

CIP 法に基づく統合爆縮コード開発と爆縮解析 II

Development of an Integrated Implosion Code based on CIP method for IFE II

- 長友英夫, 阪大レーザー研, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, E-mail : naga@ile.osaka-u.ac.jp
- 大西直文, 東北大工, 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail : ohnishi@cfm.mech.tohoku.ac.jp
- 三間罔興, 阪大レーザー研, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, E-mail : mima@ile.osaka-u.ac.jp
- 澤田恵介, 東北大工, 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail : sawada@cfm.mech.tohoku.ac.jp
- 西原功修, 阪大レーザー研, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, E-mail : nishihara@ile.osaka-u.ac.jp
- 高部英明, 阪大レーザー研, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, E-mail : takabe@ile.osaka-u.ac.jp

H. Nagatomo, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 N. Ohnishi, Dept. of Aeronautics and Space Eng., Tohoku Univ., Aobayama-01, Sendai 980-8579
 K. Mima, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 K. Sawada, Dept. of Aeronautics and Space Eng., Tohoku Univ., Aobayama-01, Sendai 980-8579
 K. Nishihara, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 H. Takabe, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

Physics of the inertial fusion is based on a variety of elements such as compressible hydrodynamics, radiation transport, non-ideal equation of state, non-LTE atomic process, and laser plasma interaction. In addition, implosion process is not in stationary state and fluid dynamics, energy transport and instabilities should be solved simultaneously. Recently, we have developed 2-D integrated implosion code based on CIP method which was described in ALE formation. To validate this code, simulations of Rayleigh-Taylor instability in laser driven foil target are performed. As a result, good agreement is obtained, comparatively. Using the code, implosion of spherical target with cone for first igniter scheme is simulated.

1. はじめに

レーザー核融合では、レーザー照射非一様性や燃料ターゲットの不均一性によって生じる流体力学的不安定性が成長した場合、ターゲットが十分に圧縮されず必要とされる核融合エネルギーが得られなくなる。また、実験の空間時間解像度の限界から数値解析との連携した解析が重要となる。従来、この種の計算では、Lagrange 法をベースとした ALE 法を用いるのが一般的であったが、ここでは CIP 法の一つである CCUP 法^{1,2}を ALE 形にした手法を用いた。2 温度 (イオン、電子温度) のプラズマ基礎方程式を用いて、レーザーの ray-trace、吸収、非理想気体の状態方程式、熱伝導、輻射輸送などを考慮している。

コードのベンチマークとして、表面に擾乱を与えた 2 次元平板にレーザーを照射し、加速させた場合のレーリー・テラー不安定性の線形成長、飽和状態を調べ、他のコードによる計算結果、実験、理論解析と比較したところほぼ妥当な結果が得られた。一方、近年レーザー核融合では新しい方式、高速点火方式が提案され、盛んに研究が行われている^{3,4,5,7}。そこで、このコードを用いて、高速点火方式の基本的な流体の動きのシミュレーションを行い、球対称でない爆縮の性能を調べた。従来の Lagrange 法ベースの ALE 法でのこのようなシミュレーションでは、Rezoning/remapping 法が非常に難しかったが、本解法を用いた解析では、簡単な Rezoning 法でも十分な解が得られることが分かった。これらの具体的な結果を報告する。

2. 数値解法

流体解法には、一般曲線座標系²の CCUP 法¹を、さらに ALE に拡張した手法を用いた。エネルギー式には、Spitzer-Härm の古典的な熱伝導を仮定し、9 点差分では、ICCG 法を用いて陰的に解いている。輻射輸送に関しては、multi-group 法、flux-limited 拡散モデルを用いている。ただし、計算時間短縮のため、今回紹介する計算結果では輻射輸送は考慮していない。また、レーザーの光線追跡は 1 次元問題に近似している。

3. 平板ターゲットにおけるレーリー・テラー不安定性解析

不均一なターゲットがレーザー照射によって加速される場合、レーリー・テラー不安定性が成長する。レーザー核融合では、これの定量的な評価が重要であり、本コードでもその検証を行った。

表面に擾乱を与えた厚さ $16\mu\text{m}$ のプラスチックターゲットに強度 $1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ のレーザーを一様に照射した。表面擾乱の波長は $5\mu\text{m}$ から $90\mu\text{m}$ まで変化させ、擾乱の初期振幅は擾乱波長の 1% とした。図 1 に、擾乱振幅が $16\mu\text{m}$ の場合の密度分布図の時間履歴を示す。図の右側からレーザーが照射されており、R-T 不安定性が成長する様子が捕らえられている。

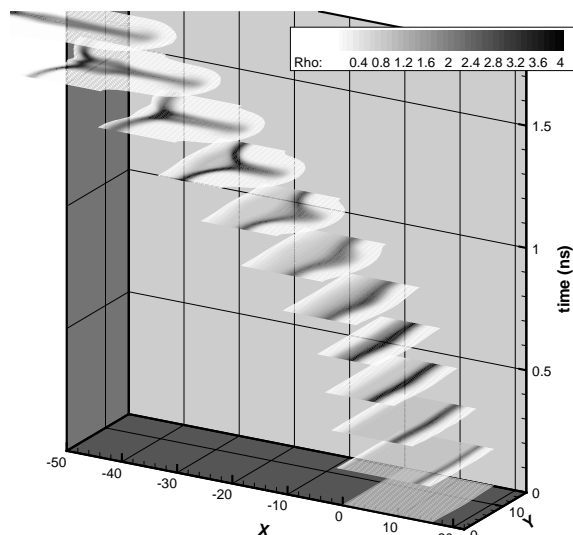


Fig.1: Time history of the density contours of Rayleigh-Taylor instability in laser driven target.

擾乱波長が20-90 μm に変化させた場合の、R-T不安定性の成長率との関係を図3に示す。この領域では、理論値や実験結果とほぼ一致しており、ほぼ妥当な結果が得られていることが分かる。しかし、これより擾乱波長が短い場合は、数値シミュレーション結果は、実験結果⁶より大きくなる。この原因としては輻射の影響、レーザーの光線追跡、吸収率などコードの数値モデルの影響が考えられている。また、短波長領域では、リップル衝撃波、反射衝撃波などが複雑に影響あっていることも分かった。特に、波長が16 μm 以下の場合、リップル衝撃波の振幅が反転したり、平滑化されておりこれが観測している密度擾乱に大きな影響を与えていることも考えられる。数値モデルの精度向上を図りながら、短波長領域での現象の解明のための解析を重点的に進める予定である。

図3には、擾乱波長が12 μm で、初期振幅を0.06 μm (波長の0.5%)、0.12 μm (1%)、0.24 μm (2%)と変化させた場合の基本波と高調波の growth factor の時間変化を示す。なお、growth factor はそれぞれの初期振幅で無次元化してある。初期振幅に比例してR-T不安定性の成長が飽和していることから、非常に微小な擾乱でも正確に記述できていることが分かる。従来のALE法では、数値拡散が格子の移動速度に依存したり、成長が飽和するまで計算を続けることが困難で、このようにはっきりとは飽和状態を検証することは非常に困難であった。

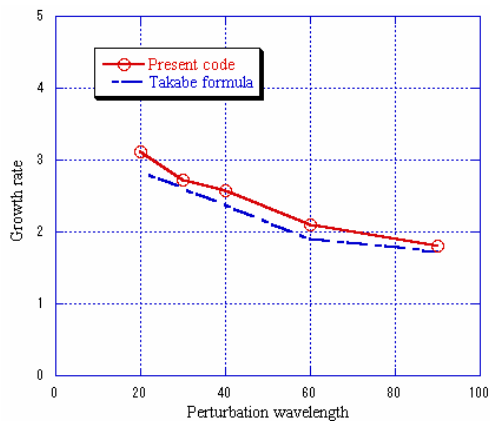


Fig.2: The dispersion curve of the growth rate of R-T instability.

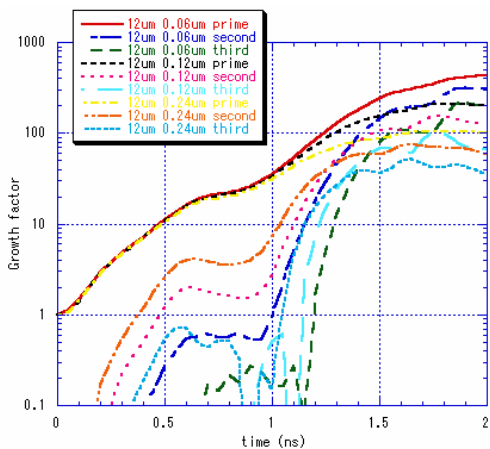


Fig.3: Time history of Growth factor (wavelength is 12 μm).

4. コーン付球ターゲットの爆縮

レーザー核融合の新しい点火方式である高速点火方式の基礎実験では、球ターゲットに金のコーン状の筒を付け、高速点火ビームの経路を確保する方式が提案され、実験も進められている⁷。今回は、このコーン付きターゲットの2次元軸対称計算を行った。

厚さ16 μm 、半径250 μm の球状プラスチックに角度60度のコーンを取りつけたターゲット(図4. t=0参照)に強度 $1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ のレーザーを一様に照射した場合の計算を行った。球ターゲットに擾乱はなく、金の状態方程式は考慮していない。また、計算格子は、周方向242 \times 252点で、軸対称を仮定した。

図4はこの非対称形状の爆縮の様子を示したものである。コーン近傍では、球状シェルが少しずつ引きずられているものの、大きな破断をとともなく爆縮していく様子が捕らえられている。t=2.3nsでは、高密度のいわゆるコア領域が形成されている。同様にコーン無しの場合の計算も行い、爆縮の中心密度、サイズの比較を行った。その結果、コーン付きターゲットでは球対称性は崩れているものの十分な ρR のコアが形成されていることが分かる。

従来のALE法では計算格子のRezoning/remapping問題で、この様な計算条件のシミュレーションは非常に困難であったが、本解法ではそのような数値的な問題は生じない。今後は、金の状態方程式を考慮するなど、計算条件をより実際の条件に近づけ、高速点火ビームの照射タイミングの最適化などを行う予定である。

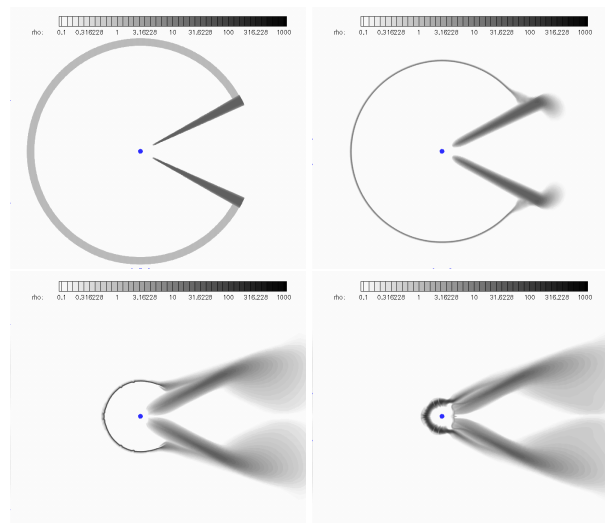


Fig.4: Simulated result of imploding spherical target with cone. Density contours at t=0, 1.0, 2.0, and 2.3ns. (log scale)

5. まとめ

レーザー核融合のための2次元の統合爆縮シミュレーションコードがほぼ完成し、定量的にもほぼ妥当な結果が得られた。このコードを用いて、レーザー核融合の新しいスキーム、高速点火方式に用いるターゲットをモデル化した数値計算を行った。その結果、非球対称な高速点火方式のターゲットでも十分圧縮が行えることが確認できた。また、このシミュレーションコードはこのように複雑な形状のターゲット計算にも利用できることが示された。

今後は、各々のモデルの追加、精度向上を行い、コード全体の信頼性を高めるとともに、より実用的な数値解析を行い、レーザー核融合における物理現象解明やターゲット設計に活用する予定である。

参考文献

1. T.Yabe, *et al.*, JPSJ **60** (1991) 2105.
2. P.-Y. Wang, *et al.*, JPSJ **62** (1993) 1865-1871.
3. M.Tabak,*et al.*, Phys.Plasmas **1**. 1626 (1996).
4. T.Yamanaka, , ILE Internal report, Osaka Univ. **I-1,5** (1983).
5. H.Takabe,*et al.*, J. Plasma Fusion Res. **74** 316 (1998).
6. T.Sakaiya *et al.*, *Proceedings of IFSA 2001*, Kyoto (2001).
7. R.Kodama *et al.*, Nature **412** No.6849, (2001) 798-802.