様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ５ 月 ２０ 日現在

機関番号： １４４０１

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2012～2013

課題番号： ２４７４０３６９

研究課題名（和文） レーザー生成非一様プラブマ中の衝撃波による磁場増幅

研究課題名（英文） Magnetic field amplification driven by shock waves in laser-produced inhomogeneous plasmas

研究代表者

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・特任助教（常勤）

研究者番号：７０４５６９２９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円、**（間接経費）** 1,050,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙空間に普遍的に存在する高エネルギー粒子、宇宙線の起源は、その発見から1世紀が経った現在も多くの謎を残している。近年観測された非常に早い宇宙線の 加速には宇宙空間の磁場が2桁以上増幅されている必要があると考えられている。ところが、遠方にある天体の直接的な磁場の計測は不可能である。本研究では、直接観測不可能な宇宙の現象を実験室で摸擬し、レーザーを用いた磁場増幅の原理実証実験を行なった。

研究成果の概要（英文）：High energy particles or cosmic rays are ubiquitous in the universe, yet their origins have been a long standing unsolved problem for more than a century. Recent observations of very fast acceleration of cosmic rays imply that the magnetic field has to be amplified by orders of magnitude. However, it is impossible to observe the local magnetic field in distant astrophysical phenomena. We model such phenomena in laboratories and perform proof-of-principal experiments with lasers.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：磁場　衝撃波　密度の不一様　不安定性　宇宙線　レーザー　実験室宇宙物理

科学研究費助成事業　研究成果報告書

１．研究開始当初の背景

(1) 宇宙空間に存在する高エネルギー荷電粒子・宇宙線の起源については、無衝突衝撃波を介したフェルミ加速が標準的な理論として受け入れられているが、未だに多くの未解決問題を残している。特に近年の観測の高精度化により、宇宙線の起源として最有力だと考えられている超新星残骸 (SNR) において、非常に早い宇宙線の加速が観測された [Uchiyama et al., Nature, 449, 576, 2007]。これを標準的な宇宙線の加速理論で説明するためには、加速域における磁場が背景磁場より 100 のオーダーで増幅している必要がある。ところが、超新星残骸等の天体プラズマでは、磁場の計測がもっとも困難であり、直接観測は不可能である。このため、超新星残骸に伴う衝撃波による磁場の生成や増幅については、これまで理論と数値シミュレーションを用いるしかなかった。星間物質中には、高密度の分子雲が存在することが観測的にも理論的にも知られており、衝撃波は宇宙空間に普遍的に存在することから、密度の非一様プラズマ中を衝撃波が伝搬する際に起こるリヒトマイヤー・メシコフ不安定性 (RMI) を介した磁場の増幅が最も有力な理論だと考えられる。２次元の磁気流体（MHD）シミュレーションでは、背景磁場に対し数百倍の磁場増幅が示され、宇宙線の加速に必要な乱流場も同時に生成されることが示された [T. Inoue et al., Astrophys. J. 695, 825, 2009]。

(2) これまでこのようなモデルを実証する方法はなかったが、近年のレーザー技術の発展により、高エネルギー天体現象を実験室で模擬できるようになってきた[H. Takabe et al., Plasma Phys. Control. Fusion 41, A75, 1999, B. A. Remington et al., Science 284 1488, 1999, B. A. Remington et al., Rev. Mod. Phys. 78, 755, 2006]。我々は、乱流航跡場による荷電粒子の非熱加速 [Y. Kuramitsu et al., Astrophys. J. Lett. 682, L113, 2008, Phys. Plasma Lett. 18, 010201, 2011, Phys. Rev. E 83, 026401, 2011]や、無衝突衝撃波生成実験等[Y. Kuramitsu et al., Astrophys. J. Lett. 707, L137, 2009, T. Morita et al., Phys. Plasma 17, 122702, 2010, Y. Kuramitsu et al., Phys. Rev. Lett. 106, 175002, 2011]、特に宇宙線の加速に関して、世界に先駆けた研究を実験的に行ってきた。SNR における磁場増幅を実験室で模擬する上で本質的な要素は、衝撃波、外部磁場、及び密度の非一様性である。上記のように、我々は衝撃波の生成実験の実績があり、また外部磁場中でのレーザー生成プラズマの伝搬に関する研究も行ってきた。更に、密度の非一様性に関する要素実験も行ってきた[Y. Kuramitsu et al., Astrophys. Space Sci. 336, 269, 2011]。これら全ての要素を含んだ予備的な実験もイギリス、ラザフォード・アップルトン研究所で行った。また、近年の国際会議では、大型レーザーを用いた宇宙の模擬実験に外部磁場の重要性が認識されてきており、関連する数値コードの開発も進んでいる。国際的な競争力を保ちつつ、本研究分野で主導的な役割を担うために、RMI を介した磁場増幅の原理実証実験を遂行する必要がある。

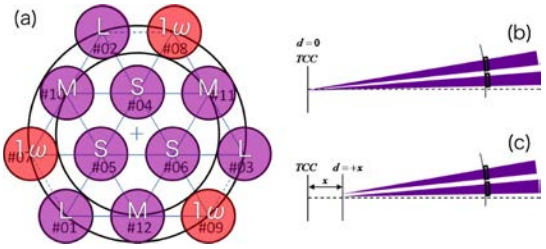

図 1(a)レーザービーム配置。(b)オフセット無し。(c)オフセット有り。

２．研究の目的

我々はこれまでレーザー生成対向プラズマ中に無衝突衝撃波を励起する実験を主導してきており、非一様プラズマの生成方法についても提案・検証してきた。また、外部磁場中のジェットの生成実験等も遂行しており、本研究に必要な、衝撃波、外部磁場、非一様プラズマの全ての要素について検証済みである。本研究では、大型レーザーを用い、非一様・非等方プラズマを磁化プラズマ中に生成し、非一様面を衝撃波が通過する際に起こる構造の時間発展を調べる。RMI による非一様面の成長や、特徴的な「マッシュルーム」構造を観測することをまず最初の目標に掲げる。プラズマが引き延ばされ、渦が生成されることは、MHD プラズマ中で磁場を生成することに対応している。プラズマ構造のイメージングに加え、磁場のローカルな直接計測を行う。最大の目標は、MHD シミュレーションが予測する、数百倍の磁場増幅が可能かどうかを実験的に検証することである。また、RMI の結果として、どのような場が生成

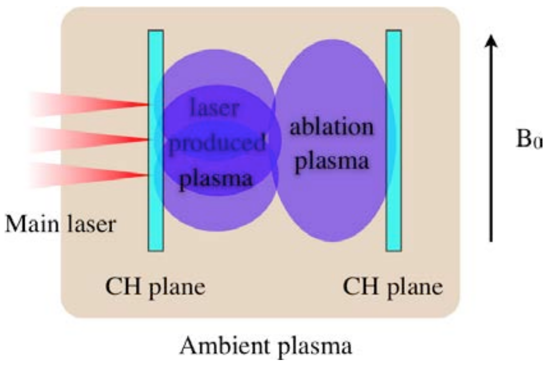

図 2 側面から見たレーザーとターゲットの概念図。

されるかを撮像する。乱流場が形成されるのか、されるならどのような構造分布になるかを調べ、将来的に粒子加速の研究に発展させる。

３．研究の方法

前項までに述べた研究目標を達成するために、大型レーザー施設を用い磁場増幅実験を行う。SNR における磁場増幅に本質的な要素は、１）衝撃波、２）外部磁場、３）非一様プラズマである。

実験は大阪大学 Gekko XII（GXII）レーザーを用いて行う。レーザー条件は、波長 351 nm、パルス幅 500 ps、パルスエネルギー100-120 J のビームを複数本用いて行なう。集光アライ

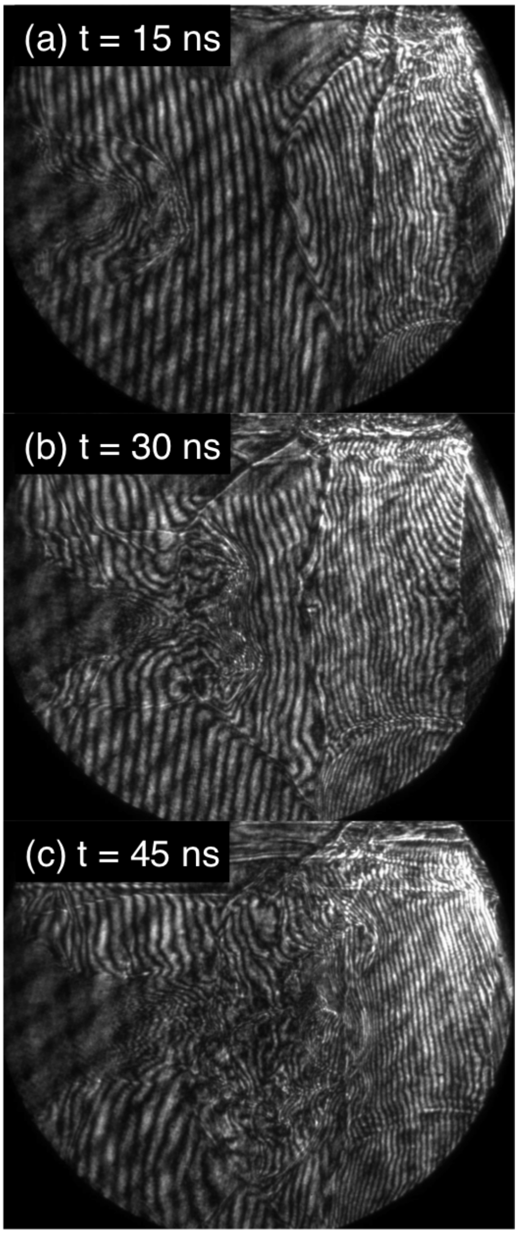

図 3 干渉計測によるプラズマの構造の時間発展

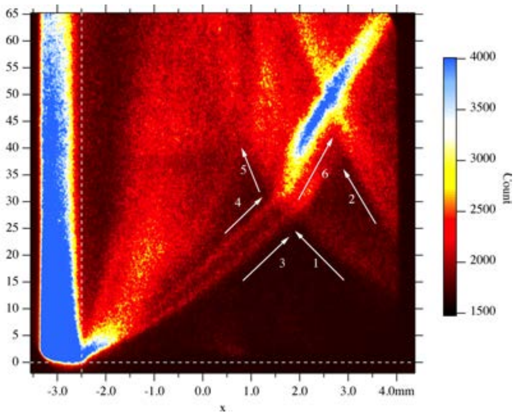

図 4 ストリークカメラを用いた自発光計測によるプラズマの時間発展。

メントはターゲットチャンバーセンター（TCC）で行い、集光位置をレーザー軸方向に動かすことで、ターゲット上での集光位置にオフセットをかける（図１）。複数ビームによりターゲットの異なる場所を照射することで、複数のプラズマを相互作用させ非一様プラズマを生成する。この非一様プラズマを衝撃波が通過する際に RMI が励起される。衝撃波を生成するためにターゲットチャンバーはガス（窒素 5 torr）を封入する。ガスはレーザー照射に伴う X 線等の輻射により電離され、磁場の存在の下ではさらに磁化される。外部磁場は永久磁石より印可する。ターゲットは透過型の平行平板を用い、非一様プラズマと衝撃波の相互作用を実現する（図２）。

計測器はプラズマの側面からの光学計測（シャドー計測、干渉計測、自発光計測）により、プラズマの形状及び密度、温度、速度を計測する。検出器は高速ゲート付きのカメラ（ICCD）による２次元の撮像、及びストリークカメラを用いた時間発展を計測する。磁場の計測には２つの手法を用いる。一つは偏光計測を用いたファラデー回転で、もう一つは磁場誘導（B-dot）コイルを用いたローカルな磁場計測である。偏光計測では、ウォラストンプリズムを用い２角度の偏光を一つの計測器で同時に測ることで、高精度の計測を ICCD 及びストリークカメラを用いて行う。さらに、プラズマのローカルな物理量を計測するために、トムソン散乱計測を行なう。

４．研究成果

図３は干渉計測による RMI による渦の形成とその時間発展を示す。レーザーは図の左から照射しており、左端にある１枚目の平板を透過したレーザーが右側の２枚目の平板も照射している。これにより対向するプラズマ流を生成する。本実験では、雰囲気のプラズマが存在するため、雰囲気中とターゲットプラズマ中のそれぞれに衝撃波が形成される。

このため、左右両側から２つの衝撃波、計４つの衝撃波が生成される（図３a)。右側の衝撃波が比較的平面的であるのに対し、左側の衝撃波はより指向性を持ったジェット状の構造を持っている。これは複数ビームを用いオフセットをかけた効果であり、このジェット状の２つの衝撃波を隔てる接触不連続面が右からやってくる衝撃波と相互作用することで RMI が励起される。図３(b)では左右から伝搬してきた衝撃波が相互作用し、RMI に特徴的なマッシュルーム構造が見られる。さらに時間が経つと、複雑な構造が見られ、RMI が発展し乱流が形成されていると考えられる（図３c)。

図４はストリークカメラを用いた自発光計測で得られた衝撃波の伝搬と相互作用の時間発展である。レーザーは同様に左から来ており、点線で示した縦線が１枚目のターゲットの位置を示している。時間は下から上に進んでおり、水平に示した点線がレーザーのタイミングに対応している。輝度はプラズマの密度と温度の関数であるが、主に密度を反映していると考えられる。矢印１、および2が右からの雰囲気プラズマ中とターゲットプラズマ中の衝撃波をそれぞれ示しており、矢印３と４が左からの衝撃波のペアを示している。左からのジェット状のプラズマが右からの衝撃波（矢印１）でショックを受けて RMI が励起される。矢印５と６は衝撃波同士の相互作用による透過・反射衝撃波、もしくは接触不連続面と考えられる。衝撃波同士の相互作用で自発光の輝度が大きく上昇しているが、この輝度の上昇は衝撃波１と３の相互作用により直ちに引き起こされている訳ではなく、衝撃波３と４の間で起きている。これは RMI が接触不連続面で起こっていることを示唆している。

これら光学計測によるプラズマの構造の撮像とその時間変化は、渦が形成されそれが乱流に発展する様子を示している。渦の生成は磁化プラズマ中の磁場の増幅と等価であり、RMI を介した磁場の増幅を示唆している。実験ではこれらの光学計測に加え、磁気プローブを用いた磁場のローカルな計測も行なっている。磁気プローブは出来るだけ小型（直径約１mm）のものを用意し、２枚の平行平板の間、磁気プローブの損傷を避けながら可能な限りプラズマの近傍（3 cm 下方）に設置した。ローカルな磁場の増幅が計測されているが、衝撃波による磁場増幅と同程度であり、100 倍以上という強力な磁場の増幅は計測されていない。これは RMI の渦が光学計測で見られるように局在化しており、この局在化した渦が存在する所に磁気プローブを設置しない限りは RMI による磁場の増幅を測れないためである。今年度の実験ではこれを回避するために、平行平板ではなく磁気プローブに垂直にターゲットを設置し、磁気プローブまでプラズマ、およびその渦が伝搬できる構造を計画している。

さらにトムソン散乱計測によるプラズマのローカルな物理量が得られており、RMI に起因する渦のローカルな計測に初めて成功している。これらの計測結果は宇宙の観測からは得られないものであり、実験室の模擬実験を通して初めて可能になるものである。

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 13 件）全て査読有り

1. <u>Y. Kuramitsu</u> et al. (+38 authors), Laboratory investigations on the origins of cosmic rays, Plasma Physics and Controlled Fusion, 54, 124049, 2013, 10.1088/0741-3335/54/12/124049
2. <u>蔵満康浩</u>、他８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、2013
3. <u>Y. Kuramitsu</u> et al. (+15 authors), Kelvin-Helmholtz Turbulence Associated with Collisionless Shocks in Laser Produced Plasmas, Physical Review Letters, 108,195004, 2013, 10.1103/PhysRevLett.108.195004
4. <u>Y. Kuramitsu</u> et al. (+7 authors), Long time evolution of collisionless shocks in laser produced counterstreaming plasmas, High Energy Density Physics, 9, 222, 2013, 10.1016/j.hedp.2012.03.016

〔学会発表〕（計　８件）

1. <u>Y. Kuramitsu</u> et al. (+22 authors), Vortices and turbulence generation via Richtmyer-Meshkov instability in laser produced magnetized plasmas, The 12th Asia Pacific Physics Conference, 15 July 2013, Makuhari, Japan
2. <u>Y. Kuramitsu</u> et al. (+22 authors), Laboratory Experiments of Magnetic field in the Universe, The 4th International Conference on High Energy Density Physics, 28 June 2013, Saint Malo, France
3. <u>蔵満康浩</u>、他 10 名、高マッハ数無衝突衝撃波の実験的研究、日本物理学会第 67 回年次大会、2013 年 3 月 29 日、広島
4. <u>蔵満康浩</u>、他４名、宇宙衝撃波と宇宙線の起源に関する実験室レーザー模擬実験、平成 24 年度衝撃波シンポジウム、

2013 年 3 月 13 日、北九州

5. 蔵満康浩、他 7 名、電子の運動論効果による磁気リコネクション、日本物理学会秋季大会、2012 年 9 月 19 日、横浜
6. Y. Kuramitsu et al. (+4 authors), Laboratory experiments of shocks and magnetic reconnections, 28th General Assembly of the International Astronomical Union, 31 August 2012, Beijing, China (**invited**)
7. Y. Kuramitsu et al. (+44 authors), Laboratory investigations on the origins of cosmic rays, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 16th International Congress on Plasma Physics, 3 July 2012, Stockholm, Sweden (**invited**)
8. Y. Kuramitsu et al. (+10 authors), Electron Scale Magnetic Reconnection in a Laser Produced Plasma, 9th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, 30 April 2012, Florida, USA

６．研究組織

(1)研究代表者

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（常勤）
研究者番号：70456929