

## [共同研究成果]

### 地球磁気圏赤道領域におけるモード変換過程についての計算機実験

Kalaei, Mohammad Javad<sup>1</sup>、小野高幸<sup>1</sup>、加藤雄人<sup>1</sup>、熊本篤志<sup>2</sup>

1: 東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻

2: 東北大学大学院 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

地球磁気圏観測衛星あけぼの (EXOS-D) により、磁気圏の赤道領域を起源として電磁波モードのプラズマ波動が励起・放射されている様相が明らかとなっている。この波動はその特性から、プラズマ圏の境界・プラズマポーズ近傍でのモード変換過程により放射されると考えられている。本研究では、モード変換過程を取り扱う 2 次元の電子流体コードを用いて、観測結果から同定した初期条件の下で計算機実験を実施、あけぼの衛星により観測された波動の生成過程がモード変換過程により説明できることを定量的に示した。

#### 1. はじめに

電磁プラズマ不安定は、宇宙プラズマ中でのプラズマ波動—粒子間のエネルギー交換の素過程であり、定量的な議論においては計算機実験が大きな役割を果たしている。地球周辺の宇宙空間においても様々な電磁プラズマ不安定が生起しており、エネルギー交換過程の結果は、プラズマ粒子の加速や、大振幅のプラズマ波動の励起として、科学衛星による観測結果に現れる。典型例の一つが、地球磁気圏の赤道領域で観測される、モード変換過程による電磁波モードプラズマ波動の励起現象である。

地球磁気圏観測衛星あけぼの (EXOS-D) [1] は 1989 年に打ち上げられ、近地点 275km・遠地点 10,500km の長楕円軌道で、軌道傾斜角 75 度の準極軌道で地球内部磁気圏のプラズマ環境を観測している。あけぼの衛星による観測から、地球磁気圏赤道領域において電磁波モードのプラズマ波動が励起・放射されている様相が明らかとなっている。この波動は波動電磁場ベクトルが背景磁場に対して左回りに回転する L-0 モード (Left-hand polarized Ordinary mode) の波動であり、発生源については、高密度の冷たいプラズマが地球を取り巻くように分布する領域・プラズマ圏の外側境界 (プラズマポーズ) 近傍であることが明らかとなっている。プラズマポーズでは、波動の伝播媒質である冷たいプラズマの数密度が急激に減少することから、波動の励起機構としては、プラズマ密度の空間勾配が存在する領域で生起するモード変換過程によるものであると考えられている。

モード変換過程とは、伝播媒質となるプラズマの空間的非一様性によりプラズマ波動の特性が大きく変化する過程であり、Oya [2] によって、熱的プラズマとの相互作用により発生した静電的プラズマ波動が、伝播の過程で高域混成共鳴周波数に繋がるブランチ (Upper-Hybrid モード) から L-0 モードの電磁波へと変換されていくことが示されている。モード変換過程による Upper-Hybrid モードから L-0 モードへの変換過程の模式図を図 1 に示す。モード変換過程は、宇宙プラズマ中での電磁波モードプラズマ波動の励起過程の一つとして研究が進められており、地球の他にも木星などの惑星磁気圏における電磁波放射機構について適用した例が報告されている [3]。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、波動エネルギーの変換効率等が議論されてきた。特に近年、磁気嵐など地球磁気圏・プラズマ圏の大規模変動時に、高効率なモード変換により生成されたと考えられる電磁波モードプラズマ波動の強い放射が観測されている。このような大規模擾乱時には、プラズマポーズ近傍に急峻な密度勾配が存在していると考えられるが、従来の理論ではこのような環境下での変換過程を議論することは難しく、観測結果の理解には計算機実験による定量的な評価が必要とされる。

このような背景の下、本研究では、モード変換過程を取り扱う 2 次元の電子流体シミュレーションコードを用いて、あけぼの衛星による観測結果から同定した初期条件・プラズマパラメータの下で計算機実験を実施した。計算機実験により再現された L-0 モードのプラズマ波動の解析結

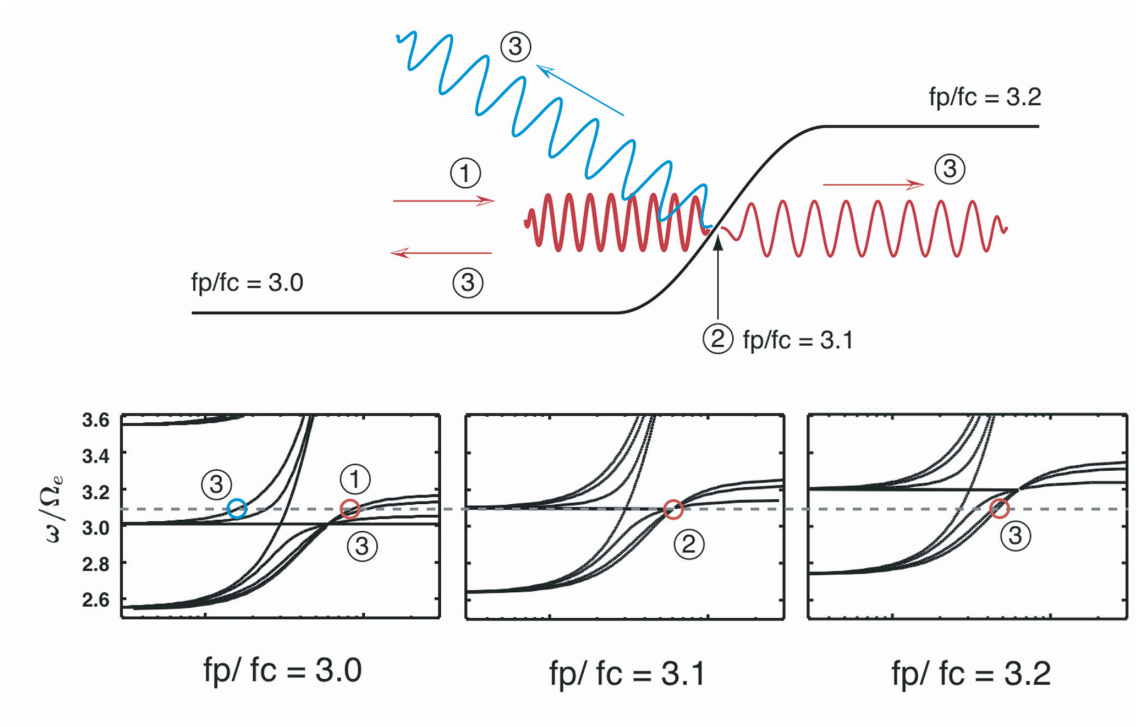


図1 モード変換過程による Upper-Hybrid モードから L-0 モードへの変換過程の模式図[4]。下段の3枚の図は、各領域でのプラズマ波動の波数と周波数の関係を示す ( $\omega$ - $k$  ダイアグラム)。伝播の過程で波動の周波数は同一で、波長が変わることでモードの変換が生じる。例として、 $f_c$  の 3.1 倍の周波数を持つ波動が  $f_p/f_c$  が 3.0 から 3.2 に変化する領域を伝播する場合を考える。この図は①Upper-Hybrid モード ( $\omega$ - $k$  ダイアグラム中の赤丸) の波動がプラズマ密度の濃い領域に向かって伝播し、②波動の周波数とプラズマ周波数  $f_p$  が非常に近くなる領域に到達すると、③波動のエネルギーが反射波 (Upper-Hybrid モードと L-0 モード;  $\omega$ - $k$  ダイアグラム中の青丸) と透過波 ( $f_p/f_c=3.2$  の領域を伝播する Z モード) とに分配される様相を示す。

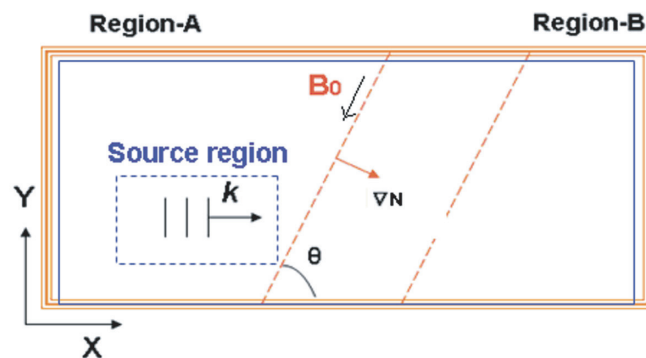


図2 シミュレーション空間の模式図

果から、あけぼの衛星により観測された L-0 モードの波動が、モード変換過程により生成された波動であることを定量的に示した。本稿ではシミュレーションモデルの概要と、得られた成果について述べる。

## 2. シミュレーションモデルの概要

分散性媒質であるプラズマ中での波動伝播を解くためには、波動電磁場の時間・空間変動に対するプラズマの応答を、運動方程式により同時に解き進める必要がある。本研究で用いるシミュレーションコードでは背景の冷たいプラズマを流体として取り扱い、電子流体の運動方程式及び連続の式、並びにマクスウェル方程式を基礎方程式とする[4-6]。シミュレーション空間中にプラズマ密度の空間勾配を設定し、プラズマ波動のモード変換プロセスを含めた伝播の様相を解き進める。シミュレーション空間は X-Y 平面上の 2 次元とし、平面上に背景磁場をとる。図 2 に示されるように、プラズマの数密度が異なる領域 A と B を設定して、その境界を繋ぐように密度勾配領域を設定する。本シミュレーションでは背景磁場強度がシミュレーション空間内で一様としており、プラズマ波動の分散を決定するパラメータである  $f_p/f_c$  (プラズマ周波数  $f_p$  とサイクロトロン周波数  $f_c$  の比) の空間変化は、シミュレーション空間中各点での電子の数密度のみに依存して変化する。なお、対象とする時間スケールに比べてイオンの運動の時間スケールは十分長いので、イオンの運動は無視し、電子の初期空間分布と同じ数密度で分布しているとする。

本研究課題では本コードを利用して、これまでに変換効率のパラメータ依存性に関する定量評価を実施しており、密度勾配の空間スケールが波動の波長スケール程度となる場合に高い変換効率を示すことなどの成果を得ている[5]。また、地球磁気圏プラズマポーズ近傍での直接観測結果に基づいて初期条件を設定、計算機実験を実施する試みも行っている。ここでは特に、顕著なモード変換過程が観測されたイベントを取り上げ、議論する。

## 3. シミュレーション結果と観測との比較

図 3 に、あけぼの衛星搭載のプラズマ波動計測器 PWS [7] による、プラズマポーズ近傍でのモード変換過程による L-0 モード発生の様相をとらえた波動観測結果の一例と、観測結果に基づく初期条件下での計算機実験の結果を示す。まず観測された波動スペクトルの解析から、高域混成共鳴周波数 ( $f_p$  と  $f_c$  の自乗和の平方根で与えられる) を読み取り、その場の磁場強度の値を用いることで、その場のプラズマ密度を計算することができる。その結果から、発生領域でのプラズマ密度勾配の存在と、その空間スケールを定量的に同定する。この密度勾配を初期条件として計算機実験を実施、観測結果と比較することにより、変換効率の定量的な評価と、発生過程の詳細な物理過程を議論した。図 3 にその結果を示す。この計算機実験では、Region-A 及び Region-B での  $f_p/f_c$  の値をそれぞれ 2.029、2.73 とした。計算機実験の初期段階で、Region-A 内に Upper-Hybrid モードの波動を注入、Region-B との境界で生じるモード変換過程を再現する。注入する Upper-Hybrid モードの波動の周波数および波面法線ベクトルについては、あけぼの衛星により観測された Upper-Hybrid モードの波動の電場各成分を、理論的に求められるプラズマ波動の分散関係と比較することで決定した。

シミュレーション結果では、注入した Upper-Hybrid モードの波動が伝播し、密度勾配領域において L-0 モード波動に変換される様相が再現されている。波動のモードの決定は、それぞれの波動の波動特性や波数スペクトルを解析することで同定している。計算機実験により再現された L-0 モード波動の電場各成分を解析すると、あけぼの衛星で観測されている L-0 モードの波動の値と一致することが示された。

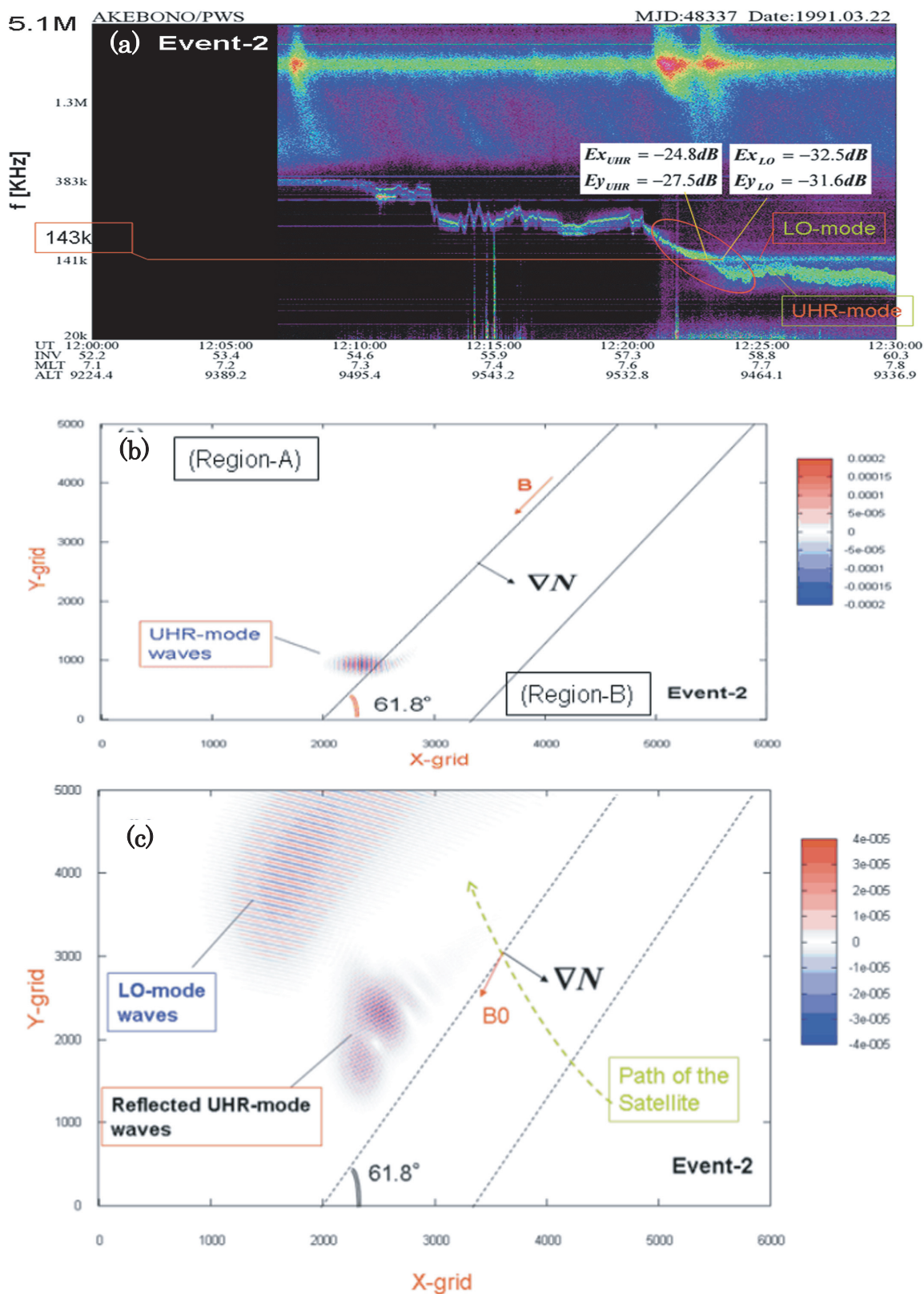


図3 (a) あけぼの衛星によるプラズマポーズ近傍での波動観測結果。  
 (b, c) 観測結果に基づいてプラズマ密度の空間勾配を設定したシミュレーション結果。印加した Upper-Hybrid モードの波動がシミュレーション空間中を伝播、密度勾配の存在する領域でのモード変換により、L-O モードの波動が生成される [5]。

		Comparison with dispersion relation				Amplitude comparison			
		Wave normal angle ( $\theta^\circ$ ) in Region-A							
		$(E_x/E_y)_{Dis.}$	$(E_x/E_y)_{Obs.}$	$(E_x/E_y)_{Sim.}$	$(E_x Lo/E_x UHR)_{Obs.}$	$(E_x Lo/E_x UHR)_{Sim.}$	$(E_y Lo/E_y UHR)_{Obs.}$	$(E_y Lo/E_y UHR)_{Sim.}$	
Event-1	UHR	55	0.65	0.63	0.64	0.60	0.62	0.36	0.38
	LO	5.5	1.036	1.035	1.034				
Event-2	UHR	61.8	1.36	1.36	1.37	0.42	0.41	0.62	0.61
	LO	7.2	0.9	0.9	0.89				
Event-3	UHR	71	1.63	1.62	1.64	0.82	0.83	0.69	0.67
	LO	10	1.91	1.9	1.92				

表1: シミュレーション結果のサマリー。図3はEvent-2にあたる。(左)各イベントでのUpper-HybridモードおよびL-0モード波動の波面法線ベクトルの方向ならびに波動振幅についての解析結果(添字 Obs.)と、シミュレーション結果(添字 Sim.)との比較。(右)Upper-HybridモードとL-0モード波動の波動振幅に関する、シミュレーション結果と観測結果との比較。いずれの結果でも観測結果にほぼ一致した値となっている。

#### 4. まとめ

本研究課題では、地球磁気圏のプラズマポーズ近傍において生じるモード変換過程について、空間2次元の電子流体コードを用いた計算機実験を実施、Upper-Hybridモードの波動からL-0モードの波動への変換過程の効率に関する定量的な評価を行った。あけぼの衛星による観測結果を用いて、実際のプラズマポーズにおけるプラズマ密度の空間勾配を求め、それを初期値として実施した計算機実験結果との比較から、観測されたL-0モードの波動がモード変換過程により発生したものであることを定量的に示した。これまでに図3と同様の解析を、あけぼの衛星によるプラズマポーズ周辺で観測された2例のイベントに関して実施し、いずれの例でも観測結果を十分説明し得るシミュレーション結果が得られている。計算結果のサマリーを表1に示す。各イベントでの変換効率および生成したL-0モードの波動の伝播角に関する考察と共に学術論文として報告している[6]。本研究の結果からは、プラズマポーズ近傍でのプラズマ密度の空間勾配が、プラズマ波動の波長スケール程度である場合には、モード変換の効率が非常に高くなることが示されている[5]。この結果は、地球を含む惑星からのモード変換による電磁波放射メカニズムの理解には、放射源近傍での詳細なプラズマ観測の必要性を指摘するものである[8]。地球内部磁気圏に関しては、2014年度の打ち上げを目指すERG衛星計画の準備が進められている。また、2020年代の実現を目指した木星磁気圏探査計画も検討されている。これらの探査計画による惑星内部磁気圏のプラズマ環境の詳細観測結果と、本研究による計算機実験結果との比較から、モード変換過程による惑星電波放射メカニズムの本質的な理解が進むと期待される。

#### 謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターとの平成22年度共同研究課題「惑星磁気圏における電磁プラズマ不安定についての計算機実験」による成果であり、スーパーコンピュータを利用することで実現できた課題である。開発されたシミュレーションコードについては、同センターとの共同研究を通じて有益な助言と多大な協力をいただき、演算性能の向上において大きな効果を得ることができた。

**参考文献**

- [1] Oya, H. and K. Tsuruda, "Introduction to the Akebono (EXOS-D) satellite observations", *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 367-370, 1990.
- [2] Oya, H., "Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths", *Radio Sci.*, **22**, 1131-1141, 1971.
- [3] 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.
- [4] 加藤雄人, 小野高幸, 飯島雅英, 「不均質媒質中でのプラズマ波動の伝播についての計算機実験」, *SENAC*, **37**(1), 13-19, 2004.
- [5] Kalae, M. J., T. Ono, Y. Katoh, M. Iizima, and Y. Nishimura, "Simulation of mode conversion process from UHR-mode wave to LO-mode wave in an inhomogeneous plasma with different wave normal angles", *Earth Planets Space*, **61**, 1243-1254, 2009.
- [6] Kalae, M. J., Y. Katoh, A. Kumamoto, T. Ono, and Y. Nishimura, "Simulation of mode conversion process from upper-hybrid waves to LO-mode waves in the vicinity of the plasmopause", *Ann. Geophys.*, **28**, 1289-1297, 2010.
- [7] Oya, H., A. Morioka, K. Kobayashi, M. Iizima, T. Ono, H. Miyaoka, T. Okada, and T. Obara, "Plasma wave observation and stimulation experiments (PWS) using Akebono (EXOS-D) satellite – Instrumentation and initial results including discovery of the high altitude equatorial plasma turbulence", *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 411-442, 1990.
- [8] Kalae, M. J., Study of the Mode Conversion Process of the Planetary Radio Emissions from Inner Magnetosphere, Ph. D. thesis, Tohoku Univ., 2009.