

小特集 短パルス高強度レーザーによる等積加熱が拓く高エネルギー密度科学

3. 固体密度を超える高密度プラズマの等積加熱の X 線計測

3. X-Ray Measurement for Fast Isochoric Heating of High Energy Density Plasma

松尾一輝

MATSUO Kazuki

大阪大学レーザー科学研究所

(原稿受付：2020年6月20日)

キロジュール級の短パルス高強度レーザーの登場により、固体密度以上の物質を等積加熱し、高エネルギー密度プラズマを生成することが可能となった。また等積加熱を再現するプラズマシミュレーションの発展により、ひとくちに等積加熱といっても、そこには複数の加熱機構が組み合わさっていることがわかってきた。等積加熱という複雑な加熱機構の解明に迫るためには、ある密度のプラズマをどれだけの温度まで加熱できたかという、加熱の結果を正確に測定するだけでは不十分である。複数の加熱機構がどのような割合で起こっているのかといった、加熱機構の解明に迫ることのできる計測方法の確立が必要となる。本章では、等積加熱によって生成された keV 温度・固体密度以上のプラズマを特徴づけ、等積加熱の加熱機構の解明に迫ることができる、ドープターゲットを用いた X 線スペクトル計測、発光分布計測について重点的に解説する。

Keywords:

picosecond relativistic laser, isochoric laser heating, high energy density plasma, x-ray spectroscopy, x-ray imaging

3.1 はじめに

前章でも述べられたように、レーザー強度 10^{18} W/cm² を超える高強度短パルスレーザーを用いることで、密度を固体に近い状態に維持したまま物質を“等積加熱”し、非常に高い圧力状態を作り出すことが可能である。この等積加熱は加熱の対象となるプラズマの密度やレーザーのパラメータ等に大きく依存する。本章ではレーザーのエネルギーがキロジュールを超えるような大型の短パルス高強度によって等積加熱された固体密度以上のプラズマの計測について取り上げる。

大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーを用いてプラズマを固体密度以上に圧縮し、キロジュール級の短パルス LFEX レーザーを用いて圧縮したプラズマを加熱することで、太陽内部の圧力に匹敵するギガバール (keV 温度・固体密度以上のプラズマに相当) を超える高エネルギー密度のプラズマ生成が達成されている [1]。そのようなプラズマを地上に作り出すことができれば、地上にいながら星内部の物性を研究するといった宇宙物理などの学術研究の進展、高輝度 X 線源など将来の応用が期待される線源の開発、究極的には核融合などの応用研究の展開が可能となるため、精力的な研究が現在も進められている [2]。

レーザーで加熱された高エネルギー密度プラズマの温度・密度の見積もりには、高密度プラズマ中で減衰することなく外部に放射される X 線や中性子の観測が主に用いられてきた [3]。特に、外部から照射した透過 X 線の観測、およびプラズマから発生する自発光 X 線の計測、中性子の

イールド計測はプラズマの情報を正確に反映しており、加熱の結果を計測するには有効な手段として認知されている。

近年、等積加熱を再現するプラズマシミュレーション [4] の発展により、高強度レーザーによる等積加熱の加熱機構は、レーザーによって加速された高速電子と物質が衝突電離する直接衝突加熱 (drag heating)、レーザー照射面近傍で高速電子群によって引き起こされる電流による電気抵抗性加熱 (resistive heating)、照射面近傍で加熱されたプラズマの熱エネルギーが拡散的に固体内部に侵入していく熱拡散加熱 (diffusive heating) といった複数の加熱機構が組み合わさっていることがわかってきている。従来から行われてきたような、加熱の結果を正確に測定する手法だけでは計測によって、等積加熱の複雑な物理機構に迫ることは難しい。

本章では、等積加熱によって生成された keV 温度・固体密度以上のプラズマを特徴づけ、等積加熱の加熱機構の解明に迫ることができるドープターゲットを用いた X 線スペクトル計測、発光分布計測の手法について重点的に解説する。

3.2 X 線計測のためのドープターゲットの開発

等積加熱の加熱機構に迫るために、keV 温度まで加熱されることによって電離し、特徴的な輝線 X 線を発生するトレーサーとなる物質をあらかじめレーザー照射の標的となるターゲットにドープしておくことで、トレーサーとなっ

た物質の原子から発生する X 線を計測し、現象の理解を進める手法が有用である。

レーザーによって加速された高速電子と電離前のトレーサー物質が衝突電離し、直接衝突加熱が起きる際に、トレーサー原子は $K\alpha$ 線と呼ばれる特性 X 線を放出する。分光器を用いてターゲットから発生した X 線をスペクトル分解し、 $K\alpha$ 線の絶対量を計測することで、直接衝突加熱によって何%のレーザーエネルギーがプラズマの加熱に寄与したかという効率を算出し、その発光分布を計測することで直接衝突加熱がターゲットのどのあたりで優位におきたかを計測することが可能である。

また等積加熱によってターゲットの加熱が進み、トレーサー物質の電離が進んでいくと、トレーサー原子は各電離状態に応じて Li-like サテライト線、 $He\alpha$ 線といった共鳴線を放出する。X 線をスペクトル分解し、各共鳴線の強度比を計測することで、プラズマの電子温度を同定することが可能である。

ターゲットにドーピングするトレーサーは対象となるプラズマの電子温度から判断される。例えば銅の原子は、図 1 のように 500 eV から 2 keV の範囲で、 $He\alpha$ 線を放出するヘリウム様にまで電離された原子や、Li-like サテライト線を放出するリチウム様の原子の存在比が変わっていく。この比は $He\alpha$ 線と Li-like サテライト線の強度比に対応しており 500 eV から 2 keV 程度のプラズマであれば、これらのスペクトルの強度比からプラズマの電子温度を計測することが可能である。一般的にトレーサーの原子番号が大きいほど、ヘリウム様などの高電離状態まで電離が進みづらいため、500 eV から 2 keV よりも温度の高いプラズマの温度を $He\alpha$ 線と Li-like サテライト線の強度比で計測する場合は、より原子番号の大きいトレーサーが適している。

上記で述べた計測には、従来から行われてきた X 線のスペクトル、イメージング計測の発展に加えて、ドーピングターゲットを高精度に形作る技術が不可欠である。また近年は、様々なターゲットデザインが実験に用いられるようになったことから、ターゲット作製も幅広いアプローチの技術が求められるようになってきた。図 2 は高強度レーザーによって圧縮したプラズマを等積加熱することで keV 温

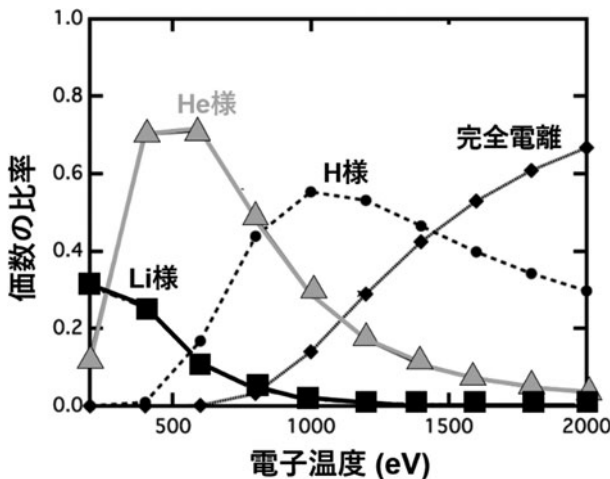


図 1 プラズマの電子温度と銅の各電離状態の存在比。

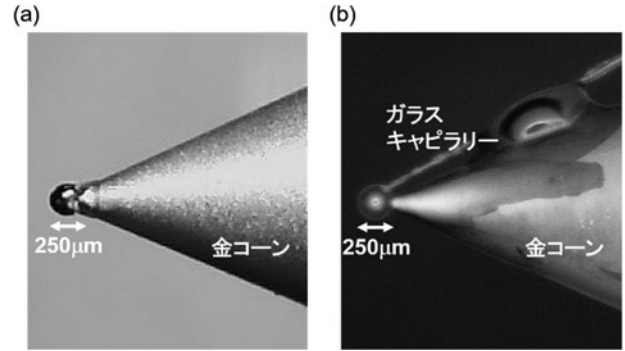


図 2 (a)オレイン酸銅ターゲットと(b)D₂O液体ドーピングターゲットの写真。

度・固体密度以上の状態を達成するために、2つの異なる方法で製作された実験用ターゲットの写真である。レーザー照射の標的となる球形のターゲットにレーザーガイド用の金コーンが取り付けられた形状をしている。これらのターゲット製作技術について以下の項でその概要を紹介する。

3.2.1 オレイン酸銅ターゲット

ドーピングターゲットを高精度に形作る技術の一つとして、エマルション法を用いて銅のトレーサーを含有した中実球ターゲットの開発が行われた[5]。この方法ではまず銅を化学的に含んだオレイン酸銅[Cu(C₁₈H₃₃O₂)₂]と有機溶媒としてベンゼン、ジクロロエタンを混ぜ合わせ、オレイン酸銅溶液を作る。次に、ガラス毛细管マイクロ流体デバイスを使用して、ポリビニルアルコール (PVA) 中にオレイン酸銅の液滴 (エマルション) を生成する。オレイン酸銅溶液と PVA の流量をコントロールすることで、中実球の直径をコントロールすることができる。その後、エマルションをロータリーシェーカーにセットし、2~3日間攪拌して、有機溶媒を除去する。これにより、オレイン酸銅の中実球をエマルションから得ることができる。

エマルション法で作られたこの中実球は X 線計測に十分な原子比で 0.93% の銅を含み、測定された球の最大半径と最小半径の差が球の平均半径に対して 3% という良好な真球度を示した。この中実球ターゲットをレーザーによって圧縮し、高強度レーザーによって等積加熱することで、keV 温度・固体密度以上の高エネルギー密度のプラズマを生成し、プラズマから発生する X 線を計測することで、等積加熱の加熱機構の解明に迫ることができる。またこの研究では、実験側からの要求により、溶質としてオレイン酸銅が選択されたが、異なる溶質を選択することにより、トレーサーとなる物質の種類や濃度を変更することができるため、このターゲット製作技術は今後幅広い実験で応用されていくと期待される。

3.2.2 D₂O 液体ドーピングターゲット

等積加熱の加熱機構に迫るためには、銅などの原子をトレーサーとしてドーピングしておき、その原子から発生する X 線を計測することによって現象の理解を進める手法が有用である一方で、慣性閉じ込め核融合では、重水素とトリチウムを含む燃料ターゲットを使用し、それらの核融合反応で生成される中性子のイールドを測定することで、プラズ

マの質量面密度 (g/cm^2), イオン温度を計測している. X線計測のためのトレーサーに加えて, 重水素とトリチウムを含んだターゲットを開発することができれば, 等積加熱の加熱機構に迫る計測と核融合反応の計測つまり, 加熱の過程と結果を同時に測定することが可能となり, 慣性核融合の実験用ターゲットとして極めて有用である.

上記のような要求から, ポリスチレンカプセルの中に銅などのトレーサー材料に加えて重水素, トリチウムを含んだ溶液が封入されたターゲットの製作方法が開発された [6]. この方法ではまず, ポリスチレンのカプセルにフェムト秒レーザーを照射して, 直径 $20 \mu\text{m}$ 程度の穴を開ける. ターゲットの最終的な直径はこの時使用するポリスチレンのカプセルによって決定される. 次にガラスキャピラリーを穴に通し, そのキャピラリーを通して X線トレーサー材料を含む溶液 (銅を X線トレーサーとする場合は CuCl_2 の溶液を使用) と D_2O 溶液をカプセルに充填する. X線トレーサー材料を含む溶液と D_2O 溶液の配合を変えることで, 最終的にターゲットに含まれることになる X線トレーサーの含有量をコントロールすることができる.

X線トレーサー材料を含む D_2O 液体で満たされたターゲットが T_2O 雰囲気下に置かれると, ポリスチレンは D_2O および T_2O に対してわずかに透過性があるため, D_2O は T_2O に交換され, ポリスチレンのカプセル内で完全に混合される. この T_2O の置換システムは, T_2O の代わりに H_2O を使用してテストされ, 約50%の D_2O が置換されたことが確認された. このターゲットは, 実際の実験では使用されていないものの, 将来の核融合実験で導入される予定である.

3.3 等積加熱のダイナミクスに迫る X線計測

本節では, 前節で紹介したターゲットをレーザーで圧縮後, 等積加熱し, ターゲットに含まれるトレーサーから発生する X線を計測した結果について概説することで, 等積加熱という複雑な物理機構に迫っていく. 本実験は, 大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII号レーザー及び LFEXレーザーを用いて行われた [1]. 計測は, 対象となるプラズマに関する物理的描像があつて初めて意味のあるものとなる. そのような視点を踏まえ, まず等積加熱の物理的描像について簡単に振り返る.

等積加熱には, 図3に示したように3つの主要なメカニズムがあることが知られている. 右辺の最初の項は直接衝突加熱の項である. 高強度レーザーとプラズマが相互作用することで高速の電子がレーザー進行方向に加速される. 高速電子の経路長 (L) に沿ったコアの質量面密度 (ρL) が高速電子を止めるのに十分である場合 (1 MeV の高速電子に対しておおよそ $\rho L = 0.6 \text{ g}/\text{cm}^2$ が要求される), この高速電子の衝突によるプラズマの直接加熱は優位なものとなる.

レーザー進行方向に高速電子流が流れるとプラズマは電荷中性を保とうとするため, 高速電子の進行方向とは逆の流れを持つ電流 (リターン電流) が駆動される. リターン電流は高速電子よりも平均速度が遅く, 周りのプラズマと

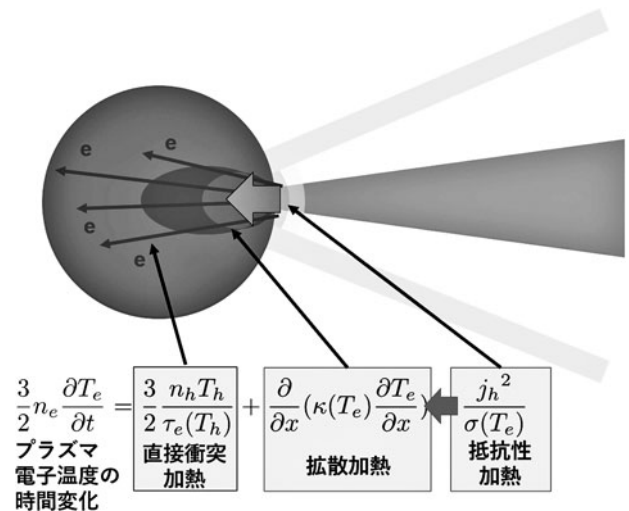


図3 等積加熱の機構の概要図.

衝突しやすいため, リターン電流はプラズマをオーム加熱する. これを抵抗性加熱と呼び, 特に高速電子の電流密度が高い場所であるレーザーとプラズマの相互作用領域において支配的な加熱メカニズムである.

抵抗性加熱によってレーザーとプラズマの相互作用領域が高温になると, 背景の電子たちによってこの高温領域の熱エネルギーは低温で密度の高い領域に拡散的に輸送されていく. これを拡散加熱と呼び, レーザーによって高温領域が保たれ続ける限り, 高温領域の熱エネルギーは連続的に密度の高いプラズマに供給され続ける.

これまでの研究では, 上記で述べた直接衝突加熱の研究が keV 温度・固体密度以上のプラズマを対象に行われてきた. ドーパターゲットを用いた X線スペクトル計測, 発光分布計測を行うことで, 等積加熱によって生成された keV 温度・固体密度以上のプラズマを特徴づけたことで, 直接加熱だけではなく拡散加熱も, 固体密度以上のプラズマを keV 温度を超えて加熱するために重要であることがわかってきた [1, 7].

3.3.1 X線スペクトル計測による加熱機構の解明

実験では, オレイン酸銅中実球ターゲットを圧縮後, ピコ秒の高強度レーザーで加熱し, 銅の輝線スペクトルを結晶型の X線分光器で取得した. 図4は銅のトレーサーから発生した, 8.0 から 8.6 keV の範囲の X線スペクトルを示している. 8.05, 8.35, および 8.39 keV のピークは, それぞれ $\text{Cu-K}\alpha$ 線, Li-like Cu サテライト線, および $\text{Cu-He}\alpha$ 線という名前がついている.

$\text{Cu-K}\alpha$ 線は高強度レーザーで加速された高速電子が中性 (電離していない) の銅の K 殻から電子を励起し, その緩和過程で発生する特性 X線である. $\text{K}\alpha$ 線の絶対量はレーザーによって加速された高速電子と圧縮されたプラズマの衝突の効率, つまり直接衝突による加熱の効率を表している. Li-like Cu サテライト線と $\text{Cu-He}\alpha$ 線はそれぞれリチウム様, ヘリウム様まで電離された銅の K 殻から電子が励起されることで発生する X線スペクトルである. プラズマの電子温度によって銅の各電離状態の存在比が変わるため, この強度比は, 主にプラズマの電子温度, また分光器の視

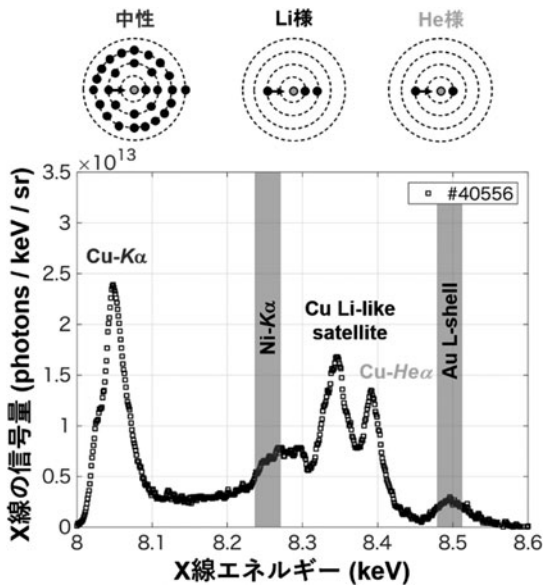


図4 スペクトル計測結果.

線に沿ったプラズマの厚さおよび密度に関する情報を反映している。

X線スペクトル計算コード FLYCHK の計算結果から実験で取得した Li-like Cu サテライト線と Cu-He α 線の強度比を、別途計測されたプラズマの密度の範囲で再現するスクリプトを作成し解析を行い、加熱されたターゲットの温度を決定した。測定値はプラズマを最大 2.2 keV まで加熱し、太陽内部に匹敵する 22ギガバールも高圧力プラズマが生成されていることを示していた。また Cu-K α 線の絶対量から直接衝突加熱による加熱効率も別途見積もられた[8]。直接衝突加熱による最大結合効率は 7.7% であり、これは直接衝突加熱によってプラズマが最大 80 eV まで加熱されたことを示している。直接衝突加熱だけでは上記で達成された keV 温度を超えるプラズマの生成を説明できない。これは直接衝突加熱以外の、他の加熱メカニズムも加熱に寄与していることを示唆している。

3.3.2 フレネルフェーズゾーンプレートを用いた加熱領域の可視化

加熱領域の特定のために、等積加熱された高エネルギー密度プラズマの二次元加熱分布をフレネルフェーズゾーンプレート (FPZP) によって測定した。FPZP はタンタルや金などの金属で構成されたマルチリング形状をしており、入射してきた X 線がそのリング上で回折をおこすことで、結像点で X 線の強めあいが起こり、像が結ばれる。図 5 に示すように、トレーサーから放出された K α 線と He α 線がそれぞれ FPZP によって画像化され、加熱領域が特定された。K α 線はターゲットの端で強く観察される一方で、加熱領域である He α 線の発光がレーザー軸に沿って強く観察された。この発光領域の違いは、コアがレーザー軸に沿って局所的に加熱されていることを示している。

3.3.3 2次元 PIC シミュレーションによる等積加熱の計算

この加熱の物理的描像にせまるため、加熱実験で得られた密度分布を使用し、2次元の粒子内セル (PIC) シミュレーション (PICLS) による計算を行った。図 6 は圧縮し

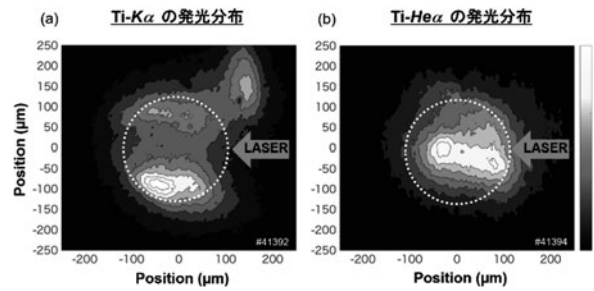


図5 K α 線と He α 線の発光分布. 参考文献[1]補足資料の図 S 3 を引用.

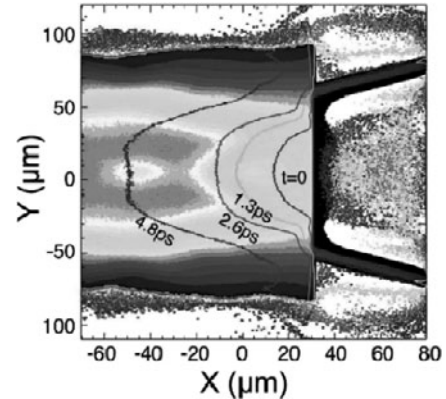


図6 1 keV の等温線の時間発展. レーザー照射側 (右側) からコアの中心に向かって 1 keV 以上の温度の領域が拡散していく。

たプラズマをピコ秒の高強度レーザーで直接加熱した際に、1 keV 以上の温度領域が広がっていく様子を示したシミュレーション計算結果である。抵抗性加熱によってレーザーとプラズマの相互作用領域でプラズマが加熱され、その周囲に熱波が秒速数千キロメートルで拡散的に広がっていく様子を見ることができる。熱波は、加熱レーザー照射が終了した後も 10 $\mu\text{m}/\text{ps}$ を超える速度で伝播し、レーザーのピークから 4.8 ps 後には、圧縮された密度の高い領域 ($X > -40 \mu\text{m}$) が 1 keV 以上の電子温度まで加熱された。この PIC シミュレーションは、拡散加熱が keV 温度を超えて高密度領域を局所的に加熱できる加熱プロセスであることを明らかにした。

3.4 まとめと展望

本章では、等積加熱によって生成された keV 温度・固体密度以上のプラズマを特徴づけ、等積加熱の加熱機構の解明に迫ることができるドーブターゲットを用いた X 線スペクトル計測、発光分布計測の手法について重点的に解説した。従来から行われてきた中性子のイールド計測のように加熱の結果を正確に測定する手法に加えて、ドーブターゲットを用いた X 線スペクトル計測、発光分布計測を行っていくことで、より深く等積加熱の複雑な物理機構に迫ることができる。今後は、この X 線スペクトル計測、発光分布計測に時間分解計測を組み合わせ、等積加熱の物理機構により詳細にアプローチしていこうと考えている。

謝 辞

激光 XII 号レーザー及び LFEX レーザーを利用した実験に関して、大阪大学レーザーエネルギー学研究所の多くの職員、学生の方々に感謝いたします。特に X 線の計測に関しては、大阪大学レーザー科学研究所の李昇浩博士、坂田匠平博士、藤岡慎介教授、ネバダ大学の澤田寛准教授がいなければ遂行することができませんでした、感謝いたします。またターゲット開発並びに製作に関して、大阪大学レーザー科学研究所の有川安信講師、産業技術総合研究所の岩佐祐希博士にご尽力いただきました、感謝いたします。また等積加熱の理論及びシミュレーションに関して

は、大阪大学レーザー科学研究所の東 直樹氏、岩田夏弥講師、千徳靖彦教授にご尽力いただき感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 35001 (2019).
- [2] 千徳靖彦：プラズマ・核融合学会誌 **95**, 6 (2019).
- [3] 重森啓介：プラズマ・核融合学会誌 **92**, 3 (2016).
- [4] Y. Sentoku and A.J. Kemp, J. Comp. Phys. **227**, 6846 (2008).
- [5] Y. Iwasa *et al.*, Fusion Eng. Des. **125**, 89-92 (2017).
- [6] Y. Arikawa *et al.*, Fusion Sci. Technol. **76**, 464 (2020).
- [7] H. Sawada *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 155002 (2019).
- [8] S. Sakata *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3937 (2018).