

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340141

研究課題名(和文)大型レーザーを用いた無衝突衝撃波の生成

研究課題名(英文)Collisionless shock generation using large-scale laser systems

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)： 平行平板型ターゲットを用いて超音速の対向流プラズマを生成し、無衝突衝撃波実験を行った。激光XII号HIPERレーザー実験では、協同トムソン散乱イオン項計測を行い、対向流プラズマおよび衝撃波の電子・イオン温度、流速、電子密度を計測し時間発展を調べた。

OMEGAレーザー(米国)実験では、D-3He核融合生成プロトンを用いてプロトンバックライト計測を行い、ワイベル不安定性に起因するフィラメント構造が観測された。

CD製ターゲットを用いたNIFレーザー(米国)実験では、衝撃波によって加熱された2枚のターゲット中央の高温プラズマからDD核融合生成プロトン・中性子および強いX線発光が観測された。

研究成果の概要(英文)： Collisionless shock experiments were conducted using supersonic counter-stream plasmas with parallel double-plane (DP) target. On Gekko XII HIPER laser experiment, collective Thomson scattering ion-term measurement was conducted. Electron and ion temperatures, flow velocity, electron density were measured for counter-streaming plasmas and shock, and their temporal-evolution was investigated.

On OMEGA laser (USA) experiment, Weibel filaments were observed by D-3He fusion produced proton radiography.

On the NIF laser (USA) experiment, DD neutrons/proton and strong x-ray emission from the hot plasmas in the middle of the two planes are observed with CD DP target. These results indicate that neutrons are produced in a shock-heated hot plasma.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：無衝突衝撃波 大型レーザー ワイベル不安定性 強磁場実験 協同トムソン散乱

1. 研究開始当初の背景

宇宙線とは、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの荷電粒子の総称であり、1912年にヘスの気球実験により発見された。宇宙線のエネルギースペクトルはベキ乗の分布をしており、これまでに 10^{20} eV を超える超高エネルギー宇宙線が観測されているが、その起源は明らかになっていない。観測される宇宙線のエネルギースペクトルは $10^{15.5}$ eV 付近で折れ曲がっており、これ以下のエネルギーをもつ宇宙線は天の川銀河内で生成されたもの（銀河宇宙線）と考えられている[1]。銀河宇宙線の生成機構として有力視されているのが若い超新星残骸における衝撃波フェルミ加速と呼ばれている機構であり、現在粒子加速の標準理論となっている[2]。この衝撃波は、イオン-イオンクーロン衝突の平均自由行程が衝撃波の遷移幅よりも遥かに長い、無衝突プラズマ中での衝撃波、無衝突衝撃波である。

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[3]。しかし、この現象はまだ実験的に証明されてはいない。

我々は、このシミュレーション結果を実験室に再現し、外部磁場無しで高出力レーザーを用いた対向プラズマ流の相互作用による無衝突衝撃波生成実験を世界に先駆けて行った。これまでに日本[4]、中国[5]、ヨーロッパの高出力レーザーを用いて無衝突衝撃波生成実験を行って来た。これらのレーザーで生成された衝撃波は電磁的ワイベル衝撃波ではなく、高マッハ数の無衝突静電衝撃波である。また、これらの実験ではプローブレーザーを用いた干渉計測によるプラズマ密度、自発光による衝撃波の時間発展や速度計測は行われているが、プラズマ温度と流速計測が行われておらず、マッハ数の導出や衝撃波による加熱の議論には不確定な要素が大きい。

また加藤等は、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^{-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[6]。激光XII号で生成されるプラズマ流速・密度に対して磁化パラメータ = 10^{-3} を得るには、約 2 T の外部磁場が必要となる。米田等は、小型パルスパワー装置を用いて、内径 1.5 mm のコイルを用いて約 20 T のパルス磁場生成に成功しており[7]、これをレーザー実験に用いた強磁場中の無衝突衝撃波生成共同研究が行われている。

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[3]からスケ

ーリング則を求め実験室プラズマに適用した結果、これまで我々が実験を行って来た数 10 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 NIF レーザー (1.3 MJ / 192 beam, 米国 LLNL 研究所)が必要である事がわかった。

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 2014 年頃に実験を開始する予定である。

さらに NIF 実験に先立ち、OMEGA レーザー (30 kJ / 60 beam, 米国ロチェスター大学)を用いた無衝突ワイベル衝撃波生成の予備実験 (提案者 H-S.Park, LLNL) と、強磁場中の無衝突衝撃波生成実験 (提案者 A. Spitkovsky, Princeton University) の提案を行い、採択された。2010 年秋から実験が開始されている。

我々の提案した NIF レーザーを用いた無衝突ワイベル衝撃波の実験が採択されて以来、日本、米国、英国、フランス等、総勢 30 名を超える研究者がこの研究に興味を持ち、OMEGA レーザー実験に参加している。NIF 実験を成功させるためには、激光 XII 号や OMEGA レーザーを用いた実験による計測器の開発、および実験データとシミュレーション結果の詳細な比較による NIF 実験パラメータの最適化が不可欠である。そのために、OMEGA 実験に参加して成果をあげるとともに、無衝突衝撃波実験における国際的なリーダーシップを保つ事が重要である。

これら世界の大型レーザーを用いる事によって初めて、外部磁場の有無、静電・ワイベル衝撃波等、異なる条件における高マッハ数の無衝突衝撃波生成実験および衝撃波パラメータの詳細計測が可能となる。従って本研究は、実験室における無衝突衝撃波生成の物理機構を総合的に研究する、世界に類を見ないものである。

2. 研究の目的

本研究では、まず (1) 世界の大型レーザー (激光 XII 号、OMEGA-米国、NIF-米国) を用いて高速の対向プラズマ流の相互作用により、無磁場中の無衝突静電衝撃波、外部磁場中の無衝突衝撃波、およびワイベル不安定性によって生成される磁場中の無衝突ワイベル衝撃波、の 3 つの異なる条件における高マッハ数の無衝突衝撃波生成を生成し、(2) 従来の干渉計測や自発光計測に加えて、プローブレーザーを用いたトムソン散乱計測による衝撃波の上流・下流におけるプラズマ密度、温度、流速等の衝撃波パラメータ計測と高強度レーザー (LFEX-日本、

OMEGA EP-米国)や D-³He 核融合生成プロトンを用いたプロトンバックライトによる電場・磁場計測を行うことによって、無衝突衝撃波生成の物理機構を総合的に研究する。

3. 研究の方法

(1) 激光 XII 号 HIPER レーザーを用いた無衝突衝撃波生成

無磁場中の無衝突静電衝撃波生成

激光 XII 号 HIPER レーザー (Nd:ガラスレーザー、波長 = 351 nm (3 ω)、パルス幅 = 500 ps、エネルギー~120 J/beam、1-3 beam、強度 10^{15} W/cm²) を、4.5 mm 間隔の平行平板型ダブルプレーンターゲットに照射し、生成された超音速の対向プラズマ流の相互作用により、無衝突静電衝撃波生成実験を行う [図 1(a)]。レーザーの照射されない 2 枚目のターゲットプラズマは、1 枚目のレーザー生成プラズマからの輻射とプラズマ流によって生成される。計測は、図 1(b)に示すように、ターゲットに対して垂直方向からの光学プローブレーザーを用いたシャドウ計測と干渉計測による密度の測定、波長 450 nm の自発光計測を、ICCD カメラとストリークカメラを用いて行う。またトムソン散乱 (TS) プローブレーザーと加分散型トリプルグレーティング分光器を用いた協同トムソン散乱イオン項計測を、ICCD カメラによって行う。これによって平行平板型ターゲットにおいて生成される 1 枚目と 2 枚目からの対向 (二流体) プラズマの、それぞれの電子密度、電子・イオン温度、イオン価数、流速、マッハ数等のプラズマパラメータを詳細に計測した。2 台のプローブレーザーは、共に Nd: YAG レーザー (532 nm, ~10 ns, ~300 mJ) である。

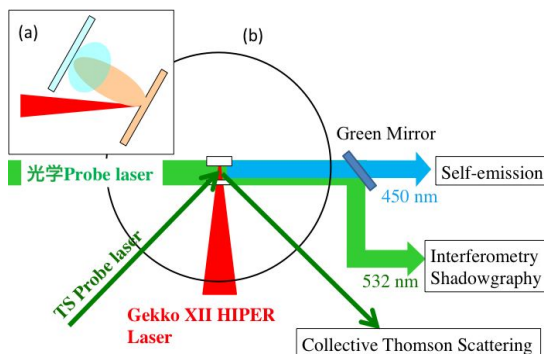


図 1: 激光 XII 号 HIPER レーザーを用いた実験セットアップの概略。(a) Side-view と (b) Top-view。

外部磁場中での無衝突衝撃波生成

真空容器に雰囲気ガス (窒素、ヘリウム、水素) を数 Torr 封入し、厚さ 数 μm - 数 100 μm の固体ターゲット (CH, Al, Cu 等) をレーザーで照射し、生成されたアブレーションプラズマや裏面プラズマからの輻射によって雰囲気ガスがプラズマ化される。この雰囲気ガスプラズマとターゲットからのプラズマ

の 2 流体相互作用によって無衝突衝撃波が生成される。小型パルスパワー装置、伝送線、レーザーギャップスイッチを用いて、ターゲットチャンバー中心部で数 T のパルス磁場を生成する。

(2) OMEGA レーザー (米国 ロチェスター大学) を用いた無衝突ワイベル衝撃波生成

図 2 に示すように、OMEGA の 16 本のメインビーム (3 ω , 総エネルギー ~8 kJ, 1 ns のフラットトップパルス) を 8 mm 間隔の CH 製平行平板型 double-plane ターゲット (直径 2 mm, 厚さ 500 μm) の内側に照射して (各ターゲットに 8 本, 4 kJ) 対向プラズマを生成する。また、18 気圧の D と ³He を充填した SiO₂ 球に 8 本、~9 kJ のレーザーを照射することによって 14.7 MeV の D-³He 核融合生成プロトンを発生させ、プロトンバックライト計測を行う。

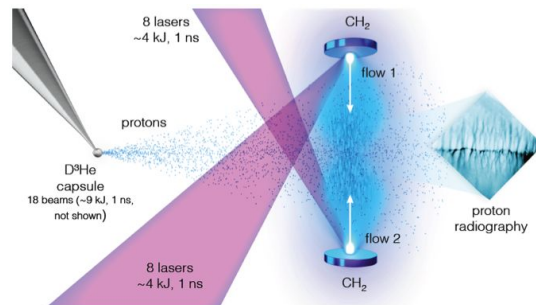


図 2: OMEGA レーザーを用いた実験セットアップの概略[11]。

(3) NIF レーザー (米国 LLNL) を用いた無衝突ワイベル衝撃波生成

56 - 104 本の Drive beam (3 ω , 総エネルギー 300 - 500 kJ, 5 ns のフラットトップパルス) を 6 mm 間隔の 0.1% の Fe/Ni をドーブした double-plane ターゲット (直径 6 mm, 厚さ 1 mm) に照射して (各ターゲットに 28 - 52 本, 150 - 250 kJ) 対向プラズマを生成する。ターゲットとして、CD/CD と CD/CH の double-plane と CD の single-plane ターゲットを用いた。

計測は、DD 核融合生成中性子計測とプロトンイメージング、X 線のスペクトルおよびイメージング、NIF の 4 本のビームを用いた誘導ラマン散乱スペクトルからの電子密度計測等を行う。

4. 研究成果

(1) 激光 XII 号 HIPER レーザーを用いた無衝突衝撃波生成

無磁場中の無衝突静電衝撃波生成

光学計測の結果、平行平板ターゲットの 1 枚目と 2 枚目の両側の CH から無衝突静電衝撃波 (それぞれ S1 と S2) が生成された [8]。図 2(a) に示すプローブの光路に沿って、 $t = 30$ ns におけるトムソン散乱信号を得た [図 3(b)]。

図 4(a)と 3(b)に、図 3(b)における P1 と P2 のトムソン散乱スペクトルを示す。これは、2 枚目の CH からの衝撃波 S2 の上流 (P1)と下流 (P2)のトムソン散乱スペクトルを示している。C と H からなるイオン密度・温度・流速の等しい 2 種イオンを仮定し、スペクトルのカーブフィットを行ない、電子温度 T_e 、イオン温度 T_i 、流速 v_d 、散乱光強度から電子密度 n_e を求めた。また、衝撃波 S2 の速度 $v_s = 0 - 66 \text{ km/s}$ に対してマッハ数 M を求めた。その結果、衝撃波の上流 (P1)では、 $T_{e0} = 24 \text{ eV}$, $T_{i0} = 20 \text{ eV}$, $V_{d0} = 88.9 \text{ km/s}$, $n_{e0} = 7.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $M_0 = 3.1 - 5.5$, 衝撃波の下流 (P2)では、 $T_{e1} = 103 \text{ eV}$, $T_{i1} = 71 \text{ eV}$, $V_{d1} = 17.9 \text{ km/s}$, $n_{e1} = 10 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $M_1 = 0.29 - 1.4$ を得た[8]。

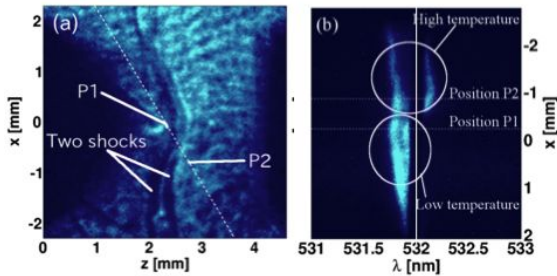


図 3: (a) HIPER レーザー照射後 30 ns におけるシャドウグラフ。HIPER レーザーは $z=x=0 \text{ mm}$ に、トムソンプローブレーザーは $z=2.3 \text{ mm}$, $x=0 \text{ mm}$ にそれぞれ集光された。白線はトムソンプローブレーザーの光路。(b)同時に計測したトムソン散乱信号 [8]。

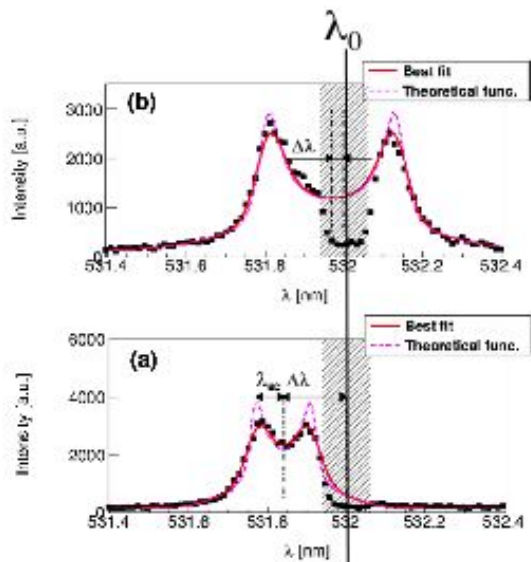


図 4: 図 3(b)における (a)上流 (P1)と (b)下流 (P2)のトムソン散乱スペクトル。太線はカーブフィットの結果を表す[8]。

外部磁場中での無衝突衝撃波生成

真空容器に雰囲気ガスとしてヘリウムを 3.3 Torr 封入し、厚さ $5 \mu\text{m}$ の Al ターゲットを 120 J のレーザーで照射した。ターゲット近傍で約 4 T のパルス磁場を、ターゲット

ノーマル方向に垂直方向 (レーザー軸方向) に印可し、生成された裏面プラズマからの輻射によってヘリウムガスがプラズマ化され、密度 $\sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ を得た。自発光計測から、密度のプロファイルが時間とともに立ち上がりて行くのが観測された。今後は、磁場の値を増加させ、水素ガスを用いて磁化プラズマを生成して実験を行う予定である。

(2) OMEGA レーザーを用いた無衝突ワイベル衝撃波生成

レーザートムソン散乱計測の結果、single-plane ターゲットでは、電子密度 $N_e = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, プラズマ流速 $v_e = v_i = 1000 \text{ km/s}$, 電子・イオン温度 $T_e \sim T_i \sim 100 \text{ eV}$ が得られた [9]。また double-plane ターゲットでは、電子イオンの加熱 ($T_e \sim T_i \sim 1 \text{ keV}$) [9]と、Biermann battery 効果による磁場の圧縮が観測された [10]。

図 5(a)に CH double-plane ターゲットに OMEGA レーザーを照射することによって生成された対向プラズマ流の、メインレーザー照射後 4.2 ns における D^3He 核融合生成 14.7 MeV プロトンバックライト計測結果を示す [11]。図より、プラズマ流に垂直な方向 ($x \sim \pm 0.4 \text{ mm}$) に Biermann battery 効果によって生成された磁場に起因する構造が、またプラズマ流に平行な方向にはフィラメント状の構造が現れているのが分かる。図 5(b)に、得られたプラズマ条件を用いて行った 3 次元 PIC シミュレーション結果を示す [10]。計算結果は実験を良く再現しており、ワイベル不安定性によるフィラメント構造が生成されていることが明らかになった。しかし、OMEGA レーザーで実験できるのは予想通り、ワイベル不安定性によるフィラメントが生成されるまでの過程であり、ワイベル衝撃波生成には NIF 実験が必須であることが分かった [11]。

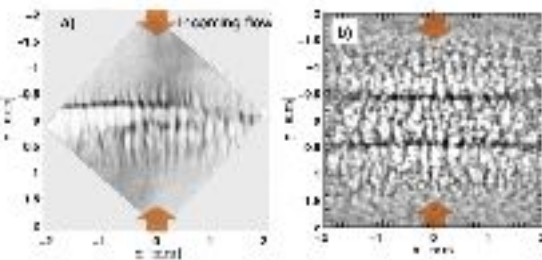


図 5: (a) D^3He 核融合生成 14.7 MeV プロトンバックライト計測結果と (b) PIC シミュレーション結果 [11]。

(3) NIF レーザーを用いた無衝突ワイベル衝撃波生成

250 kJ/foil のショットでは、 4.4×10^{10} 個の DD 核融合中性子が 5 ns パルス幅のレーザー照射終了となる、 $t \sim 5.5 \text{ ns}$ に計測された。また、2 つのターゲット間の中央部に $t \sim 5.5 \text{ ns}$ で強度が最大となる X 線発光が観測された。DD 核融合プロトン強度分布は、X 線の分布

と一致した。これらのことから、衝撃波によって加熱された高温プラズマから DD 中性子・プロトンと X 線が生成されたものと考えられる。誘導ラマン散乱スペクトルから求めた電子密度は $\sim 7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ となった。D-³He 核融合反応生成陽子によるプロトンバックライト計測は、計測器の準備ができていなかったため、行うことはできなかった。

2014 年に行われた 2 回目の NIF 実験公募において、代表者としての提案 “Generation of collisionless shocks and magnetic fields on the National Ignition Facility” が採択され、2016 年から 2017 年まで NIF を用いた無衝突衝撃波と磁場生成実験が行われる予定である。プロトンバックライト計測も 2016 年には使用できる予定で、ワイベル不安定性の成長とフィラメント状磁場の時間発展、および無衝突衝撃波の生成を明らかにして行く。

参考文献

- [1] 山崎了, 馬場彩: 日本物理学会誌 **64**, 196 (2009); 星野真弘, 天野孝伸: 日本物理学会誌 **64**, 421 (2009).
- [2] R. D. Blandford and J. P. Ostriker, *Astrophysical Journal Letters* **221**, L29 (1978).
- [3] T. N. Kato, *Astro Phys. J.* **681**, L93-L96 (2008).
- [4] Y. Kuramitsu et al, *Physical Review Letters* **106**, 175002 (2011).
- [5] T. Morita et al, *Physics of Plasmas* **17**, 122702-1-6 (2010).
- [6] T. N. Kato and H. Takabe: *Astrophys. J.* **681**, 721 (2010).
- [7] H. Yoneda, et al, *Physical Review Letters* **109**, 125004-1-5 (2012).
- [8] T. Morita, Y. Sakawa, et al., *Physics of Plasmas* **20**, 092115-1-6 (2013).
- [9] J. S. Ross et al., *Phys. Plasmas* **19**, 056501 (2012); J. S. Ross et al., *Physical Review Letters* **110**, 145005 (2013).
- [10] N. L. Kugland et al, *Nature Physics* **8**, 809-812, (2012).
- [11] C. M. Huntington et al, *Nature Physics* **11**, 173-176 (2015).

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 30 件)

- 1) C. M. Huntington, 他 16 名, Y.Sakawa, 他 3 名, *Observation of magnetic field generation via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows*, *Nature Physics* **11**, 173-176 (2015). 10.1038/nphys3178
- 2) Naofumi Ohnishi, Ayako Ishii, Yasuhiro Kuramitsu, Taichi Morita, Youichi Sakawa, Hideaki Takabe, *Numerical Analysis of*

Hydrodynamic Instability in Magnetized Laser Ablation Flow, *High Energy Density Physics*, Published online (2014). 10.1016/j.hedp.2014.11.006

- 3) J. Meinecke, 他 17 名, Y.Sakawa, 他 8 名, *Turbulent amplification of magnetic fields in laboratory laser-produced shock waves*, *Nature Physics* **10**, 520-524 (2014). 10.1038/nphys2978
- 4) C.D. Gregory, 他 11 名, Y.Sakawa, 他 3 名, *Experiments to investigate the effects of radiative cooling on plasma jet collimation*, *High Energy Density Physics* **11**, 12-16 (2014). 10.1016/j.hedp.2013.12.003
- 5) Y.Sakawa, 他 15 名, *High-power laser experiments to study collisionless shock generation*, *European Physical Journal Web of Conferences* **59**, 15001-1-4 (2013). 0.1051/epjconf/20135915001
- 6) T. Morita, Y.Sakawa, 他 21 名, *High Mach-number collisionless shock driven by a laser with an external magnetic field*, *European Physical Journal Web of Conferences* **59**, 15004-1-5 (2013). 10.1051/epjconf/20135915004
- 7) K. Nishio, Y.Sakawa, 他 19 名, *Laboratory experiments on plasma jets in a magnetic field using high-power lasers*, *European Physical Journal Web of Conferences* **59**, 15005-1-5 (2013). 10.1051/epjconf/20135915005
- 8) T. Ide, Y.Sakawa, 他 15 名, *Formation of counterstreaming plasmas for collisionless shock experiment*, *European Physical Journal Web of Conferences* **59**, 15002-1-5 (2013).
- 9) T. Morita, Y.Sakawa, 他 21 名, *Interaction of high Mach-number shocks in laser-produced plasmas*, *High Energy Density Physics* **9**, 187-191 (2013). [http:// dx.doi.org/ 10.1016/j.hedp.2012.12.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.hedp.2012.12.008).
- 10) Y. Kuramitsu, Y.Sakawa, 他 6 名, *Long time evolution of collisionless shocks in laser produced counterstreaming plasmas*, *High Energy Density Physics* **9**, 222-225 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.hedp.2013.01.001>
- 11) M.J. Grosskopf, 他 14 名, Y.Sakawa, 他 11 名, *Simulation of laser-driven, ablated plasma flows in collisionless shock experiments on OMEGA and the NIF*, *High Energy Density Physics* **9**, 192-197 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.hedp.2012.11.004>
- 12) T. Morita, Y.Sakawa, 他 12 名, *Thomson scattering measurement of a shock in laser-produced counter-streaming plasmas*, *Physics of Plasmas* **20**, 092115-1-6 (2013). 10.1063/1.4821967
- 13) N. L. Kugland, 他 25 名, Y.Sakawa, 他 3 名, *Visualizing electromagnetic fields in laser-produced counter-streaming plasma experiments for collisionless shock*

- laboratory astrophysics, PHYSICS OF PLASMAS **20**, 056313-1-14 (2013).
- 14) 蔵満 康浩, 坂和洋一, 他 7 名, レーザーによる実験室宇宙物理: 無衝突衝撃波に伴う電磁場乱流, レーザー研究 **41**, 20-24 (2013).
 - 15) Y. Kuramitsu, Y.Sakawa, 他 27 名, *Laboratory investigations on the origins of cosmic rays*, Plasma Phys. Control. Fusion **54**, 124049-1-7 (2012). 10.1088/0741-3335/54/12/124049
 - 16) T. Morita, Y.Sakawa, 他 12 名, *Optical pyrometer system for collisionless shock experiments in high-power laser-produced plasmas*, Review of Scientific Instruments **83**, 10D514-1-3 (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4733738>
 - 17) H. Yoneda, 他 3 名, Y.Sakawa, 他 4 名, *Strong compression of magnetic field with a laser accelerated foil*, Physical Review Letters **109**, 125004-1-5 (2012). 10.1103/PhysRevLett.109.125004
 - 18) N. L. Kugland, 他 23 名, Y.Sakawa, 他 3 名, *Self-organized electromagnetic field structures in laser-produced counter-streaming plasmas*, Nature Physics **8**, 809-812 (2012). 10.1038/NPHYS2434
 - 19) Y. Kuramitsu, Y.Sakawa, 他 14 名, *Kelvin-Helmholtz Turbulence Associated with Collisionless Shocks in Laser Produced Plasmas*, Physical Review Letters **108**, 195004-1-5 (2012). 10.1103/PhysRevLett.108.195004
 - 20) J. S. Ross, 他 15 名, Y.Sakawa, 他 16 名, *Characterizing counter-streaming interpenetrating plasmas relevant to astrophysical collisionless shocks*, Physics of Plasmas **19**, 056501-1-8 (2012). [http:// dx.doi.org/10.1063/1.3694124](http://dx.doi.org/10.1063/1.3694124)
 - 21) Y. Kuramitsu, Y.Sakawa, 他 3 名, *On the universality of nonthermal electron acceleration due to quasi-turbulent wakefield*, High Energy Density Physics, **8**, 266 - 270 (2012). 10.1016/j.hedp.2012.03.016
 - 22) H.-S. Park, 他 12 名, Y.Sakawa, 他 14 名, *Studying astrophysical collisionless shocks with counterstreaming plasmas from high power lasers*, High Energy Density Physics **8**, 38-45 (2012). 10.1016/j.hedp.2011.11.001
 - 23) G. Gregori, 他 21 名, Y.Sakawa, 他 4 名, *Generation of scaled protogalactic seed magnetic fields in laser-produced shock waves*, Nature **481**, 480 - 483 (2012). 10.1038/nature10747
- 2) Y.Sakawa, *Laboratory experiments to study astrophysical collisionless shocks*, 12th Asia Pacific Physics Conference APPC12, Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 15 -19 (2013) Invited.
 - 3) 坂和洋一, 無衝突衝撃波のレーザー模擬実験の成果, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 領域 2, 宇宙線・宇宙物理領域, ビーム物理領域合同シンポジウム, 9 月 27 日 (2013) 招待講演.
 - 4) Y.Sakawa, *Collisionless shock formation in counter-streaming plasmas produced by large-scale intense lasers*, 22nd Int. Toki Conference (ITC22), Ceratopia Toki, Gifu, 19 - 22 Nov. (2012) invited.
 - 5) Y. Sakawa, *LABORATORY EXPERIMENTS TO STUDY COLLISIONLESS SHOCKS*, 9th Int. Conf. on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA2012), Tallahassee, Florida, USA, 30 April - 4 May (2012) Invited.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

坂和 洋一 (SAKAWA YUICHI)
 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

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

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

森高 外征雄 (MORITAKA TOSEO)
 大阪大学・レーザーエネルギー学 研究センター・研究員
 研究者番号:20554372

富田 健太郎 (TOMITA KENTARO)
 九州大学・総合理工学研究科 (研究院)・助教
 研究者番号:70452729

森田 太智 (MORITA TAICHI)
 九州大学・総合理工学研究科 (研究院)・助教
 研究者番号:30726401

〔学会発表〕(計 47 件)

- 1) 坂和洋一, 大型レーザーを用いた無衝突衝撃波生成実験, レーザー学会研究会「大エネルギーレーザーを用いた科学研究」, 大阪大学レーザー研, 1 月 8 日(2014) 招待講演.