

超高エネルギー密度状態下におけるナノワイヤーアレイ内でのエネルギー輸送に関する研究

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース

レーザーエネルギー工学領域 重森研究室 田中 大裕

1. はじめに

1990年代の Chirped Pulse Amplification 法の発明による超高強度レーザーの出現によって、圧力にして1 GBarを超える超高温・超高密度状態である超高エネルギー密度状態(Ultra High Energy Density States, UHEDs)の生成が実験室レベルで可能となった。UHEDsはレーザー核融合の炉心プラズマや恒星の中心等に存在していることから、その特性の理解はこれらの研究分野にとって非常に重要である。一方、超高強度レーザーの照射によって生成可能なUHEDsの領域は、レーザーが照射される試料(ターゲット)のごく表層領域のみであり(図1(a))、その生成効率の低さから本格的な応用や展開には至っていないのが現状である。この問題を解決するために、直径数100 nmのごく細いワイヤーが基板面に整列したナノワイヤーアレイ(図1(b),(c)、以下NWアレイ)を照射試料として活用する手法が2013年に提案された[1]。NWアレイは直径が数100 nm、長さが数 μm ほどのごく小さなワイヤーが基板上に垂直に整列した構造体である。この表面構造をもつ試料にレーザーを照射することにより、ワイヤー間にレーザー光が進出し、従来よりも高効率・大体積で超高エネルギー密度状態が生成できることが指摘されている。しかし、NWアレイにおけるエネルギー吸収・輸送メカニズムはいまだ不明な点が多かった。このような中で、我々の先行研究によりNWアレイ内では、表面電流の抑制と強磁場構造の形成を通じてNWアレイ内で局所的な加熱が生じている可能性が指摘された[2]。本研究では同メカニズムを解明するために、①超高エネルギー密度状態生成用高品質NWアレイの開発、②X線自由電子レーザー施設SACLAにおける超高速時間分解計測を通じた時間発展データの取得を行った。

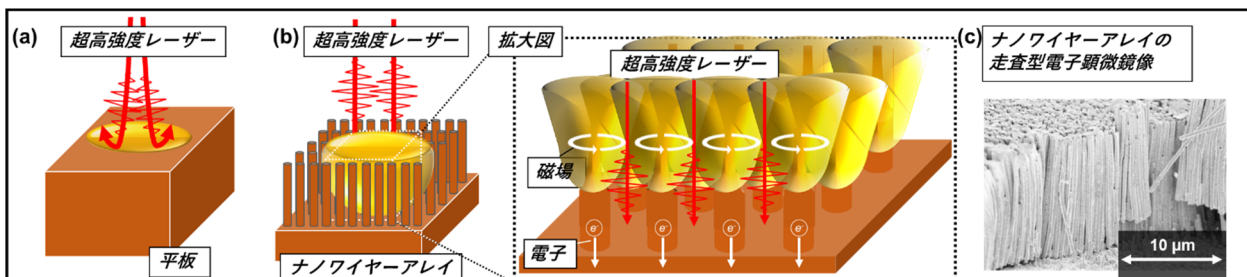


図1 (a)平板における超高エネルギー密度状態生成の様子。(b)ナノワイヤーアレイにおける超高エネルギー密度状態生成の様子。(c)ナノワイヤーアレイの走査型電子顕微鏡像例。

2. 陽極酸化アルミニウムを活用したナノワイヤーアレイ作成

本研究では無数のナノホールを持つ自己組織化ナノ構造体、陽極酸化アルミニウム(AAO)を用いてナノワイヤーアレイを開発してきた。図2にナノワイヤーアレイ作成工程の概要を示す。AAOは電解液下で高純度アルミニウムへ電圧を印加することにより形成される。このAAOに対して電気めっきで基盤を形成、ナノホール内を金属で充填する。そ

してこの AAO を化学エッチングによって除去することにより NW アレイを作成した。この方式では、NW アレイのジオメトリ（ナノワイヤーの直径及び間隔）は AAO の作成条件（電圧・試薬）で決定されることから、筆者はこれらの条件を様々に変えることにより多様な NW アレイの作成を可能とすることに成功した。

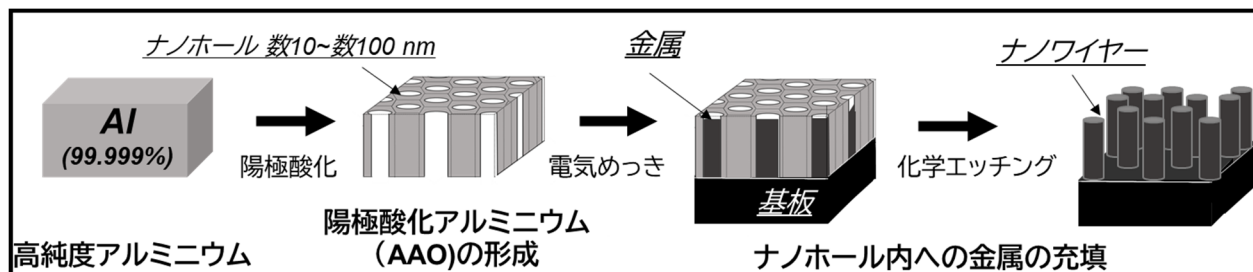


図2 ナノワイヤーアレイ製造プロセスの概要

3. X線自由電子レーザー施設 SACLA における超高速時間分解計測

レーザー照射実験は X 線自由電子レーザー（XFEL）施設 SACLA において、超高強度レーザーと X 線自由電子レーザーとを用いて行われた（図 3(a)）。ターゲットには、NW アレイと参照用に金属平板を使用した。実験ではまず、超高強度レーザーをターゲットへ照射した。その後時間差を置いて XFEL が照射され、K 吸収端のシフト（図 3(b)）に由来する X 線の透過度変化の空間的な広がりを 2 次元 X 線シャドウグラフから評価した^[3]。

時間分解計測ではどの時間帯・レーザー強度においても常に NW アレイの方が平板よりも透過度の変化領域（＝レーザーにより加熱された領域）が小さいという結果が得られた。これは我々の先行研究が示唆する NW アレイにおける局所的な加熱を裏付ける結果である。

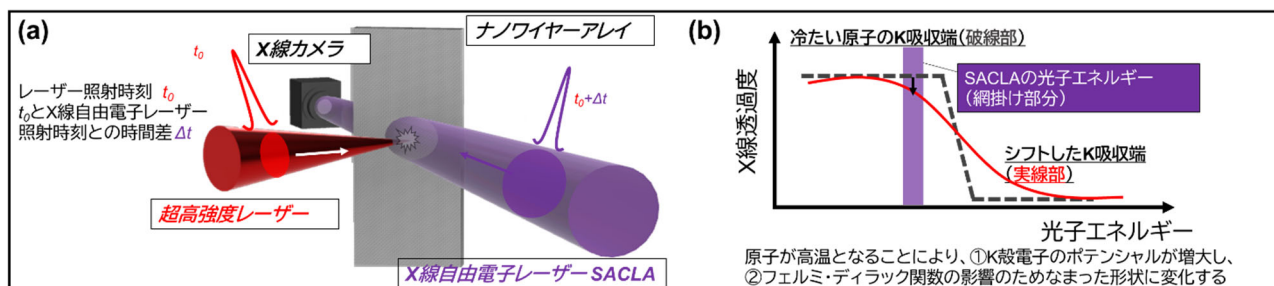


図3 (a) Face-On計測での実験セットアップ。(b)K吸収端のシフトの概念図。このK吸収端の前後にX線自由電子レーザーの光子エネルギーを設定することで、超高強度レーザーによって加熱されたナノワイヤーアレイに生じるX線透過度の変化を観測できる。この観測を通して、温度や密度の変化を様々な時間差でとらえることによりUHEDs形成の超高速ダイナミクスを得る。

4. 結論

NW アレイ内におけるエネルギー吸収・輸送機構に対して、表面電流の抑制と強磁場構造の形成による局所的な加熱が寄与している可能性が指摘されていた。そこで、同機構の解明のために①高品質 NW アレイの開発、②X 線自由電子レーザー施設 SACLA における超高速時間分解計測を実施した。①項については、AAO のパラメータ（ホール径・配置）を合成条件の調節を通して、多様な NW アレイの作成に成功した。また②項では NW アレイ上に形成されたプラズマの時間分解計測に成功し、各時刻における NW アレイにおける局所的な加熱を捉えることができた。今後は、NW アレイのジオメトリを様々に変化させてレーザー照射実験を行い、ジオメトリの差異に由来する NW アレイにおけるレーザーエネルギー吸収の影響を評価する。

(1) M.Purvis, *et al.*, Nat. Phot (2013) (2) D.Tanaka, *et al.*, under review (2023) (3) H.Sawada, *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc (2022)