

11-NA28

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 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粒子コードを開発している。これらは、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を対象としたコードである。本稿では、それらのコードの改善成果と、本年度新たに得られ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

プラズマは、固体・液体・固体に続く物質の第 4 の状態と位置付けられ、イオンと電子からなる荷電粒子多体系である。このプラズマは、中性媒質にはない電磁場と相互作用する自由度を通して豊富で特異なダイナミクスや構造を創出し、宇宙・天体をはじめとした様々な自然現象や将来のエネルギー源として期待される核融合、さらに高強度で高輝度の粒子源や輻射源などの応用研究の鍵を握る媒質である。本稿では、このようなプラズマの複雑過程を解明することを目的に、プラズマの運動論効果を取り入れた 1) 高温核融合プラズマの乱流輸送過程を再現する Vlasov シミュレーション、2) 原子過程や複雑な緩和過程が関与した基礎プラズマ過程を再現する粒子シミュレーションに関する成果について報告する。

1-1. 位相空間 5 次元 Vlasov シミュレーション研究の目的と意義

核融合プラズマでは、急峻な温度勾配が自由エネルギー源となってマイクロな乱流が発生し、閉じ込めを劣化させる一方、非線形効果による自己組織化過程を通して、マクロな渦構造や層流（帯状流）が生成され、閉じ込めが改善される。このようなマイクロとマクロが混在した複雑な揺らぎの微細構造やダイナミクスが、現象を大きく左右する。宇宙・天体プラズマでも、銀河・星形成時に

おける降着円盤内の乱流現象や粒子加速現象などで、同様の過程が重要な役割を果たす。

このようなプラズマのダイナミクスをより正確に再現する方法として、6 次元の位相空間に格子を設けて、速度分布関数を連続媒質として数値的に解く Vlasov シミュレーション（核融合プラズマでは、磁力線による旋回運動を平均化した位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーション）が世界的に広く用いられている。Vlasov シミュレーションは、粒子シミュレーションに比べて数値ノイズが低い反面、高次元の位相空間を直接扱うため、格子点数が膨大となり、位相空間の微細構造を保持したシミュレーションは、離散化、ならびに並列化が十分に洗練されていなければ不可能である。特に、位相空間の微細渦構造やセパラトリックス近傍での引き伸ばしや畳み込みが、数値散逸（数値エントロピー）を増大させる要因となり、大きな障害となっている。

このような Vlasov シミュレーションの数値計算手法として、これまでの歴史では、有限差分法や有限体積法を基礎とした解法が広く用いられてきた。それらは、空間微分や数値流束を評価する上で、物理的意味とは独立に、離散化したグリッド値をいかに「滑らか」に結ぶかを第一義の拘束条件としている。一方、我々のグループでは、グリッド値に加えて、物理的意味を持つグリッド間の面積値も追跡する保存型 IDO（Interpolated

Differential Operator) 法が数値流体力学分野で報告されたことを受け [Y. Imai, *et. al.*, J. Comput. Phys. **227** (2008) 2263.], これを Vlasov シミュレーションに適用し [K. Imadera, *et. al.*, J. Comput. Phys. **228** (2009) 8919.], この手法が位相空間の微細構造を捉える上で有用であることを示した。

この研究を通して、グリッド値を「滑らか」に結ぶことが第一義ではなく、支配方程式に基づいて物理的に意味のある拘束条件の下で離散化を行うことが本質的であると考え、新たに「多重拘束マルチモーメント概念」を提案した。この概念では、複数の物理モーメント値を参照することで精度を確保し (Tab. 1)、さらにそれらを支配方程式のモーメントに沿って独立に時間積分することで、物理的に意味のある多重の拘束条件を課している。

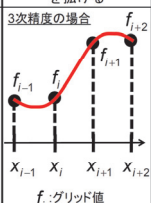
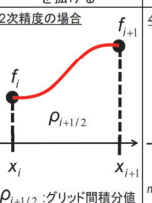
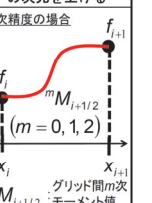
	従来の差分概念	保存型IDO法の概念	多重拘束マルチモーメント概念
独立変数	グリッド値のみ	グリッド値とグリッド間積分値	グリッド値とグリッド間モーメント値
精度の向上	参照する区間を拡げる	参照する区間を拡げる	参照するモーメントの次元を上げる
急峻な構造の捕捉	3次精度の場合 	2次精度の場合 	4次精度の場合 

Table 1: Comparison between the concepts of the conventional FDM, IDO-CF and Multi-Moment scheme.

この概念に基づいて、これまで開発してきたジャイロ運動論的 Vlasov コードを、並列化手法を含めて再構築することで、外部からのエネルギーの入出力を含む核融合プラズマの多階層乱流シミュレーションをこれまでにない高精度で実現し、核融合シミュレーション研究の新たな展開を切り開くことが、この位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーション研究の目的である。

従って、研究目標は、以下の 3 つに大別される。

(A) 位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov コードの再構築

保存型 IDO 法を基による位相空間 5 次元ジャイ

ロ運動論的 Vlasov コードを、多重拘束マルチモーメント概念に基づいて再構築し、微細構造の再現性や保存性などの比較・検証を行う。また、「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連携して、100 テラフロップス級の大規模計算に向けた並列指向型 Poisson solver による並列化効率の改善を試みる。

(B) 開放系プラズマ中の非局所輸送現象の解明

磁場閉じ込め高温プラズマでは、背景温度分布の勾配を不安定性の駆動源として、乱流が励起され、自己組織的に温度分布の緩和が引き起こされる。このような現象の一つとして、臨界勾配近傍で温度分布の硬直化を引き起こす Self-Organized Criticality (SOC) が挙げられ、ガウス統計では説明できないような速いスケールで、かつ非局所的な特性を持った輸送と関連していると考えられている。また実験では、そのような非局所的な輸送現象と関連して、cold pulse による周辺領域での電子温度の低下が、数ミリ秒の時間スケールで中心部に伝搬し、さらに興味深いことに、電子温度の低下が内部で電子温度の上昇に入れ替わることが、核融合科学研究所の LHD で TESPEL を用いた実験や、西南物理研究所の HL-2A で SMBI を用いた実験で発見された。このような現象は、中心部における電子の熱輸送係数の低下によって実験的に説明されているが、揺らぎと輸送のモデルを使ったシミュレーションでは再現されていない。本研究では、我々が開発したジャイロ運動論コードを用いることで、そのような非局所輸送が支配的となる開放系プラズマにおける乱流輸送特性を、帯状流の役割を中心に考察する。

(C) MHD-イオン系乱流間の多階層非線形相互作用の解明

マクロな電磁流体力学(MHD)モードとミクロなイオン系乱流が混在した多階層シミュレーションを行い、磁気島中で起きるイオン系乱流輸送に起因した温度分布の緩和現象、及び帯状流の形成メカニズムを解明する。特に、磁場に平行方向に沿

って急速な温度分布の緩和が起きることが予想され、それに伴う乱流構造の変化、およびそれらの物理過程に対する帯状流の役割を中心に考察する。

また、本研究の学術的・社会的意義としては、以下の 2 点があげられる。多重拘束マルチモーメント概念の導入は、計算科学の観点からも斬新なアイデアであり、数値散逸の大幅に抑えた（数値エントロピーの増加を大幅に抑えた）シミュレーションが可能となる。その結果、長時間にわたる輸送量の正確な見積もり（上述の(B)に相当）や、幅広い時空間スケールを包括した多階層間相互作用（上述の(C)に相当）を解析するための有力の手段となる可能性がある。また、京都大学メディアセンターと「超大規模数値計算系応用分野」の枠組みで大規模シミュレーションに向けた並列化を推進しており、次世代の大規模シミュレーションを見据えたコード開発に繋がることが期待される。

1-2. 原子・分子過程を取り入れた粒子シミュレーション研究の目的と意義

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。しかし、これらは、因果関係を問うことが困難なほど多様性と複雑性に満ちた現象であり、これまでも様々な試みがなされてきたが、特に、これらの現象が普遍的に示す突発的なダイナミクスと複雑な構造形成現象を予測する理論基盤は皆無に等しく、未だに原理的解明に至っていない。

中性媒質（固体・液体・気体）における状態変化は、相転移として、熱平衡状態の仮定の下に理論基盤が構築されてきた。一方、核融合や宇宙・天体などの高温プラズマでも、揺らぎや閉じ込め状態が急激に変化する現象が観測され、相転移として理解されている。これに対して、中性媒質からプラズマへの状態変化を相転移として扱った例はない。これは、両者の中間状態である電離過程が、

複雑性レベルの極めて高い非平衡かつ非定常な新しい物質相の出現を伴い、熱平衡状態を仮定した従来の相転移概念の導入が困難なことによる。

本研究では、Fig.1 に示されるように、中世媒質からプラズマへの相転移とそこでの基礎過程（初期状態の形成、トリガーと連鎖のダイナミクス、構造発展とパターン形成など）を再現することを目的に、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 次元電磁粒子コード（EPIC3D: 3-Dimensional Extended Particle based Integrated Code）を開発してきた。特に、「超大規模数値計算系応用分野」の枠組みを通して、EPIC3D 実装される様々な物理モデルの高度化を行うとともに（詳細は 3.2 を参照）、「超大規模数値計算系応用分野」の枠組みで、超並列計算に適した最適化を行った。EPIC3D を用いることで、高強度レーザーに照射された媒質（気体、固体、クラスターなど）の電離過程のシミュレーションを行った。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。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）を推進することができる。

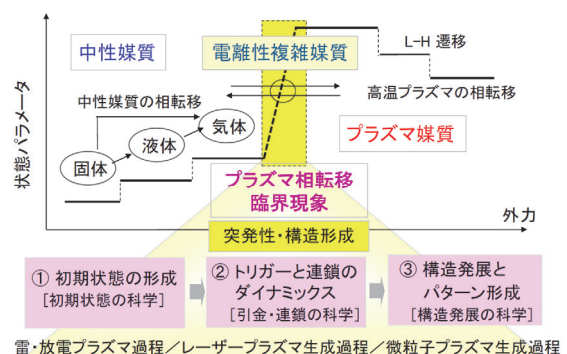


Fig.1 : Concept of plasma phase transition and the related fundamental dynamics.

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、位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 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。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。

また、EPIC3D では、通常のプラズマ粒子コードと異なり、プラズマを構成する荷電粒子数は、電離・再結合過程を通して時々刻々変化することから数値雑音が高くなり、十分な空間メッシュ数と粒子数が必要となる。また、それらの粒子の生成・消滅に伴って、計算負荷も領域内で一般的に局在するとともに時間変化することから、負荷分散などを考慮した並列化が将来的に必要なことになる。

それらの観点から、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. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

3-1 位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov コードの開発と応用研究

(A) ジャイロ運動論的 Vlasov コードの再構築

本研究課題ではまず、多重拘束マルチモーメント法を位相空間 2 次元 Vlasov シミュレーションに適用し、二流体不安定性のベンチマークテストを行うことで、その有効性を検証した。詳細については、平成 23 年度共同研究中間報告書に記載済みのためここでは省略するが、マルチモーメント法を用いることで、保存型 IDO 法の半分のメッシュ数であっても、セパトリックス近傍での引き伸ばしや畳み込みに伴って生じた分布関数の微細構造をより捕捉できることを明らかにした。またプログラム高度化については、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、並列化性能の改善を行った。

Table 2 は、1024 プロセスを用いて行った大規模計算における改善前と改善後の各パートの計算時間を示している。並列化性能の改善を行うことで計算時間が 57%程度になったことがわかる。また、

L3 キャッシュミス率も処理全体において約 24.8%削減されていることがわかり、キャッシュが有効活用されることが示された。しかしながら 1024 プロセスの時点で既に高速フーリエ変換を用いた Poisson solver がボトルネックとなっており、更なる並列化効率の改善のためには、実空間並列指向型 Poisson solver を導入する必要がある。この導入に関しては、本研究期間中を目途に行っていく。

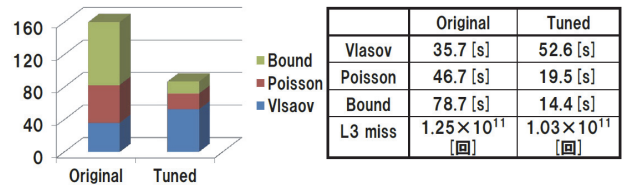


Table 2: Calculation time of each part (Vlasov solver, Poisson solver, Boundary data communication). L3 cache miss is also shown.

達成状況は、「多重拘束マルチモーメント法の微細構造の再現性や保存性などの比較・検証」については概ね終了したものの、「位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov コードの再構築」、ならびに「並列指向型 Poisson solver による並列化効率の改善」に関しては、現在もなお進行中である。

(B) 開放系プラズマ中の非局所輸送現象の解明

本研究課題では、ジャイロ運動論コードを用いることで、非局所輸送が支配的となる開放系プラズマにおける乱流輸送特性を、帯状流の役割を中心に解析した。主な結果は以下の 2 点である。準定常状態では、熱流束は f^{-1} (f : 周波数) の avalanche 的な特性を持ち、温度分布が自己組織的に硬直化することが確認された。これは幅広い周波数領域で輸送現象が起きていることを示しており、臨界輸送現象においてみられる典型的な特徴である。Fig. 2 はその際の温度勾配の特性長の空間-時間変化を示している。内側、および外側の双方に大域的な雪崩現象が起きていることがわかり、その際の輸送の相関長と特性速度を計算したところ、それぞれジャイロ半径の 14 倍、熱速度の 1000 分の 1 程度であることがわかった。乱流の相関長

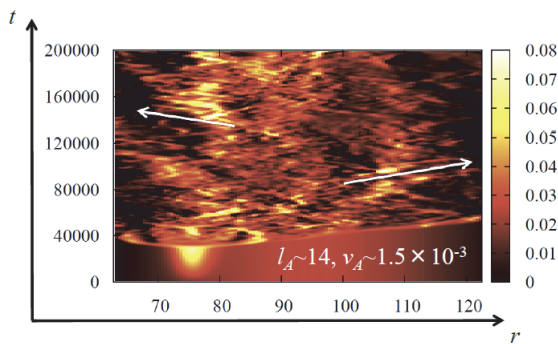


Fig.2: Spatio-temporal evolutions of the normalized electron temperature gradient.

は 3 倍程度、温度分布の特性長はジャイロ半径の 63 倍程度であるので、それらの中間的なスケールで輸送が起きていることがわかった。

Fig. 3 は、外部からの熱の入出力値を $Q_{\text{turb}}=1,2,4$ と変化させた場合のエネルギーの乱流と帯状成分の時間発展を示している。熱入力の値を増加させても帯状成分はほとんど増加せず、乱流成分のみが増え、結果として帯状流のエネルギー配分率が低下することが分かった。これは熱輸送係数の増加に対応しており、帯状流のエネルギー配分率の低下が、温度分布の硬直化の一因であると考えられる。帯状流の配分率が増加しない原因は、帯状流の励起される特性時間と比較して、輸送が半径方向に伝播する時間が早い可能性が考えられる。今後はより現実に近い配位での解析を行う必要はあるが、当初の目標は概ね達成したといえる。

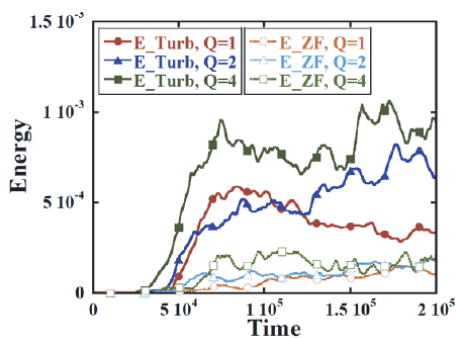


Fig.3: Time evolution of field energy with different heat input, $Q_{\text{input}}=1, 2, 4$. Both turbulent and zonal parts of the energy are shown in each case.

(C) MHD-イオン系乱流間の多階層非線形相互作用の解明

本研究では、マクロな磁気島とマイクロなイオン系乱流が混在した多階層シミュレーションを行い、それらの多階層間相互作用をまず線形領域において解析した。詳細は、平成 23 年度共同研究中間報告書に記載済みのためここでは省略するが、流体シミュレーションで行われた同様の先行研究と比較して、イオン系乱流の成長率が磁気島の幅の変化に大きく依存しないことを明らかにした。

達成状況は、線形における多階層相互作用の解析は概ね終了したものの、磁気島中で起きるイオン系乱流輸送に起因した温度分布の緩和現象や帯状流の形成メカニズムなどの多階層非線形相互作用に関しては、現在もなお解析中である。

3-2. 原子・分子過程を取り入れた粒子シミュレーションコードの開発と応用研究

(A) 相転移コード (EPIC3D) の開発の高度化

EPIC3D には、荷電粒子間の衝突・緩和過程モデルとして、衝突前後の運動量、およびエネルギーを相対論的に厳密に保存する pairing 法を、モンテカルロ法と併用して用いている。これにより、電子の平均自由行程に対して温度勾配のスケール長が同程度となり、Fick の法則 (拡散近似) が成立しない状況下での非局所熱伝導過程が正しく再現することができる。原子過程に関しては、電磁場によるトンネル電離過程と電子衝突による電離過程が実装されている。電子衝突による電離過程に関しては、衝突緩和過程に pairing 法を使用していることを利用して、衝突緩和で用いた電子・原子(イオン)の pairing を用いている。ただし、3 体再結合過程については、3 対の pairing が必要なことや、衝突前の 2 つの電子のエネルギーをパ

物理過程	要因	素過程	
電離過程	光電離過程	トンネル電離	単一・多光子吸収電離
	電子衝突	外殻電離	内郭電離
再結合過程	電子衝突	放射性再結合	2 電子衝突再結合
		3 体衝突再結合	電子付着負イオン生成
内部励起過程	電子衝突		
分子過程	電子衝突	分子解離	イオン対生成

Table 3 : Atomic process installed and/or planned atomic and molecular process.

ラメータとする断面積の入手が容易でないことから、今後、適切なモデル化が必要である。また、トンネル電離および単一・多光子吸収電離による光電離過程も実装されており、再結合過程・内部励起については今後導入予定である。Table 3 に、導入されている原子過程（予定を含む）を示す。

(B) プラズマ相転移現象の応用研究

B1 放電・雷過程のシミュレーション

プラズマ相転移の典型例として、放電・雷過程のシミュレーションを行い、それらの現象で普遍的に観測される突発性と構造形成の研究に取り組んできた。Fig. 4 は、ネオン(Ne)の高圧ガス(密度： $4.6 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$)に静電界($1.1 \times 10^7 [\text{V/cm}]$)を印加したとき、初期に配置した Ne^{+2} の微小な電離スポットから放電が進行する様子を示した結果である。初期に配置した電離スポットから、高電界によって線状の放電経路が生成され、それが左右に発展している様子が分かる。プラズマは、中央に形成された放電路から左右に急速に広がっていく。

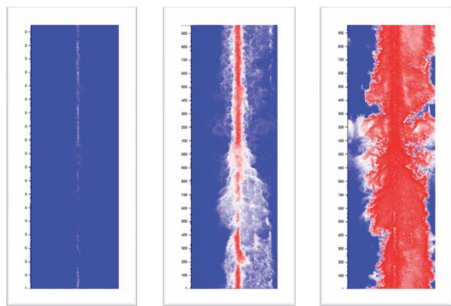


Fig. 4: Density profile of Ne ion discharged by strong external electric field at $t=15[\text{psec}]$, $20[\text{psec}]$, $25[\text{psec}]$.

これまでは実空間 2 次元配位であったが、今後は、超並列計算による 3 次元シミュレーションを実現する必要がある。Fig. 5 は、EPIC3D で 3 次元

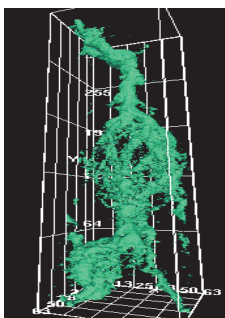


Fig.5: 3 dimensional simulation of discharge process of compressed Neon gas using EPIC3D. Electron density distribution is shown at the instantaneous time of discharge.

の放電シミュレーションの初期結果を示している。これまで 2 次元で見られたような放電の突発的な発生や放電路の枝葉構造などが再現できている。

B2 高強度レーザーとクラスターの相互作用シミュレーション

原子クラスターは少数多体系として興味深い研究対象である。このようなクラスターに高強度レーザーを照射すると、高エネルギーの多価イオンの生成や粒子加速、クラスターからの高次高調波や高輝度 X 線、また高強度・短パルスの中性子源や核変換など、様々な応用研究が考えられている。本研究では、EPIC3D を用いて高強度レーザーと炭素クラスターの相互作用とそれに伴う高エネルギーイオンの生成の大規模シミュレーションを行い、特定なクラスターサイズにおいて加速効率が格段に増大する現象を見出すことに成功した。

Fig. 6 は、電子密度とイオン密度の各時刻での空間分布を示している。初期にクラスターからの電子の放出に伴ってイオン膨張が起こり (100fsec)、その後、クラスターは小さくなり、核が消失して均一なプラズマが生成される (500-700fsec)。Fig.7

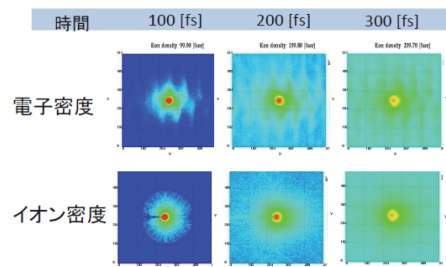


Fig. 6: Density profiles of ion and electron in the cluster with $a=200[\text{nm}]$

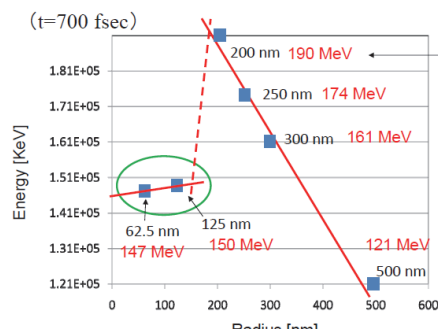


Fig. 7: Maximum energy for the accelerated ion in the cluster with different cluster radius.

は、イオンの最大加速エネルギーのクラスター半径依存性を示している。クラスター半径が増大すると不連続的に加速エネルギーが増大し、適正な半径が存在することが分かった。

B3 高強度短パルスレーザーと固体薄膜の相互作用に関するシミュレーション

レーザーと物質が相互作用すると、レーザー場が進入できない固体内部においても電離波が高速で伝播して短時間にプラズマ状態になるが、その詳細な過程は明らかでない。ここでは、光学的に透明である炭素薄膜 ($Z=6$) (但し、密度は固体の $1/20$ に設定: $n=n_s/20=0.88 \times 10^{22}/\text{cm}^3$) に集光強度 $5.07 \times 10^{19} \text{ W}/\text{cm}^2$ ($a_0 = 5.0$)、波長 820nm 、パルス長 100fsec (Gauss 分布形状) の高強度レーザーを照射したときの電離ダイナミックスを、EPIC3D を用いて解析した。

Fig. 8 は、(a) $2.9 < t < 10.5\text{fsec}$, (b) $10.5 < t < 23.5$, (c) $23.5 < t < 34.6$, (d) $34.6 < t < 120$ の各時間における電子の空間密度分布 (n_e) を示している。初期には、1 価から 2 価に変化するなだらかな階段状の分布を有する電離波が光速で伝播している (Fig. 8(a))。これは、強度の比較的弱いレーザー場先端部初期には薄膜内部に透過し、そのレーザー場による場電離によるものである。2 価のプラズマ生成に伴い薄膜内部のレーザー場は遮断され、相互作用表面で反射される。この時刻から表面では電離が進み、4 価が徐々に生成される。その後 4 価は急峻な電離波面を保ちながら薄膜内部に向かって高速で伝播し、裏面に達する。この波面速度は $1.2 \times 10^8 \text{ m}/\text{sec} (=v_F)$ で光速の $1/3$ を上回る。4 価の電離波が裏面に到達した後は、薄膜の両面に形成されたシース電場に閉じ込められた高エネルギー電子による衝突イオン化によって、5 価を経由して薄膜全体に 6 価が緩やかに形成されていく (Fig. 8(d))。レーザー強度がピークに達する $50\text{--}60\text{fsec}$ からは、空間的に局在した電子およびイオンの衝撃波が形成され、薄膜中を伝播していく様子が見られる (Fig. 8(d))。

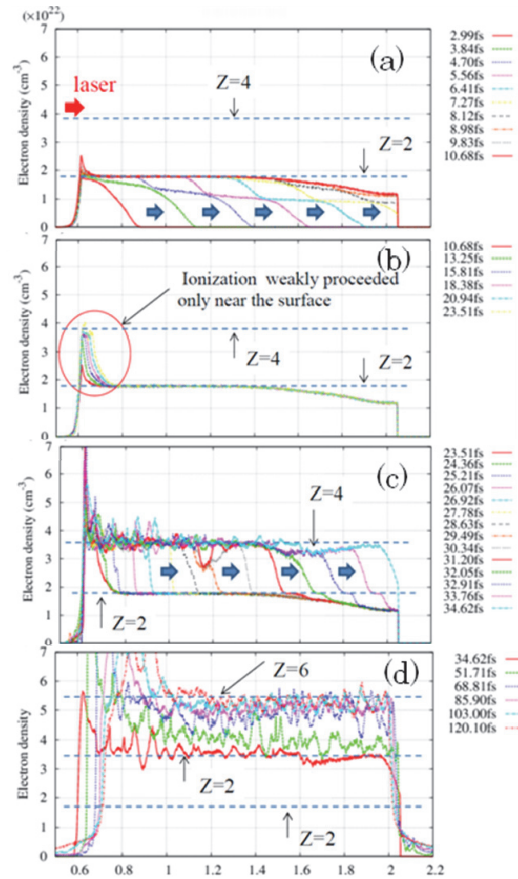


Fig. 7: Electron density profiles after laser hits the carbon film at each time of (a) $3.0 < t < 10.6$, (b) $10.65 < t < 23.5$ and (b) $23.5 < t < 34.62$ $23.5 < t < 34.6$, (d) $34.6 < t < 120$. Dashed line represents the density corresponding to the fully ionized $Z=2, 4$ and 6 plasmas. The initial carbon density is $n=n_s/20$.

4. 今後の展望

「位相空間 5 次元ジャイロ運動論的 Vlasov コードの再構築」については、京都大学学術情報メディアセンターから既に提供されている並列指向型 Poisson solver の実装を、本研究期間中を目途に行っていく。「開放系核融合プラズマ中の非局所輸送現象の解明」については、コードをより現実に近いトロイダル配位に拡張し、スラブ配位において明らかとなった「熱の入力値を大きくしても、帯状流のエネルギー配分率が低下し、温度分布が硬直化する」を示し、今まで明らかになっていなかった温度分布の硬直化現象を定性的に説明することを目指す。「イオン系乱流間の多階層非線形相互作用の解明」については、非線形シミュレーションを行い、磁気島中で起きるイオン系乱流輸送に

起因した温度分布の緩和現象、及び帯状流の形成メカニズムを解明し、磁気島構造によってどの程度乱流輸送が変化するかを定量的に評価する。

また、多彩な原子・分子過程や衝突緩和過程を通して生成される非平衡・非定常なプラズマ状態を高精度で再現する粒子コード(EPIC3D)は、プラズマ相転移に関わる様々な応用研究を実現し、これまでの初期にプラズマ過程したシミュレーションを大きく発展させることができた。今後、ペタフロップスレベルのシミュレーションを目指して、負荷分散型の並列化手法(Ohhelp) などを取り入れて、コードの高度化を行っていく予定である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[1] J. Q. Li, K. Imadera, P. Hilscher, Y. Kishimoto and Z. X. Wang, “Multi-scale turbulence simulation in magnetic fusion plasma”, *Progr. Nucl. Sci. Tech.*, **2** (2011) 64.

[2] 岸本泰明, “物質の電離ダイナミクスと構造形成のシミュレーション”, *プラズマ・核融合学会雑誌*, **84** (2008) 484.

(2) 国際会議プロシーディングス

[3] T. Kawano, K. Imadera, J. Q. Li and Y. Kishimoto, “Numerical Method for Eulerian Vlasov simulation based on the multi-moment scheme”, *J. Plasma Fusion Res.*, **6** (2011) 2401097.

[4] S. Miyata, J. Q. Li, K. Imadera and Y. Kishimoto, “Gyrofluid simulation of slab ITG turbulence in plasmas including pressure profile corrugation”, *J. Plasma Fusion Res.*, **6** (2011) 2403113.

(3) 国際会議発表

[5] Y. Kishimoto, K. Imadera, P. P. Hilscher and J. Q. Li, “The role of meso-scale structures on global profile relaxation and spectrum”, 1st Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Toki, Japan, June, 2011.

[6] K. Imadera, Y. Kishimoto and J. Q. Li, “Global

profile relaxation and entropy dynamics in turbulent transport”, US-Japan JIFT Workshop -Turbulent and neoclassical flow generation and associated transport dynamics-, Long Branch, U.S.A., September, 2011.

[7] K. Imadera, Y. Kishimoto and J. Q. Li, “Study of entropy transport using gyrokinetic simulation in open system”, Plasma Conference 2011, Kanazawa, Japan, November, 2011.

[8] Y. Kishimoto, N. Iwata, A. Sugahara, S. Nakano and T. Matsuda, “High power laser-matter interaction including atomic and relaxation processes”, The Seventh International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2011), Bordeaux, France, September, 2011 (Poster).

(4) 国内会議発表

[9] 今寺賢志, 岸本泰明, 李継全, “開放系プラズマにおける非局所熱輸送に関するジャイロ運動論的解析”, 『燃焼プラズマでの輸送特性の理解と予測の高精度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する体系的研究』および『閉じ込め・輸送サブクラスター会合』合同研究会, 土岐市, 2012 年 1 月.

[10] J. Q. Li, Y. Kishimoto, K. Imadera, P. P. Hilscher and A. Mao, “Response of micro-fluctuation and ion heat transport to MHD island dynamics in multi-scale turbulence simulation”, 日本物理学会・プラズマ学会 2012 年春季大会, 西宮市, 2012 年 3 月.

[11] P. P. Hilscher, Y. Kishimoto, K. Imadera and J. Q. Li, “Effect of a magnetic island on ITG driven turbulence”, 日本物理学会・プラズマ学会 2012 年春季大会, 西宮市, 2012 年 3 月.

[12] 今寺賢志, 岸本泰明, 李継全, “開放系プラズマにおける非局所輸送に関するジャイロ運動論的解析”, 日本物理学会・プラズマ学会 2012 年春季大会, 西宮市, 2012 年 3 月.