高強度レーザーと構造性媒質の相互作用による 高エネルギー密度プラズマの閉じ込と磁場生成

Confinement of high energy density plasma and magnetic field generation by the interaction between high power laser and structured medium

<u>岸本 泰明</u>^{1,3)}、松井 隆太郎¹⁾、上原 直希¹⁾、井原 優希¹⁾、増井 英陽²⁾、 坂口 浩司³⁾、深見 一弘⁴⁾、Tatiana Pikuz⁵⁾、Maria Alkhimova⁶⁾、坂和 洋一⁷⁾、 神野 智史⁸⁾、井上 峻介⁹⁾、金崎 真聡¹⁰⁾、太田 雅人⁷⁾、福田 祐仁¹¹⁾

Yasuaki KISHIMOTO, Ryutaro MATSUI, Naoki UEHARA, Yuki IHARA, Hideaki MASUI, Hiroshi SAKAGUCHI, Kazuhiro FUKAMI, Tatiana PIKUZ, Maria ALKHIMOVA, Yoichi SAKAWA, Satoshi JINNO, Syunsuke INOUE, Masato KANASAKI, Masato OTA, Yuji FUKUDA

¹⁾京大エネ科、²⁾京大工、³⁾京大エネ研、⁴⁾京大工科、⁵⁾阪大先導的学際研究機構、⁶⁾ロシア科学 アカデミー高温研究所、⁷⁾阪大レーザー研、⁸⁾東大院工、⁹⁾京大化研、¹⁰⁾神大海事科学、¹¹⁾量研関西研

本研究は、ターゲットにサブµm オーダでデザインされた微細構造を有する物質(構造性ターゲット)を 導入し、高強度レーザー照射時に現出する準静的な高強度の電場や磁場を含む複雑な相互作用過程を制御 することで、様々な応用研究(高強度・高輝度のX線源や中性子源など)に資する多様な機能を持ったプ ラズマを生成することを目的に、構造性ターゲットとしてサブµm オーダのシリコンの円柱状物質(ロッ ド)で構成した数 10 µm オーダのロッド集合体(バルク構造体)を導入・作成し、その局所座標に 10²¹ W/cm² 領域の集光強度が可能な量研関西研の J-KAREN-P レーザー(短焦点配位)のアライメントを実現するとと もに、これに 10 Jクラスのエネルギーを投入する実験を行った。

実験においては、上記サブµm オーダの内部構造を持つ数 10 µm オーダのバルク構造体に対して J-KAREN-P レーザーのアライメントの方法論を確立するとともに、同レーザーを、ロッド集合体を支える 支持基盤等に接触することなく、最大集光強度 2×10²¹ W/cm² (レーザーエネルギー13 J)でバルク構造体の 所定位置に高精度で照準し、安全性を確保した微小な戻り光状態でエネルギーを付与することに成功、電 子温度 (高エネルギー成分)が 10-20 MeV クラスのプラズマ生成に成功した。実験においては、電子エネル ギー計測用のスペクトルメータ、電子密度分布計測用の干渉計、イオンエネルギー計測用のトムソンパラ ボラ、X 線計測のシステムを設置し、構造性ターゲットで生成されるプラズマの計測を試みた。その結果、 最大エネルギーが 12 MeV のプロトン (H⁺) や核子当たり最大で 12 MeV/u の高価数イオン (Si¹²⁺, Si¹³⁺, Si¹⁴⁺)の生成が確認され、上記の電子温度の評価とも整合する結果を得た。

特に、同じ平均質量密度(ロッドの空間重点率)を持つ異なる構造のターゲットへの同一条件のレーザー 照射に対して、異なった制動・特性X線スペクトル分布と強度が観測され、構造の違いに起因する異なっ たプラズマが生成・実現することが示された。これらは、高強度レーザーを照射するターゲットとして構 造性ターゲットを導入することで、従来と異なった新しいクラスのプラズマ研究の展開に資する第一段階 の重要な成果と位置付けられる。

<u>キーワード</u>:高エネルギー密度プラズマ,ロッド集合体,構造性媒質、多価イオン、高強度準静的磁場

1. <u>目的</u>

近年のレーザー技術の進展により、集光強度が 10²⁰⁻²² W/cm² 領域のフェムト秒オーダの極短パルス高強度レーザ ーが実現可能となった。このような高強度レーザーを物質(ターゲット)に照射すると、物質は瞬時に電離し、 ターゲットの種類に依存した相対論的電子と高電離多価イオンで支配される高エネルギー密度プラズマが 生成され、その極限的な特性を利用した様々な応用研究が展開されている [1-4]。例えば、そのようなプ ラズマ中に生成される TV/m レベルの強電場を用いた高エネルギーイオン加速やそれを利用した核融合中性子、 高エネルギー相対論電子の加速度運動や多価電離イオンとの衝突過程、輻射減衰過程で生成される高強度 X 線やガ ンマ線などがあげられる。一方、これらの過程は生成されるプラズマの時空間構造に大きく依存する。その一つが プラズマの保持時間である。高エネルギー密度プラズマは大きな圧力の不均衡に起因して慣性時間程度で飛散する ことから、応用研究もプラズマが生存する時空間スケールに制限される。このため、慣性時間を超えて高エネルギ ー密度プラズマを長時間保持(閉じ込める)ことができれば、応用研究の幅を大きく広げることができる。

本研究は、(気体や単純な固体薄膜とは異なった)サブµm オーダでデザインされた微細構造を有する物質 (構造性ターゲット)に高強度レーザーを照射するとともに、その相互作用過程で生成される準静的な自己 生成電磁場を利用することでこれを実現する方法論を開拓することを目的とする。具体的には、1) 構造 性ターゲットとしてサブµm オーダのシリコンの円柱状物質(ロッド)で構成した数 10 µm オーダのロッド 集合体(バルク構造体)を導入・作製、2) 生成した構造性ターゲットに 10²¹ W/cm² 領域の集光強度が可能 な量研関西研の J-KAREN-P レーザー(短焦点配位)のアライメントを実現、3) J-KAREN-P レーザー(短焦点 配位)による 10 J クラスのエネルギーを投入する実験行うとともに、共同研究者の協力を得て、電子エ ネルギー計測用のスペクトルメータ、電子密度分布計測用の干渉計、イオンエネルギー計測用のトムソン パラボラ、X 線計測のシステムを設置し、構造性ターゲットで生成されるプラズマの計測を試みた。

2. <u>方法</u>

本研究は、上記の項目(1)~(3)を以下の要領で段階的に実施した。 (1)構造性媒質の作製:これまで、相対論的電磁粒子コード EPIC3D を用いて、集光強度が1.0×10²⁰⁻²¹ W/cm²領域の高強度レーザーを、直径がサブµm オーダの円柱状シリコンがµm オーダの間隔で格子状に配置されたロッド集合体に集光強度が10²⁰⁻²¹ W/cm²領域のフェムト秒高強度レーザーを照射する2次元粒子シミュレーション結果に基づいて、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点において、ロッドの直径と間隔が異なる数種類のロッド集合体を作製した。作製は以下の手順で実施した。

- シリコンウエハ上に、電子リソグラフィ技術を用いてロッド集 合体の構造パターンを描画
- ② Bosch Process と呼ばれる、プラズマを用いたドライエッチング 手法により、ロッド集合体をシリコンウエハ上の 40 µm×100 µm の領域内に作製



図 1: (a) 電子顕微鏡により上面から撮影し たロッド集合体。シリコン基板上に 40 µm× 100 µm の領域に作製している。 (b) ロッド 集合体の拡大写真。シリコンロッドが格子状 に整列配置している様子が確認できる。

③ レーザーダイシング装置によりターゲットを数mmオーダに切り出した後、京都大学エネルギー理工学研 究所の協力を得て、作製したロッド集合体を電子顕微鏡により観察(図1(a), (b)参照)。

実験では、高強度レーザーをロッド集合体の「側面方向」に照射することを考慮し、エッチング条件を当研

究室で独自に工夫した。その結果、ロッドの平均高さを40 µm 程度とすることに成功した。

作製したターゲットは、レーザーダイシング装置により1mm×2mmに切り出しを行った後、独自設計した ターゲットホルターに紫外線硬化樹脂を用いて接着した。この際、J-KAREN-Pレーザーの照射条件(F値~1.3) を想定して、ターゲットホルダーへのフレームショット、および、それによる戻り光を避けるため、レーザ 一伝播方向に対して 22.5 度傾けた状態で接着した。

(1) レーザー照射実験の実施(量研関西研 J-KAREN-P レーザー)

(1)で作製したターゲットを用いて、集光強度が 10²⁰⁻²¹ W/cm²領域の短焦点配位の J-KAREN-P レーザーを照 射した。実験系を図 2 に示す。ノマルスキー式の干渉計をチャンバー外に設置し(設置:東京大学神野助教 を含む京都大学グループ)、発生したプラズマにプローブ光を通すことで、プラズマの電子密度の測定を試み た。また、ターゲットの裏面方向にトムソンパラボラ(TP)と電子スペクトルメーター(ESM)を設置し(設 置:神戸大学金崎助教らのグループ)、生成するイオンのエネルギーと価数分布、および、電子のエネルギー

分布を計測した。さらに、チャンバー内に1台、チャンバー 外に2台の合計3台のX線分光器(XR)を設置し(設置: Tatiana Pikuz 大阪大学特定准教授・Maria Alhimova 博士研 究員)、X線スペクトルを計測した。

レーザーの照射位置(焦点位置) は、事前に行ったアライ メントによって、1 μ m 以下の誤差で正確に決定したのち、シ ョットごとに徐々に変化させていった。ロッド集合体への高 強度レーザーの側面照射は初の試みであるため、戻り光によ るレーザー装置の損傷を防ぐことを目的として、レーザーエ ネルギーをパラメータとして、0.1J(2×10¹⁹ W/cm²) から最大 で 13 J (1.3×10²¹ W/cm²) まで段階的に上げながら、3 日間 で合計 33 個のターゲットにショットを行った。また、レー ザーのパルス幅 (FWHM) も 40fs から 400fs まで変化させた。



図 2: ロッド集合体に高強度レーザーを照射する 実験系。レーザーの進行方向にトムソンパラボラ (TP)、図の3方向にX線分光器(XR)、ターゲ ットの裏面側に電子のスペクトルメーター(ESM) を設置。図のようにレーザー照射方向に対して垂 直に入射したプローブ光は、チャンバー外部の干 渉計により測定される。

3. <u>結果及び考察</u>

本実験では、以下の結果と結論を得た。なお、当研究室と大阪大学のグループがレーザーの照射方法について十 分に検討を行った結果、全てのショットに対して、フレームショットはなく、戻り光も規定内の範囲に収めつつ、 ロッドの側面方向に正確にレーザーを照射することに成功した。

(1) 電子のエネルギースペクトル、干渉計による電子密度・温度計測

電子のエネルギーは、計測器の動作不調、もしくは計測可能なエネルギー領域と実際に発生したエネルギー 領域が乖離していたため、計測に至らなかった。干渉計測については、ショット前の干渉計測では、直径 20 µm程度の針の先端の影と干渉縞が確認できた。一方、実際のショットでは干渉縞は確認できたが、ショット 前の干渉縞との差が見られず、40 µm×100 µm の領域に存在するロッド集合体も確認できなかった。この原因 として、CCD カメラの視野にロッド集合体が入っていなかった、あるいはショット後の干渉縞はプラズマによ るものではなく、メインレーザーの反射光が干渉したものである、等が考えられる。引き続き調査を行い、 次回以降の干渉系の確立に活かしたい。 (2) イオンのエネルギー分布の計測

トムソンパラボラによりイオンのエネルギーを計測 した結果、J-KAREN-P レーザーの集光強度が最大(レ ーザー集光強度:2×10²¹ W/cm², パルス幅(FWHM): 40 fs)となる条件下でショットを行った場合におい て非常に強いシグナルが観測され、最大で12 MeV のプロトン、および12 MeV/u のケイ素イオン(Si¹²⁺, Si¹³⁺, Si¹⁴⁺)が得られた(図3)。特に、ケイ素イオン のエネルギースペクトルには特徴的な構造(くぼみ)



図3:トムソンパラボラ(TP)で観測したイオンのエネ ルギーを2次元図で可視化したもの。図中の原点に近 づくほど高エネルギーであることを表す。カラーバー の明るさはイオンの数を表す。

が見られ、これから算出される電子温度が18 MeV 程度であることが分かった。これはレーザーの集光強度が 2×10²¹ W/cm² の場合の動重カスケーリングから見積もられる電子温度とほぼ一致していることから、ロッド の内部に「内部シース電場」と呼ばれる特徴的な電場構造 [5]が形成されており、この電場によってイオン が加速されたことを示唆する結果となっている。

(3) X線分光器によるX線スペクトルの計測

実験チャンバーの内部に設置した X 線分光器により、トムソンパラボラにより確認したイオン種(He 様イオン: Si¹²⁺)の存在を示す X 線スペクトルを得た。これは、(2)の結果(高エネルギーSi¹²⁺イオンの生成)を裏付けている。また、レーザーの照射条件(集光強度・パルス幅)が同一であるが、ターゲットの構造の差異によって電子温度が大きく異なる場合があることを見いだした。これは、ターゲットの構造を変化させることで、電子温度(プラズマ状態)が制御可能であることを示す重要な知見である。

今回の実験では、サブµmの微細構造を持つ数 10µm のバルク構造体の所定位置に 10¹⁹ W/cm² から 10²¹ W/cm² レベ ルの幅広い集光強度レーザーの照射に成功し、その全てについて制動・特性 X 線データが取得された。今 後、X 線輻射過程を自己無撞着に取り入れた粒子シミュレーションと実施するとともに、磁場生成に関す る Stark 効果にも着目した実験データの解析を進め、プラズマの閉じ込め特性を評価する予定である。

【謝辞】本研究を実施するにあたり、大阪大学工学研究科の蔵満康浩教授、博士課程の南卓海氏、大阪大学レーザ ー科学研究所の博士課程の江頭俊輔氏、修士課程の中川義治氏、神戸大学海事科学研究科の博士課程の浅井孝文氏 には、実験機器の準備・設置等、実験環境の整備にご協力いただくとともに、準備期間を含め実験をサポートして いただきました。お礼申し上げます。また、量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所の桐山博光グループリ ーダー、近藤康太郎主任研究員は、円滑な実験の実施にご協力いただきました。感謝いたします。

- 4. <u>引用(参照)文献等</u>
- 1. R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto, Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019).
- 2. R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto, Phys. Rev. E 100, 013203 (2019).
- 3. Y. Kishimoto, D. Kawahito, R. Matsui, T. Okihara, H. Sakaguchi, K. Fukami and Y. Fukuda, The 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2017), September 12, (2017) (Plenary talk)
- Y. Kishimoto, R. Matsui, N. Uehara, K. Imadera, H. Sakaguchi, M. Ota, Y. Sakawa, K. Fukami and Y. Fukuda, The 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019), September 27, (2019) (Oral)
- 5. Y. Kishimoto, K. Mima, T. Watanabe, and K. Nishikawa, Phys. Fluids 26, 2308 (1983).