小特集

異なった時空間スケールが関与する多階層プラズマシミュレーション 現状からの展望

4. レーザー核融合プラズマにおける 多階層シミュレーション研究の展望

三 間 園 興, 長 友 英 夫, 坂 上 仁 志¹⁾
(大阪大学レーザー核融合研究センター, ¹⁾姫路工業大学工学部)

Prospect for Multiple Time and Spatial Scale Simulation Research of Laser Fusion Plasmas

MIMA Kunioki, NAGATOMO Hideo and SAKAGAMI Hitoshi¹⁾
Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, 565-0871, Japan,
¹⁾Himeji Institute of Technology, Himeji 671-2201, Japan
(Received 31 January 2003)

Abstract

Reviewed is the development of the integrated simulation code related to laser fusion plasma research. In particular, the simulation system for describing ultra-intense laser interaction with high density plasmas is discussed. In ultra-intense laser plasma interaction, the relativistic electron current reaches a few hundred mega amperes and generates strong magnetic fields which control the electron transport. Therefore, the simulation system should include particle-in-cell simulation for laser plasma interactions, Fokker-Planck simulation and hybrid simulation for transport and dense plasma heating, and radiation hydrodynamic simulation for laser implosion and fusion burning. This paper reports the present status of the research regarding those simulations and how the above 4 simulation codes are interconnected as parts of the study of multi-space-time scale laser fusion plasma phenomena.

Keywords:

laser fusion, ultra intense laser, fast ignition, integrated code, PIC code, Fokker-Planck code, radiation hydro code, hybrid code, relativistic electron, implosion, self-generated magnetic field

4.1 はじめに

レーザー核融合プラズマのダイナミックスは、高強度レーザーとプラズマが直接相互作用する比較的低密度のコロナプラズマ($10^{19} - 10^{21} / \text{cm}^3$)の物理過程と、爆縮により生じる固体密度の1,000倍以上($10^{26} / \text{cm}^3$)に達する超高密度のコアプラズマの物理過程が強く関連しあって生起する。コロナプラズマでは通常の高温希薄プラズマ同様 collision-less であり、運動論的取り扱いが不可欠である。一方、コアプラズマでは、その空間、時間スケールが衝突の平均自由行程や平均自由時間よりも遥かに大

author's e-mail: mima@ile.osaka-u.ac.jp

きく運動は流体力学により支配される。すなわち、レーザー核融合プラズマのシミュレーションでは、平均自由行程より遥かにスケールの小さい現象と遥かに大きい現象が混在した複雑系を総合的に取り扱うことが求められている。すなわち、レーザー核融合プラズマのシミュレーションでは、ミクロとマクロの現象を自己無撞着に取り扱うことが求められており、本質的に多階層的である。

最近、レーザーパルス幅がサブピコ秒でエネルギーが1,000 Jを超える超高強度レーザー(ペタワットレーザー)

の利用が日本をはじめ欧米でも可能となり、超高強度レーザーで生じる相対論的電子や高エネルギーイオンによる加熱で点火をめざす“高速点火核融合”が話題になっている[13]。この関連で、ペタワットレーザーを低Zから高Zの種々の原子種からなる多様な形状の固体やガスターゲットに照射することにより発生する超高温、かつ超高密度のプラズマ物理の解明が求められている。

この分野では、ペタワットレーザーで生じるGeVに達する電子やイオンの発生、輸送やそれに伴う陽電子や中間子の発生を含む極限プラズマのシミュレーション研究を進めることになる。この研究は、宇宙物理学、高エネルギーレーザー加速器、レーザー核物理学等の関連分野の研究にも波及するものである。すなわち、高速点火核融合の統合シミュレーションコードの開発は広い関連分野の研究の推進に役立つものであると言える。この第4章では、高速点火によるレーザー核融合のための多階層シミュレーションを中心に、高出力レーザープラズマシミュレーション研究の動向を展望する。

4.2 高速点火核融合プラズマのシミュレーション

高速点火核融合ではナノ秒の高出力パルスで発生させたプラズマにペタワット(10^{15} W)を超える超高強度レーザーパルスを入射し高エネルギーの電子やイオンを発生させ、超高密度プラズマを加熱する。この時の典型的なプラズマの空間分布はFig. 1に示すように密度が7桁にわたり変化し、プラズマのスケールはデバイ長の10万倍以上に達する。レーザープラズマ相互作用の記述にはデバイ長の分解能が不可欠であり、単一のシミュレーションコードで3次的に全体を記述しようとする 10^{15} の空間メッシュが必要となる。当然ながら、このようなシミュレーションは不可能である。したがって、レーザープラズマ相互作用をマイクロな粒子シミュレーション(PIC; Particle In Cell simulation)で局所的に記述し、全体は放射流体シミュレーション(R. Hydro; Radiation Hydro simulation)で記述する。

ペタワットレーザーで生成される高エネルギーイオンや相対論電子によるエネルギー輸送とプラズマの加熱の効果は、PICシミュレーションの結果をフォッカープランクシミュレーション(F.P. simulation; Fokker Planck simulation)やハイブリッドシミュレーション(Hybrid simulation)を経由して、R. Hydroシミュレーションに取込むFig. 2上部には、超高強度レーザーを核融合ペレットのような固体ターゲットに照射した時の非線形波動現

Fig. 1 Plasma density profile and the corresponding simulation codes for the integrated fast ignition simulation.

象や高エネルギー電子やイオンおよびそれらと原子核反応等によるいろいろな量子ビームの発生の様子を示す。このような、大規模な相対論的な電磁プラズマ現象の総合的記述は、4種類のシミュレーションコードを結合することで可能となる。それぞれのシミュレーションコードで記述される物理は以下のとおりである。

粒子シミュレーションコードは、ペタワットレーザーを固体ターゲット、もしくは爆縮された高密度プラズマに照射した時の自己収束、誘導ラマン散乱や高エネルギー電子の発生や超短パルスのテラヘルツ放射などの超高強度レーザーとプラズマとの相対論的非線形相互作用を記述する。とくに、高速点火では、高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用により発生する数MeVから数十MeVに達する高電流密度の電子流に伴う電磁流体現象や、高エネルギーイオン集団加速等のシミュレーションが重要である。ここでは、アルヴェン極限電流の数千倍に達する相対論電子電流と高密度プラズマとの相互作用により、電子フィラメントの発生とそのマーキングによる大規模電子流チャネルの形成、および電磁流体乱流の発生と異常阻止能等が生じることが知られている。これらの現象の典型的な空間スケールは電子のスキンドープス程度($0.1 \mu\text{m}$ 前後)であり、時間スケールは電子プラズマ振動数やレーザー周期のオーダー(1 fs程度)となる[45]。

100 MAで数十MeVの電子流と大規模な固体密度を超える高密度プラズマとの相互作用を記述するには、放射流体コードと結合したハイブリッドコードやフォッカープランクコードを用いる。フォッカープランクコードでは、相対論電子の流れに伴う自発電界、磁界の効果ならびにクーロン衝突によるエネルギー緩和な

Fig. 2 Physical processes in ultra intense laser plasma interactions and related simulation codes. The simulation results are compared with the experimental observations of laser induced high energy photons and particles.

どをプラズマの原子過程や状態方程式の変化等を含めて相対論電子の輸送とプラズマ加熱を記述することになる[6].

ハイブリッドコードでは、粒子コードのより運動論的に相対論電子の伝搬特性を記述するとともに、バックグラウンドの高密度プラズマを電磁流体としてとして取り扱い、クーロン衝突、原子過程や状態方程式の効果が含まれる。また、高エネルギー電子やイオンと物質との相互作用による高密度の中性子、陽電子、中間子や γ 線の発生等の過程もセルフコンシステンに記述することが考えられる。

上記の ~ のシミュレーションの結果を総合し、マクロの現象として実験的に観測される結果とシミュレーションを対比するため、放射流体コードシミュレーションコードが用いられる。このような、複数種のシミュレーションコードを結合した統合シミュレ

ーションシステムの確からしさの検証には、レーザー爆縮実験や、ペタワットレベルでのレーザープラズマ中での高エネルギー電子流に伴う電磁流体现象の実験をおこない、それらのデータと高エネルギー密度プラズマの放射流体シミュレーションの結果が比較される。以上のような統合シミュレーションシステムを利用することで、局所的短時間の現象であるための実験的な観測の困難性を克服し、高速点火の予測性を高めたり、ペタワットレーザーによる高輝度、高エネルギー量子線の科学技術研究や産業への応用を開拓することが可能となる。

Fig. 2の下部には、超高強度レーザーを固体ターゲットや爆縮プラズマに照射した時にカスケード的に起きる物理過程の多階層性に対応するシミュレーション手法が示されている。非常に強いレーザー電磁場により、高密度の相対論電子が発生する。この過程はサブミクロン、

サブピコ秒の現象である．この電子群がプラズマや原子核と相互作用することで、短パルスの電磁波、高エネルギーイオン、ハードX線、 γ 線、陽電子、放射性原子核や中間子を発生する．この時の空間スケールは電子の平均自由行程より数百 μm 、時間スケールは数psとなる．このような種々の高エネルギー量子線がいろいろな2次反応を起こすことで、核融合や種々の原子核反応、物質の構造変化などを引き起こす．この時の、プラズマや物質のダイナミックスの空間、時間スケールはナノ秒、ミリメートルになる．

4.3 具体的な現象例；相対論電子の発生・輸送・緩和

超高強度レーザーにより相対論電子がプラズマの表面から打ち込まれた時、フィラメントに分裂しながら侵入することが実験 (Fig. 3上) 粒子シミュレーション

(Fig. 3下) により発見されている．シミュレーションではフィラメントのスケールはサブミクロンであり、この分解能を保证するには現在の計算機的能力より3次元粒子シミュレーションではせいぜい $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ のスケールが限度である．この時の計算に使われるメモリは100 Gbytesをこえる．一方、電子輸送の基礎実験においても、プラズマのスケールは $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ であり、これを粒子コードによりシミュレーションすることは現状のコンピュータでは不可能である．さらに、核融合研究においては、Fig. 4の例で示されるように、レーザー照射やプラズマのスケールはミリメートルに達する．この場合でも、局所的な磁場構造や高エネルギー電子の分布はプラズマのスキンドプス； $c/\omega_p \sim 0.1\mu\text{m}$ のスケールの構造を持つ．Fig. 3にも見られるように、ミクロな磁界や電子のフィラメントが時間空間発展する結果、実験で観測されるような大規模な構

Fig. 3 Relativistic electron transport experiment(up) and a PIC simulation on electron transport (down). The current profiles of above 1 MeV electron and below 1 MeV electron and return current, and magnetic fields are shown [4].

Fig. 4 A photograph of a cone shell target (right up) and PIC simulation results for cone-laser interaction (a, b, c, d,) which are magnetic field structure, electron energy density distributions on the side wall and at the top of the cone, and laser pulse propagation in the cone, respectively [5].

Fig. 5 Radiation hydrodynamic simulation by ALE-CIP simulation (ALE; Arbitrary Lagrange- Euler method). Plasma density contours are shown for a cone shell target implosion.

Fig. 6 Data link-age between 4 simulation code for the integrated simulation of fast ignition.

造を形成すると思われるが、その詳細の検証には統合シミュレーションシステムが必要となる。

電子プラズマ波のような高速でデバール長やスキンドープスのスケールの現象を平均化してより大きいスケールの現象を追跡するため、フォッカープランクシミュレーションと放射流体シミュレーションの組み合わせが用いられる。Fig. 5にその一例を示す。金のコーンの先端に付けたプラスチックのペレットをナノ秒のレーザーで爆縮した時の様子を流体シミュレーションしたものである。(a)は爆縮途中で、半径が1/4まで収縮した時の様子を示している。(b)から(c)はコーンの先端にプラズマが集積しつつある過程を示しており、(c)から(d)は最大圧縮の時の様子を示したもので爆縮プラズマがジェットを形成してコーンに侵入するのが示されている。この爆縮シミュレーションと粒子コードおよびフォッカープランクコードによる超高強度レーザー加熱のシミュレーションが組み合わせられると高速点火核融合の総合的なシミュレーションが可能になる。

4.4 シミュレーションの統合化の考え方

レーザーとプラズマの相互作用による高エネルギー電子の発生など、高速かつミクロスコピックな現象はPICコードやHybridコードで記述することになる。これら

のコードによるシミュレーションのプラズマの初期配位、すなわち密度や温度分布はFig. 6に示すように輻射流体シミュレーションの結果より取ってこられる。PICシミュレーションの結果である高エネルギー電子やイオンの運動量分布はHybridシミュレーションやF.P.シミュレーションへのインプットデータになる。電荷中性や質量保存が維持されるためにPIC、やHybridシミュレーションシステムからPICシミュレーションに電子やイオンが境界より供給される。高エネルギー電子とbackground electronとの相互作用が強くkinetic Weibel instabilityとそれに伴う電磁流体乱流が高密度プラズマの原子過程やクーロン衝突と共存する場合にはPICのデータはHybridを経由してF.P.コードに伝達されることになる。

F.P.シミュレーションやHybridシミュレーションの結果はエネルギー伝達としてR. Hydroシミュレーションに用いられる。また、F.P.シミュレーションでは核融合反応など原子核反応や陽電子 γ 線発生等の素過程も計算し、いろいろな高エネルギー量子の発生に関する実験結果と直接対応できる結果を提供する。R. HydroシミュレーションからはF.P.やHybridシミュレーションに密度分布、温度分布、原子状態、電気伝導度などのデータが与えられる。さらに、高エネルギー電子輸送に伴う強

い磁界が発生する場合は、R. Hydro シミュレーションの電子熱伝導に磁界の効果を含める必要がある。以上のような物理情報を交換することで、4つのシミュレーションがリンクして1つの現象を追跡することになる。

高速点火核融合や超高強度レーザープラズマの理論研究ではこのような形での統合シミュレーションが可能になることをめざして研究を進めている。

参考文献

- [1] K. Mima, J. Plasma Fusion Res. 74, 319 (1998).
- [2] Fast ignition of ICF targets: an overview, Meyer-ter-Vehn J, Plasma Phys. Control. Fusion 43, A113-A125 Suppl. 12A DEC 2001.
- [3] R. Kodama, P.A. Norreys, K. Mima, A.E. Dangor, R.G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S.J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K.A. Tanaka, Y. Toyama, Y. Yamanaka and M. Zepf, Nature 412 (6849): 798 (2001).
- [4] Y. Sentoku, K. Mima, S. Kojima and H. Ruhl, 7 (2), 689 (2000).
- [5] M. Honda, J. Meyer-ter-Vehn and A. Pukhov, 85 (10), 2128, 4 (2000).
- [6] T. Taguchi, T.M. Antonsen, C.S. Liu and K. Mima, Phys. Rev. Lett. 86 (22), 5055 (2001).