

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740338

研究課題名(和文) プラソフモデルに基づく次世代プラズマシミュレーション技法の研究

研究課題名(英文) Development of numerical methods for Vlasov simulations of plasma

研究代表者

簗島 敬 (MINOSHIMA, Takashi)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：00514811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙プラズマの第一原理シミュレーション研究手法として提案されているプラソフシミュレーションのための新たな数値計算手法を開発した。本手法は物理量の高次モーメントを同時に解くことで、その形状を精度良く保持することができる。本手法を用いることで、プラソフシミュレーションに必要な不可欠な移流・回転問題を長時間正確に解くことが可能になった。

本手法を実空間2次元、速度空間3次元の電磁プラソフシミュレーションコードに組み込み、その性能評価を行った。線形問題のみならず、磁気リコネクションなどの非線形問題においても、分布関数を詳細に記述できるようになり、本コードが実問題に十分適用できる技術であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a Multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma. The scheme treats zeroth to second order piecewise moments of a physical profile as dependent variables to preserve its shape as much as possible. It enables us a long time calculation of linear advection and solid-body rotation problems with little numerical diffusion, which is a necessary ability for Vlasov simulations of magnetized plasma.

We applied the scheme to electromagnetic Vlasov simulations. In addition to linear problems, we succeeded in simulating nonlinear problems such as magnetic reconnection. Our code clearly described a complex structure of the plasma velocity distribution function around the reconnection region. These benchmark tests show that our scheme is a powerful technique for kinetic plasma simulations based on the Vlasov model.

研究分野：超高層物理学

キーワード：宇宙プラズマ プラソフシミュレーション 磁気リコネクション

1. 研究開始当初の背景

宇宙に普遍的に存在するプラズマ現象は極めて非線形なため、コンピュータシミュレーションを用いた研究が、その解明に重要な役割を果たしてきた。質量の異なる電子とイオンから構成される宇宙プラズマは本質的に多階層性を有しており、流体スケールから粒子スケールまでの現象が階層的に内在している。その中で、粒子スケールを記述する第一原理に最も忠実なモデルが全粒子モデルである。

全粒子モデルではプラズマ粒子の位相空間分布を厳密に扱う。このシミュレーション手法として広く用いられている手法が、Particle-In-Cell (PIC) 法である。PIC 法ではプラズマを有限個の超粒子で近似し、個々の粒子の軌跡をラグランジュ的に追跡する。本手法は比較的小規模の計算機資源でも安定に結果が出る利点があるが、プラズマ粒子を有限個の粒子で記述することに起因する統計ノイズや、超大規模並列計算における効率化などの固有の難点を抱えている。

これらの問題を解決すべく提案された手法がブラソフシミュレーションである。ブラソフシミュレーションでは位相空間上に計算グリッドを定義し、ブラソフ方程式を位相空間内で直接離散化して時間発展を追跡する。本手法はPIC法より多くの計算機資源を必要とするものの、統計ノイズは発生せず、また並列計算の効率も良いため、超大規模並列計算において有用な手法である。

2. 研究の目的

これまででも、磁場を伴わないプラズマの静電ブラソフシミュレーションは研究されてきた。しかし、磁化プラズマの電磁ブラソフシミュレーションは未だ発展途上である。磁場を考慮したブラソフシミュレーションでは、多次元速度空間における移流と剛体回転問題を長時間正確かつ安定に解く必要があり、これが極めて困難だからである。そこで本研究では、磁化プラズマの電磁ブラソフシミュレーションに適した数値計算手法を開発し、ブラソフモデルに基づいた次世代プラズマシミュレーションのための新たな技法を確立することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 移流と剛体回転問題を長時間正確に解くために、本研究では情報エントロピーの保存に注目する。プラズマの最も基本的な速度空間分布であるガウス分布の情報エントロピーを保存するためには、分布の0次から2次までのモーメントを同時に解き進めればよい。この着想に基づいて、我々はマルチモーメント移流法という数値計算手法を開発してきた。本研究ではまず、3次元マルチモ

ーメント移流法を開発する。

(2) マルチモーメント移流法はセミラグランジュ法と有限体積法を組み合わせた解法であり、コードの使い勝手や保守に難がある。そこで、マルチモーメント移流法の長所を維持しつつこれらの問題に対処するために、有限体積法のみに基づいたマルチモーメント移流法を開発する。

(3) 開発したマルチモーメント移流法を空間2次元、速度空間3次元の電磁ブラソフシミュレーションコードに組み込み、スーパーコンピュータ上での性能評価及び実問題への適用を行う。

4. 研究成果

(1) 3次元のマルチモーメント移流法では、計8種の物理量を解き進めることで、移流と剛体回転問題を長時間正確かつ安定に解くことに成功した。図1は移流回転問題のテストであり、初期条件(左)がそのまま維持されるのが正解であるが、マルチモーメント移流法(右)を用いることで、分布を長時間維持できていることがわかる。

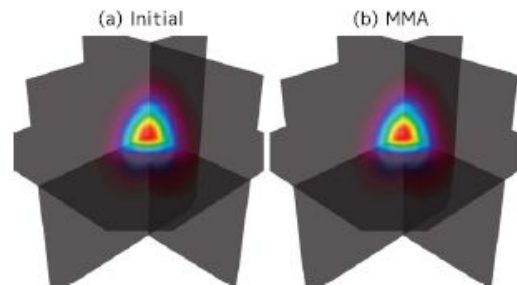


図1: ガウス分布の3次元移流回転問題。左が初期条件、右は100回転後。

本スキームを空間1次元、速度空間3次元の電磁ブラソフシミュレーションコードに組み込み、テスト計算を行った。まず磁場に垂直及び平行方向の線形波動伝播の数値計算を行い、解析解と整合的な結果を得た。引き続き、文献で行われた温度異方性によるホイッスラー波動励起のPIC法による計算を追試した。図2(左)は励起された波動の空間-時間分布である。時刻50付近で急速に発生した波動が次第に長波長モードに逆カスケードしていく様子が見取れる。周波数解析からこの波動が確かにホイッスラー波動であり、逆カスケードは先行研究と整合的である。図2(右)は磁力線平行方向及び垂直方向の温度の時間発展を示している。波動の励起に伴って温度異方性が緩和され、垂直方向と平行方向の温度比は1.2程度となっている。この飽和値も先行研究と整合的である。以上のことから、我々の電磁ブラソフシミュレーションの妥当性を確認した。

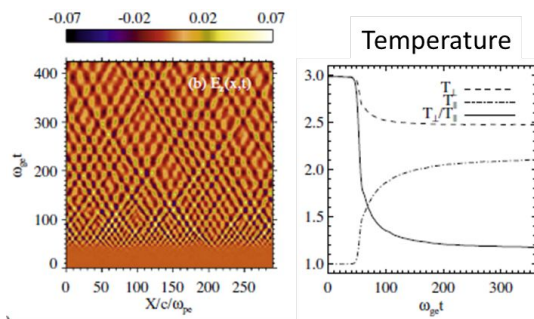


図 2: 温度異方性のブラソフシミュレーション。(左) 波動の時空間発展、(右) 温度の時空間発展

(2) 有限体積型のマルチモーメント移流法では、これまで更新していた点値は扱わず、セル内のモーメントの平均値のみを更新することとした。結果、1次元では3種、2次元では6種、3次元では10種の物理量を解き進めることにした。有限体積法を採用したことにより、多次元スキームにおいても1次元補間手法を次元毎に繰り返せば良く、これまでの手法に対してコードが大幅に簡略化された。図3は本手法を用いた3次元移流回転問題のテストであり、初期条件(左)がそのまま維持されるのが正解である。以前の手法と同様に、分布を長時間維持できていることがわかる。また、本手法は以前の手法に対してわずかに数値粘性が働き、結果としてスキームを堅固にする傾向があることがわかった。よってブラソフシミュレーションに対しては有限体積型のマルチモーメント移流法がより適していると判断した。

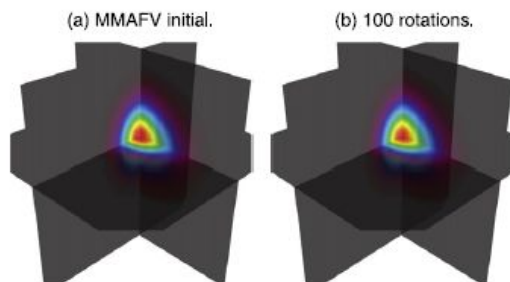


図 3: ガウス分布の3次元移流回転問題。左が初期条件、右は100回転後。

(3) 有限体積型のマルチモーメント移流法を空間2次元、速度空間3次元の電磁ブラソフシミュレーションコードに組み込む。その際、プラズマシミュレーションで必要となるマクスウェル方程式の数値解法として、従来のFDTD法に対して、より拡散的であるが安定なLax-Friedrichs法と電場のガウス則及び磁場のソレノイダル条件を満たす手法を提案した。シミュレーションコードにはMPIによる実空間領域分割とOpenMPによるスレッド分割のハイブリッド並列を施し、九州大学情報基盤研究開発センターが保有する高

性能演算サーバPRIMERGY CX400を用いて性能評価を行い、並列化率99.998%、実行性能14%と、共に良好な結果を得た。

シミュレーションのテスト問題として、まず磁場に垂直及び平行方向の線形波動伝播の数値計算を行い、解析解と整合的な結果を得た。引き続き、実問題への適用として磁気リコネクションの計算を行った。リコネクション率や諸物理量の空間分布などは先行研究と整合的であり、かつPICシミュレーションに比べて数値ノイズの無い結果を得た。さらに、磁気リコネクションの拡散領域近傍における電子速度分布関数を調べ、磁気セパトリックスに沿って拡散領域から飛び出した電子流や、電流層における磁力線垂直方向の加熱などの速度分布を確認した(図4)。これは文献の研究と整合的であり、我々のコードがマクロな物理量のみならず、ミクロな速度分布関数の詳細も記述できることが示された。電子温度を変えた計算を行い、系の進行に伴ってリコネクション電場が電子からイオンによって維持されていく様子が確認され、これは文献の予測と整合的である。以上のことから、我々が開発した電磁ブラソフシミュレーションコードが実問題に十分適用できる高精度解法であることが示された。今後は本コードを用いた磁気リコネクションの大規模シミュレーションをスーパーコンピュータ「京」で実行する予定である(平成27年度「京」若手人材育成利用課題として選定されている)。

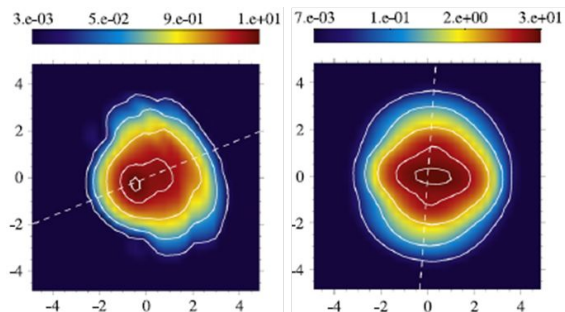


図 4: 磁気リコネクション領域近傍の電子速度分布関数。(左) 磁気セパトリックス上、(右) 電流層内部。破線は磁力線の方角を示す。

<引用文献>

Sydora R. D., K. Sauer, I. Silin (2007), Geophys. Res. Lett., 34, L22105
 Hoshino M., K. Hiraide, T. Mukai (2001), Earth Planets Space, 53, 627
 Kuznetsova, M.M., M. Hesse, D. Winske (2001), J. Geophys. Res., 106, 3799

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、”A finite volume formulation of the multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma”, Computer Physics Communications, 査読有, Vol. 187, 2015, 137-151 DOI: 10.1016/j.cpc.2014.10.023

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、”Multi-moment advection scheme in three dimension for Vlasov simulations of magnetized plasma”, Journal of Computational Physics, 査読有, Vol. 236, 2013, 81-95, DOI: 10.1016/j.jcp.2012.11.024

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、”Multi-Moment Advection Scheme for Vlasov Simulations”, ASP Conference Series, 査読有, Vol. 459, 2012, 277-281

〔学会発表〕(計5件)

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、有限体積マルチモーメント移流法を用いた電磁プラソフシミュレーション、日本地球惑星科学連合2014年大会、2014年5月2日、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、A finite volume formulation of the multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma, American Geophysical Union Fall Meeting 2013, 2013年12月9日、モスクワセンター、サンフランシスコ、アメリカ合衆国

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、有限体積マルチモーメント移流法とプラソフシミュレーション、日本地球惑星科学連合2013年大会、2013年5月24日、幕張メッセ国際会議場、千葉県千葉市

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、有限体積型マルチモーメント移流法とプラソフシミュレーション、STE シミュレーション研究会、2013年3月21日、名古屋大学、愛知県名古屋市

簗島敬、松本洋介、天野孝伸、Multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma, CCP2012, 2012年10月15日、ニチイ学館・神戸ポートアイランドセンター、兵庫県神戸市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

簗島 敬 (MINOSHIMA, Takashi)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：00514811