

線図による LSD の定常性の検討

Study of Laser-Supported Detonation Stationarity by Graphical Analysis

○中野 一朝(大同大・院)・白石 裕之(大同大)

○Ichiro Nakano(The University of Daido)・Hiroyuki Shiraisi (The University of Daido)

Abstract

In laser propulsion systems, laser-supported detonation (LSD) is considered the most important phenomenon because it can generate high pressures and high temperatures for laser absorption. In this study, computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed on LSD considering the laser absorption model and the thermal non-equilibrium model, and based on the results, "p-v plot of spatial distribution" and "p-v diagram for temporal distribution" have been applied. The stationarity of the LSD propagation can be judged by the comparison of both p-v diagrams.

1. はじめに

将来的に有望視されている宇宙推進システムの一つとして、レーザー光を飛行体内部のプラズマ化した推進剤に照射して推進力を得るレーザー推進システムが挙げられる。この推進システムは、推進剤の化学組成比で推進性能が規定される化学ロケットとは異なり、照射光の特性(強度、波長、パルス特性など)で推進のコントロールが可能である。また、燃焼器を搭載する必要がないため、構造の単純化や軽量化が見込めるなどのペイロード上の利点を持つ。このシステムにおいては、推進に必要な高温・高圧を得るためにレーザー吸収帯(電離面)と衝撃波面が一体となって伝播する特殊な detonation である、レーザー支持爆轟波(Laser-supported detonation, 以下 LSD)の存在が必須とされる。図1にLSDの伝播構造の模式図を示す。一方、レーザーを吸収していた電離面が弱くなり先行衝撃波に追いつけなくなった場合、LSDは伝播の遅いレーザー支持燃焼波(Laser-supported combustion wave, 以下 LSC)へと遷移する²⁾ものの推進力は得にくいと考えられ、本研究ではLSDを安定に伝播させるための知見を得る事も主眼に置いている。

LSDの伝播構造に関しては、先行研究より概要は明らかになっており²⁻⁴⁾、レーザー強度低下によるLSD-LSC遷移⁵⁾やレーザー波長をパラメータとした検討⁶⁾も行われた。

本研究では、これらの手法によるCFD解析結果に基づき、p-vプロットを作成する。ここでのp-vプロットとしては、「空間変化に関する」と「時間変化に関する」ものが考えられるが、本研究ではその両方を作成し、これらの比較よりLSDの伝播構造の定常性についての検討を試みた。

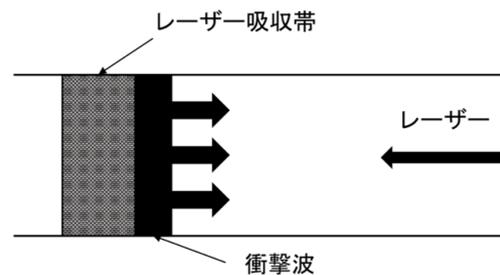


図1 LSD伝播構造の模式図

2. 物理流体数値解析模型と解析上の仮定

2.1 解析模型 図2に1次元物理流体解析の概念図を示す。解析模型としては格子数3000、格子サイズ0.01 mmとしている。レーザー光としてCO₂レーザー⁶⁾($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$)は右方から照射され、室温($T_0=300\ \text{K}$)の常圧(1 atm)アルゴンガス中をLSDが伝播する。なお、解析する上で高い電子温度を有するHot spotを設定している。これは、実験において金属をターゲットとしてレーザーを照射し、予め自由電子がシーディングされた状態からスタートさせる事に相当する。

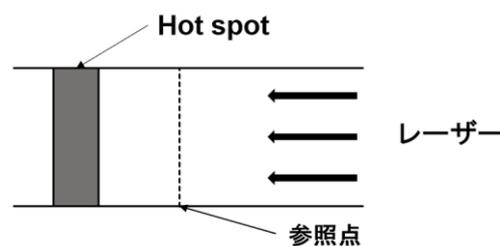


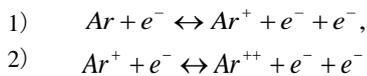
図2 1次元物理流体解析の概念図

本解析では、Hot spot は座標値 $x = 3 \text{ mm}$ を中央にして設置した。Hot spot の電子温度は $15,000 \text{ K}$ であり、サイズは 2 mm である。なお、シーディング量は先行研究¹⁾に基づいて被伝播気体の 1% 数密度としているが、これらの条件設定は初期の LSD 形成時間には影響するものの、形成後の挙動には影響するものではない。

また、時間変化に関する $p-v$ 線図を作図する上では参照点 (Reference point) を設定し、いわゆる定点観測的な系とした。

2.2 解析上の仮定 先行研究と同じく、以下の通りである。

- (1) 作動流体は、電氣的に中性である。
- (2) 化学反応として、以下の電離過程を考慮する。



(3) 温度非平衡モデルとして、Park の 2 温度モデルを用いる。ここで電子励起モードに関連付けられた電子温度は、他モードの重粒子温度とは別個に扱われる。

(4) 輸送効果として、熱伝導を考慮する。また、有効拡散係数の算出においては、両極性拡散を考慮する。

2.3 支配方程式 本解析の支配方程式は 1 次元 Navier-Stokes 方程式であり、これは各化学種及び全質量の保存式、運動量保存式、全エネルギー保存式及び電子エネルギー (電子並進-電子励起エネルギー) 保存式から成っている。解析スキームは先行研究と同様に重粒子-電子モード緩和項および輻射吸収項を陰的に扱った、semi-implicit TVD 差分スキームによって時間進行が施される⁵⁾。詳細については、そちらを参照されたい。

なお、比熱比 C_p と比エンタルピー h は Gnofr⁶⁾ や Matsuzaki⁸⁾ による温度多項式近似によって実在気体が考慮されている。

2.4 輻射吸収モデル 局所レーザー強度 $I(x, t)$ は、次式によって求められる。

$$\frac{dI(x, t)}{dx} = I(x, t) \times (K_{ea} + K_{ei})$$

ここで、添え字 e は電子、 a はアルゴン原子、 i は 1 価および 2 価のイオンを示している。

また本解析においては、先行輻射加熱による電子生成モデルを考慮している⁹⁾。

3. 物理流体数結果に基づく作図と考察

3.1 LSD の伝播構造

本稿では、 $p-v$ 線図の特徴を示すために典型的な LSD 発

生条件として照射レーザー強度は 6 MW/cm^2 の場合について言及する。

図 3 および図 4 に数密度分布および温度分布の数値流体解析結果を示す。なお、ここでは電子に関する数値を太線、重粒子に関する数値を細線で示している。右方より照射したレーザーより反応して生成された各波面は、図内で右方に進行する。図 3 において電子の数密度が急激に上昇している箇所が電離波面であり、重粒子数密度が上昇する衝撃波面と一致している事が示されている。同様に図 4 において電子温度上昇が衝撃波面による重粒子温度の急激な上昇に追従しており、LSD が生成されていることが確認できる。本稿では、このような LSD が発生する条件において、これがどの時点で定常伝播へと移行するのかを判断したい。

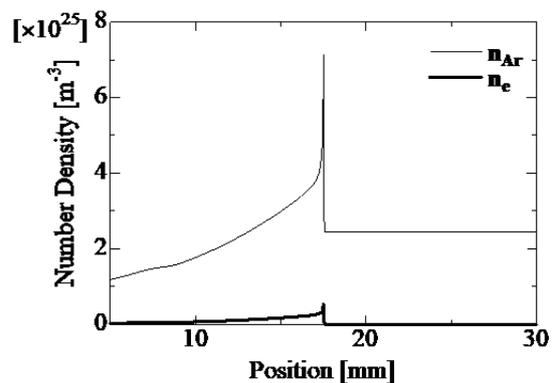


図 3 各化学種の数密度分布図

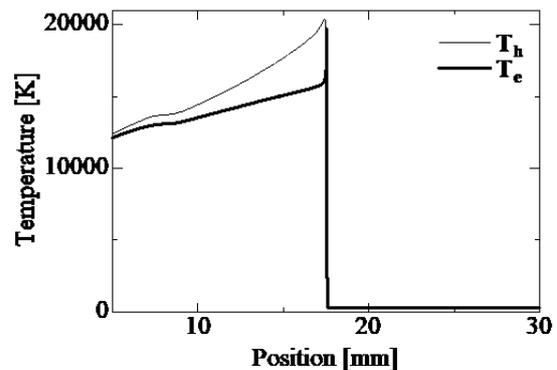


図 4 電子温度と重粒子温度分布図

3.2 時間変化 $p-v$ 線図による LSD 定常伝播の判断

図 5 は、各参照点における時間変化に関する $p-v$ 線図である。ここでは、参照点 12 mm (LSD 波面到達時刻: $t = 2.30 \text{ } \mu\text{sec}$) を破線、 14 mm (同 $t = 2.70 \text{ } \mu\text{sec}$) を細線、そして 16 mm (同 $t = 3.20 \text{ } \mu\text{sec}$) でのプロットを太線で示している。本図より、LSD の前方 (線図の左下部) および後方 (右上部) の一致を確認出来た。線図の一致はプロファイルの安定を示しており、この事は 12 mm の位置に到達した次点で LSD は既に定常伝播になっている事を示している。

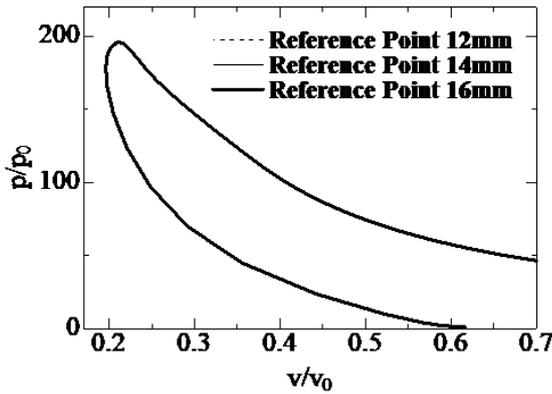
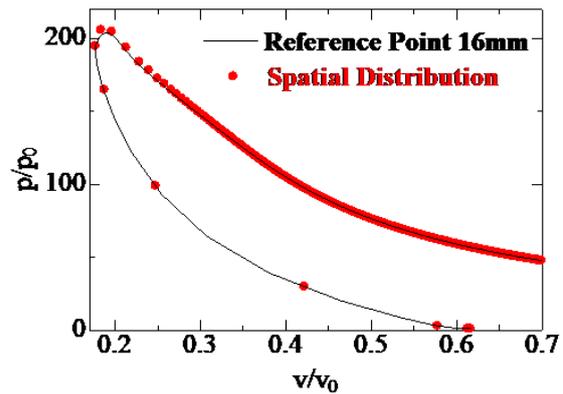


図5 時間変化に関する p-v 線図



(b) 格子数 6000, 格子サイズ 0.005 mm

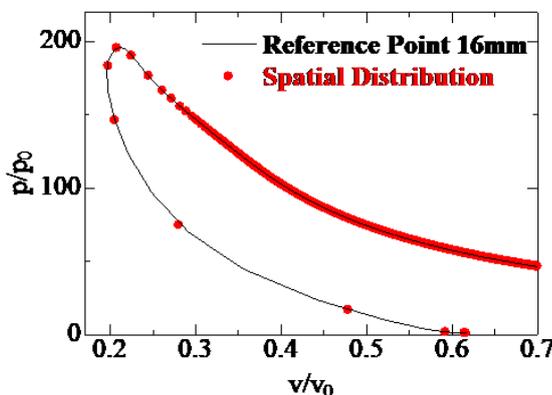
3.3 空間変化 p - v プロットによる LSD 定常伝播の判断

前項では、時間変化に関する線図を幾つもの参照点に関して作図し、それらの比較によって LSD 定常化の時点を判断した。この方法は理解しやすいが、複数の参照点で時間変化に関する p - v 線図を作成しなければ基準となる線図が判断できない。検討には幾つもの線図を作成する必要がある。

そこで別のアプローチとして、空間変化の p - v で同様のプロットを行い、それを基準にして前項のある参照点での作図が定常 LSD のものかどうかを判別する事が可能かどうかを示す。

図6は、同一解析条件下での(a) 格子数 3000, 格子サイズ 0.01 mm および(b) 格子数 6000, 格子サイズ 0.005 mm とした場合の解析結果を p - v プロットしたものである。なお、時間変化の p - v 線図としてはは確実に定常 LSD と判断される場合として参照点 16 mm (LSD 波面到達時刻: $t = 3.20 \mu\text{sec}$) の場合を比較対象とした。

本図においては、空間変化の p - v プロットがやや粗いものの、両者は殆ど合致しており、 $10 \mu\text{m}$ 間隔程度のプロットでも時間変化 p - v 線図との併用で定常伝播の判断が可能である事が示された。



(a) 格子数 3000, 格子サイズ 0.01 mm

図6 時間変化-空間変化に関する p-v 線図

4. 結び

本研究では、LSD の伝播構造の定常性について判断する手法として、1 次元数値流体解析を実行した結果に基づいて時間変化及び空間変化に関する p - v プロットを作成した。

まず、時間変化の p - v 線図においては、幾つもの参照点上での作図結果を比較した。その結果、ある位置よりも後方では線図のプロファイルの変動はなくなり、それ以降は定常 LSD であると判断可能である事が示された。

しかしながら、この手法は複数の参照点での線図を作成しなければ基準となる線図が判断できず、検討には幾つもの線図を作成する必要がある。そこで別のアプローチとして、空間変化の p - v で同様のプロットを行い、それを基準にして前項のある参照点での作図が定常 LSD のものかどうかを判別する事が可能かどうかを示した。

その結果、空間変化の p - v 線図は $10 \mu\text{m}$ 程度の格子間隔でも定常 LSD と判断される参照点での時間変化に関する p - v プロットとの一致は良好で、空間変化の p - v プロットを定常 LSD の判断に用いる事が可能であることが示された。

参考文献

- 1) Y. P. Raizer, Laser-induced Discharge Phenomena, Consultants Bureau, New York, 1977.
- 2) H. Shiraishi, Numerical Analysis on Thermal Non-equilibrium and Multidimensional Laser-Supported Detonation Wave Using Multiply-Charged Ionization Model, Proceed. 27th ISTS, 2009, b-34, pp. 1 - 4.
- 3) H. Shiraishi, Fundamental Properties of Non-Equilibrium Laser-Supported Detonation Wave, Proceed. 2nd Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion, 2003, pp. 68 - 79.
- 4) H. Shiraishi, Numerical Analysis on Laser-Supported Plasma for Laser Propulsion Systems, J. Space Tech. Science, 23 (2007), pp. 20 - 29.
- 5) H. Shiraishi and Y. Kumagai, Numerical Analysis of Threshold between Laser-Supported Detonation and Combustion Wave Using Thermal Non-Equilibrium and Multi-Charged Ionization Model, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 10 (2012), pp. Pb_59 - Pb_63.

- 6) H. Shiraishi et al., Numerical Analysis of Effects of Incident Laser Wavelength on Thermal Nonequilibrium Laser-supported Detonation Wave, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 6 (2011), pp. Pb_1 - Pb_5.
- 7) P. A. Gnoffo et al., Conservation Equations and Physical Models for Hypersonic Air Flows in Thermal and Chemical Nonequilibrium, *NASA Technical Paper 2867*, 1989, pp. 1 - 57.
- 8) R. Matsuzaki, Specific Heat and Isentropic Exponent of High Temperature Gases. Exact Analytical Expressions, *AIAA Paper 80-1532*, 1980, pp. 1 - 11.
- 9) H. Katsurayama et al., Preliminary Investigation of Thermochemical Nonequilibrium behind a Strong Shock Wave with Precursor Photoionization in Argon, *AIAA 2007-4552*, (2007).