OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザー照射ナノワイヤーアレイ中のエネルギー吸収・輸送過程に関する研究
Author(s)	田中, 大裕
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105463
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　　名	（田中大裕）
論文題名	レーザー照射ナノワイヤーアレイ中のエネルギー吸収・輸送過程に関する研究

論文内容の要旨

本論文はレーザー照射ナノワイヤーアレイのエネルギー吸収・輸送過程を明らかにするため、本研究おいて必須となる高品質ナノワイヤーアレイの作成手法の開発、ピコ秒キロジュール級レーザーLFEXを用いたレーザー照射実験及びX線自由電子レーザー施設SACLAでのレーザー照射実験を中心として、理論・シミュレーションによる詳細な物理機構の検討を含めた研究をまとめたものである。

第1章では、ナノワイヤーアレイと呼ばれるナノ構造体が高エネルギー密度科学において有望なターゲット材料として注目されていることとその理論的背景と物理的考察を述べ、本研究の意義とその目的を示した。

第2章では、ナノワイヤーアレイとレーザーの相互作用を考えるうえで重要となる物理過程をまとめた。まず、高強度レーザー電場中での電子の運動の振る舞いに関して検討を行った。次にプラズマ中でのレーザーエネルギー吸収メカニズムを議論し、固体ターゲット中における加熱プロセスについてまとめた。そして、ナノワイヤーアレイにおけるエネルギー吸収メカニズムについて、レーザー照射からの時間スケールをによる詳細な検討を行った。

第3章では、ナノワイヤーアレイの開発手法についてまとめた。本研究では陽極酸化アルミニウム（Anodic Aluminum Oxide, AAO）をテンプレートとする手法を用いた。本手法により作成されるナノワイヤーアレイの空間パラメータは、AAOの合成条件と電気めっきの条件で決定される。そこで筆者はAAOの合成条件の探索を通して、直径40～400 nm、充填率13～40%のナノワイヤーアレイの作成条件を見出した。また、銅とニッケルの電気めっきの条件も併せて考慮し、実験目的に応じた空間パラメータを有するナノワイヤーアレイの作成手法を開発した。さらに、作成したナノワイヤーアレイの特性評価も実施した。エネルギー分散型X線分光計測(EDX)、制限視野電子線回折(SAED)観察によって、不純物の少ないほぼ単結晶のナノワイヤーが作成されていたことを確認し、レーザー照射実験に使用するにあたり充分な品質であることを示した。

第4章ではピコ秒超高強度レーザーLFEXを用いた実験的研究についてまとめた。実験では超高温・超高密度状態の形成を示すHe様線がナノワイヤーアレイにおいて平板より多く観測され、ピコ秒レーザー照射条件下でもナノワイヤーアレイのエネルギー吸収増強が起きうることを示した。また、電子スペクトルに関しては、ターゲット前面において計測した電子の発生数はナノワイヤーアレイの方が大きいが、ターゲット裏面側で観測された電子に関してはナノワイヤーアレイと平板は同程度であった。以上の実験結果をParticle in Cellシミュレーションの計算結果と比較した。その結果、ナノワイヤーアレイにおいてはワイヤー間の真空による電子の移動の阻害と、ワイヤーごとに発生する強磁場による電子のトラップが引き起こされていることが分かった。この空間構造に由来する効果により、ナノワイヤーアレイではエネルギーの散逸が防止され、ピコ秒レーザー照射時でも効率的な高エネルギー密度状態の生成につながることを明らかにした。

第5章ではX線自由電子レーザー(X-ray free electron laser, XFEL)を用いた超高強度レーザー照射ナノワイヤーアレイに対する超高速時空間分解計測の結果をまとめた。XFELと同期した超高強度レーザーを使用したポンプ・プローブ計測を平板ターゲットと、ナノワイヤーアレイに対して実施した。特にナノワイヤーアレイと基板の温度変化をそれぞれ評価するために、ナノワイヤーアレイと基板が別素材で構成される異素材ナノワイヤーアレイを用いた。ターゲット材質のK吸収端近傍でのX線透過率計測を行い、温度変化に伴うX線の透過率変化の計測を行った。その結果、レーザーによる急速な加熱、ナノワイヤーアレイの崩壊に伴う電子温度上昇、そしてプラズマが流体的に広がることによる冷却という過程でナノワイヤーアレイにおける電子温度が変化することを見出し、その時間スケールはレーザーのパルス幅（50 fs）より非常に長い（10 ps以上）ことが明らかになった。一方で、ナノワイヤーアレイの形状変化に関する計測を別途実施し、ナノワイヤーアレイはレーザー照射から5 psまではその形状を大きく損なわないことを示し、上記の解釈をよく説明する結果であった。以上より、超高強度レーザー照射によるナノワイヤーアレイのエネルギー吸収・輸送過程の包括的な理解を得た。

第6章は本論文のまとめとして、研究内容を総括した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名　（ 田中　大裕 ）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者	主 査　教授　重森 啓介 副 査　教授　大石 佑治 副 査　准教授　山ノ井 航平	

論文審査の結果の要旨

本論文はレーザー照射ナノワイヤーアレイのエネルギー吸収・輸送過程を明らかにするため、本研究において必須となる高品質ナノワイヤーアレイの作成手法の開発、ピコ秒キロジュール級レーザーLFEX を用いたレーザー照射実験及び X 線自由電子レーザー施設 SACLA でのレーザー照射実験を中心として、理論・シミュレーションによる詳細な物理機構の検討を含めた研究をまとめたものである。

第 1 章では、ナノワイヤーアレイと呼ばれるナノ構造体が高エネルギー密度科学において有望なターゲット材料として注目されていることとその理論的背景と物理的考察を述べ、本研究の意義とその目的を示している。

第 2 章では、ナノワイヤーアレイとレーザーの相互作用を考えるうえで重要となる物理過程をまとめている。まず、高強度レーザー電場中での電子の運動の振る舞いに関して検討を行っている。次にプラズマ中でのレーザーエネルギー吸収メカニズムを議論し、固体ターゲット中における加熱プロセスについてまとめている。そして、ナノワイヤーアレイにおけるエネルギー吸収メカニズムについて、レーザー照射からの時間スケールによる詳細な検討の内容を述べている。

第 3 章では、ナノワイヤーアレイの開発手法についてまとめている。本研究では陽極酸化アルミニウム（Anodic Aluminum Oxide, AAO）をテンプレートとする手法を用いている。本手法により作成されるナノワイヤーアレイの空間パラメータは、AAO の合成条件と電気めっきの条件で決定される。そこで AAO の合成条件の探索を通して、直径 40～400 nm、充填率 13～40%のナノワイヤーアレイの作成条件を見出している。また、銅とニッケルの電気めっきの条件も併せて考慮し、実験目的に応じた空間パラメータを有するナノワイヤーアレイの作成手法を開発している。さらに、作成したナノワイヤーアレイの特性評価も実施している。エネルギー分散型 X 線分光計測(EDX)、制限視野電子線回折(SAED)観察によって、不純物の少ないほぼ単結晶のナノワイヤーが作成されていることを確認し、レーザー照射実験に使用するにあたり充分な品質であることを示している。

第 4 章ではピコ秒超高強度レーザーLFEX を用いた実験的研究についてまとめている。実験では超高温・超高密度状態の形成を示す He 様線がナノワイヤーアレイにおいて平板より多く観測され、ピコ秒レーザー照射条件下でもナノワイヤーアレイのエネルギー吸収増強が起きうることを示している。また、電子スペクトルに関しては、ターゲット前面において計測した電子の発生数はナノワイヤーアレイの方が大きいが、ターゲット裏面側で観測された電子に関してはナノワイヤーアレイと平板は同程度である。以上の実験結果を Particle in Cell シミュレーションの計算結果と比較している。その結果、ナノワイヤーアレイにおいてはワイヤー間の真空による電子の移動の阻害と、ワイヤーごとに発生する強磁場による電子のトラップが引き起こされていることが分かる。この空間構造に由来する効果により、ナノワイヤーアレイではエネルギーの散逸が防止され、ピコ秒レーザー照射時でも効率的な高エネルギー密度状態の生成につながることを明らかにしている。

第 5 章では X 線自由電子レーザー(X-ray free electron laser, XFEL)を用いた超高強度レーザー照射ナノワイヤー

アレイに対する超高速時空間分解計測の結果をまとめている。XFEL と同期した超高強度レーザーを使用したポンプ・プローブ計測を平板ターゲットと、ナノワイヤーアレイに対して実施している。特にナノワイヤーアレイと基板の温度変化をそれぞれ評価するために、ナノワイヤーアレイと基板が別素材で構成される異素材ナノワイヤーアレイを用いている。ターゲット材質の K 吸収端近傍での X 線透過率計測を行い、温度変化に伴う X 線の透過率変化の計測を行っている。その結果、レーザーによる急速な加熱、ナノワイヤーアレイの崩壊に伴う電子温度上昇、そしてプラズマが流体的に広がることによる冷却という過程でナノワイヤーアレイにおける電子温度が変化することを見出し、その時間スケールはレーザーのパルス幅（50 fs）より非常に長い（10 ps 以上）ことを明らかにしている。一方で、ナノワイヤーアレイの形状変化に関する計測を別途実施し、ナノワイヤーアレイはレーザー照射から 5 ps まではその形状を大きく損なわないことを示し、上記の解釈をよく説明する結果である。以上より、超高強度レーザー照射によるナノワイヤーアレイのエネルギー吸収・輸送過程の包括的な理解を得ている。

第 6 章は本論文のまとめとして、研究内容を総括している。

本論文は、超高強度レーザー照射下におけるナノワイヤーアレイのエネルギー吸収および輸送過程という高エネルギー密度科学分野の重要課題に対し、ナノワイヤーアレイの高品質作製手法の確立、ピコ秒キロジュール級レーザーLFEX および X 線自由電子レーザーSACLA を用いた先端的実験、ならびに理論・数値シミュレーションを有機的に統合することで、体系的かつ包括的な理解を与えたものである。材料開発から物理機構の解明に至る体系的な知見の獲得、ならびに超高速時空間分解計測による新規知見の創出は高エネルギー密度科学研究の発展に資するものである。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。