

# 高強度レーザーによる高密度プラズマの加熱シミュレーション

千徳 靖彦

大阪大学 レーザー科学研究所

## 1. はじめに

レーザー工学の発展によりレーザー強度は相対論的強度( $>10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>)に達し、高強度レーザーによる固体の直接加熱が可能となってきた。発生するプラズマはフェムト秒からピコ秒といった極めて短い時間で形成され、高密度で熱的非平衡状態にある。レーザーにより加速された高速電子が、プラズマ生成・加熱に強く関与する。また高温プラズマから発生するX線やガンマ線を観測することでプラズマ内部の温度・密度あるいは高速電子分布の測定が行われている。加熱された物質のエネルギー密度は  $10^{11}$  J/m<sup>3</sup> (1Mbar)を超え、太陽内部と同様な高エネルギー密度と呼ばれる極限状態になる (図1参照)。

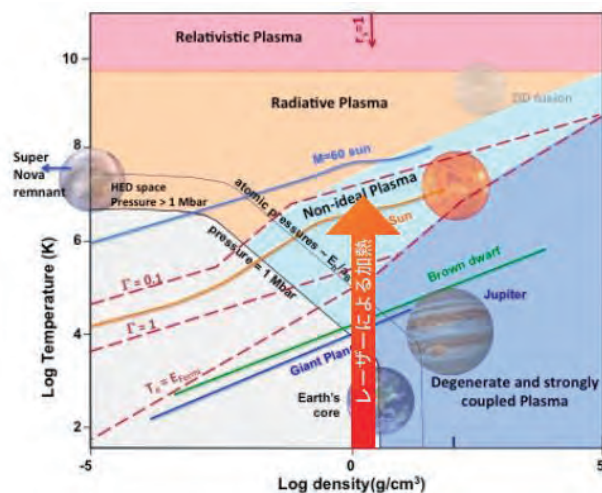


図1 密度と温度のマップ。固体( $\sim 1$ g/cm<sup>3</sup>)を高強度レーザーで1000万度以上に瞬間的に加熱する。生成されたプラズマのエネルギー密度は太陽の内部状態と同じである。

そのようなプラズマは慣性核融合や、恒星や巨大惑星の内部の物理の観点からも興味深い研究対象である。また、高速電子輸送は数十キロテスラに達する磁場の発生を伴うので、強磁場下におけるプラズマ物性研究としても、近年注目されているとともに、軟X線からガンマ線まで幅広い高輝度X線源としても期待されている。国内では大阪大学レーザー科

学研究所や量子科学技術研究開発機構他で相対論的強度のレーザーを用いた実験が行われており、レーザー核融合[1,2]、高密度プラズマ物性、テラヘルツ波・高調波発生、粒子加速などの研究が展開されている。

高強度レーザーと物質の相互作用は、レーザーのパルス幅がフェムト秒からピコ秒で、スポット径がミクロンスケールであるため、極めて短時間に極小の空間で起こる。そのため現象の観測が難しく、計測されるデータのみでは物理現象の詳細を把握することができない。そこで数値シミュレーションによる実験解析が行われる。高強度レーザー生成高密度プラズマは、熱的に非平衡であるため流体近似が使えないため、プラズマを粒子群とする運動論的なシミュレーションが必要であり、Particle-in-Cell (PIC) と呼ばれるプラズマ電磁粒子コード(以下 PIC コード)が広く使われている。

著者らのグループは多次元 PIC コード(PICLS)を開発し[1]、大規模並列計算機を活用して高強度レーザーの吸収、電子加速、イオン加速および高速電子輸送などの研究を行ってきた。また、相対論クーロン衝突モデルおよびイオン化モデルを開発し、原子過程を含めることで、高エネルギー密度状態のプラズマ生成過程をPICで解明している。

## 2. 支援枠を活用したシミュレーション

### 2.1 コードの改善について

今回、「大規模計算機システム公募型利用者制度」の支援を受け、2次元PICLSコードを用いて、高強度レーザーによる高密度プラズマの加熱に関するシミュレーションを行った。シミュレーションの結果を紹介する前に、大規模PICLSシミュレーションの出力部を、対面相談によるアドバイスにより改善することができたので報告する。

高密度プラズマのシミュレーションは、大量のプラズマ粒子の軌道を計算するため、必要なランタイムメモリーがテラバイト級の大規模並列計算が必要である。並列数が高くなるに連れ、CPU 毎に分散している結果を出力すると、ファイル数が膨大になりシステム運用上問題がある。そのため通信してファイルを一箇所に集め合成し出力していたが、大きな配列を割り当てる必要があり、それが大規模計算のネックになっていた。対面相談でのアドバイスにより、並列計算の分散データを通信することなしに、一つのバイナリーデータとして書き出す方法 (`mpi_file_set_view`, `mpi_file_write` 等を使用) をアドバイスいただき、コードに反映し、出力ファイル数及びランタイムメモリーの大幅な削減ができた。これにより PICLS コードを利用する他の共同研究者の HPCI 利用の利便性を大幅に向上できたので、ここで CMC での対面相談アドバイスに感謝を表したい。

## 2.2 爆縮プラズマの加熱のシミュレーション

今回実施したシミュレーションは、レーザー研で行われた高速点火核融合実験の解析を目的とする。実験では図 2 に示すような金コーンに取り付けられた球状ターゲットを、6 ビームのレーザーで爆縮し、最大密度に圧縮されたタイミングで、コーンの側から高強度レーザー[4]を照射して、圧縮したターゲットを加熱し 1000 万度以上の温度を目指している。最大圧縮時のプラズマ密度を初期条件とし (図 3 参照)、加熱の検証を PICSL コードで行った。実験ではドーブした銅の発光から爆縮したプラズマ密度を同定している。データから最大圧縮密度は 10g/cc、つまり密度は初期密度から 10 倍以上に圧縮されている。加熱レーザーを照射する前のプラズマ温度は数万度程度である。

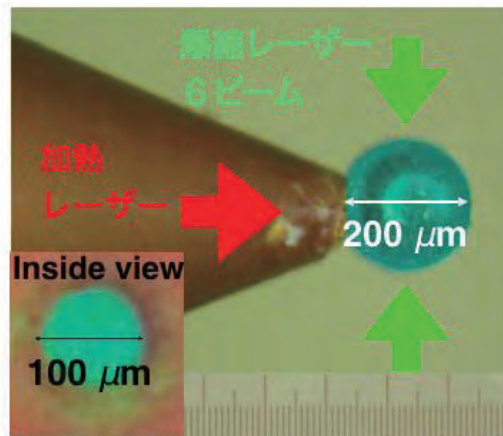


図 2 金コーンに取り付けられた球ターゲット。この球ターゲットを激縮レーザー6ビームで爆縮する。その後、コーン内側から加熱ビームを照射し加熱する。

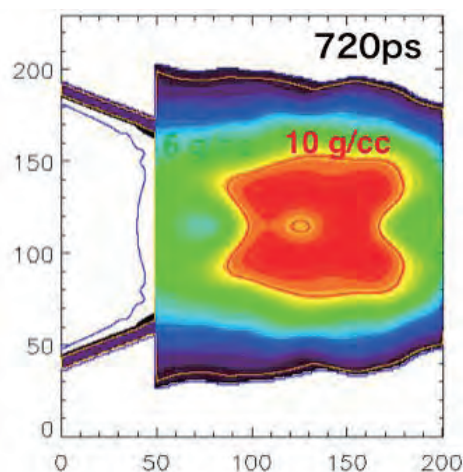


図 3 シミュレーション初期プラズマ密度。実験の最大圧縮時 (爆縮レーザー照射後 720ps) の密度から設定。中心はおよそ固体の 10 倍に圧縮されている。

## 2.3 シミュレーション条件

シミュレーション空間は  $200\mu\text{m} \times 240\mu\text{m}$  (7000 x 8000 グリッド使用)、各グリッドに 25 程度の粒子を配置し、使用したトータル粒子数は 14 億個、必要メモリーは約 300GB、200-400 コアで MPI 並列計算を行った。計算時間は 4 ピコ秒、およそ 5 万ステップである。左側境界から、ピーク強度  $1.6 \times 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$  の加熱レーザーを 1.5 ピコ秒照射した。レーザーのスポットサイズは  $50\mu\text{m}$  で、プラズマは実験と同様に数密度 1% で銅イオンを含んでいる。シミュレーションでは、電磁波 (レーザー) の伝播、イオン化、衝突による熱伝播と言った物理過程を自己無撞着に計算する。

実験では銅イオン (完全電離で 29+) が 27 価と 28 価まで加熱でイオン化されている兆候が得られてい

る。銅を 27 価までイオン化するためには背景プラズマの温度が keV 以上に加熱されていることが予測されている。そのため、シミュレーションにおいても、背景プラズマの温度とともに、ドーピングしている銅イオンが 27 価以上にイオン化している領域がどこにあるのかを追跡している。

## 2.4 シミュレーション結果

図 4 は加熱レーザー照射後 3 ピコ秒程度後のプラズマの温度分布（上パネル）とドーピングした銅イオンが 27+価以上にイオン化している領域（下パネル）を示している。加熱レーザーは左側境界から照射され、プラズマ表面（ $X=50$  ミクロン）で吸収され、プラズマにエネルギーを変換している。表面近傍は 1 億度（10keV）程度に達し、数十ミクロンの領域が 1 千万度（keV）以上に達していることがわかる。また、プラズマの温度上昇に伴い、ドーピングしている銅イオンのイオン化が進み、27+以上の領域が右側に  $\sim 10$  ミクロン/ps 程度のスピードで伝播していくことが明らかになった。実験では  $\text{Cu}28+$ からの  $\text{He } \alpha$  (8.4keV)や  $\text{Cu}27+$ からの Li-like(8.35keV)の X 線スペクトルが観測されているが、これら硬 X 線は、加熱レーザーで加熱された領域から発していることが明らかになった。

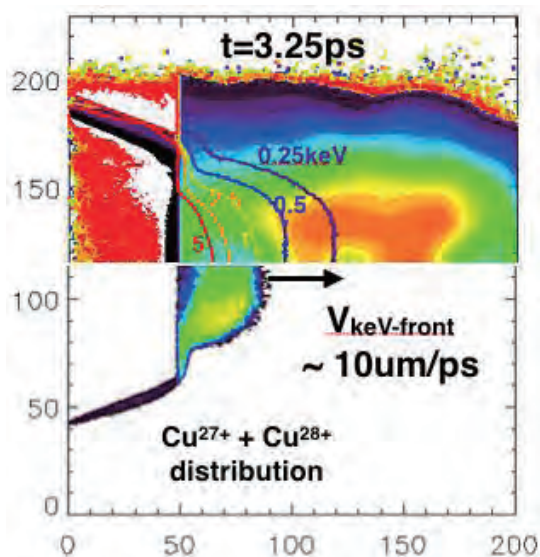


図 4 2次元PICLSによるシミュレーション結果。(上)加熱レーザー照射後 3.25 ピコ秒時のプラズマの温度の等高線図。(下) 27+以上の銅イオンの分布。加熱レーザーは左側から照射されている。レーザー加熱により熱波が伝播し、それに伴いドーピングした銅イオンが高次にイオン化していく様子が見れる。

## 3. おわりに

レーザー核融合を実現するためには 100 倍に圧縮したプラズマを 5 千万度まで加熱する必要がある。現在はまだ 10 倍の圧縮に止まっているが、加熱レーザーで数千万度まで加熱されることを数値シミュレーションで実証したことに本研究の意義がある。計算結果は実験で得られたデータを説明することができ、加熱理論と実験データの検証を行うことができた。

一般的に高密度プラズマの粒子シミュレーションは、計算すべき粒子数が膨大であり容易ではない。しかし最新のスーパーコンピュータを駆使することで、これまで明らかになっていなかったプラズマの加熱機構が徐々に明らかになりつつある。今後は、3次元シミュレーションを含め、さらに大きなシミュレーションに取り組む必要がある。

## Acknowledgement

この研究は平成 29 年度「大規模計算機システム公募型利用者制度」の支援を受け行った。また、科研費 JP15K21767 の支援を受けている。

## 参考文献

- (1) M. Tabak et al., Phys. Plasmas **1**, 1626 (1994).
- (2) R. Kodama et al., Nature **412**, 798 (2001).
- (3) Y. Sentoku and A. J. Kemp, J. Comput. Phys. **227**, 6846 (2008); R. Mishra, P. Leblanc, Y. Sentoku et al., Phys. Plasmas **20**, 072704 (2013).
- (4) N. Miyanaga et al., J. Phys. IV Fr. **133**, 81 (2006).