

CIP 法に基づく統合コード開発とレーザー核融合爆縮解析

Development of an Integrated Implosion Code based on CIP method for ICF

- 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, 阪大レーザー研, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, E-mail : ohnishi@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
 三間匱興, 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@cfi.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
- H. Nagatomo, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 N. Ohnishi, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 H. Takabe, ILE Osaka Univ., 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
 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

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. In order to study such complex physics, an integrated implosion code including all physics important in the implosion process should be developed. Before starting this work, an integrated code based on Hirt's ALE method had been developed. But it needed sophisticated rezoning/remapping algorithm and less dissipative ALE method in hardly distorted mesh. In this work, we have developed 2-D integrated implosion code based on CIP method which was described in ALE formation. The reasonable results in simulating Rayleigh-Taylor instability and cylindrical implosion were obtained using this code.

1. はじめに

レーザー核融合では、レーザーの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。一方爆縮の実験解析は、実験の空間および時間解像度の限界があり、数値解析との連携した解析が重要となる。このためのシミュレーションコードを統合爆縮シミュレーションコードと呼び、我々のグループではその開発研究を行っている。

しかし、例えば爆縮における流体力学的不安定性の数値解析だけを考えても、サブ μm オーダーの擾乱がある厚さ数 $10\mu\text{m}$ のターゲットが、レーザー照射によって加速され、レーリー・テラー不安定性を伴いながら数 mm 移動する現象を捕らえられなければならず非常に困難を伴う。さらに、爆縮での様々物理現象の数値モデル考慮して、正確に、しかも現実的な計算時間内にシミュレーションができることが求められている。

従来、このようなコード¹には Lagrange 法をベースとした ALE 法を用いるのが一般的であり、著者らも Hirt らの ALE 法²に基づく統合爆縮コード開発^{3,4}を行った。その場合、移動するターゲットに沿って計算格子点が移動するため、接触面などが鮮明に捕らえらる反面、計算格子が大きく歪み、それを回避するための rezoning/remapping 法が複雑になる。例として、そのようなシミュレーション途中の計算格子形状を図 1 に示す。このように、従来の手法では汎用的なコードの構築が難しく、また格子の変形によっては解の精度が低下する可能性もある。

これらの問題点を考慮すると、個々の格子点を Lagrange 式に動かすより、ターゲット近傍の格子点全体をスライドさせる方が有効であると思われる。ただし、この場合は適切な流体解法を用いないと数値拡散の影響を受けやすくなる。そこで幾つかの手法を試したところ CIP 法⁵など

が最適であることが分かった。ただし、単に CIP を用いると爆縮解析に必要な計算対象の空間と空間解像度の比が極めて大きいため、計算格子点数が莫大になる。このため、CIP 法を ALE 表記に拡張し、爆縮解析に必要な様々な物理モデルを考慮した 2 次元統合爆縮コードを構築した。本発表では、この数値解析法の概略を説明し、擾乱を与えた平板ターゲットにレーザーを照射、加速させた場合、および円筒形状の爆縮の解析結果を報告する。

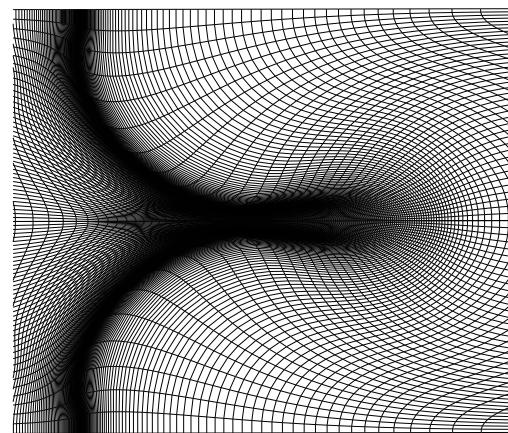


Fig.1: Grid configuration in laser driven R-T instability using Hirt's ALE method.

2. 数値解法

流体スキームは、一般曲線座標系⁶の CCUP 法⁷を、さらに ALE に拡張したスキームを新たに開発した。まず、時間依存の計算格子であるために、格子座標の時間微分項なども付加しており、それらの解への依存性を調べた。衝撃波問題を計算した一例を(図 2)に示した。図中の“fix”、“lagrangian”、“sliding”はそれぞれ、計算格子を固定した場合(Euler 座標系)、Lagrangian 座標に沿って移動した場合、および接触不連続面と同じ速度で格子全体をスライドさせた場合に関して、ある時間の密度分布図を示す。この場合、本解法ではいずれの格子移動法を用いてもほぼ一致した解が得られることが示された。

なお、同様の比較を他の ALE 法²で行うと、Lagrangian フェーズと Euler フェーズの 2 つの数値粘性の影響を受けるため、解が格子の移動方法に大きく依存する。

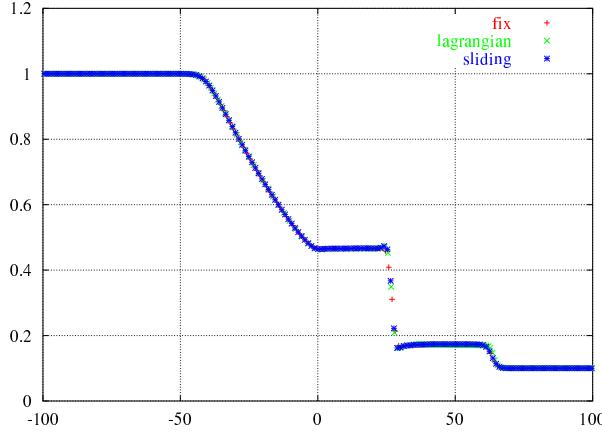


Fig.2: Shock-tube-Riemann-problem solved by new ALE method with the various mesh-moving-methods.

この流体スキームをベースにイオン、電子温度を考慮した 2 次元プラズマの基礎方程式に適応した。また、流体以外の物理としては、レーザーの ray-trace、吸収、非理想気体の状態方程式、熱伝導(Spitzer-Härm)、拡散形の輻射輸送などを考慮している。なお、熱伝導、輻射は ILUBCG 法を用いて陰的に解いている。

計算格子は、ターゲット近傍の計算格子はターゲットの重心と共に移動、その前後は滑らかに分布させている。特にアブレーション面やレーザー吸収点近傍に計算格子が十分に分布するようにしている。一方、状態方程式などで必要となる物質間の境界追跡法にも CIP 法を適用している。

3. 計算例

コード検証のため平板ターゲット、円柱形状ターゲットにレーザー照射した場合の計算結果を示す。なお、これらの計算には、大阪大学レーザー核融合研究センターの日立 SR8000、および大阪大学サイバーメディアセンターの NEC SX-4 を利用した。

3.1 平板ターゲット

波長 $30\mu\text{m}$ 振幅 $0.3\mu\text{m}$ の擾乱を表面に与えたプラスチック(CH: 厚さ $16\mu\text{m}$)平板ターゲットに、波長 $0.53\mu\text{m}$ のレーザーを照射し、加速させた。計算格子点数は、 200 (加速方向) $\times 40$ (擾乱 1 波長) 点で、このうち約 $3/5$ をターゲット上およびその周辺に配置した。このとき生じるレーリー・テーラー(R-T)不安定性の様子を調べた。また、ここでは計算時間の制約とコード検証の目的のため、輻射の影響は無視した。

図 3 に、レーザー照射後 0.5ns 後から 1.75ns 後までの密度分布の時間経過を示す。図の右側からレーザーが照射され、ターゲットは左側に加速されていく。初期の表

面擾乱は、加速されるに従って R-T 不安定性によって成長し、やがてバブル-スパイク構造が現れてくる。同様の計算を Lagrange 法に基づく ALE 法で計算したときの計算格子が図 1 であり、re zoning/remapping のほぼ限界に達しているのが分かる。それに対し、本解法では無理なく解くことができている。

なお、R-T 不安定性の線形成長に関する成長率を実験、理論解析と比較すると、理論解析や従来の数値解析よりやや低く、実験値に近い値が求まつた。ただし、この成長率は様々な物理現象が複雑に影響しあうため、さらなる解析、考察を行っている。

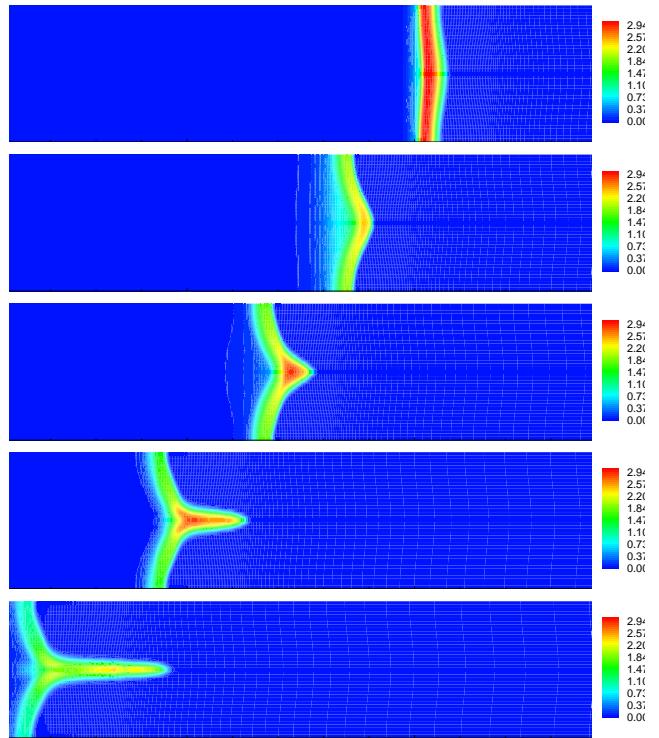


Fig.3: Laser driven R-T instability (density contours at $t=0.5, 1.0, 1.25, 1.5$, and 1.75ns .)

3.2 円柱形状ターゲット

次に、実際に爆縮計算が行えることを確認するために、円柱形状のターゲットにレーザー照射した場合の爆縮シミュレーションを行った。ターゲット半径、厚さはそれぞれ $500\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ で、ターゲット表面に振幅 $0.8\mu\text{m}$ 、モード 8 の擾乱を与えた。レーザーの照射強度は、初期のターゲット表面で $1 \times 10^{14}\text{W/cm}^2$ で、半径方向の計算格子に沿って 1 次元の ray-trace をした。また、計算格子は 250 (半径方向) $\times 120$ (周方向) 点で、計算では初期半径の 6 倍の領域を考慮した。

図 4 にレーザー照射後 2.2ns 経過した時の密度等高線を示す。加速による R-T 不安定性によって成長したバブル-スパイク構造が鮮明に捕らえられている。また、ターゲットが中心に近づくにつれ減速することによって内側に R-T 不安定性が発生し、バブル-スパイクが内側に向かっている様子を図 5 に示す。スパイクはマッシュルーム状に成長する過程で中心に衝突している。

このように、従来の ALE 法では解析が難しかった減速相での R-T 不安定性や、ターゲットが破断する様子、さらにはスタグネーション後も、複雑な rezoning/remapping 法を用いることなく、シミュレーションを継続することができる事が分かった。現在、実験、理論解析などと比較し、定量的な評価を行っている。

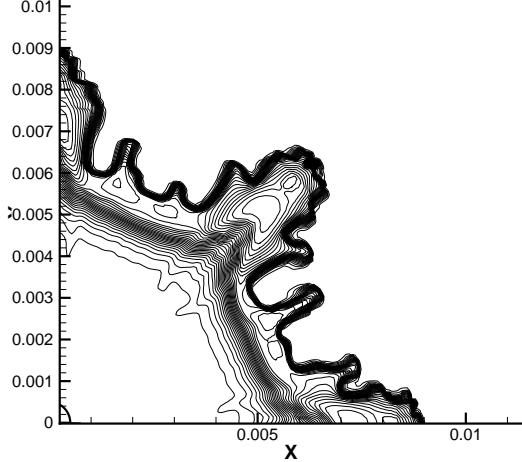


Fig.4: R-T instability caused by acceleration in cylindrical implosion.

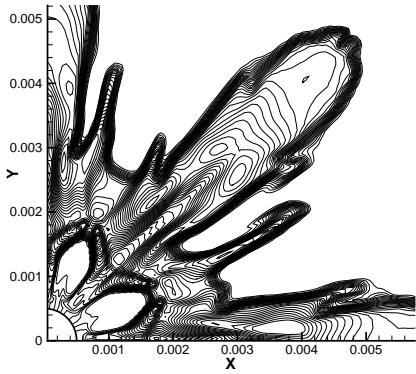


Fig.5: R-T instability of inner direction caused by deceleration in cylindrical implosion.

4. まとめ

ALE 表記に拡張した CIP 法を用いて、レーザー核融合の爆縮シミュレーションのための統合爆縮コードを新たに開発した。このコードを用いた数値解析の結果より、複雑な Rezoning/remapping アルゴリズムを用いなくても、レーザー照射によって加速された平板ターゲットの R-T 不安定性や爆縮のシミュレーションを行えることが示された。さらに、従来のコードでは解析が非常に難しかったターゲットの破断なども解析可能であることも分かった。現在、コードの妥当性を検証するとともに、物理モデルを追加する作業を行っている。

参考文献

1. H.Takabe, *lecture notes*.
2. C.W. Hirt, *et al.*, *J. Comp. Phys.*, **14** (1974) 227-253.
3. H.Nagatomo, *et al.*, *Proc. of IAEA Tech. Comm. Meet. on Drivers and Ignition Facilities for Inertial Fusion*, Elsevier, (1999) pp.187-190.
4. 長友英夫 他, 第 13 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1999), 194.
5. H.Takewaki, *J. Comput. Phys.* **61** (1985) 261.
6. P.-Y. Wang, *et al.*, *J. of the Phys. Society of Japan* **62** (1993) 1865-1871.
7. T.Yabe, *et al.*, *J. of the Phys. Society of Japan* **60** (1991) 2105.