

非熱的プロセスによる極限状態における物質構造形成 Study of non-thermal material process dynamics using ultra-short pulse laser

黒田 隆之助¹、

Ryunosuke Kuroda¹、

(1. 産業技術総合研究所 先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ)

(1. Operando-OIL, AIST)

超短パルスレーザーによる材料プロセス技術は、連続波レーザーなどによる熱溶解加工と比較すると、熱伝導よりも短い時間で瞬間的に高エネルギー密度状態を材料中または材料表面に人工的に作り出すことで、特に熱応力や熱破壊などによって割れやすい難加工の「脆性材料」に対しても、熱影響が極めて少ない非熱的な微細加工が可能であるとともに、デジタル制御性が高いことなどから、我が国のものづくり現場で推進されているDX（デジタルトランスフォーメーション）化の実現を担う技術の一つとして期待されている[1]。更に、超短パルスレーザーによる非熱的な加工技術を用いると、条件によっては回折限界よりも小さなナノメートルスケールの構造形成が実現できることが知られている[2][3]。このような材料への回折限界を超えたナノ領域の非熱的な構造形成を制御するためには、超短パルスレーザーによる加工現象のメカニズムを解明することが1つのアプローチである。

我が国の産業上重要な役割を担っている半導体やガラス、セラミックスなどは、難加工の脆性材料であるとともに、地球上の惑星物質としても動的な構造形成が着目されている酸化物の集合体、「鉱物」であるという共通点がある。このような材料物質への超短パルスレーザー加工現象を理解するためには、フェムト秒からピコ秒の高エネルギー密度の非熱平衡状態から、惑星物質科学で主に議論されているナノ秒以降の熱平衡状態へ移行する時間領域において、物質材料中で何が起きているかを紐解くことが重要である。そのためには、材料プロセスだけでなく、プラズマ物理から惑星物質科学に渡る横断的な学術領域の共通課題として、その動的プロセスを理解することが今後期待される。

一方、超短パルスレーザーによる材料加工・プロセスでは、プロセスパラメータ（レーザー波長、パルス幅、スポット径、照射強度、繰返

し周波数、スキャン速度など）によって、非熱的なものから熱的なものまで、加工結果が大きく変わることが知られており、その膨大なパラメータ探索によるプロセス条件の最適化は容易ではなく、学理解明による学術的なアプローチがなされている[4], [5], [6]。このような加工現象は非線形、非平衡、開放系における複雑な光-材料相互作用過程を経ているため、予測や最適化が困難な分野でもあることも知られている。

ここで超短パルスレーザーによる加工現象の概念図を図1に示した。材料や加工パラメータによって詳細な過程は異なるが、その時間変化を追っていく。まず、レーザー照射後のフェムト秒からピコ秒の時間領域において、光励起等の非熱的過程により急激に温度上昇した電子系から、格子系へと徐々にエネルギーが移行する。その後、格子温度が上昇し、材料の融点や沸点を迎え、プラズマ化やアブレーションが起こる。更に、熱平衡状態を経て最終的な構造形成に至ると考えられる。特に電子系から格子系へエネルギーが移行しながらアブレーションが開始される数ピコ秒前後の時間領域は、初期膨張による希薄波からアブレーションによる圧力波、衝撃波が発生する領域で、固相から液相、そしてプラズマへと高速に遷移する領域であるとともに、両者が混在する高エネルギー密度状態であるWarm Dense Matter (WDM) 状態とも推測される[7]。このような高エネルギー密度状態を経て、最終的な構造形成に至る加工メカニズムを理解するためには、特に非熱平衡状態のエネルギー散逸過程による過渡的な温度や圧力の変化が重要となる。図1のような温度変化を理解するためには、電子系と格子系の二温度モデル計算などを行うアプローチが考えられるが、それだけでは粒子放出に至る加工メカニズムや沸点を超えるような温度変化を正確には理解できない。そのため、このようなフェムト秒からピコ秒の高エネルギー密度の

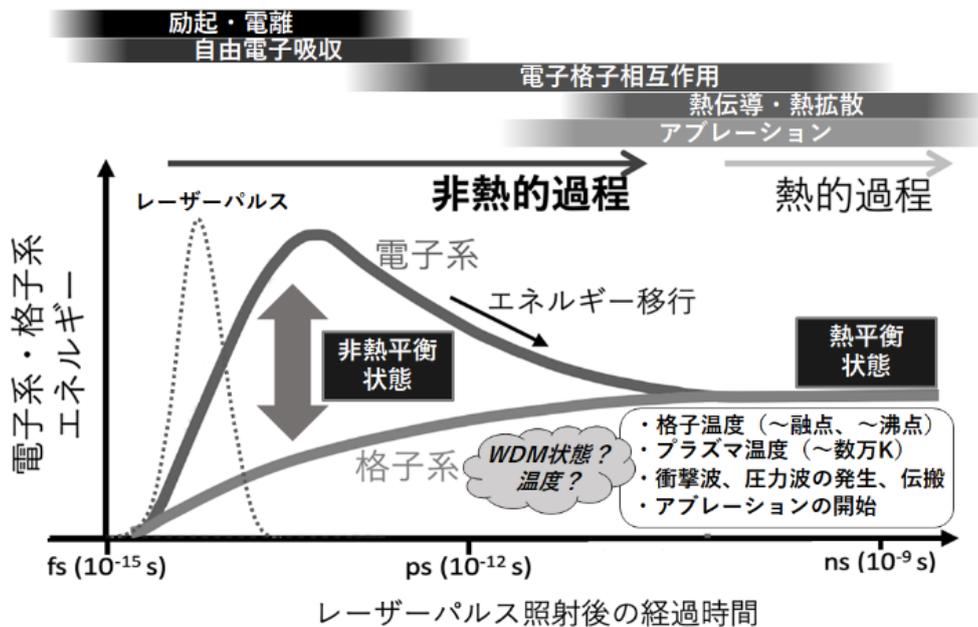


図1 超短パルスレーザー加工における非熱的・熱的エネルギー散逸過程の概念図

非熱平衡状態から、ナノ秒以降の熱平衡状態へ移行する時間領域における動的挙動を理解するためのアプローチの1つとして、フラグメントイオン計測や、ポンプ・プローブ計測、更には第一原理計算等のシミュレーション技術が有用である[8-10]。また、フェムト秒レーザー加工では、その高いピーク強度から瞬間的なアブレーション圧力はGPa、更にはTPa（テラパスカル）を超えることも可能であり、それによる衝撃波や圧力波の伝搬観察においては、ナノ秒のパワーレーザー研究で多くの実績のあるシャドウグラフも、ポンプ・プローブ計測法の1つとして有効な手段である。

このよう非熱的レーザー加工技術の適用が期待されている産業上及び惑星科学上重要な脆性材料としては、ガラス材料の二酸化ケイ素をはじめとして、アルミナやサファイヤなどの酸化アルミニウム、更には酸化マグネシウムや酸化亜鉛等の酸化物が重要材料と考えており、加工現象解明から最適化に向けたプロセスデータの取得を進めているところである。

これら材料の構造形成に至るまでのメカニズムは、フェムト秒からピコ秒の非平衡状態だけでなく、ナノ秒以降の平衡状態に至るまでのエネルギー散逸過程を理解する必要があり、材料プロセスだけでなく、プラズマ物理から惑星物質などの高エネルギー密度科学の横断的な学術領域の共通課題として、今後さらなる理解が進むことが期待される。

謝辞

本研究は、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」、及びNEDO先導研究プログラム／新産業創出新技術先導研究プログラム「ICTデータ活用型アクティブ制御レーザー加工技術開発」の成果の一部であり、プロジェクトメンバーに多大な感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Shibuya et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, S11A02 (2019)
- [2] J. Bonse et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 23, 9000615 (2017)
- [3] B. Zhang et al., J. Mater. 5, 1 (2019)
- [4] ノーマン・ホジソン 他, Industrial Laser Solution Japan, April, p6-p13 (2019)
- [5] 藤田雅之, レーザー加工技術と物理, 36, 459 (2007)
- [6] B. Rethfeld et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 50, 193001 (2017)
- [7] 尾崎典雅, 高圧力の科学と技術, 27, 129 (2017)
- [8] Y. Miyamoto, AIP Advances 9, 025217 (2019)
- [9] D. Satoh et al., Appl. Phys. A 126, 795 (2020)
- [10] E. Terasawa et al., J. Laser Micro Nanoeng. 16, 194 (2021)