

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800275

研究課題名(和文)2流体プラズマを用いた次世代磁気圏シミュレーションモデルの開発

研究課題名(英文) Developments of next generation simulation model of magnetosphere with two-fluid plasma

研究代表者

深沢 圭一郎 (FUKAZAWA, Keichiro)

京都大学・学術情報メディアセンター・准教授

研究者番号：50377868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：MHDシミュレーションを拡張して、陽解法による2流体プラズマシミュレーションの開発を進めた。実行テストにおいて、非物理的振動が見られるため、方程式系を含め、見直しが必要な状況である。陽解法では光速で、計算の時間ステップが規定されてしまうため、陰解法の導入を調査したが、計算結果がなまってしまう現象を回避するためには時間ステップを短くするしかなく、陽解法と比べて計算時間的にはそれほど優位性がなかった。このように開発しているシミュレーションは計算時間がかかるため、並列計算が必須であるが、新しい通信モデルを導入することでエクサスケール環境においても高い並列計算性能を発揮できることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：To extend the MHD simulation code, the development of two-fluid plasma simulation was proceeded. The non-physical oscillations were found in the execution test then the simulation code needs to be reviewed including the equation system. In the explicit method the time step is defined by the light speed thus the introduction of implicit method was considered. However, the advantage of introduction was much small since the time step in the implicit method needs to be small to see the dynamic time evolution phenomena. To perform the calculation rapidly, the new communication model was introduced to the simulation, which achieved good performance in the massively parallel system.

研究分野：高性能計算、太陽地球系物理学

キーワード：磁気圏シミュレーション 宇宙プラズマ 並列計算

1. 研究開始当初の背景

一般に、宇宙空間に広く存在する宇宙プラズマは様々なスケールを含むマルチフィジックス環境である。この環境内に存在する磁気圏全体を正確に計算機シミュレーションで解く場合、宇宙プラズマの振る舞いを最も正確に扱えるプラソフ方程式を用いることが考えられるが、この方程式は速度空間を含み計算量が膨大になるため、未だにグローバルシミュレーションは行われていなかった。そのため、現在はプラソフ方程式のモーメントをとることで速度空間を落とした近似式であるMHD方程式を用いてグローバル磁気圏シミュレーションが行われている。また、このMHD方程式は一般に磁気圏全体というグローバルな領域を扱う場合に良く成り立つ。

これまでに、このMHDシミュレーションを用いて地球や木星、土星磁気圏を調べてきており、近年では、計算機の発展により、地球においてMHD近似限界の数倍の時空間スケールでシミュレーションが行えるようになってきている。また木星、土星磁気圏では最新の観測結果にも見られるプラズマの渦構造を再現出来ているが、その二次発展を調べることはMHDシミュレーションでは不可能という現状である。

近年、観測においては、探査機や人工衛星の観測機器の発展、更に地球であればTEMISのような地上観測との同時観測により様々な物理現象が明らかになってきている。このような中でマクロ-ミクロスケールの現象が互いに結合している事も示唆されている。例えば、磁気圏尾部における磁気リコネクション領域ではイオン、電子スケールで現象が起きており、それらがグローバルな磁気圏構造にも影響を与えている。また磁気圏-電離圏結合における電流系の構造もイオン、電子スケールの現象である。しかしながらMHD方程式を用いて磁気圏を解いている限り、電子、イオンの時空間スケールを扱うことはできない。

そのため、現状のシミュレーションモデルから一步以上進んだ次世代磁気圏グローバルシミュレーションに向け、MHD近似を緩和した、宇宙プラズマをより詳細に扱えるシミュレーションモデルが必要である。プラズマには様々なスケールがある。MHDから一つ近似を緩和すると、Hall効果を考慮したHall-MHDシミュレーションになり、電場にイオン慣性効果を加えることができる。これは現在すでにいくつかの国外グループによりグローバル磁気圏シミュレーションモデルに導入されている。更に近似を緩めると電子とイオンからなる2流体プラズマシミュレーションになり、イオンサイクロトロン周波数よりも時間スケールが速い現象を表すことができる。2流体プラズマシミュレーションでは磁気リコネクション領域など局所的な領域では計算可能であるため、いくつか

の研究行われているが、グローバルでは計算時間の問題から未だ行われていない。

2. 研究の目的

本研究の目的はグローバル磁気圏を解くことができる2流体プラズマシミュレーションモデルを開発することである。そのためにまず、現在利用しているMHDシミュレーションコードを拡張し、2流体方程式とMaxwell方程式で記述される陽解法コードを開発する。これを用いて、線形波動や非線形波動のシミュレーションを行い理論と比較することでコードの動作を検証する。挙動に問題が無ければ、今後開発する陰解法コードとの比較用データを作成する。この拡張されたモデルは、非常に計算時間がかかると想定されるが、実際に開発したモデルで短時間発展シミュレーションを行うことで、実時間でどの程度計算時間がかかり、どの程度の構造を扱えるかを明らかにする。

簡単な見積をおこなうと、2流体プラズマシミュレーションでは現在の1万倍以上の計算資源が無ければ、グローバル磁気圏の長時間発展を現実的な時間で計算できない。そこで、計算時間を短縮することを目的に陰解法による2流体プラズマシミュレーションを開発する。陰解法では時間ステップをシミュレーション内の最大速度に依らず決められることができるため、計算時間の短縮が期待できる。

2流体プラズマの陰解法は今までにだれも開発していない手法のため、試行錯誤が想定される。そのため、近年の数値流体力学分野で研究開発されている陰解法の手法を2流体プラズマシミュレーションに適用し、精度良く計算が行えるかを明らかにする。その後、グローバル磁気圏を解くために、陰解法1次元モデルを拡張し、3次元2流体プラズマシミュレーションを開発する。

その結果を陽解法の計算結果と比べ、プラズマ現象の再現性、計算速度の問題などを総合的に比較することで、開発したモデルの優位点だけでなく、問題点も明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では研究開発項目を次の4つの項目に分けて、次世代グローバル磁気圏シミュレーションのための、2流体プラズマシミュレーションモデルを開発することを目指した。

現在のMHDシミュレーションコードを活用し、2流体プラズマシミュレーションコードに拡張する。陰解法の手法を詳細に調査し、それを元に陰解法による2流体プラズマシミュレーションコードを1次元から開発し、3次元に拡張する。

陽解法は計算時間がかかるが、今まで実際に計算に利用してきたため、その性質について理解している。陰解法は計算時間短縮を狙って開発するコードであり、時間方向に精度が落ちる可能性がある。そのため本研究では、陰解法による2流体プラズマシミュレーション

ンの特徴を理解することで、2 流体プラズマシミュレーションコードへの陰解法の適用を考える。

前述の4つの項目の一つ目である陽解法による2流体プラズマシミュレーションモデルの開発は下記の流れで行う。まず、現在研究に利用しているMHDシミュレーションにおいて、利用している計算手法を応用し、陽解法による2流体プラズマシミュレーションモデルを開発する。MHD方程式はプラソフ方程式から求まる2流体方程式の電子流体とイオン流体を同じ流体と近似することで求まる。そのため2流体プラズマの方程式系はMHD方程式と構造が似ており、陽解法による2流体プラズマシミュレーションを開発する場合、現在研究に利用しているMHDシミュレーションコードも陽解法であるため、活用できることが想定される。このコードでは時間ステップが光速で決まっており長時間発展の計算することはかなりの計算機資源が必要である。

上記の流れで開発したコードを利用して、線形波動や非線形波動のシミュレーションを行って理論と比較することにより、コードの動作を検証する。更に、続けて開発する陰解法コードとの結果比較用に長時間の計算を行い、データを作成する。

このモデルは計算時間が非常にかかることと想定されるため、まず初めに開発を行い、計算を行っておくことで今後の比較用データを蓄積できる。また、計算に時間がかかることから、スーパーコンピュータを利用し、計算を早く実行できるようにする。

次に、陰解法の調査を行う。陰解法は2流体プラズマシミュレーションでは利用されていない。しかしながらMHDシミュレーションやHall-MHDシミュレーションに適用された例があるため、それらの知見を理解し、2流体プラズマシミュレーションモデル開発において想定される問題点を事前に見つけ出す。また開発予定のコードがうまく動作しない場合に備えて、時間方向並列化についても精査する。

その結果を元に、陰解法による2流体プラズマシミュレーションモデルの開発を開始する。陽解法を用いた2流体プラズマシミュレーションでは、計算時間の多さから現実的にはグローバル磁気圏構造を計算できないことが見積られるため、陰解法による2流体プラズマシミュレーションの開発を始める。

陰解法は差分方程式において時刻 $t+1$ の未知数を2つ以上含む手法(陽解法は $t+1$ が一つのみ)であり、計算を行うには連立方程式を解く必要がある。そのため、時刻 t の値の変化が時刻 $t+1$ の全ての点の解に影響を及ぼし、数値的な情報の伝播速度は無制限大という特徴がある。これにより計算の安定性にシミュレーション内の速度が影響せず、時間ステップを大きく取る事が出来るが、計算量が

増えるため計算時間がかかる。しかしながら、光の速度で決まる時間ステップを用いるより早く計算が行えると考えられる。また古典的な陰解法では陽解法時に行っていた領域分割による並列計算が不可能なため、並列化に対応した陰解法を導入しなければならない。そこで近年開発され、実績を上げているJFNK (Jacobian-Free Newton Krylov) 法を導入する。この手法ではNewton Krylov法という反復法において毎ステップ計算が必要であったヤコビアンをテラー展開で置き換えた手法であり、計算時間も抑えられ、並列化も可能である。

2次元計算ではあるが、このJFNK法に様々な工夫を加えて収束時間を短くし、MHD、Hall-MHDシミュレーションに組み込んでいる事例がある。これらの事例では、解く必要がある連立一次方程式に対して前処理を行い、収束時間を早めており、式の構造からも2流体プラズマシミュレーションにも効果的だと考えられ、これらを組み込むことを考える。実際に、この前処理手続きを組み込む開発を行い、計算結果に問題があった場合は、別の手法の導入を検討する。想定しているものは、収束に伴い変化するデータを記憶しておき、それを収束計算に利用して収束時間を短縮する手法である。さらに問題がある場合、空間方向の並列化を考えなければ、一般のKrylov法が利用でき、確立された手法が利用できる。そのため、時間方向の並列化の導入を考える。ただし、この手法は空間並列よりも計算効率が悪いという課題がある。コードが完成後、シミュレーションを行い陽解法と計算結果を比べることで、計算結果の正しさ、陰解法によって計算を行った場合の特徴などを精査する。

上記の陰解法が完成後、グローバル磁気圏用に3次元陰解法を開発する。MHDシミュレーションにおいても3次元陰解法が実装された例は二つしかない(Toth et al., 2006, Chacon, 2008)。Chaconの結果から1次元で導入した前処理手続きは3次元においてもスムーズに拡張でき、基本的に差分法であるため、多次元拡張時に特別な問題は起こりにくい。しかしながら、うまく計算が行えない場合、プラズマでは無く、基本的な式構造は同じ一般の中性流体において嶋ら(2010)が提案している全速度スキームと前処理付陰解法を適用し、非物理的の数値振動を抑制する。

3次元に拡張後、その結果を開発した陽解法の結果と比べ、磁気圏現象の再現性、計算速度の問題などを総合的に比較する。陰解法での計算結果が陽解法と比べて正確に解けていない現象も考えられるため、その適用範囲を把握する。

この計算は繰り返しになるが、非常に時間がかかることが予想される。そのためにスーパーコンピュータを利用するが、その性能を最大限に利用するには、並列数を増やしていくことが必要である。そのため、最終的には並

列化を行い、エクサスケールコンピュータを利用時に現実的な時間で計算が行えるように準備をする。エクサスケールでは100万計算ノードになり、1000万プロセスに達する可能性が高い。このような環境において、並列計算の性能を維持することは非常に難しい。そのため、並列計算性能が劣化しないような並列化の実装を行う。

4. 研究成果

まず、始めに陽解法による2流体プラズマシミュレーションモデルの開発を開始した。現在研究で利用しているMHDシミュレーションは、プラソフ方程式から求まる2流体方程式の電子流体とイオン流体を同じ流体と近似することで求まるMHD方程式を解いている。そのため2流体プラズマの方程式系はMHD方程式と構造が似ており、陽解法による2流体プラズマシミュレーションを開発する場合、陽解法MHDシミュレーションコードが活用できる。現在研究で利用しているMHDシミュレーションを拡張して、2流体シミュレーションモデルの開発を進めた。開発した2流体プラズマシミュレーションコードを利用し、簡単な実行テストにおいて、非物理的振動が見られるため、方程式系を含め、見直しが必要となった。

また、陽解法では光の速さで、計算の時間ステップが規定されてしまうため、現実的にはシミュレーション時間を進めることが難しい。そこで、陰解法を導入することにより時間発展を早く計算できないか調査した。3次元2流体プラズマシミュレーションでは陰解法がまだ利用されていないが、MHDシミュレーションやHall-MHDシミュレーションに適用された例があり、その調査を行った。その結果、数式的には問題が無いようだが、定常状態では無く、非定常状態を見る場合には、過渡的な現象が時間積分時になまる恐れがあると分かった。そのため、陰解法を導入する場合、時間ステップの取り扱いに注意する必要がある。

更に陰解法について調査を行った結果、前述の時間変化が大きい問題に対して、計算結果がなまってしまいうまうま回避するためには結局時間ステップを短くするか、変動成分をうまく残すような計算を加える必要があった。この結果、陽解法とそれほど計算時間が変わらないこともわかった。このように、見たい現象(イオン-電子の挙動の違い)をグローバルに計算するためには、陰解法で解く場合にであっても時間分解能を上げる必要があり、陽解法と比べて計算時間的にはそれほどアドバンテージがあるものではなく、むしろ現象がなまる傾向がある分、最適な手法ではないと言う結論に至った。

引き続き、陽解法による2流体プラズマシミュレーションモデルの開発を進めたが、2流体プラズマシミュレーションは現在研究で利用しているMHDシミュレーションに比

べ、扱う物理変数が多く、また時間を進める時間ステップが短いためシミュレーションを実行すると、計算量が多く計算時間がかかる。そのため開発中のシミュレーションコードを評価するために計算機で走らせる場合には、並列計算機を多く使う必要がある。その際、上記のMHDシミュレーションと比べた性質の違い(データ量、時間ステップ)から、通信時間が大きくなり、並列計算での実効速度劣化が非常に大きくなっていった。この問題に対処するために、新しく計算と並列計算に伴う通信の最適化を行った。今までは、MHDシミュレーションで用いていた通信順序性があることで、通信をまとめておこなえる通信モデルだったが、本研究ではその通信を細分化することで、その順序性を無くし、通信とそれに伴うデータパック・アンパック処理をオーバーラップさせることが可能となり、並列計算における計算速度劣化を抑えることに成功した。

さらに並列計算性能を向上させるために、通信スレッドを用いて通信時間自体を隠蔽できる手法の作成を始めた。しかしながら、通信スレッドを用いた通史時間隠蔽手法は、通信時間の隠蔽という点では利点があるが、計算に割り当てるスレッドが減るため、計算自体の性能が下がる可能性があった。このため、通信スレッドの概念を進化させ、通信とその結果が必要な計算を行うスレッドHaloスレッドを作成した。このように通信結果が必要な計算までも同じスレッドに担当させると、他のスレッドとは同期を取る必要が無く(通信結果が必要無いため)同期待ち時間の排除に成功し、また、一定量の計算もHaloスレッドでは行われるため、計算自体の性能低下もある程度抑えられることが可能となった。この手法により、高並列時においても、並列性能を維持できるようになった。

今後の並列計算機では計算コア数が増えることが想定されており、モデル開発時から通信専用コア向け実装を行うことは非常に重要と考えられる。

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 2件)

Y. Inadomi, T. Patki, K. Inoue, M. Aoyagi, B. Rountree, M. Schulz, D. Lowenthal, Y. Wada, K. Fukazawa, M. Ueda, M. Kondo, I. Miyoshi, Analyzing and mitigating the impact of manufacturing variability in power-constrained supercomputing, Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '15). ACM, New York, NY, USA, 査読有, Article 78, 12 pages. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2807591.280>

7638, 2015.

Umeda, T., and K. Fukazawa, A high-resolution global Vlasov simulation of a small dielectric body with a weak intrinsic magnetic field on the K computer, Earth, Planets and Space, 査読有, Vol.67, No.1, 49 (8pp.), 2015.

〔学会発表〕(計 9件)

K. Fukazawa, R. J. Walker, A Simulation Study of the Dependence of the Vorticity in Saturn's Magnetosphere on the IMF, AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA, 14 - 18 Dec. 2015.

深沢圭一郎, R. J. Walker, Dependence of the Vorticity in Kronian Magnetosphere on the IMF, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第138回総会及び講演会、東京、2015年10月31日 - 11月3日

深沢圭一郎, 森江善之、曾我武史、高見利也、南里豪志、エクサスケールコンピューティングに向けた Halo スレッドの電磁流体シミュレーションに対する効果, 第151回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会、沖縄、2015年10月2日 - 10月3日

K. Fukazawa, and R. J. Walker, An MHD Simulation of the Dynamics of the Kronian Magnetosphere Driven by Solar Wind Observations, AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 3 - 7 August 2015.

深沢圭一郎, 高解像度土星磁気圏シミュレーションにおける渦構造の形成, 日本地球惑星連合2015年大会、幕張、2015年5月24 - 5月28日

深沢圭一郎, "大規模シミュレーションによる木星磁気圏の構造・ダイナミクスの研究", 地球電磁気・地球惑星圏学会 第136回総会及び講演会、長野、2014年10月31日 - 11月3日

K. Fukazawa, R. J. Walker and S. Eriksson, Massively parallel MHD simulation of convection and auroral emissions in Saturn's magnetosphere driven by the observed solar wind, AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, 15 - 19 Dec. 2014.

深沢圭一郎, 片桐孝洋、大宮学、江川隆輔、大島聡史、青木尊之、下川辺隆史、荻野正雄、岩下武史、東田学、実アプリを用いた様々なアーキテクチャからなる計算機システムの性能評価, 第199回ARC・第142回HPC合同研究発表会、札幌、2013年12月16日 - 17日

Fukazawa, K., T. Ogino, R. J. Walker, Key parameter of planetary magnetospheric configuration and dynamics, AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, USA, 9 - 13 Dec. 2013.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深沢圭一郎 (FUKAZAWA, Keiichiro)
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授

研究者番号： 50377868

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし