

低密度領域を含むレーザーアブレーションプラズマの ハイブリッドシミュレーション

大西 和夫 (東北大学大学院 工学研究科)

Abstract

宇宙空間で見られる衝撃波の多くは無衝突衝撃波であり、粒子間衝突でなく磁場を介した散逸によって衝撃波が維持される。無衝突衝撃波では、フェルミ加速などにより高エネルギー粒子が生成されると考えられており、そのような加速現象は地上で観測される高エネルギー宇宙線の起源を知る上でも重要である。近年、高強度レーザーを用いて地上で無衝突衝撃波の実験を行う試みがなされている。現在提案されている実験では、高強度レーザーを真空中に配置した 2 枚の平行平板ターゲットに照射することで高速の対向流プラズマを生成し、これらの干渉によって無衝突衝撃波を発生させようとしているが、実験で用いるパラメータを定めたり、実験結果の解析を行う上では数値シミュレーションが必要不可欠である。無衝突プラズマでは流体近似が成り立たないため、本来は粒子計算を用いてプラズマの流れを予測するべきであるが、膨大な計算コストが必要となるため、現実的に不可能である。したがって、現在は流体近似による実験デザインを余儀なくされている。我々はこれらの問題を解決すべく、粒子計算と流体計算をハイブリッド化したシミュレーションコードを開発し、無衝突衝撃波の地上実験をデザインすることを目指した研究を行っている。低密度領域ではモンテカルロ直接法を用いた粒子計算、高密度領域では有限体積法を用いた流体計算を試みる。ハイブリッド化は領域分割によって行い、粒子計算へとマクロな物理量を引き渡すための緩衝領域を設ける。この緩衝領域において流束を介して物理量を交換する手法を検討し、高エネルギー粒子発生メカニズムの解明を念頭に置いた実験提案を目指す。

1 緒言

無衝突衝撃波とは、粒子間の衝突が殆ど起きない流れ場に生じる衝撃波であり、その散逸過程は電場や磁場を介して行われる。無衝突衝撃波は宇宙における高エネルギー現象であるガンマ線バーストなどにも深い関係があり、発生メカニズムを知ることができれば宇宙線の起源を知ることにもつながる。無衝突衝撃波の研究は、観測や理論解析によるものだけでなく、数値シミュレーションを用いた研究も盛んに行われている。最近では地上での模擬実験も試みられており、レーザーアブレーション (1) という現象を用いた研究手法が提案されている。レーザーアブレーションとは、固体試料に高強度レーザーを照射することにより、固体表面から分子、中性原子、プラズマなどが飛散する現象である。

提案されている実験は以下の手順で行われる。真空チャンバー内で固体試料にレーザーを照射し、プ

ラズマを発生させる。その固体試料と向かい合うように置いた別の固体試料も、輻射熱でアブレーションを起こしプラズマが発生する。それぞれの固体試料から発生したプラズマ同士が高速衝突することで無衝突衝撃波が形成される。しかし、無衝突衝撃波が形成されるには十分に対向流の相対速度が大きく、密度が低い必要があり、これを満たす条件を探るために数値シミュレーションを行う必要がある。

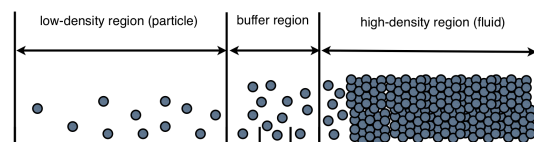


図 1: 各領域の区別。

このとき、アブレーションプラズマには高密度領域と低密度領域が存在する。高密度領域を解析できる

流体計算コードを用いて全領域を計算する場合、低密度領域では速度分布関数がマクスウェル分布に従わないため、その領域においては非物理的な解を生む。一方で、希薄流に対して構成粒子について運動方程式を解く DSMC(Direct Simulation Monte Carlo) 法と呼ばれる粒子シミュレーション手法がよく用いられる。

そこで本研究では、図 1 に示すように、低密度領域、緩衝領域、高密度領域の 3 つの領域を異なる手法で扱うハイブリッドシミュレーションの実現を目指す (2)(3)。そのために、低密度及び高密度の計算手法の特性を調べ、緩衝領域において流束を評価しそれを介して低密度領域と高密度領域を結合する手法を検討する。

2 レーザープラズマの流体計算

比較的高密度な流れを対象とした流体コード (4) の 1 次元テスト計算を行った。数値流束には AUSM-DV スキームを用い、高次精度化は 2 次精度の MUSCL 法を用いて行った。

計算領域は x 方向 7 mm を 600 セルの計算格子で解像する。図 2 のようにプラスチック (CH) の平板を 2 枚配置した。厚さ $20 \mu\text{m}$ の CH を左、厚さ $5 \mu\text{m}$ の CH を右に 5 mm の間隔をあけて配置した。その他の空間は密度 $4.7 \times 10^{-5} \text{g/cm}^3$ の窒素原子で満たされているものとする。

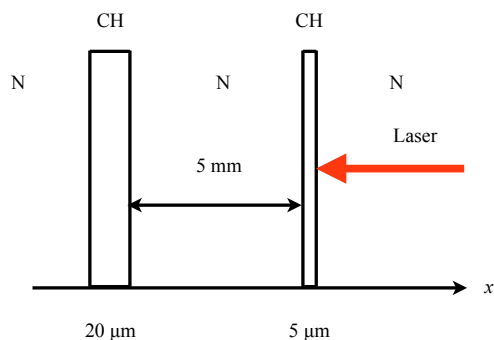


図 2: 2 平板による対向流プラズマの計算。

右方向から厚さ $5 \mu\text{m}$ の CH に、パルス持続時間

1 ns の矩形ロングパルスレーザーを垂直に入射する。レーザー強度は $1.2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 、波長は $0.52 \mu\text{m}$ とした。なお、本計算では輻射計算を行っていない。代わりに、厚さ $20 \mu\text{m}$ の CH はレーザーによる輻射熱で温められることを想定し、予めターゲット表面 $10 \mu\text{m}$ に初期温度 5 eV を与える。これによりターゲットを電離させ、プラズマを発生させる。

図 3、図 4 は $t = 25 \text{ ns}$ における密度分布、電子温度分布のシミュレーション結果である。それぞれ不連続の箇所を分かりやすく見るために対数表示している。図 3 では、 $x = 0.2$ と $x = 0.3$ で密度分布に不連続が見られる。左の平板は与えた初期温度によって表面付近から膨張している。また、右からレーザーを照射された厚さ $5 \mu\text{m}$ の平板は急速に膨張し、プラズマが $x = 0.3$ まで広範囲に広がっている。図 4 の温度分布も図 3 と対応していることが見て分かる。左側の平板では、初期温度を与えた表面から内部に熱が伝わっていく様子が分かる。また、右の平板はレーザー照射により高温状態を保ちながら、もう一方のターゲットに迫ってきている。

連続流と希薄流を区別するとき指標となるクヌッセン数 Kn を調べたところ、窒素原子で満たされているとすると $x = 0.3$ 付近では $Kn = 1.29 \times 10^{-5}$ となった。 $Kn = 0.01$ 以下では連続流と見なせるので、この条件は無衝突衝撃波の形成に適當でないが、レーザープラズマにより衝撃波を生成可能なが分かる。

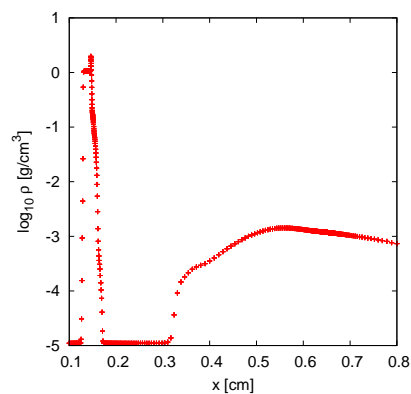


図 3: $t = 25 \text{ ns}$ における密度分布。

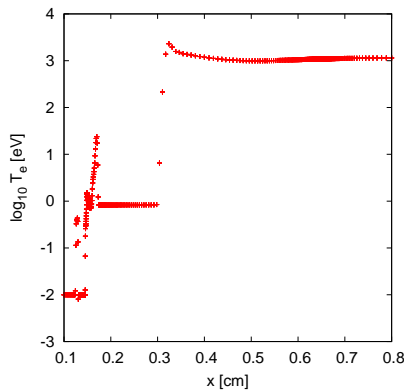


図 4: $t = 25 \text{ ns}$ における電子温度分布.

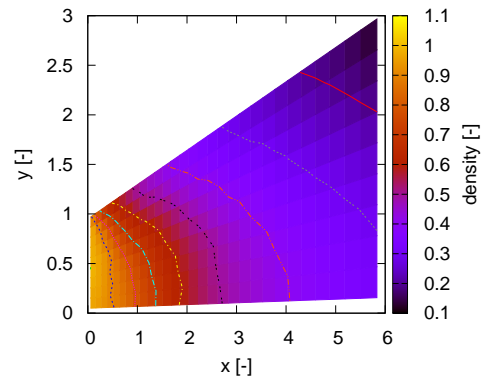


図 5: 2次元ノズルの密度分布.

3 DSMC による低密度流の計算

次に希薄流を対象とした粒子コードのテスト計算を行った。低密度流のテスト計算として、DSMC 法 (5) を用いた 2次元ノズルの定常流のシミュレーションを行った。支配方程式は加速度項を除いたボルツマン方程式である。

計算領域は、 y 方向に無次元距離 1 の大きさを持つノズルスロート部から x 方向に無次元距離 6 までとり、壁面は広がり角 20° でスロート部から広がっていく。この計算領域を y 方向に 10 セル、 x 方向に 30 セルの計算格子で解像する。はじめに、スロート部にマッハ数 1 の分子を配置して流入させる。境界条件は $x = 6$ において流出境界、壁面は拡散反射境界、 $y = 0$ では鏡面反射とした。ただし、分子は剛体球とした。

図 5、図 6 は 2次元ノズルの計算をした結果で、それぞれ密度分布とマッハ数分布となる。図 5 の密度分布では、スロート部の密度で無次元化して表している。左は密で、右にいくにつれ疎となっている。 $x = 6$ より右は計算領域外の真空槽を想定しており、スロート部から粒子が真空槽へ流れていく様子が分かる。また、図 6 のマッハ数分布から、 $x = 0$ から $x = 6$ まで徐々に加速していく様子が得られた。

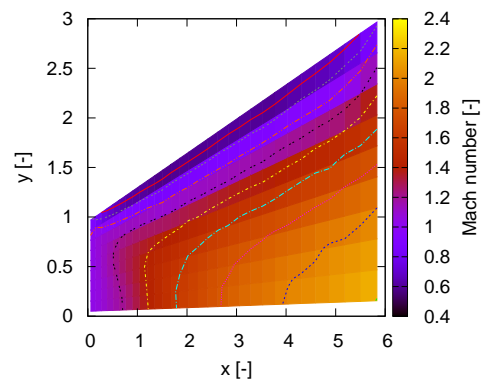


図 6: 2次元ノズルのマッハ数分布.

4 結言

本研究では、無衝突衝撃波を地上で再現できる実験の提案を目指している。プラスチック固体ターゲットのレーザーアブレーションの数値シミュレーションを行った結果、対向流による衝撃波が生成されることを確認することができた。また、DSMC 法を用いた 2次元の数値シミュレーションを行い、超音速ノズルのテスト計算を行った。今後は緩衝層で評価した流束を介して高密度領域と低密度領域を結合するモデルを考案し、低密度から高密度まで広範囲にわたってシミュレーションできる手法を構築する。それをもとにハイブリッドコードを開発した上で、無衝突衝撃波を再現する実験を提案する。

Reference

- [1] T. Okada and K. Sugioka. 2003. J. Plasma Fusion Res. Vol. 79, pp. 1278–1286.
- [2] 杉本和弥. 2012. DBD プラズマアクチュエータにおける放電過程の数値解析, 東北大学修士学位論文.
- [3] T. E. Schwartzentruber and I. D. Boyd. 2006. J. Comp. Phys. Vol. 215, pp. 402–416.
- [4] N. Ohnishi et al. 2006. J. Phys. IV Vol.133, pp. 1193–1195.
- [5] 南部健一. 1992. 第13章 ボルツマン方程式の確率解法 数値流体力学—基礎と応用—, 保原充 大宮司久明編, 東京大学出版. pp. 237–324.