

高強度レーザーと構造的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めと磁場生成

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

岸本 泰明^{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(構造的ターゲット)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、構造的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 $10\ \mu\text{m}$ 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 $10^{21}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 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 $10\ \text{J}$ 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 $10\ \mu\text{m}$ 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 $2 \times 10^{21}\ \text{W}/\text{cm}^2$ (レーザーエネルギー $13\ \text{J}$)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 $10\text{--}20\ \text{MeV}$ 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、構造的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 $12\ \text{MeV}$ のプロトン(H^+)や核子当たり最大で $12\ \text{MeV}/u$ の高価数イオン(Si^{12+} , Si^{13+} , Si^{14+})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的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。

キーワード : 高エネルギー密度プラズマ, ロッド集合体, 構造的媒質, 多価イオン, 高強度準静的磁場

1. 目的

近年のレーザー技術の進展により、集光強度が 10^{20-22} 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(構造的ターゲット)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) 構造的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 $10 \mu\text{m}$ オーダのロッド集合体(バルク構造体)を導入・作製、2) 生成した構造的ターゲットに 10^{21} W/cm² 領域の集光強度が可能な量研西研の 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を行うとともに、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、構造的ターゲットで生成されるプラズマの計測を試みた。

2. 方法

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) 構造的媒質の作製：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 $1.0 \times 10^{20-21}$ 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 10^{20-21} 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。

- ① 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 $40 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の領域内に作製
- 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

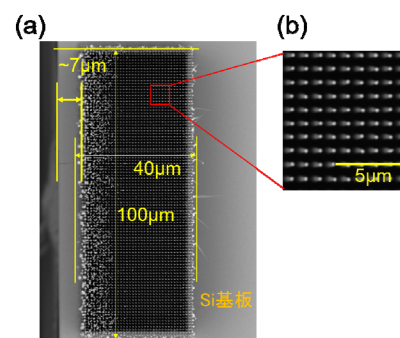


図 1: (a) 電子顕微鏡により上面から撮影したロッド集合体。シリコン基板上に $40 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の領域に作製している。(b) ロッド集合体の拡大写真。シリコンロッドが格子状に整列配置している様子が確認できる。

(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： 2×10^{21} 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）

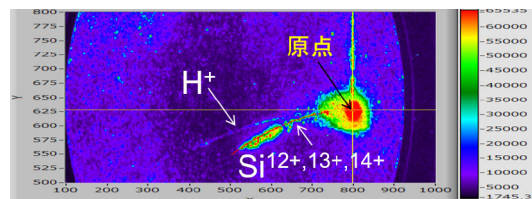


図 3：トムソンパラボラ（TP）で観測したイオンのエネルギーを 2次元図で可視化したもの。図中の原点に近づくほど高エネルギーであることを表す。カラーバーの明るさはイオンの数を表す。

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 2×10^{21} 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 10 μm のバルク構造体の所定位置に 10^{19} W/cm² から 10^{21} 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所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. 引用(参照)文献等

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)
4. 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).