



## 小特集 レーザー核融合における新点火方式：衝撃点火

# 4. 超高速インパクトア生成実験

境家達弘

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

(現 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻)

(原稿受付：2007年6月25日)

衝撃点火方式では、燃料の点火のために超高速 (1000 km/s) インパクトアの生成が必要である。超高速の達成にはその加速過程で起こるレイリー・テイラー (RT) 不安定性を抑制することが重要である。近年開発された RT 不安定性の抑制手法を用いて、超高速 (640 km/s) インパクトアを生成することに成功した。また、得られた超高速インパクトアが持つ動圧力は約 1 Gbar (10億気圧) であり、前人未到の高圧力物性研究の道具となりうる。

### Keywords:

super-high velocity, impactor, Rayleigh-Taylor instability, suppression, radiography

### 4.1 はじめに

レーザー核融合研究においては現在、高速点火方式が精力的に研究されている [1]。この方式は高密度に圧縮された燃料に超高強度・超短パルスレーザーを照射することで、燃料を局所的かつ瞬間的に加熱して核融合反応を起こす手法である。この手法では、超高強度レーザーによって生成された電子やプロトンのような高エネルギー粒子によって加熱が行われるため、相対論的電子と物質の相互作用といった新しい物理機構の解明が必要となっている [2]。また一方で、主燃料の高密度圧縮の妨げとなるレイリー・テイラー (RT) 不安定性についてもこれまで研究されてきた [3]。RT 不安定性の理解が進んだことによって [4]、その抑制手法の開発も行われた [5-8]。これを受けて、衝撃点火と呼ばれる新しい点火方式が提案された [9]。衝撃点火では、高密度に圧縮された燃料に超高速のインパクトアを衝突させることによって加熱し核融合反応を起こす。この時、超高速インパクトアの生成には RT 不安定性を抑制し十分加速することが最も重要である。

衝撃点火方式では流体同士の衝突によって点火を起こすので、超高強度レーザーによって生じる相対論電子と物質の相互作用のような複雑な物理機構を介することがなく、理論的には高速点火方式と同程度のエネルギー利得を達成できると予測されている [9]。さらに、主燃料を圧縮するために必要なレーザーと同等のレーザーでインパクトアの加速を行うので、超高強度・超短パルスレーザーを必要とせず、炉設計にかかるコストを大幅に低減することが可能である。また超高速インパクトアが持つ動圧力は 50 Gbar (500億気圧) に達し、これはレーザー誘起衝撃波で生じることができる圧力の 2, 3 桁高い値であり、前人未到の高圧力物性研究の道具にもなりうる。本章では、衝撃点火の鍵を握る超高速インパクトアの生成について基礎実験の結

果をふまえて記述する。

### 4.2 レイリー・テイラー不安定性の抑制

衝撃点火においてインパクトアに要求される 1000 km/s もの超高速を達成するためには、高い圧力による加速あるいは長い加速時間が必要となる。この時、加速過程で起こるレイリー・テイラー (RT) 不安定性によってターゲットが破断される可能性があるため、それを抑制しなければならない。これまでに、レーザー生成プラズマにおける RT 不安定性は理論的 [10] にも実験的 [3, 4] にもよく研究されていて、その成長率  $\gamma$  は、

$$\gamma = \sqrt{kg/(1+kL)} - \beta kv_a \quad (1)$$

で表されることがわかってきた ( $k$  は擾乱の波数,  $g$  は加速度,  $L$  は密度スケール長,  $\beta$  は熱伝導機構に依存する抑制係数,  $v_a$  はアブレーション速度)。右辺第 1 項は古典的な成長を、第 2 項はアブレーションによるその抑制項を表している。この成長率は加速度を大きくすると当然大きくなってしまいが、密度スケール長やアブレーション速度を制御することによって成長を抑制することができる。これまでに、その抑制手法についていくつか開発されてきた [5-8]。ここでは、ターゲットに高 Z 物質を添加し、そこで発生する輻射による加熱を利用してアブレーション速度と密度スケール長を大きくすることにより RT 不安定性を抑制する方法を用いた [5]。

図 1 は 2 次元輻射流体コードによる RT 不安定性のシミュレーション結果である [11]。図 1 (a) はレーザー照射後 3.5 ns におけるポリスチレン (CH) ターゲット、(b) は 2.6 ns における臭素 ( $Z=35$ ) を添加したポリスチレン (CHBr) ターゲットの密度分布である。CHBr ターゲットの場合は、輻射の効果によって RT 不安定性の成長が CH ター

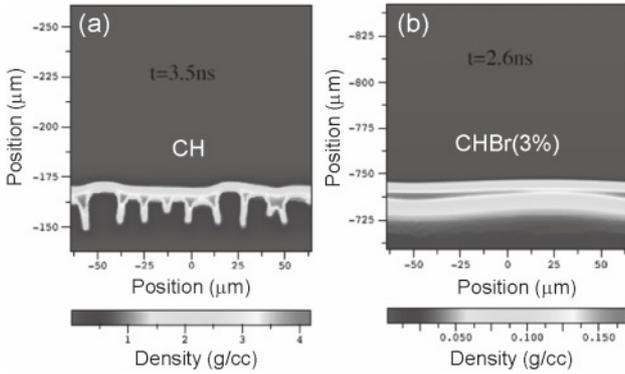


図1 2次元輻射流体シミュレーション結果[11]. (a)時刻  $t = 3.5 \text{ ns}$  における CH の密度分布 (b)時刻  $t = 2.6 \text{ ns}$  における CHBr (臭素添加量: 3%) の密度分布.

ゲットの場合よりも抑制されていることがわかる。しかしながら一方で CHBr ターゲットでは輻射によるエネルギー損失があるため加速効率が低下してしまう。十分に RT 不安定性を抑制し、かつ加速に対する輻射損失が少なくなるように、あらかじめ臭素の添加量を1次元輻射流体コード[12]を使って最適化した。レーザーの条件(レーザー強度:  $400 \text{ TW/cm}^2$ )とターゲットの面密度 ( $1.7 \text{ g/cm}^2$ ) を固定して、臭素の添加量を変化させて、加速時間の間に RT 不安定性によってターゲットが破断せずかつ輻射損失を抑えるように調整した。図2はその最適化の結果を示している。輻射損失を抑えつつ超高速を達成できる条件として、ここでは質量比 0.4% の添加量を採用した。

### 4.3 超高速インパクターの生成

ターゲットの加速軌跡を側面 X 線撮影法[4]を使って計測する。図3は実験配置図を示している。球殻の一部を模擬した平板ターゲットにレーザーを照射し、加速させる。この時、別のレーザーを銅ターゲットに照射してバックライト光源 (BL) となる X 線を発生させ、その X 線を照明としてターゲット側面からターゲットの影絵を X 線ストリークカメラで計測する。結像系には  $10 \times 50 \mu\text{m}^2$  のスリットを

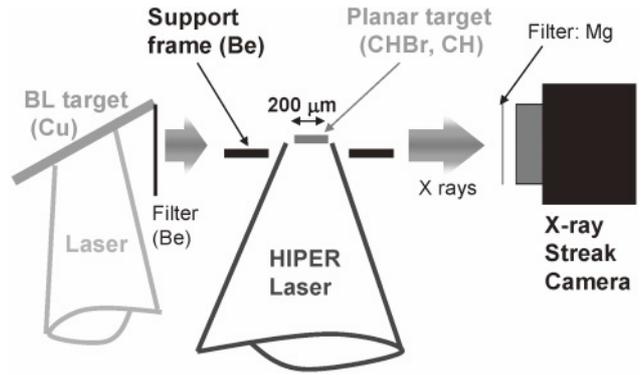


図3 実験配置図.

用いた。ターゲット材は臭素を質量比で 0.4% 添加したポリスチレン (CHBr) と臭素を添加しない純粋なポリスチレン (CH) を使った。レーザーは全国共同利用施設である大阪大学レーザーエネルギー学研究センターに既存の高強度基礎実験装置 (HIPER) を使った。高い圧力でターゲットを加速するために、レーザーの波長は基本波長の3倍波である  $0.35 \mu\text{m}$  を用いた。レーザーのエネルギーは  $1.5 \text{ kJ}$ 、パルス幅は  $2.5 \text{ ns}$ 、ターゲット上でのレーザー集光径は  $300 \mu\text{m}$  であり、レーザー照射強度は  $400 \text{ TW/cm}^2$  である。

図4は X 線ストリークカメラで観測された生画像である。ターゲットは厚さ  $22 \mu\text{m}$  の CHBr である。ターゲットの影絵(a)とターゲット表面からの自発光 X 線の軌跡(b)がそれぞれ同時に観測されている。図4(a)ではターゲットが X 線を最も吸収する位置つまり質量重心を、(b)では自発光の空間分布の立ち上がり半値の位置つまりターゲット表面を、それぞれ時間変化としてプロットして、その軌跡の傾きからターゲットの速度を評価した。図5は厚さ  $15 \mu\text{m}$  の CHBr ターゲットと厚さ  $24 \mu\text{m}$  の CH ターゲットの速度の時間変化を示している。実験で観測された終端速度として、CHBr は  $640 \text{ km/s}$ 、CH は  $380 \text{ km/s}$  が得られた。また、実験結果は1次元輻射流体シミュレーション[10]の結果でよく再現されていることがわかる。

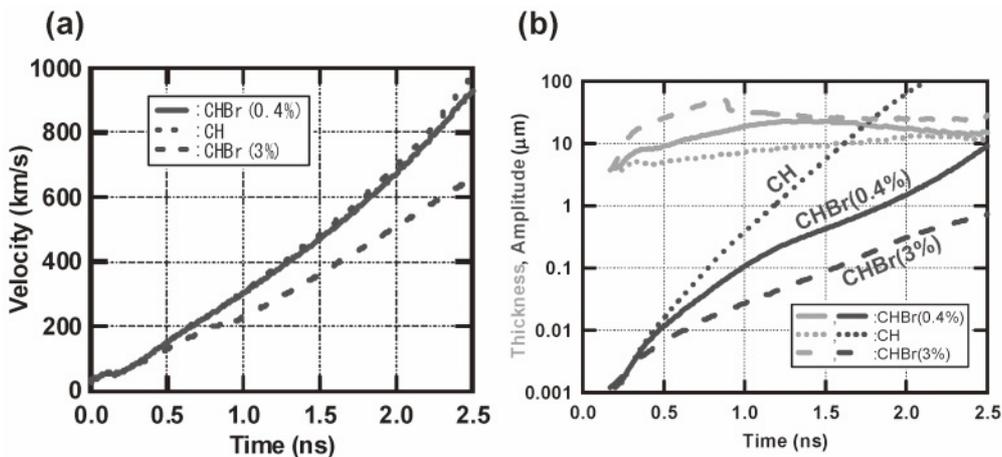


図2 1次元輻射流体シミュレーション結果。(a)ターゲット速度の時間変化。臭素の添加量が増えると加速が緩やかになる。(b)ターゲット厚と表面擾乱振幅の時間変化。CH では擾乱振幅がターゲットの厚さを超えてしまって破断しているが、CHBr ではターゲットの破断を制御可能である。

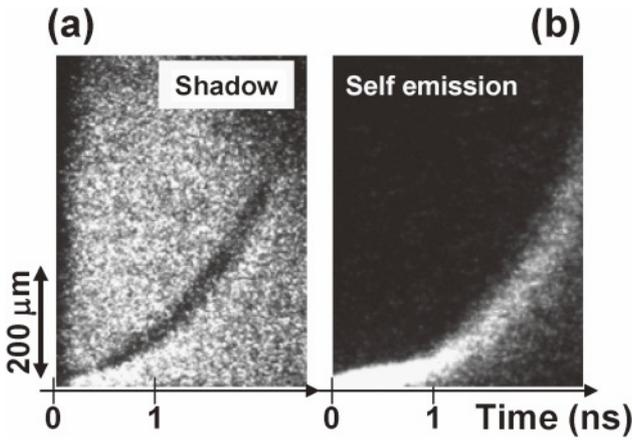


図4 CHBr ターゲットの加速軌跡. (a)透過 X 線画像. 黒い部分がターゲットの影絵を示す. (b)ターゲット表面から放射される自発光 X 線画像.

超高速インパクトは得られたが、主燃料との衝突時に密度が著しく低下しては衝撃点火は実現できない。そこでインパクトの密度を計測することが重要である。しかし、ターゲットの影絵から X 線の吸収率により密度を計測する手法[4, 13, 14]では、ターゲットが超高速で飛行するため、観測画像がなまってしまて密度の評価が困難である。そこで、新たな密度計測手法として薄膜衝突法 (Colliding Foil 法) を開発した。図 6 はその概念図を示している。超高速に加速したターゲットを状態方程式が比較的良好にわかっている物質 (銅など) に衝突させる。この時、透過衝撃波と反射衝撃波が生成されて、これらの衝撃波の前後でランキン・ユゴニオの関係式を使うと、衝突直前のターゲット密度 ( $\rho$ ) はターゲットの持つ圧力 ( $p$ ) と速度 ( $V$ ) および透過衝撃波後方の温度 ( $T$ ) によって次の式で表せる ( $\gamma$  は銅の比熱比,  $\rho_0$  は銅の初期密度,  $A$  は銅の質量数,  $Z$  は銅の電離度,  $m_u$  は原子質量単位)。

$$\rho = \frac{\beta T - p}{\sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \frac{T}{\alpha} - V}} \left[ 1 - \frac{(\gamma + 1)p + (\gamma - 1)\beta T}{(\gamma - 1)p + (\gamma + 1)\beta T} \right],$$

$$\left( \beta = \frac{(\gamma + 1)\rho_0}{(\gamma - 1)\alpha}, \alpha = \frac{Am_u}{1 + Z} \right). \quad (2)$$

図 7 はこの式から評価した密度を温度の関数として示している

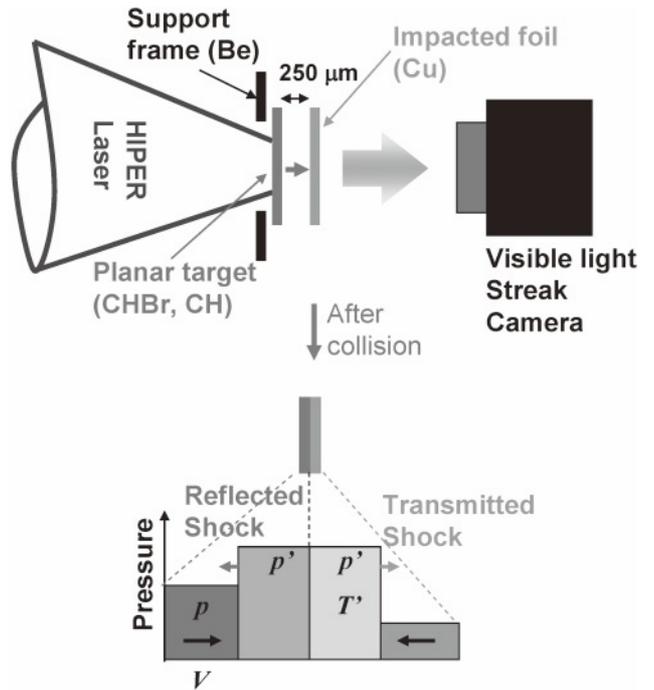


図 6 薄膜衝突法 (Colliding Foil 法) による密度計測の概念図.

( $p = 20$  Mbar,  $V = 250$  km/s,  $\gamma = 2.1$ ,  $\rho_0 = 8.93$  g/cc,  $Z = 12$ ,  $A = 63.55$  の場合)。

ターゲットの持つ圧力と速度は加速軌跡計測の結果から得られるので、衝突された物質の温度を計測することでターゲットの密度が得られる。加速したターゲット (CHBr と CH) を被衝突体 (Cu) に衝突させて、それによって生じた衝撃波が銅の裏面に到達した時にそこから放射される可視光の発光強度を観測した。あらかじめ発光スペクトル計測によって発光強度から得られる輝度温度を校正してあるので、観測した発光強度から CHBr で約 95 eV, CH で約 84 eV の温度が得られた。図 7 より密度を評価すると、密度は CHBr で約 0.8 g/cc, CH で約 0.2 g/cc であった。CHBr や CH の初期密度は約 1 g/cc であるので、平板加速 (1 次元) による密度の低下は大きくないことがわかった。このことからインパクトに要求される密度 (約 5 g/cc) は球収縮効果 (3 次元) によって達成されると考えられる (本小特集第 3 章参照)。また得られた密度と速度から、インパクトの持つ動圧力は約 1 Gbar (10 億気圧) であり、レー

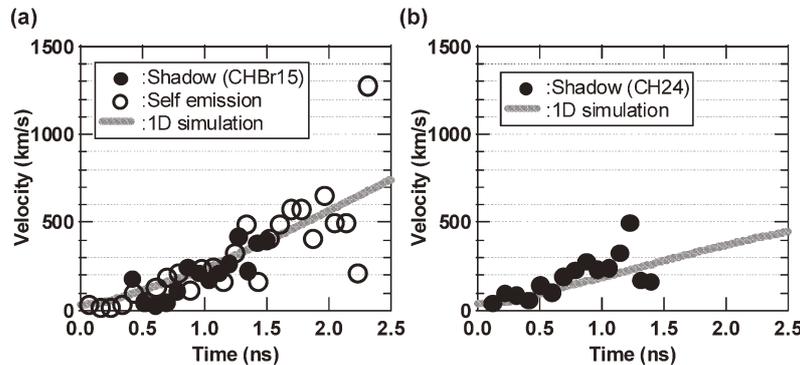


図 5 インパクトの加速軌跡から評価した CHBr(a) と CH(b) の速度の時間変化. 塗り潰された点は影絵から評価した速度を、白抜き点は自発光から評価した速度を示す. 実線は 1 次元輻射流体シミュレーションの結果から得られた速度変化を示す.

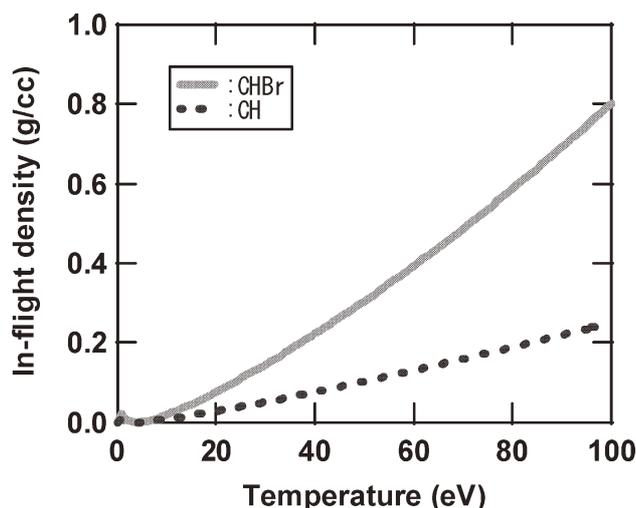


図7 銅の裏面温度から評価される飛行中のターゲット密度。実線はCHBr, 点線はCHの場合を示す。

レーザー誘起衝撃波が持つ圧力より数桁高い値であるので、地球惑星内部科学などの物性研究への応用が期待される。

本実験における超高速インパクターの生成は理論・シミュレーションによって予測可能であることがわかったので、その予測から衝撃点火に要求される速度 1000 km/s の達成には  $(1000/640)^2 \sim 2$  倍程度のレーザー強度が必要であることがわかった。そのため現在、既存レーザー装置の改修によるレーザーエネルギーの向上と加速一様性向上のためにキノフォーム位相板の設計を検討している。また、より短いレーザー波長を使って高い圧力を実現するために、KrF レーザー (波長: 0.25  $\mu\text{m}$ ) を所有するアメリカ海軍研究所での実験を予定している。

#### 4.4 まとめ

近年開発されたレイリー・テイラー不安定性の抑制手法を用いて、超高速インパクターの生成に成功した。また、薄膜衝突法を使うことによって、飛行中のインパクターの密度が初期密度程度に維持されていることがわかった。得られた超高速インパクターの動圧力は 1 Gbar (10 億気圧) にも達し、レーザー誘起衝撃波で生じる圧力より数桁高い値であり、前人未だの高圧力物性研究の道具になりうる。今回の結果は衝撃点火に要求される条件を完全に満たすまでには到っていないが、理論・シミュレーションで解釈可能

な結果であり、衝撃点火方式の実現可能性を示唆する結果であると考えられる。

#### 謝辞

本研究の遂行に関しまして、レーザー装置の運転、ターゲットの製作、プラズマ計測等でご協力いただきました大阪大学レーザーエネルギー学研究中心のスタッフおよび PHI グループのメンバーに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [ 1 ] R. Kodama *et al.*, Nature **412**, 798 (2001).
- [ 2 ] R. Kodama *et al.*, Phys. Plasmas **8**, 2268 (2001).
- [ 3 ] B.A. Remington *et al.*, Phys. Rev. Lett. **67**, 3259 (1991); K. Shigemori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 250 (1997); H. Azechi *et al.*, Phys. Plasmas **4**, 4079 (1997); S.G. Glendinning *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 3318 (1997); C. J. Pawley *et al.*, Phys. Plasmas **6**, 565 (1999); J. P. Knauer *et al.*, Phys. Plasmas **7**, 338 (2000); K. Budil *et al.*, Phys. Plasmas **8**, 2344 (2001); T. Sakaiya *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 145003 (2002).
- [ 4 ] H. Azechi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 045002 (2007).
- [ 5 ] S. Fujioka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 195001 (2004).
- [ 6 ] S. Obenshain *et al.*, Phys. Plasmas **9**, 2234 (2002).
- [ 7 ] T.J.B. Collins *et al.*, Phys. Plasmas **11**, 1569 (2004).
- [ 8 ] K. Shigemori *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **82**, 520 (2006) [*in Japanese*]; K. Otani *et al.*, Phys. Plasmas, *to be published*.
- [ 9 ] M. Murakami and H. Nagatomo, Nucl. Instrum. Methods A **544**, 67 (2005).
- [ 10 ] S. Bodner, Phys. Rev. Lett. **33**, 761 (1974); H. Takabe *et al.*, Phys. Fluids **28**, 3676 (1985); R. Betti *et al.*, Phys. Plasmas **5**, 1446 (1998); H.J. Kull and S.I. Anisimov, Phys. Fluids **29**, 2067 (1986); J. Sanz, Phys. Rev. Lett. **73**, 2700 (1994); V.N. Goncharov *et al.*, Phys. Plasmas **3**, 1402 (1996); A.R. Piriz, Phys. Plasmas **8**, 997 (2001).
- [ 11 ] J. Gardner of Naval Research Laboratory, Washington DC (*private communication*).
- [ 12 ] H. Takabe *et al.*, Phys. Fluids **31**, 2884 (1988); A. Sunahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 95003 (2003).
- [ 13 ] S. Fujioka *et al.*, Phys. Plasmas **10**, 4784 (2003).
- [ 14 ] Y. Tamari *et al.*, Two-Dimensional Ablation Density Measurement Relevant to Rayleigh-Taylor Instability with Fresnel Phase Zone Plate, Sept. 7-12, 2003, Monterey, CA (American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2003) p.182.