

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：14401  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2009 ～ 2011  
 課題番号：21340172  
 研究課題名（和文）高出力レーザー生成超音速プラズマジェットを用いた無衝突衝撃波の形成  
 研究課題名（英文）  
 Collisionless shock generation using high-power laser produced super-sonic plasma jet  
 研究代表者  
 坂和 洋一（SAKAWA YOUICHI）  
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
 研究者番号：70242881

研究成果の概要（和文）：高出力 激光 XII 号 HIPER レーザーを、4.6 mm 間隔の CH 製平行平板型ターゲットに照射し、高速の対向流プラズマを生成しプラズマ流の相互作用により、無衝突衝撃波を生成した。計測は、シャドウ計測、干渉計測、可視自発光計測を、それぞれ ICCD カメラとストリークカメラを用いて行った。その結果、レーザーを照射した 1 枚目の CH 平板の前面に無衝突静電衝撃波が生成された。また、トムソン散乱イオン音波項計測によって衝撃波の上流と下流における電子温度、イオン温度、電子密度、流速等、衝撃波のパラメータを求めることができた。

研究成果の概要（英文）：Collisionless shocks are generated in high-speed counter-streaming plasma flows produced by irradiating high-power laser beams of Gekko XII HIPER laser system on a CH double-plane target with 4.6 mm in separation. The plasmas and shocks are diagnosed by shadowgraphy, interferometry, and self-emission measurements using ICCD cameras and streak cameras. Collisionless electrostatic shocks are generated in front of the fist CH plane where laser beams are irradiated. Thomson scattering ion-term measurements provide shock parameters, such as electron and ion temperatures, electron density, and flow velocities, both at the up- and down-stream of a shock.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理、無衝突衝撃波、超音速プラズマジェット、高出力レーザー

1. 研究開始当初の背景

20 世紀の初めに気球実験によって、当時地球の内部に源を有すると考えられていた放射線が、宇宙からやってくる高エネルギー粒子（宇宙線）であることが発見された。しかし、 $10^{20}$  eV に至る高エネルギー粒子の起源は、宇宙線の発見当時から現在に至るまで明らかになっていない。

その一方で、宇宙線の生成には従来から衝撃波が重要な役割をはたしていると考えられてきた。1970 年代には科学衛星の観測結果から、太陽フレア現象で作られた惑星間空間衝撃波において高エネルギー粒子が生成されていることが示された。また 1990 年代には我が国の X 線天文衛星観測の結果、超新星爆発の残骸を伝搬する衝

撃波によって残骸のエッジ近傍で  $10^{14}$  eV もの高速電子が作られている証拠が得られた。これらの衝撃波はすべて、衝突の自由行程よりもはるかに短い領域で衝撃波面が形成されるという、無衝突衝撃波である。

天体観測と並んで宇宙現象の解明において重要な役割を担うシミュレーションでは、近年、無衝突衝撃波研究に大きな進展が見られた。加藤等は 2 次元粒子シミュレーションを用いて、超新星爆発によって発生する 10,000 km/s 程度の高速プラズマが二流体系でワイベル不安定性を励起し、発生した強い自己磁場によって粒子軌道が曲げられ、実効的なエネルギーの散逸がおきて無衝突ワイベル衝撃波が形成される事を示した (T. N. Kato, *Astro Phys. J.* 681, L93—L96 (2008))。しかし、この現

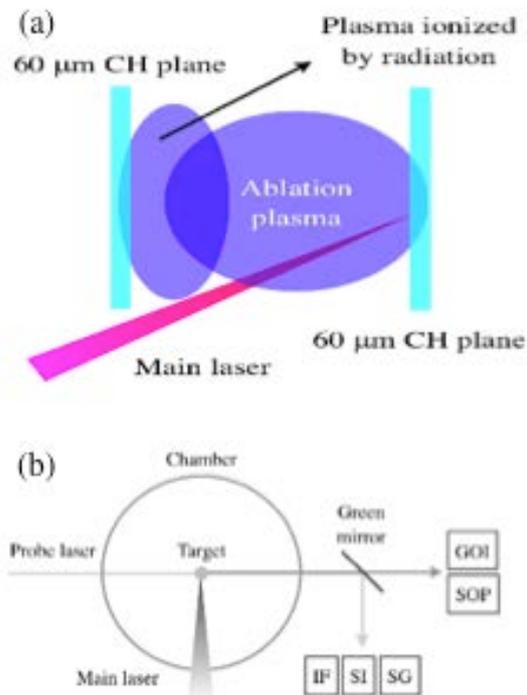


FIG. 1: (a) Schematic of the double-plane target. The separation between two planes was 4.5 mm. (b) Schematic of the transverse diagnostics. IF, interferometer; SI, streaked interferometer; SG, shadowgraphy; GOI, gate optical imager (self-emission); SOP, streaked self-emission optical pyrometer.

象はまだ実験的に証明されていない。

さらに、加藤等は 2 次元粒子シミュレーションによって、外部磁場のエネルギー密度と粒子の運動エネルギー密度の比で定義される磁化パラメータ  $\sigma_{\square}$  が  $10^{-3}$  程度の外部磁場を印可した場合には、無磁場の場合に比べてより短い時間で急峻な遷移領域を持つ無衝突衝撃波が生成される事を示した。

我々は、これまでに行って来たレーザー生成プラズマ実験の経験と結果から、このシミュレーション結果を高出力レーザーを用いて実験室に再現し、マッハ数・密度等の制御されたレーザー生成超音速プラズマジェットを用いて無衝突衝撃波を形成する事を着想するに至った。これまでも高出力レーザーを用いた無衝突衝撃波生成の試みは世界各地で行われて来たが、衝撃波生成の物理的機構が明らかになったとは言い難い。

外部磁場の無い無衝突衝撃波生成のシミュレーション結果からスケージング則を求め実験室プラズマに適用した結果、プラスチック(CH)プラズマで約 1000 km/s の流速、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の密度を実現出来れば、10 ns 程度で無衝突衝撃波が形成される事が示唆された。

また、このプラズマに対して磁化パラメータ  $\sigma = 10^{-3}$  を得るには、約 14 T の外部磁場が必要となるが、米田等はすでに小型パルス装置を用いて約 20 T のパルス磁場生成に成功しており、これをレーザー実験に用いる共同研究も既に始められている。

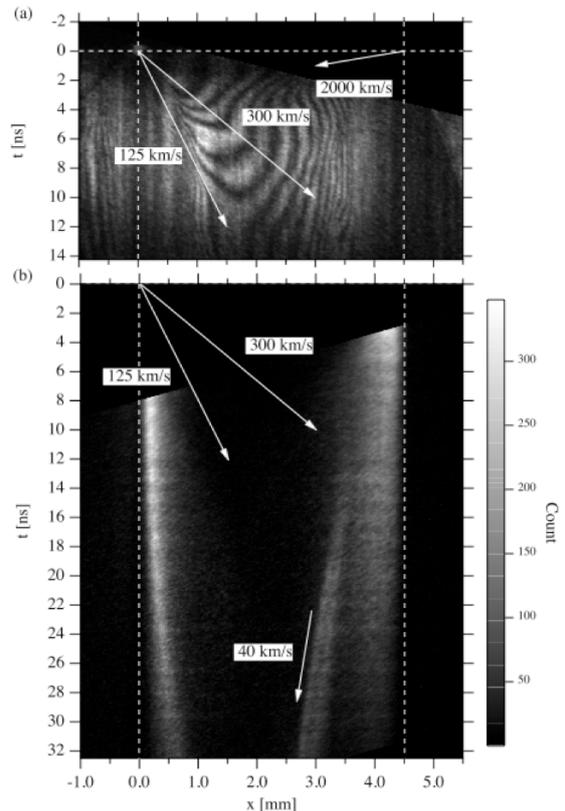


FIG. 2: (a) Streaked interferogram. The horizontal and vertical dashed lines represent the main laser timing and the target positions, respectively. (b) SOP image taken on the same shot as the interferogram in (a). The laser timing corresponds to the top of the image.

これまでに、大出力レーザーを用いて生成されたプラズマジェットとプラズマとの相互作用によって衝撃波構造が生成されていた。この衝撃波は電磁的ワイベル衝撃波ではなく、マッハ数の低い超音速プラズマジェットとプラズマの相互作用によって生成される静電イオン衝撃波であると思われる。

本研究では、このようなプラズマジェットや衝撃波の密度・速度・温度等の空間分布および時間発展を詳細に調べ、無衝突条件を満たす領域での無衝突衝撃波生成の物理機構を明らかにする。

本研究で行う超音速プラズマジェットの生成には大出力レーザーが必要であり、国内では大阪大学レーザー研究保有のレーザーのみが、海外では米国のリバモア研とロチェスター大学、英国ラザフォード研、フランス LULI、中国 上海光機所等が保有する大型レーザーがその条件を満たす。我々はその多くに共同研究者として参加し、プラズマジェットのコリメーション機構解明の実験等を行って来た。しかし、超音速プラズマジェットを用いた無衝突衝撃波生成実験は世界でもほとんど行われておらず、国際的な優位性を保つためにも早急な実験が必要である

## 2. 研究の目的

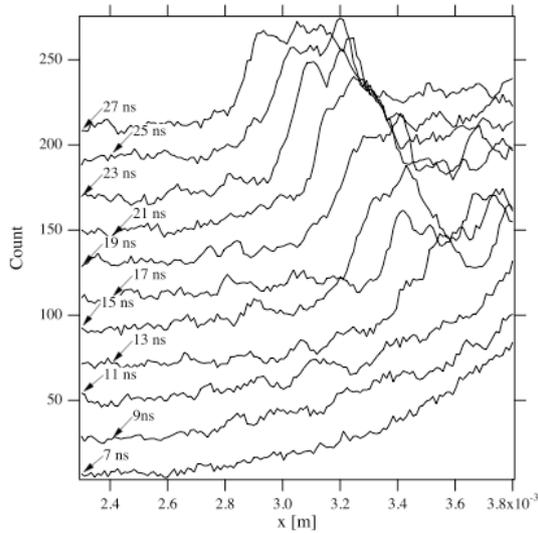


FIG. 3: Stuck plot of the line profiles of the SOP image in Fig. 2 (b) from 7 to 27 ns.

(1) プラズマジェットのマッハ数や密度を制御する事によって、マッハ数の低い超音速プラズマジェットを用いた無衝突静電イオン衝撃波、および、対向する高マッハ数超音速プラズマジェットを用いたワイベル不安定性による自己発生磁場中での無衝突ワイベル衝撃波を生成し、物理機構を明らかにする。

(2) 20 T の外部磁場を印可し、無衝突衝撃波生成における外部磁場の効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

Fig. 1 (a) にターゲット照射配位を示す. 4.5 mm 間隔のプラスチック (CH) 製平行平板型 (double-plane) ターゲット (3 mm x 3 mm, 厚さ 60 μm) の右側 (1 枚目) CH 平板にターゲット垂直方向から 30 度の入射角で高出力レーザーを照射し、アブレーションプラズマを生成した. 1 枚目の CH からの放射またはプラズマ流によって左側 (2 枚目) CH 平板のプラズマを生成し、これら高速対向プラズマ流の無衝突相互作用により無衝突衝撃波を生成した.

実験は、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の激光GXII号HIPERレーザーの4ビーム (Nd: Glassレーザー, 波長: 351 nm ( $3\omega$ ), パルス幅: 500 ps, エネルギー  $\sim 120$  J/beam x 4ビーム, 総エネルギー < 500 J, 強度 <  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>) を用いて行った. HIPERレーザーは、12本のレーザーが一方向に集められターゲットに照射される. 計測は、Fig. 1 (b) に示すように、HIPERレーザーに対して垂直方向からのプローブレーザー (Nd: YAGレーザー, 波長: 532 nm ( $2\omega$ ), パルス幅:  $\sim 14$  ns) とICCDカメラを用いたシャドウ計測 (SG: shadowgraph, ゲート幅 250 ps) と干渉計測 (IF: interferometer, ゲート幅 250 ps) による2次元密度測定, ストリークカメラを用いた干渉像の時間発展 (SI: streaked interferometer) を行った. また、波長450 nmの自発光計測によるプラズ

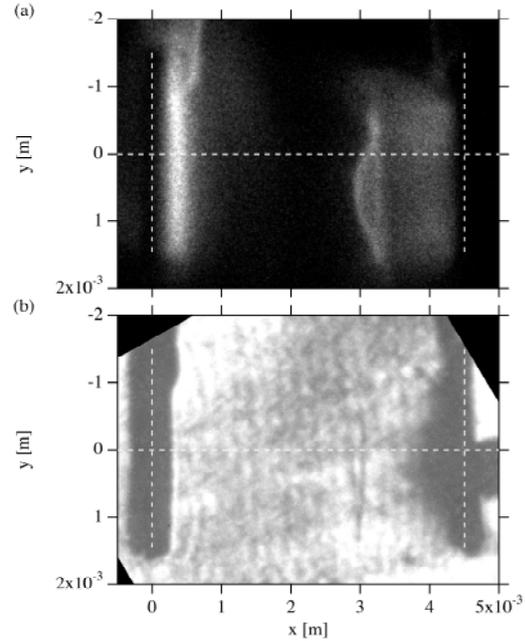


FIG. 4: (a) Self-emission (GOI) snapshot at  $t = 25$  ns taken on the same shot as Fig. 2. (b) Snapshot of shadowgraphy (SG) at  $t = 25$  ns taken on a different shot.

マ輝度温度の測定を、ICCDカメラ (GOI: gate optical imager, ゲート幅 1.6 ns) とストリークカメラ (SOP: streaked self-emission optical pyrometer) を用いて行った.

また、外部から印加した強磁場中での無衝突衝撃波生成実験を行った. 小型パルスパワー装置 (20 kA, 20 kV, 立ち上がりジッター数ns) と  $1 \Omega$  のトランスミッションラインを用いて、ターゲットチャンバー中心部で約 20 T のパルス磁場を生成した. スwitchingはプローブレーザーの一部を低インダクタンスマルチレーザーギャップスイッチに導く事によって行い、HIPERレーザーに対し

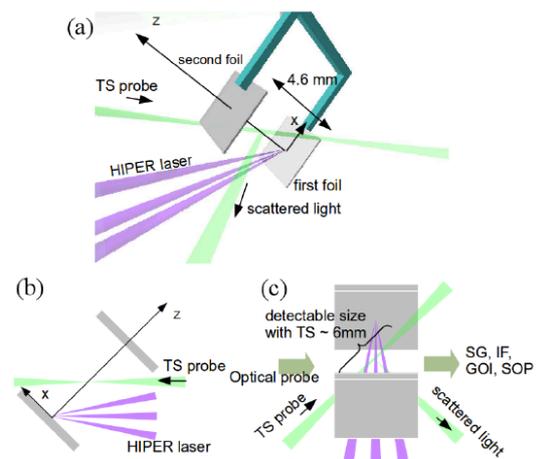


FIG. 5 Schematic view of the target. HIPER laser beams are focused on the inner surface of the first foil. The incident laser for the TS is shown in (a) the projective view, (b) top view, and (c) side view.

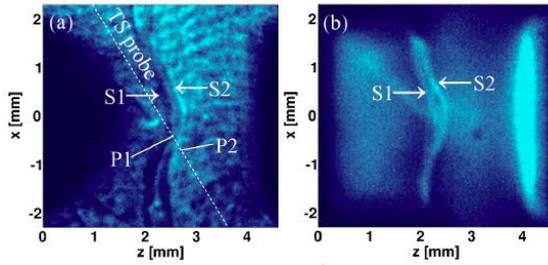


FIG. 6 (a) SG and (b) GOI taken at  $t = 30$  ns in a same laser shot.

て磁場印加のタイミングを変えた。外部磁場中での対向する高マッハ数プラズマジェットを用いた無衝突衝撃波生成実験を行い、外部強磁場の無衝突衝撃波生成に与える影響を明らかにした。

#### 4. 研究成果

Fig. 2 に、SI計測 (Fig. 2(a)) とSOP計測 (Fig. 2(b)) の同一ショットでの結果を示す。時間  $t = 0$  はレーザー入射タイミングである。縦の白色破線で示したのはCH double-planeターゲットの位置で、 $x = 4.5$  mm にレーザー照射される1枚目のCH、 $x = 0$  に2枚目のCHが設置されている。2つのストリーク像は異なる特性を観測している。SI計測は約  $10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の電子密度を測定する事ができ、SOP計測の信号強度は、光学的に薄いプラズマではプラズマ密度と温度に依存する。SI計測と同時にIF計測を行っており、同時刻の電子密度の2次元分布を求めている。

SI計測 (Fig. 2(a)) より、プラズマ流速を概算する事ができる。レーザーが照射された右側CHからは、レーザー照射タイミングでのデータはないが、 $x = 1.5$  mm、 $t = 1.5$  nsにフリンジシフトが観測されていることから、約  $2000 \text{ km/s}$  のプラズマ流が生成されていると思われる。左側CHからは、同様にフリンジシフトより  $125 - 300 \text{ km/s}$  のプラズマ流が生成されていると考えられる。このSI計測より求めた  $125 - 300 \text{ km/s}$  のプラズマ流速をSOP計測 (Fig. 2(b)) の結果に実線で示した。SOP計測ではこのような高速プラズマは温度と密度が低く観測できなかったが、ターゲット前面に強い発光が観測された。ここで、左側CHからの  $300 \text{ km/s}$  の高速プラズマ流が右側CHからのプラズマに到達する時間 (約  $14 \text{ ns}$ ) 近傍から、シャープな構造の自発光強度が増加し、左側に向かって伝搬しているのが分かる。これは、左側CHからの高速プラズマと右側CH近傍のプラズマとの相互作用によって衝撃波が生成され自発光強度が増加したためであると考えられる。この衝撃波の速度  $V_s$  は約  $40 \text{ km/s}$  である。

Fig. 3(a) に SOP 計測 (Fig. 2(b)) から求めた自発光強度プロファイルの時間変化を示す。11 ns までは右上がりのなだらかな分布をしているが、13 ns で  $x \sim 3.4$  mm 近傍に発光強度の増加が現れ、これが時間とともに左に伝搬しながらプロファイルが急峻になり、衝撃波が生成されている。この衝撃波の幅は約  $100 \text{ mm}$  である。

Figs. 4(a) と 4(b) にそれぞれ double-pane ターゲットでの  $t = 25$  ns にける自発光のGOI計測とプローブ光のSG計測の結果を示す。縦と横の破線は、それぞれターゲ

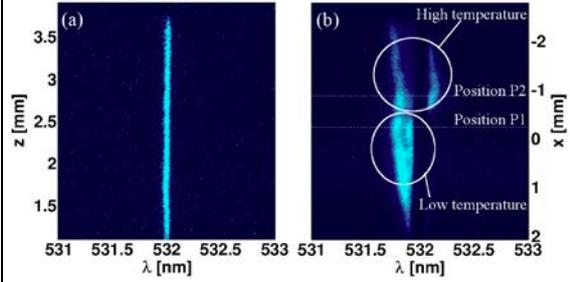


FIG. 7 (a) Rayleigh scattering and (b) Thomson scattering spectra at  $t = 30$  ns.

ット表面とストリークカメラのスリットの位置を示す。 $x = 3$  mm 近傍の Fig. 3(a) に示した衝撃波に相当する位置において、自発光強度の増加 (Fig. 4(a)) に加えて、大きな密度勾配に起因するフィラメント状の構造 (Fig. 4(b)) が見られる。衝撃波の中心がターゲット中心 ( $y = 0$ ) よりも下側にあるのは、右側ターゲットのレーザー照射位置が約  $0.5 \text{ mm}$  下となったためである。

イオン-イオン衝突平均自由行程  $\lambda_{ii}$  をSpitzerの公式  $\lambda_{ii} = 2\pi e_0^2 m_i^2 \langle v_i \rangle^4 / (n_i Z^4 e^4 \ln \Lambda)$  より求めた<sup>1)</sup>。ここで、 $e_0$  は真空中の誘電率、 $m_i$  はイオン質量、 $\langle v_i \rangle$  は平均相対イオン速度、 $Z$  はイオン電荷量、 $n_i = Z n_e$  はイオン密度、 $\ln \Lambda = \ln (\lambda_D 4\pi e_0^2 m_i \langle v_i \rangle^2 / (Z^2 e^4))$ 、 $\lambda_D$  はデバイ長である。IF計測から求めた  $n_e \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、CHプラズマの平均  $Z = 3.5$ 、イオン質量数  $A = 6.5$ 、電子温度を  $T_e = 100 \text{ eV}$  を用いた。右側CHからの下流プラズマが静止していると仮定すると、 $\langle v_i \rangle$  として左側CHからのプラズ流速  $v$  を用いる事になる。さらに、レーザーが右側CHに照射された  $t = 0$  に、同時に左側CHからも速度  $v$  のプラズマ流が生成されたと仮定すると、 $\langle v_i \rangle = v$  は時間とともに減少する。

$v = 300 \text{ km/s}$  と  $140 \text{ km/s}$  のプラズマ流はそれぞれ  $t = 11.5 \text{ ns}$  と  $22 \text{ ns}$  に衝撃波の先端に到達し、衝突の平均自由行程はそれぞれ  $\lambda_{ii} = 1.7 \text{ mm}$  と  $100 \text{ mm}$  となる。従って、衝撃波の生成され始める初期の時間 ( $t < 22 \text{ ns}$ ) では衝突の平均自由行程が衝撃波の幅よりも長く、無衝突相互作用による衝撃波、無衝突衝撃波である。一方、後半の  $t > 22 \text{ ns}$  では衝突の影響が大きくなる事が分かる。また、上記の計算では右側CHからの下流プラズマが静止していると仮定したが、下流プラズマに流速がある場合や、下流プラズマの音速が衝撃波速度である  $40 \text{ km/s}$  程度であるとすると、その熱運動を考慮することになり、衝突の平均自由行程は長くなり、無衝突衝撃波の領域が長時間 ( $t \sim 28 \text{ ns}$  程度まで) 続く事になる。また、PICシミュレーションによって求めた遷移幅との比較から、観測された衝撃波は静電衝撃波であると考えられる<sup>2)</sup>。

また Fig. 5 に示すように、2台目のプローブレザー (Nd: YAG レーザー、 $532 \text{ nm}$  ( $2\omega$ ),  $10 \text{ ns}$ ) とトリブルグレーティング分光器、ゲート幅  $2 \text{ ns}$  の ICCD カメラを用いてトムソン散乱イオン音波項計測を行った。

Fig. 6 に、HIPER レーザー照射後  $30 \text{ ns}$  におけるシャドウグラフと自発光の2次元像を示す。1枚目と2枚目のCHの位置はそれぞれ  $z = 0$  と  $4.6 \text{ mm}$ 。HIPER レーザーは  $z = x = 0 \text{ mm}$  に、トムソンプローブレザーは  $z = 2.3 \text{ mm}$ 、 $x = 0 \text{ mm}$  にそれぞれ集光された。 $z \sim 2 \text{ mm}$  の位置に衝撃波が生成され、白線で示すトムソンプローブレ

Parameters	Position P1	Position P2
Position $(x, z)$ [mm]	$(-0.2, 2.4)$	$(-0.9, 2.8)$
$n_e$ [ $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ]	7.8	11
$n_i$ [ $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ]	4.0	4.6
$Z$ (Carbon)	$2.8 \pm 0.1$	$3.7 \pm 0.1$
$T_e$ [eV]	$24 \pm 1$	$110 \pm 10$
$T_i$ [eV]	$18 \pm 2$	$75 \pm 5$
$v_d$ [km/s]	$90.1 \pm 0.5$	$17.2 \pm 0.1$
$C_s$ [km/s]	27	62
Mach-number ( $v_s = 66 \text{ km/s}$ )	5.5	1.3

Table 1 Plasma parameters at up-stream (P1) and down-stream (P2) of a shock obtained by Thomson scattering at  $t = 30 \text{ ns}$ .

ザーの光路は、衝撃波の上流と下流を通過している。

Fig. 7 に示すように、衝撃波の上流 (位置: P1) では下流 (位置: P2) に比べて、ドリフト速度が大きくイオン音波の速度が小さいことがわかる。得られたスペクトルより、Table 1 に示すように電子温度、イオン温度、流速、イオン価数、さらに散乱光強度からプラズマ密度を同時に計測し、無衝突衝撃波のパラメータを詳細に求めることができた。

加藤等は 2 次元粒子シミュレーションを用いて、超新星爆発によって発生する  $10,000 \text{ km/s}$  程度の高速プラズマが二流体体系でワイベル不安定性を励起し、その結果生じる強い自己磁場によって粒子軌道が曲げられ、実効的なエネルギーの散逸がおり無衝突ワイベル衝撃波が形成される事を示した<sup>3)</sup>。2 次元プラズマ粒子シミュレーションの結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す<sup>3)</sup>。このシミュレーションでは左側からの高速プラズマ流が右の壁に衝突し反射して二流体領域を時間的に広げていく。Fig. 8 には、衝撃波が形成された時刻 ( $\omega_{pt} = 2100$ ) における、イオン数密度の二次元 ( $x-y$ ) 分布 (Fig. 8 (a)),  $y$  方向に平均したイオン数密度 (Fig. 8 (b)), 速度 (Fig. 8 (c)), 電場・磁場エネルギー密度 (Fig. 8 (d)) の  $x$  方向分布を、Fig. 9 にはイオン数密度の時間発展を示す。ここで時間は電子プラズマ周波数 ( $\omega_p$ ) で、長さは電子の skin depth ( $\lambda_e = c/\omega_p$ ) で規格化されている。強い衝撃波極限である密度上昇が 3 倍 (3 次元では 4 倍) まで、遷移領域 (衝撃波面) を経て上昇している。ワイベル不安定の線形成長、非線形構造形成、飽和を経て、磁場のエネルギー密度はイオン流体の運動エネルギー密度の 1% 程度まで達している。この磁場が左から流入するイオンの軌道をラーモア運動で乱し、これが実質的な異常粘性の働きをし、衝撃波が形成されていることがわかった。ワイベル衝撃波の、流速 ( $v/c = 0.45, 0.5, 0.1$ ) とイオン/電子質量比 ( $m_i/m_e = 20, 50, 100$ ) に対するスケールング則を求めた結果、遷移幅はこれらパラメータに依存せずイオン慣性長の約 100 倍 ( $100 c/\omega_{pi}$ )、ここで  $\omega_{pi}$  はイオンプラズマ周波数) となった<sup>3)</sup>。実験室プラズマにこの結果を適用した結果、CH プラズマで約  $1000 \text{ km/s}$  の流速、 $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  の電子密度を実現出来れば、数 ns 程度で無衝突衝撃波が形成される事が示唆された。

上記、加藤の示した外部磁場の無い無衝突衝撃波生成のシミュレーション結果、これまで我々が実験を行って来た激光 XII 号等の数  $10 \text{ kJ}$  のレーザーでは出力が不足しており、無衝突ワイベル衝撃波を生成するには、世界最大のレーザーである米国ローレンスリバモア研 (LLNL) の NIF レーザー (192 ビーム,  $3\omega$ ,  $1.8 \text{ MJ}$ )<sup>4)</sup> が必要であ

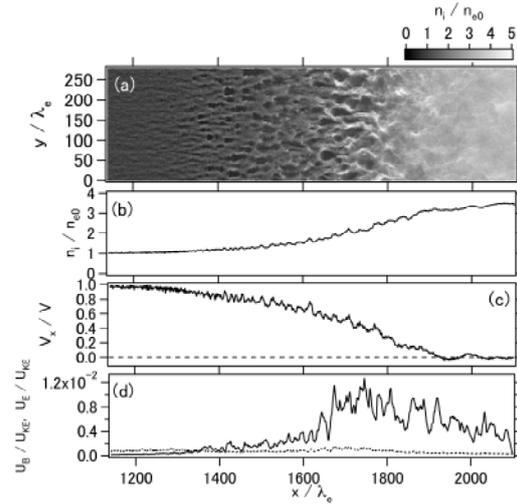


Fig. 8 (a) Number density of ions for the upstream bulk velocity of  $V = 0.45c$  at  $\omega_{pt} = 2100$ . The left-hand side and right-hand side are the upstream and downstream of the shock, respectively. Filamentary structure is visible in the shock transition region. Profiles of (b) the ion number density, (c) the mean velocity in the  $x$ -direction both normalized by the respective upstream values, and (d) the energy densities of the magnetic (solid curve) and electric (dashed curve) fields both normalized by the particle bulk kinetic energy density of the upstream plasma.

る事がわかった。そこで我々は 2010 年に初めて行われた NIF レーザーを用いた実験公募 (NIF facility time proposal 2010) に “Collisionless Shock Generation Mediated by Weibel Instability in Counter-Streaming Ablation Plasmas by NIF” の提案を行い、世界各国からの 43 件の応募の中から採択された (10 件採択)。計測器の準備が整う 2013 年頃に実験を開始する予定である。

また、NIF 実験の前の予備実験として、米国ロチェスター大学の OMEGA ( $60$  ビーム,  $3\omega$ ,  $1 \text{ ns}$ ,  $30 \text{ kJ}$ ) と OMEGA EP の long-pulse ( $4$  ビーム,  $3\omega$ ,  $6 \text{ kJ/beam}$ ) レーザー<sup>5)</sup> を用いた実験を提案し (提案者 Hye-Sook Park (LLNL, USA), Astrophysical Collisionless Shock Generation in Laser Driven Experiments) 採択され、2011 年から実験を開始している。

加藤等は 2 次元粒子シミュレーションによって、外部磁場のエネルギー密度と粒子の運動エネルギー密度の比で定義される磁化パラメータが  $10^{-4}$  程度の外部磁場を印可した場合には、無磁場の場合に比べてより短い時間で急峻な遷移領域を持つ無衝突衝撃波が生成される事を示した<sup>6)</sup>。激光 XII 号のターゲットチャンバー中心部に設置した直径  $2 \text{ mm}$  の磁場コイルを用いて、ターゲットノーマル方向に垂直な約  $10 \text{ T}$  のパルス磁場を生成し、強磁場中での無衝突静電衝撃波生成実験を行った。その結果、レーザー照射後  $20 \text{ ns}$  以降ではプラズマ圧力と磁気圧の比  $\beta = 6 - 50$  程度になり、無磁場中での無衝突衝撃波生成実験との比較を行った結果、生成された衝撃波のダイナミクスに違いが見られた。これら外部磁場中の無衝突衝撃波生成実験は激光 XII 号および OMEGA と OMEGA EP レーザーを用いて引き続き行う。

#### 参考文献

- 1) L. Spitzer: Physics of Fully Ionized Gases (2nd ed.; New York: Interscience, 1962).
- 2) T. N. Kato and H. Takabe: Phys. Plasmas 17 (2010) 032114.
- 3) T. N. Kato and H. Takabe: Astrophys. J. Lett. 681 (2008) L93.
- 4) <http://lasers.llnl.gov/>.
- 5) <http://www.lle.rochester.edu/>.
- 6) T. N. Kato and H. Takabe: Astrophys. J. 681 (2010) 721.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

- 1) Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, S. Dono, C. D. Gregory, S. A. Pikuz, B. Loupias, M. Koenig, J. N. Waugh, N. Woolsey, T. Morita, T. Moritaka, T. Sano, Y. Matsumoto, A. Mizuta, N. Ohnishi, and H. Takabe, Kelvin-Helmholtz Turbulence Associated with Collisionless Shocks in Laser Produced Plasmas, Physical Review Letters **108**, 195004 -1—5 (2012).
- 2) J. S. Ross, 他 13 名, Y. Kuramitsu, T. Morita, Y. Sakawa, H. Takabe, 他 15 名, Characterizing counter-streaming interpenetrating plasmas relevant to astrophysical collisionless shocks, Physics of Plasmas **19**, 056501-1—8 (2012).
- 3) Yasuhiro Kuramitsu, Youichi Sakawa, Masahiro Hoshino, Shih-Hung Chen, Hideaki Takabe, On the universality of nonthermal electron acceleration due to quasi-turbulent wakefield, High Energy Density Physics **8**, 266 - 270 (2012).
- 4) X. Liu, 他 7 名, Y. Sakawa, T. Morita, Y. Kuramitsu, 他 13 名, *Collisionless shockwaves formed by counter-streaming laser-produced plasmas*, New Journal of Physics **13**, 093001 (2011).
- 5) Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, H. Takabe, T. Morita, 他 7 名, *Time Evolution of a Collisionless Shock in Counterstreaming Laser Produced Plasmas*, Physical Review Letters **106**, 175002 (2011).
- 6) 坂和洋一, 蔵満康浩, 森田太智, 加藤恒彦, 高部英明, 高強度レーザーを用いた宇宙物理実験, レーザー研究 **39**, 05-11 (2011).
- 7) Y. Kuramitsu, 他 2 名, Y. Sakawa, 他 17 名, *Experimental Evidence of Nonthermal Acceleration of Relativistic Electrons by an Intensive Laser Pulse*, Physical Review E **83**, 026401-1--6 (2011).
- 8) Y. Kuramitsu, 他 2 名, Y. Sakawa, 他 17 名, *Model Experiment of Cosmic Ray Acceleration due to an Incoherent Wakefield Induced by an Intensive Laser Pulse*, Physics of Plasmas **18**, 010701-1--4 (2011).
- 9) T. Morita, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, 他 8 名, H. Takabe, J. Zhang, *Collisionless shock generation in high-speed counter-streaming plasma flows by a high-power laser*, Physics of Plasmas **17**, 122702-1—6 (2010).
- 10) 坂和洋一, 蔵満康浩, 森田太智, 高部英明, 高出力レーザーを用いた実験室宇宙物理実験, プラズマ・核融合学会誌 **86**, 578-581 (2010). 査読無し

[学会発表] (計 54 件)

- 1) Y. Sakawa, 他, Collisionless shock generation in high-power laser produced counter-streaming plasmas, 8th International Conference on high Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA 2010), Cal Tech, California, USA, 15-18 March (2010).
- 2) Y. Sakawa, 他, Laboratory experiments to study collisionless shock generation in high-power laser produced counter-streaming plasmas, 31st European Conference on Laser Interaction with Matter (XXXI ECLIM), Budapest, Danubius Hotel Gellért, Hungary, September 6-10 (2010).
- 3) Y. Sakawa, 他, HIGH-POWER LASER EXPERIMENTS TO STUDY COLLISIONLESS SHOCK GENERATION, International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2011), Bordeaux, France, 12-16 September (2011).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂和 洋一 (SAKAWA YOUICHI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
研究者番号: 70242881

(2) 研究分担者

蔵満 康浩 (KURAMITSU YASUHIRO)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任助教  
研究者番号: 70456929

加藤 恒彦 (KATO TSUNEHICO)  
広島大学・理学研究科・特任助教  
研究者番号: 90413955

高部 英明 (TAKABE HIDEAKI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 20150352

米田 仁紀 (YONEDA HITOKI)  
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授  
研究者番号: 00210790

(3) 連携研究者

尾崎 典雅 (OZAKI NORIMASA)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 70432515

兒玉 了祐 (KODAMA RYOUSUKE)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 80211902