ー次元LSD数値解析における 格子解像度の検証と カットオフ簡易モデルの検討

山口大学 石田樹、葛山浩

第8回「高エネルギー電磁ビームに誘起される放電と その工学的応用」ワークショップ 2020/3/25

過去の研究

- 神田らはレーザー推進機におけるプラズマ数密度を計測した 作動流体をArとし圧力0.2atmで実験を行っている
- レーザー強度が大きい場合に、神田らの実験 値と我々のCFDに大きな違いが生じている



 CFDにおけるカットオフのモデリ ングをきっちりしたい



カットオフ密度とは

 レーザーの角振動数とプラズマ角振動数が等しくなるときの プラズマ密度を臨界密度または、カットオフ密度と言う



- ・プラズマ角振動数≧レーザー角振動数となるとレーザーはプラズ
 マ内に進入できなくなる
 - ・プラズマがレーザーを吸収できなくなりLSDが起きなく なってしまう

研究目的

カットオフ現象を再現できる一次元CFDコードの開発
 ・ カットオフはレーザー波長以下で起きているため、現在の解像度ではモデリングすることができない



- 格子を細かくすることで電子数密度の上昇を複数点でとらえる
- どれくらい細かくするとモデリングできるのか調べる

逆制動輻射吸収係数

- Kemp、Raizer(これを使用)の式など(カットオフ無視)
 - $-k_{inv-ion} \sim ag_f(T_e)n_e^2/T_e^{1.5}$
- Johnston、Huguesの式など

$$-k_{inv-ion} \sim ag_f(T_e)n_e^2 / \left[T_e^{1.5} \sqrt{1 - \omega_p^2 / \omega_L^2}\right]$$

$$-\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m_e \varepsilon_0}}, \ \omega_L = \frac{2\pi c}{\lambda_L}$$

- カットオフ密度で、吸収係数無限大、それを超えると虚数になり、計算不能

- 計算上、カットオフ密度を超えた場合、それ行こうはレーザー吸収が起こらないようにモデリングすると、吸収が極大→ゼロに不連続に変化することになり、うまく計算がいかない
- カットオフ密度に近づく数点を解像できるCFDを行い、カットオフを簡易にモ デリングできないか?

解析モデルと計算条件

- 支配方程式:熱化学非平衡(二温度モデル)を考慮した
 一次元Navier-Stokes方程式(電子熱伝導、拡散を含む)
- ・ レーザー吸収:逆制動輻射(電子 イオン、電子 中性粒子)
- 化学種

- 空気:二価電離を考慮した13化学

その他のパラメータ

初期圧力	1 atm	
レーザー波長	10.6 µm	
解析領域全長	5 mm	

• 格子数と格子幅

格子数	500	1000	2000	4000	8000
格子幅 [µm]	10	5	2.5	1.25	0.625

計算結果1 S=40 MW/cm²の時 (完全なLSD形態となる時)

圧力分布(S=40 MW/cm²)



- 格子幅が狭くなるほど、圧力ピーク値は上がり、際限がない
- どの格子幅でも、数点(2~3点)で完全にレーザーを吸収するので、格子幅
 を狭くするほど、小さい体積で完全吸収が起こり、圧力が上がり続ける

電子温度分布(S=40 MW/cm²)



- ・ 電子温度も格子幅が小さいほど最大値が大きくなるが、 Δx =0.625 μmで飽 和の傾向が見える
- 温度上昇と共に、電子熱伝導も大きくなるため、どこかで釣り合うところが出てくるためか

電子密度分布(S=40 MW/cm²)

• 電子数密度



- 電子数密度も、圧力と同様、格子幅が小さいほど、際限なく値が大きくなる
- ・ 衝撃波捕獲の数点(2~3点)で最大数密度に到達し、カットオフに至る過程をモデリングするのは難しい。

衝擊波速度(S=40 MW/cm²)



- 衝撃波速度は、格子幅に全く依存しない
- LSD速度を再現するだけなら、*∆x*=10 µmの格子で十分

計算結果2 S=10 MW/cm²の時 ("不完全" なLSD形態となる時)

- 不完全なLSD
 - 衝撃波と吸収帯は一緒に伝播するので、LSCではない。
 - 但し、衝撃波と吸収帯の距離が徐々に開いて行ってしまう。
 - C-J条件のスピードよりも伝播速度は小さい。

圧力と重粒子温度(S=10MW/cm²)



- 明白な格子依存性が見られ、格子収束もしてない
- 温度の最大値が大きくなり続けるのは、格子幅が狭くなると、狭い体積 で吸収が起こるためだと考えられる

(備考)吸収帯前縁の圧力振動について



- 2~3点の格子で、完全乖離に近い乖離が起こるが、S=10 MW/cm²の場合は、 N2とO2の乖離位置がずれるため、この振動が起こる?
- S=40 MW/cm2の場合は、衝撃波前縁からN2もO2も乖離していくので、一見 不自然な圧力振動は見られない。
- 単なるスキームのオーバーシュート・アンダーシュートの可能性もあるが・・・

電子温度と密度分布(S=10MW/cm²)



電子数密度

電子温度



- 格子幅を狭くしてもきりがない。
- 格子収束もしてない。

衝撃波速度(S=40 MW/cm²)



 Δx=10µmの場合のみ速度低下が見られたが、それより格子が細かければ、
 依存性はほぼ見られない

電子数密度の比較



- S=40MW/cm²の場合
 - - 衝撃波捕獲点数(不連続面)でほぼカットオフ電子が生成されるので、カットオ
 フに至る空間過程のモデリングは難しい
- S=10MW/cm²の場合
 - 吸収が完了する点数は、格子幅を狭くすると増える。もっと格子点数を増やせば、何らかの空間モデリングが可能かも



- ・ 作動流体を空気とし、レーザー強度*S*=40MW/cm²(完全LSDのケース)と
 S=10MW/cm²(不完全LSDのケース)で計算を行い、格子依存性を調べた。
- 両レーザー強度において、電子温度・圧力・電子数密度は、格子幅の減少に
 伴に増加し、格子収束性も見られない
 - 格子幅が小さくなるほど、小さい体積で等積加熱されることになり、きりがない。
- 一方、衝撃波速度は、格子幅にほぼ依存しない
- S=10MW/cm²の場合は、格子幅を細かくすることで、吸収帯前縁を捉える格 子幅は増えていくため、さらに格子幅を細かくすれば、カットオフに至る何らか の空間分布をモデリングできるのかもしれない。
 - 但し、これ以上格子を細かくするのは、現実的ではないので、格子間隔 によらないモデリングが必要