

10-NA23

核融合・基礎プラズマの超並列シミュレーションに関する研究

岸本 泰明 (京都大学)

磁場方式による核融合プラズマ中では、密度や温度勾配が自由エネルギーとなって引き起こされる不安定性の非線形発展の結果、系が乱流状態に移行し、複雑な輸送現象が現出する。また、レーザー方式による核融合プラズマや自然界のプラズマに広く目を転じると、様々な状態にある物質が、複雑な原子・分子過程や衝突緩和過程を通して非平衡・非定常なプラズマ状態を作り出し、多彩な構造を創出する。我々は、このようなプラズマが関与した複雑現象を解明することを目的に、速度分布関数を位相空間で流体的に解く Eulerian Vlasov コードと、原子・分子過程や荷電粒子間の衝突・緩和過程などの基礎過程を自己無頓着に取り入れた電磁粒子コードを開発している。これらは、いずれも超並列計算が重要な役割を果たす大規模シミュレーション用コードである。本稿では、保存型 IDO 法を用いたジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov コードの高度化改善の成果、及びそのコードを用いて行ったシミュレーション結果について報告する。

1. 研究の目的と意義

核融合プラズマや宇宙・天体プラズマに代表される高温プラズマの物性は、磁場閉じ込め核融合の実現という工学的な観点からだけではなく、非平衡・非線形の荷電粒子多体系として、学術的な観点からも興味深い研究対象である。更にこれらのプラズマは、「多階層」という言葉でしばしば形容されるように、幅広い時間・空間スケールの素過程を内包し、かつ、それらは互いに連結している。典型的な磁場閉じ込め核融合プラズマでは、プラズマ振動周期は 10 ピコ秒程度であるのに対し、電磁流体特性を支配する Alfvén 時間は数十から数百マイクロ秒、更に装置サイズが関与するエネルギー閉じ込め時間は 1 秒のオーダーとなる。また、Debye 長は 0.01 ミリメートル程度、イオンジャイロ半径は数ミリメートル、閉じ込め装置の小半径は約 1 メートルのオーダーであり、複数の特徴的スケールが混在している。このように幅広い時空間スケールにおよぶ種々の現象を高精度でシミュレーションするには、細かな空間分解能で装置全体をくまなく覆い、且つ、高い時間分解能で長時間の積分計算を行う必要がある。

このような磁場閉じ込め核融合プラズマを再現する方法の一つとして、実空間 3 次元、速度空間 2 次元のジャイロ運動論的方程式がしばしば用いられる。ジャイロ運動論の利点は、元の Boltzmann

方程式に比べ、ジャイロ運動にともなう旋回位相の次元が一つ減少し、それよりも十分ゆっくりした変動のみが現れること、磁場ドリフトや反磁性ドリフト項などが取り入れられていることが挙げられる。一方で、位相空間 5 次元の運動を追跡するため、大規模な計算容量や計算時間はなお必要であり、そのために高い並列化効率を有するコードの開発は研究の必要条件となる。

本研究では、「超大規模数値計算系応用分野」の枠組みで、京都大学学術情報メディアセンターと共同で、これまで開発したジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov コードの高度化改善を行った [17]。具体的には、3 次元領域分割法とそれに特化した高速フーリエ変換を実装し、 10^4 のプロセス数に対しても十分なスケールリングの確保が可能なコードの改良を行った。

更に、そのコードを用いて、核融合プラズマ中の微視的乱流、帯状流、及び温度分布緩和の関係を、エントロピーの観点から解析した [1-2, 5-9, 11, 16, 19]。その結果、不安定性が強いケースでは温度分布の緩和を駆動源として揺動エントロピーが励起され、それが avalanche 的な温度緩和の伝搬を伴って、非常に早い時間スケールで半径方向に進行していくことが示された。一方で、エントロピーバランスの観点からは帯状流の寄与は十分に小さく、これは avalanche 的な輸送に対して帯状流が

ほとんど影響を与えないことを示唆している。また不安定性が弱いケースでは、帯状流による寄与は比較的大きく、帯状流によって熱流束が分断され、温度分布の大域的な緩和が局所的なものに遷移することが示された。この結果は、帯状流のシアと帯状圧力が同波数、同位相であることに対応しており、新たな物理関係を示唆している。

一方、レーザー方式による核融合プラズマや自然界のプラズマ、実験室・産業応用のプラズマに広く目を転じると、凝集相、気相、クラスターなど様々な状態にある物質が、多彩な原子・分子過程や衝突緩和過程を通して、非平衡・非定常なプラズマ状態を作り出し、多彩な構造を創出する。そのような原子・分子過程が作り出す複雑なプラズマ現象を解析するコードとして、原子・分子過程や粒子間の衝突・緩和過程や輻射過程などの基礎過程を自己無撞着に取り入れた拡張型3次元電磁粒子 (EPIC3D) コードを開発してきた。本研究では、同様に「超大規模数値計算系応用分野」の枠組みで、EPIC3D コードの最適化を行った。更に、そのコードを用いることで、放電・雷過程の突発的なダイナミクスと構造形成の解析を行い、これらの過程が中性媒質からプラズマへの相転移的な特性を有していることを見出した [12]。これらの現象は、中性媒質がプラズマ状態へ移行する際の普遍的な状態として位置づけられる。特に、放電・雷過程は長い研究の歴史にもかかわらず未解明な部分が多く、また予測が困難な現象の突発的な発生機構や微細な分岐構造の出現は、非線形物理や非平衡統計力学の観点からも興味深い。このような原子過程とそれに伴うプラズマ生成過程の素過程を明らかにすることで、それらの特性を生かした応用研究 (放電・雷過程における突発性の制御、高強度粒子・X線源開発など) を推進する。

本稿では、ジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov コードの高度化改善の成果、及びそのコードを用いて行ったシミュレーション結果を中心に報告する。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究は、「超大規模数値計算系応用分野」の枠

組みで、京都大学学術情報メディアセンターと共同で行った。

前章で述べたように、ジャイロ運動論に基づいた Eulerian Vlasov シミュレーションにおいては、位相空間 5 次元速度分布関数の時間発展を追跡する必要がある。更に、本研究の最終的な目標である多階層連結シミュレーションを行うためには、細かな空間分解能で装置全体をくまなく覆い、且つ、高い時間分解能で長時間の積分計算を行う必要がある。そのためには、更なる高効率並列化、並びにそれを行う計算機環境が必要不可欠となる。その観点から、計算科学分野とのアルゴリズム、モデリング、並列処理に関する協調的相補的な関係が必要であり、大規模情報基盤を目的とした当共同研究の趣旨と合致する。

3. 研究成果の詳細

我々は、位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov-Poisson 方程式系

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_\alpha}{\partial t} + \left(v_\parallel \hat{b} + \frac{c}{B_0} \hat{b} \times \nabla \langle \Phi \rangle_\phi \right) \cdot \frac{\partial F_\alpha}{\partial \mathbf{X}} - \frac{q_\alpha}{m_\alpha} \hat{b} \cdot \nabla \langle \Phi \rangle_\phi \frac{\partial F_\alpha}{\partial v_\parallel} = 0, \\ -\nabla^2 \Phi + \sum_\alpha \frac{\Phi(\mathbf{k})}{\lambda_{D\alpha}} \left\{ 1 - \Gamma_0(k_\perp^2 \rho_\alpha^2) \right\} \\ = 4\pi \sum_\alpha \left[2\pi q_\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \delta F_\alpha(\mathbf{k}) J_0(k_\perp \rho_\alpha) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{X}} m_\alpha^2 B_0 dv_\parallel d\mu \right], \end{aligned} \quad (1)$$

を自己無撞着に解く Eulerian Vlasov コードの開発を行っている。ここで、 $F_\alpha(t, \mathbf{X}, v_\parallel, \mu)$ はイオン、又は電子のジャイロ中心座標における速度分布関数、 v_\parallel は磁力線に平行方向の速度、 μ は断熱不変量となる磁気モーメント、 $\langle \Phi(t, \mathbf{X}) \rangle_\phi$ はジャイロ周期で平均化された静電ポテンシャルを表す。また、 B_0 は平衡磁場強度、 \hat{b} は磁場方向の単位ベクトル、 $J_0(x)$ と $\Gamma_0(x)$ はそれぞれ第 0 次、及び第 0 次変形ベッセル関数、 q_α 、 m_α 、 ρ_α 、 $\lambda_{D\alpha}$ はイオン、又は電子の電荷、質量、ジャイロ半径、デバイ長をそれぞれ表している。式 (1) の特徴としては、ジャイロ運動にともなう旋回位相の次元が 1

つ減っていることで、速度空間が2次元に低減されていること、更に旋回位相の共役変数である μ に関する微分演算子を含まないため、 μ は定数パラメータとしてのみ含まれていることが挙げられる。この事実によって、ジャイロ運動論的 Vlasov 方程式 (1) では、解析的な取り扱いや数値シミュレーションを行う場合の負担が遙かに軽減される。一方で、ジャイロ運動よりも十分ゆっくりした運動論的效果や、有限ジャイロ半径による場の平均化効果などの物理的に重要な要素が包含されており、プラズマ乱流、特にドリフト波に起因する乱流輸送現象を解析する上で都合の良い構成となっている。

ジャイロ運動論的 Vlasov-Poisson 方程式系(1)、及び(2)を数値的に解くシミュレーション技法としては、実空間で粒子を追跡する Lagrange approach と、位相空間を格子で切って流体的に解く Eulerian approach に大別される。前者の方法では、プラズマ振動程度の現象をシミュレーションする場合、実空間格子あたり 10^2 個程度の粒子を用いるのが一般的であるのに対し、後者の方法では、速度空間を離散化し分布関数の微細構造を扱うには大まかに 10^3-10^4 程度の格子点が必要となる。しかしながら、Eulerian approach を用いることで、統計誤差に起因する「ノイズ」を含まず、磁場閉じ込め核融合プラズマで重要な鍵を握る外部からの熱・粒子の入出力を考慮したシミュレーションが可能となる。但し、注意すべきは、保存性や計算精度は適用する数値スキームに依存する点である。

我々は、そのようなジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov-Poisson コードを、高精度数値計算手法の一つである保存型 IDO (Interpolated Differential Operator) 法を用いて開発した。このスキームは、離散物理量と区間積分値を独立変数として扱うことで、長時間安定した高精度計算を可能としている。従来の Vlasov コードと比較して、本コードの主な利点は以下の通りである。

1) 粒子数が厳密に保存することから、長時間にわたって保存性に優れたシミュレーションを行う

ことができ、比較的遅い時間スケールである背景分布の緩和まで含んだ解析が可能となった。

2) オイラー型の時間スキームを採用できるので、衝突項や加熱項といった効果を含んだ解析が可能となった。

一方で、分布関数の境界値データ通信が大規模計算においてはボトルネックとなり、大規模計算での良いスケールリングが望めないという問題を有していた。

そこで本研究では、3次元領域分割法とそれに特化した Poisson solver 用の高速フーリエ変換を用いることで、性能改善を行った [17]。図1に高度化改善後のフローチャートを示す。有限ジャイロ半径による場の平均化効果が波数の関数で表されることから、現在、高速フーリエ変換を Poisson solver として用いているため、実空間3次元のうち、領域分割できるのは、最大2次元である。そこで今回は、更に v_{\parallel} 方向を領域分割することで、3次元領域分割を行い、大規模計算での十分なスケールリングの確保を試みた。

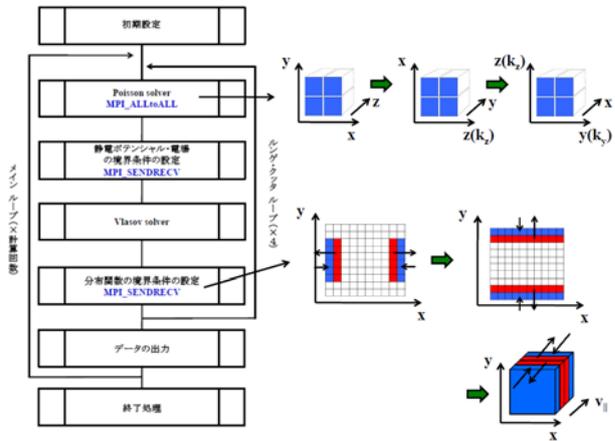


Fig. 1: Flow chart of the tuned 5D Eulerian Vlasov-Poisson code. $(N_x, N_y, N_z, N_v, N_\mu) = (128, 64, 32, 128, 16)$ are chosen as a typical mesh number.

図2(a)は、改良前後のコードの全体処理時間に対するスケラビリティを表している。改良後のスケラビリティはニアな伸長傾向となっており、128プロセス数における全体処理時間は、約1.44倍改善された。図2(b)は、改良前後のコードの境界値データ通信時間に対するスケラビリティを表している。128プロセス数における全体処理時

間は、約 2.87 倍改善され、全体処理時間に占める境界値データ通信時間の割合は 49.4%から 36.3%に減少した。これは、従来までボトルネックであった境界値データ通信時間が改善されたことを示している。今回は計算機環境の都合から、測定対象としたモデル規模は小さくする必要があり、128 プロセス数までの性能測定に限定しているが、モデル規模を大きくすれば、更なるスケラビリティの向上が見込まれる。

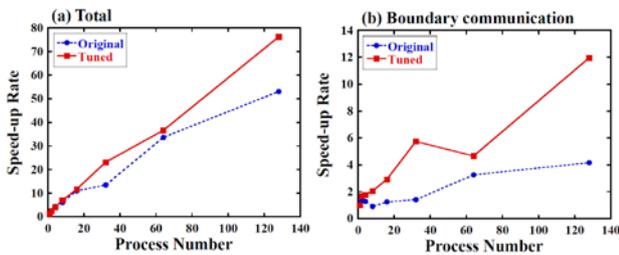


Fig. 2: Scalability of the original and tuned 5D Eulerian Vlasov-Poisson code. (a) Scalability of total calculation and (b) that of boundary communication are shown.

次に、このコードを用いて、核融合プラズマ中の微視的乱流、帯状流、及び温度分布緩和の関係を解析した。中性粒子ビーム加熱等によってプラズマ中にイオン温度分布の急峻な勾配が形成されると、それが自由エネルギー源となってイオン温度勾配モードと呼ばれる微視的な揺らぎが発生し、乱流に発展する。そのような乱流がプラズマ中に異常輸送をもたらし、自己組織的に背景温度分布の緩和を引き起こすと考えられている。一方、乱流が発生すると、乱流自身の非線形相互作用によって帯状流が自発的に生成され、それによって乱流が抑制されることが一般的に知られており、それが結果的に温度分布の緩和にも影響を及ぼすことが予測される。

そこで本研究では、この三者を関係付ける指標関数として、熱統計力学で用いられているボルツマンエントロピーを導入し、グローバルな系における新しいエントロピーバランス方程式を導いた [1-2, 5-9, 11, 16, 19]。この方程式は、従来のエントロピーバランス方程式で記述されていた微細構造に起因した揺動エントロピーと、温度分布の緩和に伴うエントロピー生成だけでなく、帯状流生成

に伴うエントロピー生成、及び揺動エントロピーの半径方向への伝搬によって構成されており、背景温度分布の緩和を伴う非局所乱流輸送を記述するモデルとして適している。

本研究では更に、前述のジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov-Poisson コードを用いて、このエントロピーバランスの解析を行った。図 3 は、揺動エントロピー生成(EP2)、熱流束(HF2)、帯状流生成(DF2)、揺動エントロピー流出(EC2)の空間分布を表している。不安定性が強いケースでは、まず線形時に温度分布の緩和を駆動源として揺動エントロピーが励起され(a)、それが avalanche 的な温度緩和の伝搬を伴って、非常に早い時間スケールで半径方向に進行していくことが示された(b, c)。一方で、エントロピーバランスの観点からは帯状流の寄与は十分に小さく、これは avalanche 的な輸送に対して帯状流がほとんど影響を与えないことを示唆している。一方、不安定性が弱いケースでは、帯状流による寄与は比較的大きく、帯状流によ

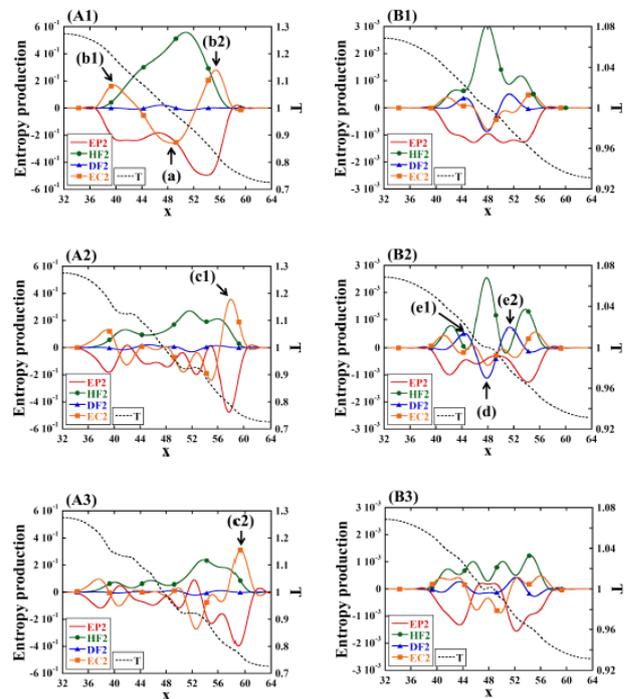


Fig.3: Spatial profile of each term in the entropy balance equation. LHS figure shows that in the strong ITG instability case at different times (A1) 9.0×10^3 , (A2) 1.0×10^4 , (A3) 1.05×10^4 , whereas RHS one shows that in the weak instability case at different times (B1) 4.4×10^4 , (B2) 4.5×10^4 , (B3) 4.6×10^4 . Note that the temperature scale is different.

て熱流束が分断され(d, e)、温度分布の大域的な緩和が局所的なものに遷移することが示された。この結果は、帯状流のシアと帯状圧力が同波数、同位相であることに対応しており、新たな物理関係を示唆している。

最後に、現在用いている保存型 IDO 法の数値散逸を更に低減するための研究として、高精度計算手法の開発を行った [4, 13, 18]。保存型 IDO 法では、一般に離散物理量と区間積分値を独立変数として扱っているが、我々は独立変数として更に 1 次、並びに 2 次の区間モーメント値を追加することで、数値散逸、並びに数値分散の低減を試みた (以下、この手法を「マルチモーメント法」と呼ぶ)。

マルチモーメント法のアルゴリズムを 1 次元線形輸送方程式

$$\frac{\partial f(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[uf(t, x)] = 0 \quad (u < 0), \quad (3)$$

を例に示す。 ${}^m M_{j+1/2}$ ($m=0,1,2$) を $[x_j, x_{j+1}]$ における m 次の規格化された区間モーメント値

$${}^0 M_{j+1/2} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} f dx / \Delta x, \quad (4)$$

$${}^1 M_{j+1/2} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} (x - x_j) f dx / \Delta x^2, \quad (5)$$

$${}^2 M_{j+1/2} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} (x - x_j)^2 f dx / \Delta x^3, \quad (6)$$

と定義する。これらを独立変数として扱うと、 $[x_j, x_{j+1}]$ の補間関数

$$F_j(x) = a(x - x_j)^4 + b(x - x_j)^3 + c(x - x_j)^2 + d(x - x_j) + e, \quad (7)$$

の係数は 5 つの拘束条件

$$\begin{aligned} F_j(x_j) &= f_j \\ F_j(x_{j+1}) &= f_{j+1} \\ \int_{x_j}^{x_{j+1}} F_j(x) dx / \Delta x &= {}^0 M_{j+1/2} \\ \int_{x_j}^{x_{j+1}} (x - x_j) F_j(x) dx / \Delta x^2 &= {}^1 M_{j+1/2} \\ \int_{x_j}^{x_{j+1}} (x - x_j)^2 F_j(x) dx / \Delta x^3 &= {}^2 M_{j+1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

から決定される。このとき、各独立変数の時間発展は、 $F_j(x)$ を用いて

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_j = -u \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_j} = -u \frac{\partial F_j(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_j} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial {}^0 M}{\partial t} \right)_{j+1/2} = -u \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{\partial f}{\partial x} dx = -u \frac{f_{j+1} - f_j}{\Delta x}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial {}^1 M}{\partial t} \right)_{j+1/2} = -u \frac{f_{j+1} - {}^0 M_{j+1/2}}{\Delta x}, \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial {}^2 M}{\partial t} \right)_{j+1/2} = -u \frac{f_{j+1} - {}^2 M_{j+1/2}}{\Delta x}, \quad (12)$$

と表せる。式(9)-(12)に従って、ルンゲ・クッタ法などの数値積分を行うことで、各独立変数を相互参照させながら、高精度に移流させることが出来る。更に、 ${}^0 M_{j+1/2}$ が Flux 形式で数値積分されることから、 $\sum_j {}^0 M_{j+1/2}$ は厳密に保存され、保存型 IDO 法同様、長時間にわたって保存性に優れたシミュレーションを行うことが可能となる。

図4は Fourier 解析によって求められた 1 次風上、3 次風上、保存型 IDO 法、マルチモーメント法の 1 タイムステップあたりの (a) 振幅の減衰率、及び (b) 位相誤差を表している。マルチモーメント法は、高波数まで非常に精度よく解けていることがわかった。

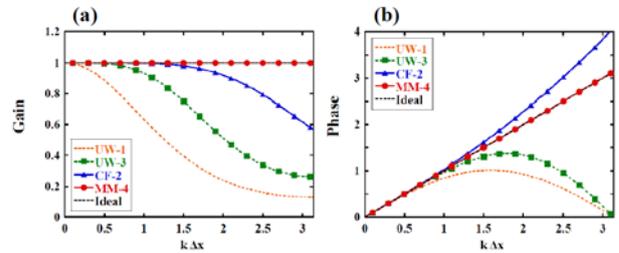


Fig.4 : (a) Gain and (b) phase errors of different schemes for 1D linear transport equation. The red curve corresponds to the Multi-moment scheme, other ones to the 1st-order upwind (orange), 3rd-order upwind (green), IDO-CF (blue), Multi-moment schemes and the ideal phase (black), respectively.

図5は剛体回転速度場において、(a)鍵型の初期プロファイルを10周する問題を(b)3次風上、(c)保存型IDO法、(d)マルチモーメント法で計算した場合の結果を示す。マルチモーメント法を用いることで、数値散逸、並びに数値分散が十分低減されていることが分かった。

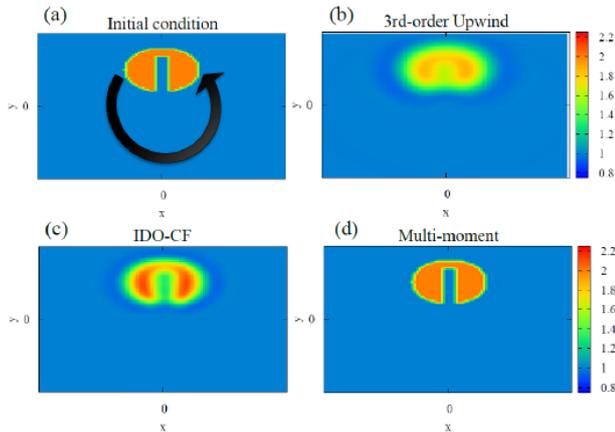


Fig.5: Contour view of the solid-body in the Zalesak problem after ten anticlockwise rotations simulated by using (b) 3rd-order upwind, (c) IDO-CF and (d) Multi-moment schemes. Here, 100×100 mesh number and constant velocity are assumed.

4. これまでの進捗状況と今後の展望

コードの高度化改善に関しては、ジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov-Poisson コードに、当初の予定通り、3次元領域分割法とそれに特化した高速フーリエ変換を実装することが出来た [17]。スケラビリティはリニアな伸長傾向となっており、128プロセス数における全体処理時間は、改良前と比べ、約1.44倍改善された。今後は、大規模計算でのスケーリングの計測を予定しており、モデル規模を大きくすれば、スケラビリティが更に向上することが見込まれる。

物理的な課題に関しては、位相空間5次元での大規模シミュレーションによって、核融合プラズマ中の微視的乱流、帯状流、及び温度分布緩和の関係を、エントロピーの観点から解析し、国内外での発表を多数行うことが出来た [1-2, 5-9, 11, 16, 19]。今後は、今回得られたエントロピーに関する知見をベースに、実際の核融合炉で想定される外部加熱や核融合出力の効果を加味した系での第1

原理シミュレーションを行う予定である。

また、数値計算スキームに関しては、数値散逸、並びに数値分散が十分に小さいスキーム（マルチモーメント法）の開発に成功した [4, 13, 18]。今後は、本スキームをジャイロ運動論的 Eulerian Vlasov-Poisson コードに実装する予定である。このスキームを実装することで、保存性と精度の向上、特に速度方向の補間精度を向上させることで、速度分布関数の形状が影響を及ぼす密度や輸送フラックスを、より高精度に評価できることが期待される。

最後に、本研究の最終的な目標である多階層連結シミュレーションに関する研究についても言及したい。現在、電磁流体力学とイオン系乱流間の相互作用を解析する研究として、磁気島を背景構造に持ったイオン系乱流のジャイロ流体シミュレーション [3, 10, 15]を、イオン-電子系乱流間の相互作用を解析する研究として、イオン系乱流と電子系乱流が共存した系での線形解析 [10, 14]を行っている。今後は、上記の研究で得られた成果と今回開発したコードをベースに、磁気島を背景構造に持ったイオン系乱流、及びイオン-電子系乱流の第1原理シミュレーションを行う予定である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[1] K. Imadera, Y. Kishimoto and J. Q. Li, “Global profile relaxation and local entropy dynamics in turbulent transport”, *J. Plasma Fusion Res.* **5**, 019 (2010).

(2) 国際会議プロシーディングス

[2] K. Imadera, Y. Kishimoto, J. Q. Li and T. Utsumi, “Gyrokinetic study of the local entropy dynamics in turbulent plasmas with zonal flow”, *J. Plasma Fusion Res.* **5**, S2050 (2010).

[3] J. Q. Li, K. Imadera, Z. X. Wang, P. Hilscher and Y. Kishimoto, “Multi-scale turbulence simulation in magnetic fusion plasma”, accepted for the proceedings of the Joint International Conference

- of the Supercomputing in Nuclear Application and Monte Carlo (SNA + MC 2010).
- [4] T. Kawano, K. Imadera, J. Q. Li and Y. Kishimoto, “Numerical Method for Eulerian Vlasov simulation based on the multi-moment scheme”, submitted for the proceedings of the International Toki Conference (ITC-20).
- (3) 国際会議発表
- [5] K. Imadera, Y. Kishimoto, J. Q. Li and P. Hilscher, “Global profile relaxation and entropy dynamics in turbulent plasmas”, Physics and modeling of multi-scale interaction in plasmas, Kyoto, Japan, Mar. 2010 (Oral)
- [6] K. Imadera, Y. Kishimoto, J. Q. Li and P. Hilscher, “Global profile relaxation and entropy dynamics in turbulent plasmas”, 15th NEXT workshop, Kyoto, Japan, Mar. 2010 (Oral)
- [7] Y. Kishimoto, K. Imadera and J. Q. Li, “Profile relaxation and entropy dynamics in turbulent transport”, US-Japan JIFT workshop on hierarchical Self-organization of turbulence and flows in Plasmas, Oceans and Atmospheres”, UC San Diego, America, Mar. 2010 (Oral).
- [8] Y. Kishimoto, K. Imadera and J. Q. Li, “Profile relaxation and entropy dynamics in turbulent transport”, 5th Japan-Korea Workshop on "Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas", Pohang, Korea, July. 2010 (Oral).
- [9] Y. Kishimoto, K. Imadera and J. Q. Li, “Profile relaxation and entropy dynamics in turbulent transport”, China-Japan CUP seminar on “Modeling of Theory and Simulation of Fusion Plasma”, Beijing, China, Aug. 2010 (Oral).
- [10] J. Q. Li, K. Imadera, Z. X. Wang, P. Hilscher and Y. Kishimoto, “Multi-scale turbulence simulation in magnetic fusion plasma”, the Joint International Conference of the Supercomputing in Nuclear Application and Monte Carlo (SNA + MC 2010), Tokyo, Japan, Oct. 2010 (Oral).
- [11] K. Imadera, Y. Kishimoto and J. Q. Li, “Global profile relaxation and entropy dynamics in turbulent plasmas with an Eulerian gyrokinetic simulation”, 4th International Workshop on Fusion Theory and Simulation, Beijing, China, Oct. 2010 (Oral).
- [12] Y. Kishimoto, A. Sugahara, D. Saito, N. Iwata, S. Kato, “Particle based integrated code EPIC3D for laser-matter interaction including atomic process”, International Conference on Physics in Intense Fields, Tsukuba, Japan, Nov. 2010 (Poster).
- [13] T. Kawano, K. Imadera, J. Q. Li and Y. Kishimoto, “Numerical Method for Eulerian Vlasov simulation based on the multi-moment scheme”, 20th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 2009 (Poster).
- [14] P. Hilscher, K. Imadera, J. Q. Li and Y. Kishimoto, “Gyrokinetic simulation of multi-scale micro-turbulence in Fusion plasma slab ITG turbulence”, 20th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 2009 (Poster).
- (4) 国内会議発表
- [15] 岸本 泰明, “巨視的なMHDモードと微視的乱流の相互作用”, 物理・天文・地球惑星合同プラズマ科学シンポジウム, 幕張メッセ国際会議場, 2010年5月 (Oral).
- [16] 今寺 賢志, “乱流プラズマにおける自己形成臨界輸送とエントロピーのダイナミクス”, 物理・天文・地球惑星合同プラズマ科学シンポジウム, 幕張メッセ国際会議場, 2010年5月 (Oral).
- [17] 今寺 賢志, 岸本 泰明, “核融合・基礎プラズマの超並列シミュレーションに関する研究”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第1回シンポジウム, 東京大学, 2010年9月 (Poster).
- [18] 今寺 賢志, 岸本 泰明, “マルチモーメント法によるブラソフ方程式のシミュレーション”, 第4回シミュレーション科学シンポジウム,

核融合科学研究所, 2010年9月 (Oral).

- [19] 岸本 泰明, 今寺 賢志, 宮田 翔, Paul Hilscher, 李 継全, “乱流輸送における分布緩和とエントロピーダイナミクス”; 日本物理学会 2010年秋季大会, 大阪府立大学, 2010年9月 (Oral).