

宇宙プラズマ静電孤立波からの  
電磁放射過程の研究

(研究課題番号：13440143)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金  
(基盤研究(B)(2))  
研究成果報告書

平成16年3月

研究代表者 大村 善治  
(京都大学宙空電波科学研究センター 教授)

宇宙プラズマ静電孤立波からの  
電磁放射過程の研究

(研究課題番号：13440143)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金  
(基盤研究(B)(2))  
研究成果報告書

平成16年3月

研究代表者 大村 善治  
(京都大学宙空電波科学研究センター 教授)

## はしがき

日本の GEOTAIL 衛星によって静電孤立波が発見されてから約 10 年が経過した。その間、WIND、POLAR, CLUSTER 等の衛星によって同様の静電孤立波が磁気圏の様々な領域で観測されており、静電孤立波に関する理論・シミュレーションの研究が盛んに行われるようになった。当初は 1 次元的なモデルを主体として研究が進められたが、衛星観測においても 2 次元、3 次元的な構造を示唆する波形が報告されており、計算機シミュレーションにおいては、2 次元、3 次元のモデルを用いて静電孤立波の研究が進められている。静電孤立波に関する研究は、宇宙プラズマ中にはプラズマ波動の線形理論や準線形理論では記述できない素過程が存在していることを如実に示すと同時に、計算機シミュレーションによる非線形過程の解析の有効性を実証したのものとして大きな意義をもっている。

本研究では、衛星データ解析と理論解析を手がかりとして、粒子モデルの計算機シミュレーションを行い、宇宙プラズマ中の電子ビーム不安定性の非線形発展を追跡した。磁気圏構造のマクロな変動に伴う誘導電場等によって加速された電子ビームがプラズマ波動不安定性を引き起こし、それにより励起された大振幅静電波が電磁波動の成分を伴いつつ相互に合体を繰り返して静電孤立波が生成されてゆくミクロな非線形過程について新たな知見を得ることができた。

本研究の背景には、GEOTAIL 衛星で波形およびプラズマ粒子の速度分布関数を直接観測することを可能にした電子技術の進歩と、本研究の計算機シミュレーションを実行した先端電波科学計算機実験装置において一億個以上のプラズマ超粒子の運動を同時に追跡するというような大規模科学計算を可能にした計算機ハードウェアの技術革新がある。GEOTAIL 衛星の開発と運用、電波科学計算機実験装置の導入・運用に協力して頂いた方々に感謝の意を表したい。

研究代表者 京都大学宙空電波科学研究センター  
大村善治

## 研究組織

研究代表者：大村 善治	京都大学・宙空電波科学研究センター・教授
研究分担者：臼井 英之	京都大学・宙空電波科学研究センター・助教授
研究分担者：小嶋 浩嗣	京都大学・宙空電波科学研究センター・助教授
研究分担者：松本 紘	京都大学・宙空電波科学研究センター・教授
研究分担者：向井 利典	宇宙科学研究所・太陽系プラズマ研究系・教授

研究経費：基盤研究(B)(2) 宇宙プラズマ静電孤立波からの電磁放射過程の研究

平成 13 年度	7,100 千円
平成 14 年度	3,300 千円
平成 15 年度	3,600 千円
計	14,000 千円

## 研究の目的

本研究の目的は、最近の衛星観測で頻繁に観測されている宇宙プラズマ中の静電孤立波の 2 次元あるいは 3 次元的構造を明らかにし、そのコーヒーレントなポテンシャル構造からの電磁放射過程を明らかにすることである。これまでの研究により、磁気リコネクションや衝撃波による加速により、電子ビームやイオンビームが形成され、背景プラズマとの強いビーム不安定性により、静電ポテンシャルが形成され高エネルギー粒子を捕捉して、それが相互に結合して孤立化したポテンシャル構造に発達することが分かっている。この孤立化したポテンシャル構造は 3 次元空間的に局在した構造をもち、密度および電流の変調を受けているため電磁波を放射することができる。この電磁放射過程は従来の連続的な波からの二次放射の機構とは全く異なる新しい物理過程であり、その特性を理解することにより、プラズマ波動から磁気圏構造を推定する際の手掛かりとすることが出来る。

## 実施研究の概要

### 平成13年度

開放系境界のモデルで2次元電磁粒子コードによる計算機シミュレーションを実行した。境界での電磁波の反射を少ない減衰領域で抑制する新しい数値計算法を考案した。これを組み込んで、電磁粒子シミュレーションを実行し、電子ビーム不安定性の非線形発展の結果、静電孤立波が形成されると同時に、斜め伝播の低周波電磁波が励起されることを明らかにした。この開放系のシミュレーションにおいては、電子ビームを境界から連続的に注入しており、その電子ビームと背景プラズマとが相互作用して静電波が励起される。電子ビームの先頭では、次元的な静電孤立波が形成されるが、電子ビームの注入点付近では、斜め伝播電磁波とのカップリングの結果、2次元的なポテンシャル構造へと変化してゆく。この2次元ポテンシャル構造の安定性と、そこからの電磁放射について、現在、詳細な解析を続けている。一方、ビームの先頭で形成される1次元のポテンシャル構造は相互に合体を繰り返してゆくが、この1次元構造の安定性について、理論的な解析をおこない、静電孤立波を蓄えられている静電エネルギーと運動エネルギーの比率について新たな知見を得た。また、本年度は、粒子コードにおける熱雑音の効果を排除するために、1次元のブラゾフ・コードを開発に着手した。また、粒子コードの並列化に関する技術開発として、京都大学宙空電波科学研究センターの先端電波科学実験装置に導入されているHPF (High Performance Fortran) を使って並列計算をする試験を行った。既存の1次元電磁粒子コードに数行の指示文を挿入することにより、並列計算が実行できることを確認し、MPI(Message Passing Interface)を用いた並列コードとの比較検討をおこなった。この計算機シミュレーションに関する作業と並行して、過去8年余りのGEOTIAL衛星観測データのうち静電孤立波を含む波動データと粒子データを抽出して統計的解析を行い、静電孤立波の磁気圏における空間分布を明らかにした。

### 平成14年度

宇宙プラズマからの静電孤立波は、最近の衛星観測においても磁気圏の色々な領域で観測されており、宇宙プラズマ中の基本的な非線形物理過程として、学会において注目を集めている。この静電孤立波の生成過程において、2つの独立した1次元的な孤立波が互いに引き合うことを理論的に解明した。開放系境界を具備した電磁粒子コードを使って、電子ビームを境界から連続的に注入し、電子ビームの注入点付近で形成される1次元ポテンシャル構造が同時に励起される低域混成波によって変調を受けて2次元的なポテンシャル構造へと変化する過程を明らかにした。さらにこの2次元ポテンシャル構造が外部磁場に垂直な電場成分をもっているために $E \times B$ ドリフトして、電流構造を形成し、電磁的な孤立波を放射することが明らかになってきた。しかし、この微少な電磁放射を粒子コードで精度良く解くには、粒子特有の熱雑音を抑制する必要がある。このために、熱ノイズの無いブラゾフコードを開発して、そのテストとして、弱い電子ビームでラングミュア波を励起する基本的な計算機実験を行った。電子ビームによって励起されたラングミュア波にはその非線形分散により2次、3次、4次と続く高調波が存在することを確認した。これは、最近のYoon氏による非線形理論の妥当性を検証する成果として注目されている。また、これらの計算機

実験で前提となっている電子ビームについて、磁気圏の境界層の電流が変動する際に生じる誘導電場によって加速された電子が引き起こす不安定性の計算機実験を行い、その非線形応答から2次的に弱い電子ビームが生成されるモデルを提唱した。これらの成果は国際学会等において口頭発表を行うと共に、米国地球物理学会誌 (JGR) 等に発表した。

## 平成 15 年度

本研究課題では、宇宙プラズマ中における電子ビーム不安定性の非線形発展の結果生じる静電孤立波に注目して、その2次元、3次元モデルへの拡張を考え、静電孤立波からの電磁波の放射過程の物理メカニズムを解明した。静電孤立波を1次元のBGK平衡解の一つとして扱い、その静電エネルギーと運動エネルギーの比率を求め、2つのポテンシャルが合体する際のエネルギーの散逸について理論的に明らかにした。2次元、3次元モデルにおいてはBGK平衡解は存在しないので、静電エネルギーは散逸してゆく。その時間発展を詳細に調べるために、2次元電磁粒子コードを用いて、大規模な計算機実験を行った。磁力線に平行なx軸とそれに垂直なy軸から構成される2次元において、磁力線に沿って、電子ビームをx軸の左端から一定の割合で注入して波を励起し、右端には開放境界を設けて、波動と電子ビームを吸収するように設定した。この2次元モデルでは、電子ビームに近い部分において、斜め伝播の低域混成波と磁力線方向の静電孤立波とが結合して、2次元のポテンシャル構造が作られることを示した。2次元ポテンシャル構造では、磁力線に垂直な電場成分が存在するために、 $E \times B$ ドリフトを受けてz軸方向に電流構造が形成されて、電磁波が放射される過程を計算機実験で再現した。また、3次元構造の孤立静電ポテンシャルが存在できる条件について理論的に解明した。これらの一連の計算機実験で想定している電子ビームが宇宙空間で形成される過程の一つとして磁場構造が変化することによる誘導電場による加速が考えられるが、実際に磁力線沿いに誘導電波が印加される場合に電子が加速されて Buneman 不安定性が励起されて電子が拡散する中で2次的な電子ビームが形成されることを1次元モデルおよび2次元モデルの計算機実験で実証した。この Buneman 不安定性について線形成長率と計算機実験による非線形発展のパラメータ依存性を明らかにした。

## 研究発表

### 学会誌等

1. T. Umeda, Y. Omura, H. Matsumoto, An Improved Masking Method for Absorbing Boundaries in Electromagnetic Particle Simulations, *Computer Physics Communications*, vol.137, no. 2 pages 286-299, 2001.
2. Y. Omura, V. L. Krasovsky, Comments on "Electrostatic wave variety and the origin of BEN" by C. L. Grabbe, J. D. Menietti, *Planetary and Space Science*, vol. 50, pages 343-346, 2002.
3. V. L. Krasovsky, H. Matsumoto, and Y. Omura, Approximate invariant of electron motion in the field of a whistler, *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 12, 10.1029/2001GL014638, 2002.
4. T. Umeda, Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Formation of electrostatic solitary waves in space plasmas: Particle simulations with open boundary conditions, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, no. A12, doi:10.1029/2001JA000286, 2002.
5. T. Umeda, Y. Omura, P. H. Yoon, R. Gaelzer, H. Matsumoto, Harmonic Langmuir waves. III. Vlasov simulation, *Physics of Plasmas*, vol. 10, no. 2, pages 382-391, 2003.
6. Y. Omura, T. Umeda, and H. Matsumoto, Simulation of Electron Beam Instabilities and Nonlinear Potential Structures, *Space Plasma Simulation*, edited by Joerg Buechner et al., Springer- Berlag Berlin Heidelberg, pages 79-92, 2003.
7. V. L. Krasovsky, H. Matsumoto, and Y. Omura, Electrostatic solitary waves as collective charges in a magnetospheric plasma: Physical structure and properties of Vernstein-Greene-Kruskal (BGK) solitons, *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. 1117, doi:10.1029/2001JA000277, 2003.
8. Y. Omura, W. J. Heikkila, T. Umeda, K. Ninomiya, and H. Matsumoto, Particle simulation of plasma response to an applied electric field parallel to magnetic field lines, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, no. A5, 1197, doi: 10.1029/2002JA009573, 2003.
9. Umeda, T., Y. Omura, T. Tominaga, and H. Matsumoto, A new charge conservation method in electromagnetic particle-in-cell simulations, *Computer Physics Communications*, Vol.156, No.1, pp.73-85, 2003.
10. V. L. Krasovsky, H. Matsumoto, and Y. Omura, Effect of trapped particle deficit and structure of localized electrostatic perturbations of different dimensionality, *Journal of geophysical research*, in press.
11. Takayuki Umeda, Yoshiharu Omura, and Hiroshi Matsumoto, Two-dimensional particle simulation of electromagnetic field signature associated with electrostatic solitary waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, A02207, Doi:10.1029/2003ja010000, 2004.

## 口頭発表

1. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Electromagnetic Particle Simulations of Electron Beam Instabilities in a Two-dimensional Open System, AP-RASC, Chuo-Univ., Tokyo, July, 2001.
2. Omura, Y., K. Ninomiya, T. Umeda, H. Usui, and H. Matsumoto, Coherent potential structures induced by electron/ion beam instabilities in plasmas, AP-RASC 2001, Chuo University, Tokyo, July, 2001.
3. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Particle simulations of electromagnetic emissions from electrostatic solitary waves, The Sixth International School/Symposium for Space Plasma Simulations (ISSS-6), Max-Planck-Institut fuer extraterrestrische Physik Garching, Germany, 03-08 September 2001.
4. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, An improved masking method for absorbing boundaries in electromagnetic particles simulations, The Sixth International School/Symposium for Space Plasma Simulations (ISSS-6), Max-Planck-Institut fuer extraterrestrische Physik Garching, Germany, 03-08 September 2001.
5. Omura, Y., T. Umeda, and H. Matsumoto, Electron beam instabilities and nonlinear potential structures in space plasmas, The Sixth International School/Symposium for Space Plasma Simulations (ISSS-6), Max-Planck-Institut fuer extraterrestrische Physik Garching, Germany, 03-08 September 2001.
6. Usui, H., H. Matsumoto, T. Ogino, M. Fujimoto, Y. Omura, M. Okada, H. O. Ueda, T. Murata, Y. Kamide, H. Shinagawa, S. Watanabe, S. Machida, and T. Hada, Development of space simulation / net-laboratory system, The Sixth International School/Symposium for Space Plasma Simulations (ISSS-6), Max-Planck-Institut fuer extraterrestrische Physik Garching, Germany, 03-08 September 2001.
7. USUI, H.; H. Matsumoto, K. Miyake, Y. Omura, Computer experiments on electromagnetic environment of plasma sheath at conducting surface, 34th COSPAR Scientific Assembly, Houston, USA, October, 2002.
8. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Two-dimensional particle simulation of electrostatic solitary waves with an open boundary condition, 11th International Congress on Plasma Physics, Sydney, Australia, 2002.
9. Omura, Y., H. Kojima, and H. Matsumoto, Simulations, theory and Geotail observation of electrostatic solitary waves, 2002 Western Pacific Geophysics Meeting, Wellington, New Zealand, 2002.
10. Umeda, T., Y. Omura, H. Matsumoto, and H. Usui, Formation of electrostatic solitary waves: Two-dimensional particle simulation with open boundary conditions, 2002 Western Pacific Geophysics Meeting, Wellington, New Zealand, 2002.
11. Sugiyama, T., M. Fujimoto, H. Matsumoto, and Y. Omura, Particle dynamics at collisionless shock waves, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
12. Omura, Y., Electrostatic solitary waves and their implication in magnetospheric dynamics, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.

13. Umeda, T., P. H. Yoon, Y. Omura, and H. Matsumoto, Vlasov simulation of harmonic Langmuir waves, COSPAR Colloquium "Frontiers of Magnetospheric Plasma Physics" Celebrating 10 Years of GEOTAIL Operation, ISAS, Kanagawa, 2002.
14. Sugiyama, T., H. Matsumoto, and Y. Omura, Dissipation process at collisionless shocks in the electron scale, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
15. Omura, Y., W. Heikkila, T. Umeda, K. Ninomiya, and H. Matsumoto, Particle simulation of plasma response to an applied electric field parallel to magnetic field lines, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
16. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, Two-dimensional particle simulations of electromagnetic emissions from electrostatic solitary waves, URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht, Netherland, 2002.
17. Okada, M. and H. Usui, Geospace environment simulator for satellite environment analyses developed on the Earth Simulator, the 4th SPINE(spacecraft-plasma interaction network in Europe), ESTEC, Netherland, September, 2003.
18. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, Particle simulations of electrostatic solitary waves in space plasmas, 7th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS), Montana, USA, 2003.
19. Omura, Y., T. Sakakima, H. Usui, and H. Matsumoto, Computer experiments on interaction of heavy ion beam from a Large-Scale ion engine with magnetospheric plasma, Experimental study on reduction of noises generated from magnetron for microwave power transmission, Uji, Kyoto, 2003.
20. Omura, Y., H. Usui, H. Matsumoto, M. Okada, T. Ogino, I. Shinohara, M. Nakamura, M. Fujimoto, D. Cai, and M. Hoshino, Geospace environment simulator implemented on the earth simulator, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
21. Omura, Y., T. Sakakima, H. Usui, and H. Matsumoto, Computer experiments on interaction of heavy ion beam from a large-scale ion engine with magnetospheric plasma, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
22. Ninomiya, K., Y. Omura, and H. Matsumoto, Simulation study on generation mechanism of electron/ion holes in space plasmas, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
23. Sugiyama, T., M. Fujimoto, Y. Omura, and H. Matsumoto, Electron heating processes at quasi-perpendicular shocks, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
24. Omura, Y., M. Matsunaga, T. Umeda, W. J. Heikkila, and H. Matsumoto, Particle simulation of plasma response to induction electric field in the magnetosphere, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
25. Umeda, T., Y. Omura, and H. Matsumoto, Particle simulations of electromagnetic emissions from electrostatic solitary waves, IUGG 2003, Sapporo, 2003.
26. 大村 善治, 二宮 啓輔, 梅田 隆行, 臼井 英之, 松本 紘, プラズマ中の電子・イオンビーム不安定性によって生成されるポテンシャル構造, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
27. 梅田 隆行, 大村 善治, 臼井 英之, 松本 紘, 静電孤立波からの電磁波放射に関する二次元計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2001.
28. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 臼井 英之, 静電孤立波からの電磁波放射に関する

- 計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学, 2001.
29. 臼井 英之, 松本 紘, 大村 善治, 宇宙シミュレーション・ネットラボラトリーの現状報告, 極域科学データライブラリと大規模シミュレーションによる極域科学のモデリングに関する研究小集会, 国立極地研究所, 2001
  30. 梅田 隆行, Peter H. Yoon, 大村 善治, 松本 紘, ブラゾフコードによるラングミュア高調波の計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  31. 杉山 徹, 松本 紘, 大村 善治, 衝撃波での粒子加熱現象, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  32. 榊間 俊洋, 大村 善治, 磁気圏プラズマと局所的に注入された重イオンビームとの相互作用に関するハイブリッドシミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  33. 大村 善治, SCOPE計画の目指すサイエンスII -プラズマ波動観測の意義-, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 電気通信大学, 2002.
  34. 二宮 啓輔, 大村 善治, 梅田 隆行, 松本 紘, 宇宙プラズマ中での電子・イオンホール形成に関する計算機実験, 地球惑星科学関連学会2002年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
  35. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 臼井 英之, 二次元開放系プラズマにおける静電孤立波の形成過程, 地球惑星科学関連学会2002年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
  36. 大村 善治, 小嶋 浩嗣, 松本 紘, 水星ミッション・プラズマ波動班, 水星磁気圏におけるプラズマ波動観測の意義, 地球惑星科学関連学会2002年合同大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2002.
  37. 大村 善治, 松永 政孝, 梅田 隆行, Walter J. Heikkila, 松本 紘, 磁力線に平行な誘導電場に対する熱プラズマの応答過程, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  38. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 静電孤立波からの電磁放射に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  39. 二宮 啓輔, 大村 善治, 梅田 隆行, 松本 紘, 宇宙プラズマ中での電子・イオンホール形成に関する計算機実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  40. 杉山 徹, 大村 善治, 松本 紘, 準垂直衝撃波での孤立ポテンシャル構造の生成, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  41. 岡田 雅樹, 大村 善治, 臼井 英之, 杉山 徹, 梅田 隆行, 松本 紘, 宇宙環境シミュレータ開発班, 地球シミュレータにおけるプラズマ電磁粒子コードの開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  42. 橋本 俊治, 大村 善治, 低ノイズシミュレーションコードの開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 富山大学, 2003.
  43. 二宮 啓輔, 大村 善治, 梅田 隆行, 松本 紘, 宇宙プラズマ中での電子・イオンホール形成に関する計算機実験, 地球惑星科学関連学会2003年合同大会, 幕張メッセ国際会議場, 2003.
  44. 梅田 隆行, 大村 善治, 松本 紘, 静電孤立波からの電磁波放射に関する計算機実験, 地球惑星科学関連学会2003年合同大会, 幕張メッセ国際会議場, 2003.
  45. 杉山 徹, 松本 紘, 大村 善治, 準垂直衝撃波での電子の加熱, 地球惑星科学関連学会2003年合同大会, 幕張メッセ国際会議場, 2003.