レーザー生成プラズマ挙動のシミュレーション

Numerical Simulation of the Pulse Laser Induced Plasma

○正 松田 淳 (名城大)

Atsushi MATSUDA, Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku, Nagoya, Aichi 468-8502

The behavior of the laser induced plasma was simulated numerically. The simulation code was verified by the calculation of the point explosion. The pressure distribution agrees well with Taylor-Sedov self-similar solution. Based on this verification, by using the laser power distribution model, the behavior of the laser induced plasma was simulated. After several hundred micro second, the plasma deformed as like injection jet against toward the laser irradiation direction.

Key Words: Laser Plasma, Shock Wave, Blast Wave

1. はじめに

近年、パルスレーザーによる生成プラズマが様々な分野において応用されている。中でも、超音速機の空力抵抗低減¹⁻⁴⁾や電極不要なエンジン着火手法⁵⁻⁷⁾への応用が注目されている。空力抵抗低減については、パルスレーザーにより機体前方に生成されたプラズマと衝撃波が干渉することにより発生する流体力学的効果が主要な役割を果たしていると考えられている。レーザー着火においても、その着火特性は生成されたプラズマの挙動と関連していると考えられている。そのため、生成されたプラズマ形状を制御することが可能になれば、とりわけ上記分野における工学的応用展開に繋がることが期待される。

単一レーザーパルスにより生成されたプラズマにおいては、生成プラズマがトロイダル状に変形し、その最終段階ではレーザー入射方向へ伸長していくことが知られている⁵⁻⁷⁾。一方で、静止気体中でレーザーパルスを短い周期で繰り返し照射した場合、2発目以降のパルスにより生成されたプラズマにおいてはレーザー入射方向への伸長が抑制される等、単一レーザーパルスにより生成されたその挙動とは、異なる可能性がある実験結果が報告されている⁸⁾。

このようなプラズマの挙動の変化から、周期的に照射されるレーザーパルスを利用することで生成されるプラズマの挙動を制御できる可能性が期待される。

そこで、本研究では、レーザー生成プラズマの挙動制御の可能性を数値解析により検討することを目的としている。本稿では、その初期段階として、単一レーザーパルスにより生成されたプラズマの挙動シミュレーションのために構築したコードの検討結果について報告を行う。

2. 解析方法

本研究では、自由大気中にレーザーパルスを集光した際に発生する現象を解析対象とする。以下では、支配方程式及び解析対象やその初期条件について紹介する。

2-1 支配方程式と計算スキーム 支配方程式は2次元のオイラー方程式を用いた。パルスレーザー入力エネルギーについては、オイラー方程式の右辺に生成項を付加することで考慮している。

数値解析は、対流項をMUSCL法により空間3次精度化したAUSMDVスキームにより離散化することで行った。

2-2 検証計算解析条件 構築したコードの検証のために、点源爆発シミュレーションを行い、発生する円筒状衝撃波の挙動について自己相似解との比較を行った。本解析におけるレーザーパルス入力パワーは 10^{18} W/m²、パルス幅は 10 ns

とした。

2-3 レーザー生成プラズマ挙動解析条件

レーザー生成プラズマの挙動のシミュレーションのために、文献7のレーザーパワー分布を基にした。Fig. 1は本研究で与えたレーザーパワーの空間分布を示している。図ではx軸の正方向にレーザーが照射されており、原点付近が(仮想的な)集光点と考えられている。本計算モデルでは、図に示すように、レーザー集光されても均一な分布にはなっておらず、レーザー照射方向に非対称な分布を有していることが特徴である。

Fig. 1 Pulse laser power distribution.

3. 結果と考察

3-1 検証計算結果

Fig. 2は点源爆発シミュレーションにより得られた圧力分布の結果を示している。図にはシミュレーション結果に併せてSedov-Taylorの理論に基づく自己相似解も示している。図の縦軸は衝撃波直後の圧力で、横軸は衝撃波位置で、それぞれ無次元化してある。図に示すように、本計算コードで得られた圧力分布は概ね理論により予測される圧力分布の挙動を捉えられていると考えられる。

3-2 レーザー生成プラズマ挙動解析結果

Fig. 1で示したような非対称なレーザーパワー分布により生成されたプラズマの挙動についてFig. 3からFig.5に示す。

図に示すように、生成されたプラズマは集光点付近で加熱され徐々に膨張していく。レーザー照射直後では、Fig. 2のレーザーパワー分布の形状から膨張した形状になっているのが見て取れる。その後、 $200\mu\text{sec}$ 以降では、形状が大きく変形している様子が見て取れる。上下に渦状の形状が形成されていることと、レーザー照射光源方向に向かって流れ構造が形成されている点の特徴である。

これらのレーザー生成プラズマの形状の特徴は、文献 5,8等の可視化結果で報告されているものと定性的には合っていると考えられる。即ち、単一レーザーパルスにより生成されるプラズマの形状のシミュレーションにおいて、可視化実験結果との少なくとも定性的な傾向は一致していると考えられる。

Fig. 2 Pressure distribution due to a point explosion.

Fig. 3 Laser induced plasma at 1.59 μsec after laser irradiation.

4. まとめ

レーザー生成プラズマの挙動制御の可能性検討に向けたシミュレーションコード構築を行った。コード検証のために点源爆発シミュレーションを行い、相似理論との比較の結果、

一致する結果が得られた。実際のレーザーのパワー分布モデルを用いた生成プラズマの挙動シミュレーションからは、可視化実験結果と定性的な傾向が一致する結果を得ることができた。

今後、プラズマ挙動制御の可能性の検討に向けて、本シミュレーションコードを応用することで、周期的に繰り返すレーザーパルスによるプラズマ生成シミュレーションを行うことが課題である。

Fig. 4 Laser induced plasma at 227 μsec after laser irradiation.

Fig. 5 Laser induced plasma at 579 μsec after laser irradiation.

引用文献

- (1) Knight, et.al, JPP.24(2009), 6, pp1153-1167.
- (2) Kim J., et.al., AIAA J., 46, 9(2011), pp2076-2078.
- (3) Adelgren, R. A., AIAA J., 43, 2(2005), pp256-269.
- (4) Tre'yakov, P. K., Physics-Doklady, 41,11(1996), pp566-567.
- (5) D. Bradley, et.al., Combust. and Flame, 138(2004), pp55-77.
- (6) T. A. Spiglanin, et.al., Combust. and Flames, 102(1995), pp310-328.
- (7) Ivan G. Dors, et.al., Applied Optics, 42(2003), pp5978-5984.
- (8) A. Matsuda et.al., AIAA Paper(2008) 2008-3898.