2020年 3月 24日

「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」研究会 B. レーザー放電の数値モデルと実験研究

レーザー支持デトネーション波の 伝播速度及び波面形状を決定する レーザーパラメータに関する研究

東京大学大学院 〇松井康平 小紫公也 小泉宏之



1. 研究背景

- 2. ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定
- 3. ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー 強度の関係
- 4. 軸外における電離波面の斜め方向の伝播
- 5. 結言





「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」研究会

研究背景:先行研究 レーザー推進概要

レーザーデトネーション推進の原理及び特徴と利点

- 1) Laser focus
 2) Energy conversion
 i) Laser focus
 i) Energy conversion
 i) Energy
- レーザーデトネーション推進の推力生成サイクル

デトネーション方式の特徴と利点

✓ 空気吸い込み式
 ✓ パルスデトネーションエンジンサイクル
 ✓ 地上レーザー装置の繰り返し利用

- ▶ レーザー加熱によるパルス デトネーションエンジンサイクル[1]
- ▶ PDEサイクルは定圧燃焼サイクルなど に比べて高い熱効率[2]
- ▶ レーザーから爆風波へのエネルギー 変換効率は50%程度 [3]
 - [1] K. Komursaki, Encyclopedia of Aerospace Engineering, 2010.
 - [2] W. H. Heiser, .J. Propul. Power, 2002.
 - [3] K. Mori, J. Appl. phys. 2004.
 - ⇒ <u>高ペイロード比</u>
 ル ⇒ <u>簡素な機体構造</u>
 ⇒ <u>レーザー基地の費用償還</u>
- <u> 一〉 打ち上げ費用の低価格化</u>

研究背景:先行研究 LSDの特徴

レーザー支持デトネーションのエネルギー変換過程



LSD: Laser Supported Detonation

▶電離波面が衝撃波を伴って超音速で伝播

▶気体は定積的に加熱される





<u>推進システムの最適化にはLSD</u> の伝播機構の解明が重要

LSD伝播の概念図

研究背景:先行研究 電離波面伝播速度について

LSD伝播速度はレーザーパラメータによる依存性がある

• Mori (2002)



図1.11 非軸パラボラミラーによるレーザーの集光

Ushio (2006)

2020/03/25

・線集光,有効ビーム径 0.2 mm F值 1.6



図1.12 線状集光とウェッジ型ノズルによる横方向膨張の閉じ込め



わちビーム径及びF値に対して

依存性あり

先行研究 電離波面伝播速度について

F値やビーム径に依存する伝播速度のばらつきの排除

先行研究:種々の実験系によって速度 10 ■ Mori. 2002 のばらつきがあり、1次元数値モデルと Propagation Velocity, u/km•s⁻¹ Δ 比較する際に問題がある. ♦ Ushio, 2008 $\triangle \triangle$ ${\bigtriangleup}$ \triangle Bounot, 1979 □ Maher, 1974 二次元的な影響が表れているのでない か? 多次元性を排除するために径を広げて, Gas species: Air かつ平行ビームで実験を行い, 伝播速 Atmospheric pressure: 1 atm 度を測定する. 10 100 1000 Laser Intensity, $S/GW \cdot m^{-2}$ 先行研究における電離波面伝播速度と レーザー強度の関係 ✓ 径を広げ平行ビームを実現することに よって電離波面伝播速度がどのような

強度依存性をもって伝播するか調査

研究背景: 先行研究 電離波面伝播速度について



レーザー放電における電離波面形状

- 先行研究によっては速度の強度依存性 は平均レーザー強度 (レーザーパワー/ ビーム断面積)で評価
- しかしレーザー強度分布について言及 されているものはほとんどない
- レーザー強度分布によって波面形状は 異なることが予測され、伝播速度の強 度依存性が先行研究によって異なるの はこのような効果が影響?

✓ 波面形状がどのようなパラメータによって決定されるか調査



研究背景:研究目的及び方法 研究目的及び方法

種々の実験系によって電離波面伝播速度が異なり,レーザー強度分布の影響も示 唆される



電離波面伝播速度及び波面形状を決定づけるパラメータは何なのか?



<u>F値が10程度と大きく、平行ビームに近い光学系を用いて電離波面伝播速度</u> 及び波面形状を決定するパラメータについて調査

◆ 局所レーザー強度依存性を調査するために強度空間分布を精密に測定

◆ ビーム中心軸上の局所レーザー強度依存性を調査

◆ ビーム軸外の局所レーザー強度依存性を調査

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の 測定

2020/03/25

「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」研究会 ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定

炭酸ガスレーザーのパワー履歴とバーンパターン

- ◆ <u>使用レーザー: TEA-CO2 レーザー</u> 定格エネルギー: *E_{typical}* = 12 J/pulse 発振波長: λ = 10.6 μm
- ▶ 時間変化するパワー履歴を利用して, 遅延時間を変えることで強度依存性を 調査する
- ▶ 使用レーザーは縦方向と横方向に異なる 強度分布をもっている (ガウシアン分布とトップハット分布)



CO2 レーザーの出力と積算エネルギーの時間 履歴. 横軸はレーザー発振の開始からの経過時間を示 す 30mm (Gaussian)



CO2 レーザーの出力窓直後でのバーンパターン

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 ビームウェストでのビーム形状はF値とM²よって決定



2020/03/25

「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」研究会 ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 平行ビームを実現するための光学系



集光光学系, (a)二つのミラーによって集光.(b)レンズによって集光

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 ピンホール法によるプロファイル測定



▶ 強度分布を以下のように仮定

$$S(x, y) = S_{\text{peak}}G(x)T(y)$$

 y = 0を測定することでS(x,0) ∝ G(x) x = 0を測定することでS(0,y) ∝ T(y) がそれぞれ求まる(左図)

<u>ピンホール法によってプロファイルを同定</u>

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 ビーム径の測定によるビーム品質M²の推定



▶ ビーム径と距離の関係の式から M²をフィッティングによって求 める

$$W(z) = \sqrt{W_0^2 + \frac{M^4 \lambda^2}{\pi^2 W_0^2} z^2}$$

- W₀:焦点におけるビーム径
- ▶ ビーム径を5 点以上を測定し, フィッティングすることがISO によって推奨[1]

ガウシアン方向, トップハット方 向でそれぞれ15,21となった

[1] ISO 11146

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 強度分布測定によって求められた有効ビーム径

表2.2 各光学系における有効ビーム径

	D_4		<i>D</i> ₃		<i>D</i> ₂		<i>D</i> ₁	
Property	G方向	T 方向	G方向	T 方向	G 方向	T 方向	G方向	T 方向
<i>f</i> [mm]	500	400	317.5		225		127	
F	16.7	13.3	10.6		7.5		4.2	
<i>W</i> ₀ [mm]	1.7	2.0	1.1	1.6	0.8	1.1	0.4	0.6
$D = 4\sqrt{\frac{W_{\rm G0} W_{\rm T0}}{\pi}} [\rm mm]$	4.1		2.9		2.1		1.2	

f: 焦点距離, F: F値, W₀:ビームウェスト半径, D₀:有効ビーム径, G方向:ガウシアン方向, T方向: トップハット方向

<u>強度分布測定によって各光学系の有効ビーム径が求まった</u>

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 使用集光光学系における平行ビーム径の実現



各集光光学系におけるトップハット方向のビーム半径 と焦点からの距離の関係.破線は測定範囲を 表す.

- ▶ 各集光光学系におけるプロファ イル測定より求めたビーム径と 距離の関係
- ▶ D = 2.1 mm と1.2 mmでは ビーム径平行部及びD = 4.1 mmと2.9 mmでの強度領域で 測定するためにアテニュエー 夕ー使用
- ➤ ビーム径は広がっているが、以降、凡例はビームウェストでの径で表記(強度の計算時には広がり考慮して計算)

ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定

<u>強度プロファイルの測定</u>

- ピンホール法によって強度分布測定を行った結果、ガウシアン方向及びトップハット方向のビーム中心軸上での局所レーザー強度とその周辺での強度分布が計測された.
- ビーム径とビームウェストからの距離の関係を求めた結果、ガウシアン方向及びトップハット方向のM²がそれぞれ求まり、任意の時間、位置における局所レーザー強度を求めることが可能となった.

レーザー軸上及び軸外における速度の強度依存性 を議論する際の基礎となるデータを取得



3.ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー強度の関係

ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー強度の関係 レーザー強度と電離波面伝播速度のビーム径依存性



 <u>D ≧ 2.9 mm以上ではレーザー</u>
 <u>強度によって一意に定まる(Line1)</u>

Line 1:
$$V = 2.2 \times 10^{-1} S^{0.46}$$

✓ D = 1.2 mmでは異なる関係(Line2)

Line2:
$$V = 3.5 \times 10^{-2} S^{0.69}$$

✓ 2.9 mm以上に広げても速度が強度に よって一意に定まることが示唆



<u>1次元解析モデルとの比較ではD ≧</u> 2.9 mm以上での実験が必要

ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー強度の関係 伝播速度とレーザー強度の関係の無次元化



「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」研究会

ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー強度の関係

ビーム中心軸上の電離波面伝播速度を調査

- > 2.9 mm以上の径において<u>伝播速度は強度に対して一意に定まるとい</u> うことが明らかになり, $\bar{V} = 1.6 \times 10^{-1} \bar{S}^{0.46}$ という関係が得られた.
- 一方それらより小さい径では異なる傾向が得られており、1.2 mmに おいては傾向が異なり、 $\bar{V} = 1.4 \times 10^{-2} \bar{S}^{0.65}$ となった.

2020/03/25

弓型電離波面形状のビーム径依存性

軸外における電離波面の斜め方向の伝播



- ▶ 中心(ビーム中心軸上)の速度の関係 はわかったが,軸から外れたところの 速度はどうなっているのか?
- ▶ 波面形状を定める要因は何なのか?



ビーム径による波面形状の違い



波面形状を決めるパラメータとして 斜め方向の伝播速度について調査

化学デトネーションにおける斜め方向の伝播速度



弾丸により誘起された 燃焼によるデトネーションに おける強い過駆動デトネーション

化学デトネーションにおける斜めデトネーション

- ・ 強い過駆動デトネーションとなり、波頭の速度は 弾丸の速度V_{projectile}で定まる
- 弾丸によって誘起された衝撃波によって燃焼反応が 発生
- 加熱量は等量比によって定まり空間で一様
 q = const
- ・ 波面形状は波頭の速度とC-J速度の比によって決定 $\cos \theta = \frac{V_{cJ}(q)}{V_{projectile}}$

[1] 笠原 次郎, 日本航空宇宙学会論文集,47,457 (1999).

レーザー放電における斜め方向の電離波面伝播速度



レーザーデトネーション 波面形状は弓型であり角度は位置に依存
 $\cos \theta(r) = \frac{V_{normal}(r)}{V(r)}$ レーザー強度は分布をもっているため、加熱量も分 布をもつ
 π をもつ
 (r) (r)

$$q(r) = \frac{S(r)}{V(r)}$$

- 波面位置によってLSD領域が異なる
- ・ 斜め方向の伝播速度は $V_{\text{normal}}(r) = V(r) \cos \theta(r)$ に よって算出

レーザー放電におけるシュリーレン写真

/ 局所レーザー強度と波面形状を高解像度で撮る必要がある

斜め方向の伝播速度及び波面形状はどのように定まる?

<u>局所加熱率で依存する場合…</u>

斜め方向の伝播速度は単位面積あたり の加熱量で定まる

<u>⇒ Scosθ によって依存</u>

局所電界強度に依存する場合…

斜め方向の伝播速度は角度によらず 局所の電離周波数と拡散係数によって定まる

<u>⇒Sによって依存</u>

Objectives

<u>斜め方向伝播速度を測定しS及びScosθ依存性を</u> 調べることでどのように波面形状が定まるか調査



波面形状とレーザー強度分布



D = 2.9 mm, ガウシアン方向から見た電離波面進展 の時間履歴

- 画像解析によって得られた波面形状とレーザープロ ファイル履歴
- ・ 波面形状の時間変化は速度と比較して十分小さくV(r)=V(0)
- ・ 斜め方向の伝播速度V(r)cosθと強度の関係を算出

「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」研究会

斜め方向の電離波面伝播速度の強度依存性



- ・ 局所レーザー強度よりも波面進行方向に入射されるレーザー強度で律速
- D ≥ 2.9 mm よりD = 1.2 mmで速度が遅い異なる傾向

斜め方向伝播速度とScosの関係と波面形状



以下に示す領域を指数関数でフィッティング

• $D \ge 2.9 \text{ mm}, S > 500 \text{ GW/m}^2$

Line 1: $\bar{V} = 1.6 \times 10^{-1} \bar{S}^{0.46}$

• <u>D = 1.2 mm</u>

Line 2: $\bar{V} = 1.4 \times 10^{-2} \bar{S}^{0.65}$

• $D \ge 2.9 \text{ mm}, S < 500 \text{ GW/m}^2$

Line 3: $\bar{V} = 3.3 \times 10^{-1} \bar{S}^{0.30}$

波面形状すなわち波面角度は以上の局所レーザー 強度と斜め方向伝播速度の関係に従うように決定

軸上における速度と波面端部における速度の比較



第3章で得られたビーム中心軸上での 伝播速度にLine3を追加

• $D \ge 2.9 \text{ mm}, S < 500 \text{ GW/m}^2$

Line 3: $\overline{V} = 3.3 \times 10^{-1} \overline{S}^{0.30}$

Line3は主に波面端部での関係式であり、ビーム中心軸上での電離波面伝播 速度と波面端部における速度が一致



ビーム中心軸上及び軸外で同じ関係式が成立

D = 2.1 mmにおける伝播速度の強度依存性



D = 2.1 mm の条件においては過渡的であり, レーザー強度が強い条件ではD ≧ 2.9 mmと同じ相関にあり, 弱くなるにつれてD = 1.2 mmの傾向に遷移している

「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」研究会

波面形状から局所の斜め方向の伝播速度を調査

- SとScosθによる違い
 - ▶ 斜め方向伝播速度は各径において波面角度を考慮した局所レーザー強度, すなわちScosθによって定まる.
- 強度領域および径による斜め方向伝播速度の依存性 $\bar{V} = 1.6 \times 10^{-1} \bar{S}^{0.46} (D \ge 2.9 \text{ mm}, S \ge 500 \text{ GW/m}^2)$ $\bar{V} = 3.3 \times 10^{-1} \bar{S}^{0.30} (D \ge 2.9 \text{ mm}, S \le 500 \text{ GW/m}^2)$ $\bar{V} = 1.4 \times 10^{-2} \bar{S}^{0.65} (D = 1.2 \text{ mm})$ という関係が得られ、**これらの関係に従うように波面形状が定まる**ことが明 らかとなった、
- 電離波面伝播速度を斜め方向の伝播速度、レーザー強度を波面進行方向に入 射されるレーザー強度として解析することでビーム中心軸上及び軸外で同じ
 関係式が成立することが明らかとなった



2020/03/25

「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」研究会

33



レーザー支持デトネーションの電離波面伝播速度を決定づけるパラメータについて 種々の集光光学系を用いて調査

- <u>
 軸外における斜め方向の伝播速度</u> 軸外において斜めデトネーションと見して解析すること伝播速度とレーザー強度に一意の関係があることが明らかなり、得られた関係に従うように局所の波面の角度が決定されることが明らかとなった。
- ビーム中心軸上と軸外での関係 軸外における斜め方向の伝播速度と軸上での伝播速度を比較することでそれら は同じ関係式で表せることが明らかになった.

また以上の結果はD ≧2.9 mmにおける結果であり, D = 2.1mm 及び1.2 mmの 場合においては異なる結果が得られ, 径による違いが生じる原因については今後調 査が必要である.

御清聴ありがとうございました

2020/03/25

「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」研究会

Appendix

2020/03/25

「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」研究会

第3章 ビーム中心軸上における電離波面伝播速度と局所レーザー強度の関係 LSDの可視化:使用カメラと撮像光学系

- ▶ 超高速<u>連射カメラ</u>: Ultra 8
- ・ 最大フレームレート: 100 Mfps 1ショットあたり8フレームを撮影
- 露光時間: *t*_{expose} = 20 ns
- 画素数: 520 × 520 pixels/flame
- 解像度:~20 pixels/mm

露光時間当たりの移動距離: 0.1 mm (@ V = 5 km)



- 出力: P_{probe} = 1.45 W
- 波長: 532 nm







図3.1 HSHS法の光学系の概要図と撮影される画像

第2章 ビームウェストにおけるレーザー強度分布の測定 使用光学系の焦点距離とF値

表2.1 各光学系の焦点距離及びF値

	<i>D</i> ₄		<i>D</i> ₃	<i>D</i> ₂	<i>D</i> ₁	
Property	G方向	T 方向	G方向T方向	G方向T方向	G方向T方向	
<i>f</i> [mm]	500	400	317.5	225	127	
F	16.7	13.3	10.6	7.5	4.2	

f: 焦点距離, F: F値, G方向: ガウシアン方向, T方向: トップハット方向

ビーム径を決定づけるパラメータM²は概算値であり,ガウシアン方向と トップハット方向で異なる値を持つことが示唆される



<u>局所強度の及びビーム径の決定には、ガウシアン方向及びトップハット方向の</u> レーザー強度分布を及びビーム品質値M²を精密に測定する必要がある

第4章 軸外における電離波面の斜め方向の伝播

高解像度カメラによる波面の可視化

斜め方向の伝播速度 ⇒ 波面角度に依存 ⇒ 波面を高解像度で撮影する必要がある

- ◆ <u>高解像度高速度カメラ</u>: iStar sCMOS
 Ultra8と比較して量子効率5倍, 画素数20倍
- 露光時間: t_{expose} = 5 ns
- 解像度: <u>~200 pixels/mm</u>
- 露光時間当たりの移動距離: <u>0.025 mm</u>
 (@ V = 5 km)

<u>(Ultra 8ではそれぞれ20 pixels/mm,0.1mm)</u>



図4.3 iStar sCMOSの外観



短露光, 高感度カメラによる高解像度の波面を撮影

[1]K. Shimamura, Jpn J. Appl. Phys., 54, 5 (2015)



2020/03/25

第4章 軸外における電離波面の斜め方向の伝播

トップハット方向における斜め方向の電離波面伝播速度



- ・トップハット方向でもScosので律速される傾向
- ・プロファイルによる斜め方向伝播速度の強度依存性の違いは見られない

Appendix

波面形状と速度の関係

$$V_0 = aS_0^b$$

斜め方向の速度と波面進行方向に入射されるレーザー強度の関係

 $V(r)\cos\theta(r) = a\{S(r)\cos\theta(r)\}^b$

波面形状の変化が小さいという仮定をおくと $V_0 = V(r)$ が成り立つので, $aS_0^b \cos \theta(r) = a\{S(r) \cos \theta(r)\}^b \quad \left\langle \bigcup \right\rangle \quad \cos \theta(r) = \left\{\frac{S(r)}{S_0}\right\}^{\frac{b}{1-b}}$

<u>波面形状は速度の関係式のb及び強度比のみで決定される</u>

Appendix

閉じ込めによる伝播の差異 (D = 4.1 mm)





閉じ込めあり



閉じ込めなし



 ✓ 閉じ込めの有無,入射レーザー エネルギーによる伝播速度 の差異はなし

⇒ 閉じ込めの効果はない