

超高強度レーザーによる超音速ジェットの数値解析

Numerical Simulation of Super Sonic Jets with Intense Laser

○ 水田 晃, 大阪大学レーザー核融合研究センター, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, Email: amizuta@ile.osaka-u.ac.jp

山田章一, 大阪大学レーザー核融合研究センター, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, Email: syamada@ile.osaka-u.ac.jp

高部英明, 大阪大学レーザー核融合研究センター, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-6, Email: takabe@ile.osaka-u.ac.jp

Akira MIZUTA, Institute of Laer Engeneering, Osaka Univ. 565-0871, JAPAN

Shoichi YAMADA, Institute of Laer Engeneering, Osaka Univ. 565-0871, JAPAN

Hideaki TAKABE, Institute of Laer Engeneering, Osaka Univ. 565-0871, JAPAN

Recently super sonic jets have produced using intense lasers. When intense lasers irradiate 'cone' target which is designed axisimmetrically. Hot plasma inflow to the axis collimates and becomes like a jet. We have simulated this experiment using 2D axisimmetric hydrodynamic code. We assume that this plasma is optically thin, so, the effect of radiation cooling can be dominant. Radiation cooling term is introduced to the code. We have simulated both cases (the term is on and off), and confirmed that cooling effect is important to collimation.

1. 緒言

超高強度レーザーを物質に照射することにより、個体密度近くの密度、温度数百 eV という、高温高密度のプラズマを生成することができる。近年このような、レーザー生成プラズマを用いて、自然界でのプラズマ現象を模擬する研究が行われ始めている。

円錐の側面のターゲットの裏面にレーザー(強度は $\sim 10^{14} [W/cm^2]$)を照射し、生成された高温高密度プラズマを対称軸上に収束させ、ジェットを生成する実験が行われている[1,2]。収束には、輻射冷却効果と呼ばれる、輻射による、エネルギーの損失が重要といわれている。対称軸上の高密度プラズマが、冷却効果によって圧力勾配をもたらし、軸上への流れが増し、ジェットが形成されていく。収束が効率よくおこり、ビーム状の超音速ジェットが生成されるのならば、宇宙ジェットと呼ばれる、天体现象の解明にも繋がると考えられている。実験では、ショット数等が限られており、実験の予測や、パラメータに対する効果を効率よく調べるには、数値計算による解析が重要となる。我々は、2次元軸対称流体コードを用いて、実験の数値解析を行った。

2. 数値計算法

数値計算には、2次元の軸対称流体コードを用いた。Godunov Type の近似 Riemann 解法を用いている。

理想気体に対する Euler 方程式を保存形でかくと、

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \mathbf{f})}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} = \mathbf{s} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}, \mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{s}$ は、それぞれ、保存量ベクトル、各方向の収束ベクトル、ソースベクトルであり、

$$\mathbf{u} = (\rho, \rho v_r, \rho v_z, E)^T \quad (2)$$

$$\mathbf{f} = (\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (E + p)v_r)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = (\rho v_z, \rho v_r v_z, \rho v_z^2 + p, (E + p)v_z)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{s} = (0, p/r, 0, 0)^T \quad (5)$$

$$E = \rho(\epsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2) \quad (6)$$

式(1)を以下のように差分化できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^{n+1} &= \mathbf{u}_i^n - \frac{1}{r_i} \frac{\Delta t}{\Delta r} (r_{i+1/2} \tilde{\mathbf{f}}_{i+1/2,j} - r_{i-1/2} \tilde{\mathbf{f}}_{i-1/2,j}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta z} (\tilde{\mathbf{g}}_{i,j+1/2} - \tilde{\mathbf{g}}_{i,j-1/2}) + s_{i,j} \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

数値流束 $\tilde{\mathbf{f}}, \tilde{\mathbf{g}}$ の計算には、Marquina の流束式[3]を用いた。この流束は、Roe スキームのような cell 表面の平均量を求めるのではなく、cell 表面の左右の状態量から特性速度の変化の仕方によって流束を決める。陰的な数値粘性が不連続面の周りではいるため、拡散的であるが、数値的に安定である。また、Marquina's flux formula は、一般的な状態方程式にも適応が容易である。空間補間精度は、MUSCL 法を用いて 2 次精度とした。実際の数値計算では、初期の数百ステップを

本研究では 2 種類の物質(ターゲット物質と、周りの物質)更に、物質の境界面を調べるために物質の濃度の移流方程式と質量保存の式を連立させた。

境界条件は、対称軸は反射条件とし、他の境界は自由境界条件とした。
輻射冷却項に関しては、制動放射を仮定し、ソース項として解く。[4]によると、電子、イオンの数密度がそれぞれ、 $n_e, n_i [\text{cm}^{-3}]$ 、温度が $[T]$ である時の単位体積あたり単位時間に放出する輻射のエネルギー J は、

$$J = 1.42 \cdot 10^{-27} Z^{*2} T^{1/2} n_e n_{ion} [\text{erg}/\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}] \quad (9)$$

ここで、 Z^* はプラズマの平均電離度であり、Thomas-Fermi モデルから導かれた近似式より計算する。輻射冷却項を各時間ステップ毎に比内部エネルギーから引くことによって、輻射冷却の効果をみる。

3. 解析モデル

数値解析を行うために実験をモデル化する。レーザーを物質に照射する時には、レーザー吸収過程や、電子熱伝導など、様々な物理過程考えられるが、本研究では、レーザーで生成されたプラズマが膨張していく部分が重要である。そこで入射レーザーは、熱エネルギーに変換されるとして、ターゲット表面が入射レーザーのエネルギーを熱エネルギーとなる初期条件をとり [Fig.1]、時間発展をさせた。ターゲット物質は、金(個体密度 $19.2 [\text{g}/\text{cm}^3]$)である。輻射冷却の効果をみるため、輻射冷却項を導入した場合と、しなかった場合について調べた。また、ジェットが伝搬していく周りの物質の密度によっても効果が変わることが考えられるため、現在実験が行われた真空の場

合 ($\rho_{ambient} = 1 \times 10^{-6} [g/cm^3]$) と、物質を入れた場合 ($\rho_{ambient} = 1 \times 10^{-3} [g/cm^3]$) について比較した。

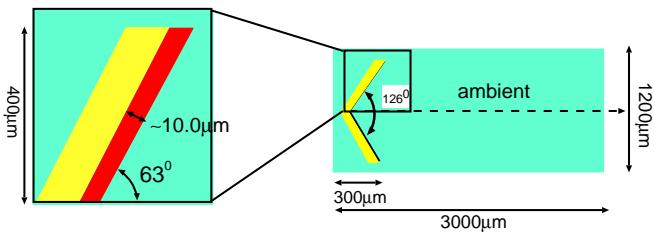


Fig. 1: 初期条件

4. 結果

Fig.(2-a) は、輻射冷却の項を入れなかった場合の時刻 $t = 1.5 [ns]$ での密度分布図である。ターゲットからの膨張波が軸への流れになり、nozzle 状の構造ができるのがわかる (Fig.3 参照)。

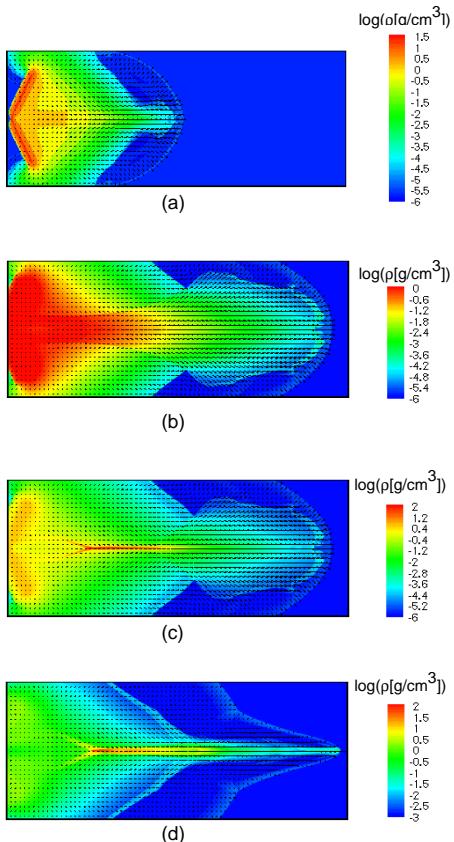


Fig. 2: 密度分布 (log scale) size: $600\mu m \times 3000\mu m$

(a),(b):周りが真空、輻射冷却項なし。

$t=1.5[ns]$ (a), $t=3.3[ns]$ (b)

(c):周りが真空、輻射冷却項あり。 $t=3.3[ns]$

(d):周りがガス、輻射冷却項あり。 $t=6.0[ns]$

さらに時間発展した時刻 $t = 3.3 [ns]$ での密度分布図 Fig.2-b では、nozzle 構造からプラズマ流がホースから水が出るように噴出している様子もみられる。周りが真空のために指向性は失われ、動径方向にも大きく広がっているのが分かる。

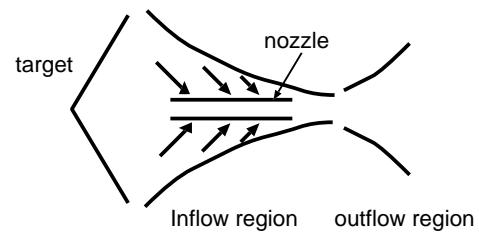


Fig. 3: 密度分布の構造

軸方向への膨張波によって密度分布に構造ができる。

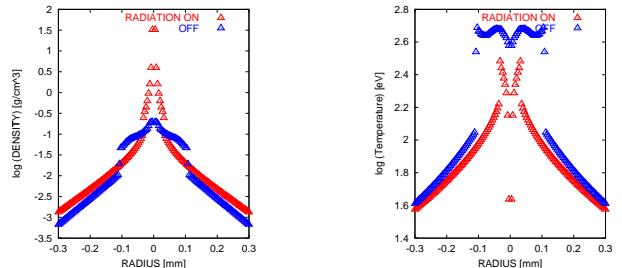


Fig. 4: 動径方向の温度密度分布

左が密度分布、右が温度分布。

横軸は、動径方向であり、原点は z 軸

Fig.2-c は、(a,b) と同じ初期条件で輻射冷却効果を考慮した場合である (時刻は、 $t = 6.0 [ns]$)。輻射冷却を考慮した場合、nozzle 構造の部分が高密度であるため、輻射冷却の効果がきき、軸上に細長いジェット状の高密度部分を形成されているのがわかる。この高密度部分は、流束が数百 $[km/s]$ であり、超音速のジェット状の構造が形成されているのがわかる。

Fig.4 は、時刻 $t = 1.5 [ns]$ 、ターゲットから z 方向に $700 [\mu m]$ 動径方向の温度密度分布を示したものである。輻射冷却項が無いときに比べ中心軸状で温度が下り、輻射冷却されている。

次に周りにガスを行った。これは、実際には実験は行われていないが、今後宇宙ジェットとの関連性について考えるとき、問題となるジェットと周りの物質との密度比という無次元量を実際のものに近づけるという点で重要である (実際の宇宙ジェットでは $\rho_{jet}/\rho_{ambient} = 1 \sim 0.01$)。輻射を考慮した場合をのシミュレーション結果が Fig.(2-d) である。ターゲットの条件は真空の場合と同じである。

構造は、周りが真空の場合と変わらないのだが、nozzle 構造から出たプラズマ流に輻射冷却効果が効いて、ジェットが形成されているのが分かる。周りが真空の場合と違い、細長いジェット流が擾乱のない領域に侵入し伝搬している。しかし、このジェットは圧力が周りよりも高く、先端付近で、数百倍もの圧力差がある。その後の時間発展によって太さを増していく。圧力が周りよりも高いジェットは、動径方向の膨張にエネルギーを使い、伝搬性が悪くなっている。

5. 結言

レーザー生成プラズマによってジェットを生成過程を調べた。生成の過程において、輻射冷却効果が重要であることが、示された。現在行われている真空への伝搬では、膨張波の中に細長い高密度部分ができるだけで、ジェットが物質中を伝搬していくような、一般的に考えられているようなジェットではない。

物質中を伝搬していくジェットの生成は、ガス中への伝搬によって可能である。この時、周りの物質による圧力が重要である。しかし、宇宙ジェットと呼ばれるよう

な天体现象では、ビーム状のまま長距離を伝搬していくというモデルが考えられどり、今後の改良が必要である。まず、現在のレーザー強度では、生成されるプラズマの温度が低く、輻射冷却効果を電離度 Z^* に頼っている。金原子の重さは、水素原子のほぼ 200 倍であり、温度が低くとも数密度が高い場合圧力が下らない。レーザーの強度があがれば低 Z 物質で同じような輻射冷却による収束効果が得られる実験が可能となり、レーザー生成プラズマで長距離を伝搬するジェットが生成されることが期待される。

参考文献

1. D. R. Farley et al., Phys. Rev. Lett. **83**(1999), pp. 1982-1985.
2. K. Shigemori et al., Phys. Rev. E **62**(2000), pp. 8838-8841.
3. R. Donat and A. Marquina, J. Comp. Phys. **125**(1996), pp. 42-58.
4. Ya. B. Zel'dovich and Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, Academic Press (1966)