

## 小特集 レーザー核融合における新点火方式：衝撃点火

### 3. 2次元統合シミュレーション

長友英夫, 村上匡且

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

(原稿受付：2007年8月2日)

衝撃点火核融合は高価な超短パルスレーザーを必要としないなど魅力的な方式であるが、爆縮方法がやや複雑であるため多次元の数値シミュレーションによる定量的な評価が求められている。衝撃点火に含まれる基本的な物理は従来の中心点火方式のレーザー核融合と同じであることから、これまでに開発した2次元統合爆縮コードを拡張することによってシミュレーションを試みた。その結果、衝撃点火の加熱効果が顕著に見られ、この方式の可能性が示された。併せて、衝撃点火、およびそのシミュレーションにおける課題が明確になった。本論文では、衝撃点火に関するシミュレーション手法、典型的な計算結果、および今後の課題についてまとめた。

#### Keywords:

impact fast ignition, radiation hydrodynamic, computational simulation

#### 3.1 はじめに

レーザー核融合の新方式である衝撃点火は、高速点火方式と同様主燃料部分を高密度に圧縮し、それに高速 ( $1 \times 10^8$  cm/s) に加速したインパクターを衝突させる方式である[1]。超高強度レーザーを用いる高速点火方式では、加熱過程に相対論レーザープラズマ相互作用と高速電子輸送などスケールの異なる物理が含まれているため、計算シミュレーション手法に多階層シミュレーションを導入しないといけないなどの困難を伴う[2]。それに対して、衝撃点火方式は輻射流体力学が支配的で、物理的には従来の中心点火方式と知見を共有できる部分が多い。このため、数値シミュレーション手法に関しても従来の輻射流体運動を基礎方程式とする統合爆縮コードを拡張することによって実行可能である。しかし、球対称ターゲットが加速、圧縮される従来の中心点火方式の爆縮と比べ、加速される部分が主燃料とインパクターの2つある点が大きく異なる。しかも、それぞれが異なる速度で極めて高速で運動することから Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法における rezoning 方法を工夫する必要がある。本来、この種のシミュレーションでは計算格子を Lagrangian 的に動かすことによって解析精度を高めることが多いが、衝撃点火の場合はターゲットの運動が複雑で格子の再構築作業には困難を伴う。幸い、今回用いた PINOCO (Precision Integrated Numerically Observing Code for implosion) [2-3] は空間精度が高い Constrained Interpolation Profile (CIP) 法をベースとしているため、格子移動の制約は比較的緩いことから衝撃点火のシミュレーションが可能となった。

本論文では、衝撃点火の2次元シミュレーションで用いた手法の概要を紹介するとともに、典型的な衝撃点火のシミュレーション結果を紹介する。また、衝撃点火のシミュ

レーション解析は始まったばかりであり、その過程でいくつかの課題が明らかになった。今後の展開とあわせて紹介する。

#### 3.2 シミュレーション手法

従来の中心点火方式の爆縮と同様にアブレーション、衝撃波などの流体運動、レーザー光線追跡、レーザー吸収・電子加熱、熱伝導、輻射輸送、状態方程式、原子過程などを考慮した2次元統合爆縮シミュレーションコード PINOCO を利用する。PINOCO の流体部分は CIP 法を基本とする ALE コードであり、格子の移動速度を流体速度と一致させることによって Lagrangian コードとしての解析も可能である。しかし、衝撃点火では加速されるターゲットが2つ存在することが計算を困難にしているほか、ほとんど静止した状態の金コーンも同時に存在するため、Lagrangian 的に計算格子を動かしながら、破綻することなくシミュレーションを継続することは不可能に近い。PINOCO では移流項に高次精度の CIP 法を用いているため、不連続面は Lagrange 法に近い精度で捉えることができる。そこで、初期計算格子の条件として、ターゲット近傍と金コーン近傍の格子を密にし、ターゲットの重心速度に合わせてターゲット部分の格子が動くような、いわゆる「スライディングメッシュ」法を採用した。今回の計算では、クーラン条件によって決まる時間刻み幅が極めて小さくなることから、計算時間節約のため輻射輸送は考慮しなかった。ただし、金コーンが含まれる爆縮ではその影響が無視できないので、今後は輻射を考慮したシミュレーションも引き続き実施する予定である。

#### 3. Two Dimensional Integrated Simulation

NAGATOMO Hideo and MURAKAMI Masakatsu

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

### 3.3 衝撃点火のシミュレーション

#### 3.3.1 計算条件

衝撃点火の原理を実証するために、軸対称を仮定した2次元シミュレーションを行った。計算条件の概要を図1に示す。開き角120度の金コーンの内側にインパクトター (impacter), 外側に主燃料側ターゲット (impactee) をそれぞれ配置する。インパクトターの半径, およびシェル厚はそれぞれ900  $\mu\text{m}$ , および35  $\mu\text{m}$  で, 主燃料側ターゲットの半径, およびシェル厚はそれぞれ700  $\mu\text{m}$ , および35  $\mu\text{m}$  とした。計算の簡略化のためターゲットの材質はすべてプラスチック (CH) とした。金コーンは中心から距離が150  $\mu\text{m}$  以上の領域に存在する。計算は流体として扱われるため, 初期のシェル内部には密度が極めて低い ( $1 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ ) プラズマが充填されている。この希薄ガスを伝播する衝撃波が対向するターゲットに影響しないよう金コーン先端は閉じている。レーザーエネルギーはインパクトターに169 kJ, 主燃料側ターゲットに83 kJで, ガウス波形を重ね合わせたテーラードパルスにし, ターゲットの照射面に一様に照射している。また, 高いアブレーション圧力で加速することが有効であることから, レーザー波長は0.25  $\mu\text{m}$  とした。2次元の計算格子は330  $\times$  240点 (放射方向  $\times$  周方向) で, 両ターゲットと金コーン近傍の格子を密にし, 格子が荒い部分は格子間隔が連続的に変化するよう代数的に格子を発生させ配置している。

#### 3.3.2 計算結果

図2に加速途中の密度分布 (上), および計算格子形状 (下) を示す。計算の空間精度を上げるため, 計算の時間ステップごとに以下のような格子生成プロセスを行っている。即ち, 計算格子の密な領域を2ヶ所設定しそれぞれが主燃料側ターゲットとインパクトターの重心に沿って移動させる。外側境界や格子が密な領域以外の間は連続的に変化する計算格子を接続することによって全計算領域を滑らかな計算で網羅することができる。図中, 両側のターゲットはそれぞれ金コーン近傍では十分加速されず, 引きずられている。これはターゲットが十分加速される前に高温・高圧にさらされた金コーン表面から噴出したプラズマがターゲットに向けて照射されたレーザーエネルギーを吸収するため, ターゲットを十分加速させることができなくなっ

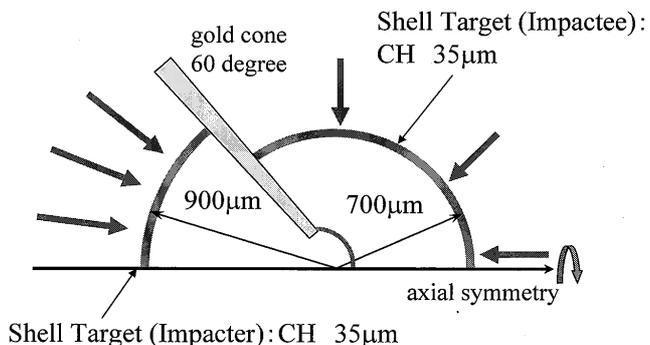


図1 衝撃点火の計算条件概要。左がインパクトター, 右が主燃料側ターゲット。金コーン先端は中心から150  $\mu\text{m}$  離れていて厚さ1  $\mu\text{m}$  の薄い蓋が付いている。

ていることによる。なお, 今回の計算では金コーン表面近傍に計算格子を多く配置したがそれでもせん断流れなどは十分に捉えられていない可能性がある。輻射輸送の金コーンへの照射を考慮した解析とともに今後の数値解析の技術的な課題に挙げられる。

対称軸上における密度とイオン温度の時間変化を図3に

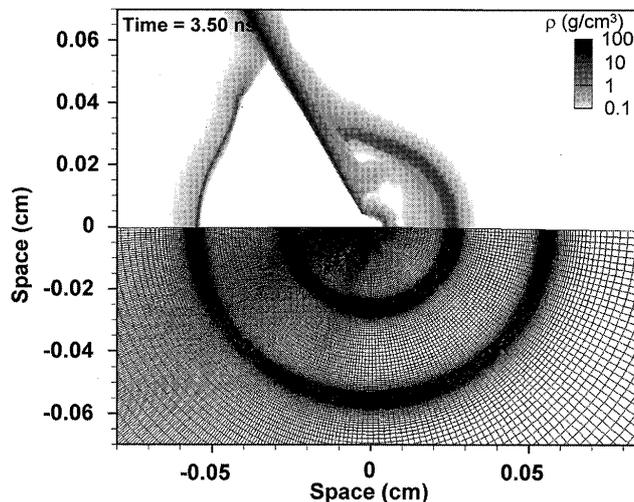


図2 爆縮過程の密度分布 (上), および同時刻の計算格子 (下)。左がインパクトター, 右が主燃料側ターゲットである。両ターゲットを含む領域, および金コーン近傍に格子を密に配置し, ターゲット重心の移動速度に従って格子が密な部分も移動する。格子が荒い部分は格子間隔が連続的に変化するよう代数的に格子を配置している。

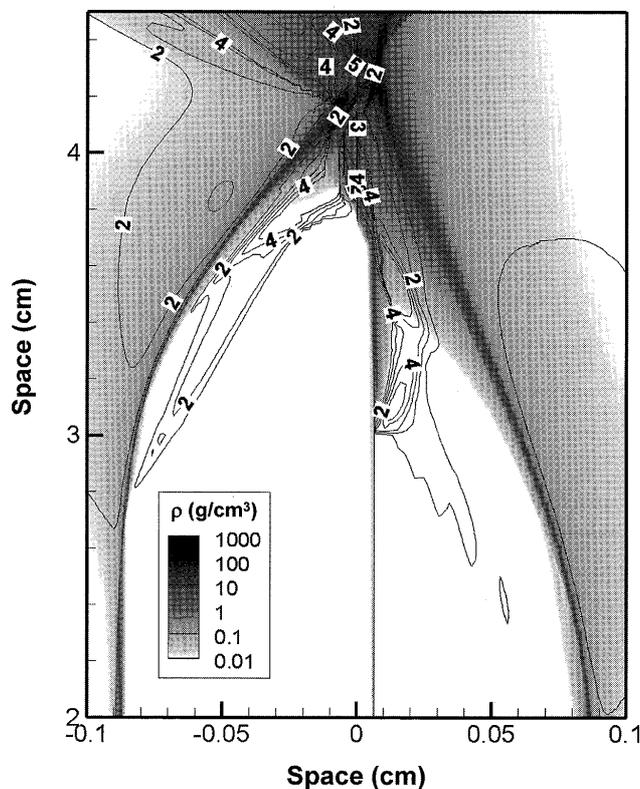


図3 軸上の密度分布 (色調:  $\text{g/cm}^3$ ), およびイオン温度 (等高線: keV)。横軸が軸上の中心からの距離 (cm), 縦軸がレーザー照射開始からの時刻 (ns)。

### 3.4 まとめ

衝撃点火の原理を実証するために2次元シミュレーションを実施した。その結果、インパクターが約 $1 \times 10^8$  cm/sまで加速され、高密度部分が5 keV以上まで加熱されていることが確認できた。一方、汎用的な衝撃点火のシミュレーションの実施には、また解決しなければならない技術的な問題がいくつか残されている。これらはシミュレーション研究にとっても興味深い課題であり、従来の高速点火のシミュレーション研究とともに開発を進めていく予定である。衝撃点火は2つの加速されるターゲットと金コーンが複雑に干渉するため、設計手法としてシミュレーションの役割は大変重要である。要素的な個別の物理的な問題の解析も含めシミュレーションを進めていく予定である。

### 謝辞

ここで紹介したシミュレーションは阪大レーザー研、および阪大サイバーメディアセンターの計算機を用いて実施した。関係者に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] M. Murakami and H. Nagatomo, Nucl. Instrum. Methods, A 544, 67 (2005).
- [2] 三間囿興他：小特集 高速点火核融合の統合シミュレーション, プラズマ・核融合学会誌 82, 135 (2006).
- [3] 長友英夫, 城崎知至, 砂原 淳, 三間囿興：プラズマ・核融合学会誌 82, 141 (2006).
- [4] H. Nagatomo *et al.*, Phys. Plasmas 14, 056303 (2007).
- [5] 境家達弘他：プラズマ・核融合学会誌 83, 636 (2007).

### 3.4 まとめ

衝撃点火の原理を実証するために2次元シミュレーションを実施した。その結果、インパクターが約 $1 \times 10^8$  cm/sまで加速され、高密度部分が5 keV以上まで加熱されていることが確認できた。一方、汎用的な衝撃点火のシミュレーションの実施には、また解決しなければならない技術的な問題がいくつか残されている。これらはシミュレーション研究にとっても興味深い課題であり、従来の高速点火のシミュレーション研究とともに開発を進めていく予定である。衝撃点火は2つの加速されるターゲットと金コーンが複雑に干渉するため、設計手法としてシミュレーションの役割は大変重要である。要素的な個別の物理的な問題の解析も含めシミュレーションを進めていく予定である。

### 謝辞

ここで紹介したシミュレーションは阪大レーザー研、および阪大サイバーメディアセンターの計算機を用いて実施した。関係者に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] M. Murakami and H. Nagatomo, Nucl. Instrum. Methods, A **544**, 67 (2005).
- [2] 三間圀興他：小特集 高速点火核融合の統合シミュレーション, プラズマ・核融合学会誌 **82**, 135 (2006).
- [3] 長友英夫, 城崎知至, 砂原 淳, 三間圀興：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 141 (2006).
- [4] H. Nagatomo *et al.*, Phys. Plasmas **14**, 056303 (2007).
- [5] 境家達弘他：プラズマ・核融合学会誌 **83**, 636 (2007).