



～レーザープラズマシミュレーションにおける多群拡散近似法による輻射流体計算の高速化・高精度化～

研究概要

- レーザー核融合などレーザープラズマのシミュレーション解析では、高温プラズマを取り扱う。この場合、輻射輸送は重要なエネルギー輸送の一つであり、シミュレーションでは輻射輸送を考慮する必要がある。
- 輻射輸送を正確に解くためには、6次元の光子の運動を記述するボルツマン方程式を解く必要がある。しかし、計算量の問題から多群拡散方程式に近似で解かれることが一般的である。ここでは2次元一般曲線座標系でも解けるように9点の陰解法によって求めている。陰解法として、ILUBCG法を採用した。
- この陰解法部分は、多大な計算資源を必要とし、全計算量の95%以上を消費している。これを低減するとともに効率化を図り解析時間の短縮を目指す。

シミュレーションコードの概要

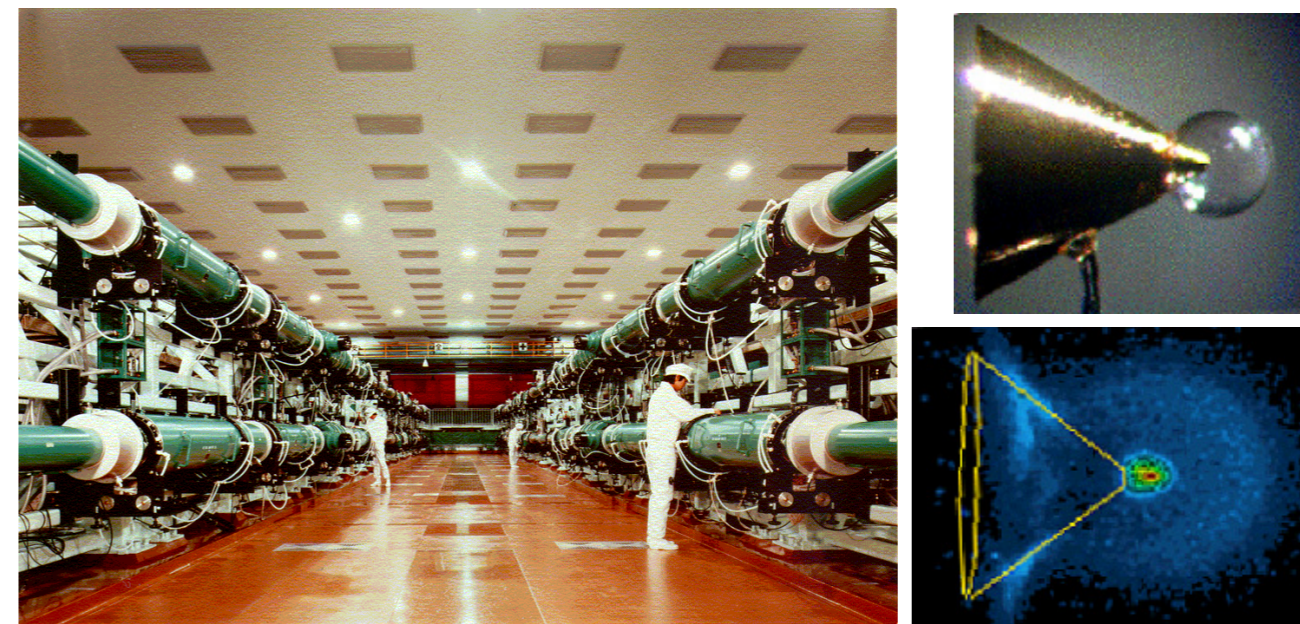
- レーザー核融合の爆縮シミュレーションでは、レーザー照射・吸収、電子加熱などの初期相から、加速相、高温・高密度点火にいたる減速相、燃焼までを考慮する必要がある。そのため、本コードでは、流体運動、レーザーの光線追跡、吸収・電子加熱、電子・イオン熱伝導、輻射輸送、状態方程式、原子過程のモデルのテーブル参照によるOpacity(吸収係数)、Emissivity(放射係数)などが考慮されている。

輻射輸送解法

- レーザー核融合などレーザープラズマのシミュレーション解析では、高温プラズマを取り扱う。この場合、輻射輸送は重要なエネルギー輸送の一つであり、シミュレーションでは輻射輸送を考慮する必要がある。
- 輻射輸送を正確に解くためには、6次元の光子の運動を記述するボルツマン方程式を解く必要がある。しかし、計算量の問題から多群拡散方程式に近似で解かれることが一般的である。ここでは2次元一般曲線座標系でも解けるように9点の陰解法によって求めている。陰解法として、ILUBCG法を採用した。
- この陰解法部分は、多大な計算資源を必要とし、全計算量の95%以上を消費している。これを低減するとともに効率化を図り解析時間の短縮を目指す。

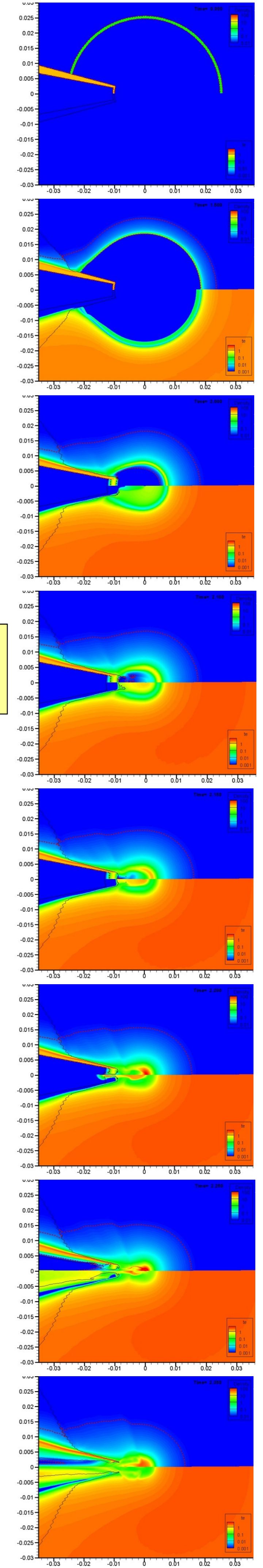
本研究課題の目標

- さまざまな物理モデル計算が一つのコードに含まれている。また、Opacity、Emissivity、あるいは状態方程式はテーブル参照するなど高速化が難しい。このため、一般的な爆縮計算でも数日間の計算時間を要している。これを短縮するために、全計算量の約95%を費やしている輻射輸送計算部分に着目した。輻射輸送計算は、拡散近似され、陰解法で解かれていることから、この陰解法部分の高速化を目指す。
- まずは、エネルギー空間を並列化することによって改善する。しかしながら、輻射エネルギーは、エネルギーによって収束までに要する計算量がさまざま、十分な並列化の効果が期待できない。このため、実空間方向についても並列化が必要があると考え。この場合、反復法の空間を分割してしまうことから収束性の悪化が予想され、その対応についても改善する予定である。



激光XII号レーザープラズマ実験装置(左)、高速点火用ターゲット(右上)、および実験によるX線画像(右下)

2次元輻射流体コードによる爆縮シミュレーションの一例。上から下に時間変化している。各図の上半分が密度分布、下半分が電子温度分布を表している。



1流体2温度モデルを仮定したプラズマ流体基礎方程式

(mass) $\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$

(momentum) $\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla P$

(ion energy) $\rho \frac{d\epsilon_i}{dt} = -P_i \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{q}_i + Q_{ei}$

(electron energy) $\rho \frac{d\epsilon_e}{dt} = -P_e \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{q}_e - Q_{ei} + S_L + S_r$

(radiation transport) $\frac{1}{c} \frac{dI^\nu}{dt} + \Omega \cdot \nabla I^\nu = 4\pi \eta^\nu - \chi^\nu I^\nu + S^\nu$

(laser absorption)

$$\mathbf{v}_g \cdot \nabla I_L^k = -v_{abs} I_L^k \quad S_L = \sum_k v_{abs} I_L^k / v_g^k$$

(Equation of State)

QEOS, SESAMIなど

(radiation transport)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I^\nu}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I^\nu = \eta^\nu - \chi^\nu I^\nu + S^\nu$$

等方散乱を仮定0次、1次のモーメントは

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E^\nu}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}^\nu = 4\pi \eta^\nu - \chi^\nu c E^\nu$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial F^\nu}{\partial t} + c \nabla \cdot \mathbf{P}^\nu = -\chi^\nu F^\nu$$

ただし、エディントン係数を用いて

$$\mathbf{P}^\nu = -\frac{c}{\chi^\nu} \nabla \cdot (f^\nu E^\nu)$$

周波数νに対する放射係数η^ν、および吸収係数χ^νは、厳密には原子モデルの波動関数を元にレート方程式を解いて求める必要があるが、爆縮プラズマでは、局所熱平衡状態(LTE)や、準定常な非局所熱平衡(non-LTE)を仮定できるため、予めこれらのデータベースを構築し、計算時にテーブル参照する。