

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトニクス: 3.6 レーザープロセッシング

2025年3月17日(月) 9:00 ~ 12:00 皿 K506 (講義棟)

[17a-K506-1~11] 3.6 レーザープロセッシング

長谷川 智士(宇都宮大)、西山 宏昭(山形大)

9:00 ~ 9:15

[17a-K506-1]

超短パルスレーザーに励起されたアルミニウムの量子状態ダイナミクスのWigner分布関数を用いた解析

○(B)小久保 光徳¹、加藤 洋生²、石川 顕一² (1.東大工、2.東大院工)

9:15 ~ 9:30

[17a-K506-2]

高繰り返し光源による銅のレーザー加工におけるインキュベーション効果の探索

○高林 圭佑^{1,2}、遠藤 翼²、乙津 聡夫²、谷 峻太郎²、山口 誠¹、小林 洋平² (1.秋田大理工、2.東大物性研)

9:30 ~ 9:45

[17a-K506-3]

直線偏光2色レーザーによる絶縁体のイオン化確率の理論的研究2

○谷 水城^{1,2}、石川 顕一²、乙部 智仁^{1,2} (1.QST関西研、2.東大院工)

9:45 ~ 10:00

[17a-K506-4]

超短パルスレーザー強度変調加工におけるシリカガラス内部欠陥形成のアブレーション効率への影響

○吉富 大¹、小川 博嗣¹、高田 英行¹、小林 洋平²、奈良崎 愛子¹ (1.産総研、2.東大物性研)

10:00 ~ 10:15

[17a-K506-5]

TTM+MD 計算に基づく AI スラブ超高速融解過程の臨界的振る舞いの解析

○加藤 洋生¹、石川 顕一¹ (1.東大院工)

10:30 ~ 10:45

[17a-K506-6]

深層学習を用いたレーザー溶接過程のシミュレータ開発

○原 伸夫¹、荒木 関 渉¹、中橋 昭久¹、隈川 顕¹、中井 出¹、北村 嘉朗¹、和田 紀彦¹、乙津 聡夫²、遠藤 翼²、田丸 博晴³、小林 洋平² (1.パナソニックホールディングス、2.東大物性研、3.東大理)

10:45 ~ 11:00

[17a-K506-7]

光干渉計を用いたホログラフィックレーザー加工のインライン計測と成形ビームのフィードバック制御

梅津 廉¹、早崎 芳夫¹、○長谷川 智士¹ (1.宇都宮大オプティクス)

11:00 ~ 11:15

[17a-K506-8]

深層学習超解像を用いたWavelet-based BOS法による超音速流れの空間解像度の向上

○(B)前田 和輝¹、須田 敦¹、廣 和樹¹、中村 篤人¹、福岡 寛¹ (1.奈良高専)

11:15 ~ 11:30

[17a-K506-9]

ガラス表面におけるフェムト秒レーザー生成超音波の干渉計測

○(B)渡辺 峻斗¹、山内 楓¹、小松 宗太郎¹、早崎 芳夫¹ (1.宇都宮大オプティクス)

11:30 ~ 11:45

[17a-K506-10]

深層学習による超短パルスレーザー照射による格子構造変化の定量化

○谷 峻太郎¹ (1.理研光量子)

11:45 ~ 12:00

[17a-K506-11]

開放型楕円容器の形状と集束される衝撃波の圧力との関係に関する数値解析

○(B)谷口 真爽¹、須田 敦¹、廣 和樹¹、福岡 寛¹、中川 桂一² (1.奈良高専、2.東京大)

超短パルスレーザーに励起された アルミニウムの量子状態ダイナミクスの Wigner 分布関数を用いた解析

Analysis of quantum state dynamics in aluminum
excited by ultrashort laser pulses using the Wigner distribution function

東大工¹ ○小久保光悞 東大院工² 加藤洋生、石川顕一

the University of Tokyo, Faculty of Engineering¹, the University of Tokyo, School of Engineering²

○Koshi Kokubo¹, Hiroki Katow², and Kenichi L. Ishikawa²

E-mail: cocksan7@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

材料の表面加工技術の一つとして、超短パルスレーザーを照射し表面を分解・蒸散させる、高精度かつ高エネルギー効率の微細加工技術が注目を集めている。それに伴い、レーザー加工プロセスのシミュレータ開発の需要が高まっている。一方で、パルス幅が極端に狭く超高強度なレーザー光の照射が誘起する加工現象は、時間的・空間的に広大なマルチスケールで展開される。

このような現象を異なるスケールでシミュレーションする手法として、我々の研究グループでは量子論的、および半古典的な理論を利用した研究を行ってきた[1]。量子論的手法は時間依存密度汎関数理論(TDDFT)に基づいており、電子の詳細なバンド構造やバンド間遷移などの量子性を含んだ現象を扱うことができるが、計算コストが高く取り扱える物理系のサイズが小さい。半古典的手法は Vlasov 方程式に基づき位相空間上の分布関数の時間発展を計算する。TDDFT より計算コストが低く、より大規模な系でのエネルギー輸送現象を扱える一方、量子性を上手く表現できない。TDDFT から Vlasov 方程式に Wigner 分布関数をスケールを跨いで受け渡すことができれば、大規模な系での計算に量子性を反映し精度を向上できる可能性がある。

そこで、本研究では、レーザーパルスにより駆動される Al 電子系の TDDFT による時間発展計算をオープンソースソフトウェアである SALMON[2]により実行し、軌道関数の Wigner-Moyal 変換により得られる位相空間上の Wigner 分布関数の振る舞いを調べた。高強度パルス照射下でも、量子性の指標となる分布関数の負値が残ることを明らかにした。これは電子系の熱緩和を仮定し有限電子温度で計算した分布関数の振る舞いとは異なる。また、レーザーパルスの強度と励起波長に応じて、Wigner 分布関数が振動する様子や負値を取る領域に違いが見られることが分かった。

参考文献

[1]M. Tani et al. Phys. Rev. B **104**, 075157 (2021)

[2]M. Noda et al. Comp. Phys. Comm. **235**, 356 (2019)

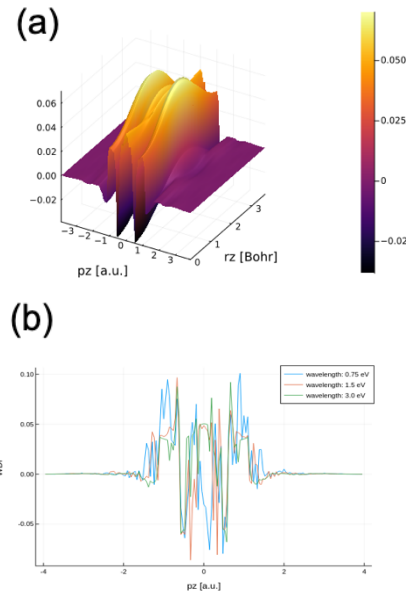


図1: (a)アルミニウムの基底状態における(pz, rz)平面上でのWDFのプロット(b)励起波長を変化させた際のアルミニウムのWDFのrz一定の断面での変化

高繰り返し光源による銅のレーザー加工における インキュベーション効果の探索

The observation of incubation effect on copper with high repetition rate laser processing

秋田大学¹, 東京大学² ◯高林 圭佑^{1,2}, 遠藤 翼², 乙津 聡夫², 谷 峻太郎²,
山口 誠¹, 小林 洋平²

Akita Univ.¹, ISSP Univ. of Tokyo², ◯Keisuke Takabayashi^{1,2}, Tsubasa Endo², Toshio Otsu²,
Shuntaro Tani², Makoto Yamaguchi¹, and Yohei Kobayashi²

E-mail: d8522010@s.akita-u.ac.jp

近年、超短パルスレーザーを用いた加工技術が急速に普及し、さらなる高品質・高効率加工へ向けた基礎的な物理現象の解明が試みられている。産業界での加工のほとんどは多パルス照射であり、パルスの累積によって破壊閾値が低下するインキュベーションが生じる。金属におけるインキュベーションの起源は、未だ議論の最中であり、表面粗さや欠陥による吸収の増大やレーザー誘起の塑性変形の蓄積などが提案されている[1]が各寄与の定量的な議論はできていない。レーザー加工では、破壊閾値がばらつくことが知られているが、ここで我々は破壊にかかるパルス数およびそのばらつきの分布がインキュベーションの物理的起源を反映しているのではないかと考え、高繰り返し加工用光源を構築、使用してパルス数依存する破壊閾値の大量データを取得する実験を行った[2]。本講演では、データの解析を進めたので報告する。

BK-7 上に製膜した多結晶銅(20 mm×20 mm×10 μm)をターゲットに、繰り返し 10 MHz、スポット半径 1.9 μm、パルス幅 25 fs、27 通りのフルエンス 0.05-0.6 J/cm²、パルス数 2×10⁷ までの条件で照射した。光源は、破壊にかかるパルス数を計測するための破壊のその場観察系を備えており、1 点の照射中に銅表面からの反射光強度の時間変化を測定する。未加工の銅は高い反射率を示すが、破壊が起きると表面が荒れ検出可能な反射光強度が減ることを利用し、反射光強度が減少するまでの時間を検出、光源の繰り返し周波数を考慮することで破壊にかかるパルス数を得た。様々なフルエンスにて得られた破壊閾値のパルス数依存性を Fig. 1 に示す。例えば、0.41 J/cm² で照射したときの破壊にかかるパルス数を集計し、確率密度としたものが挿入図である。パルス数 20 程度をピークにもつ、単峰型の左右非対称な形状となることが分かった。Fig. 1 では、各フルエンスにて得られた、破壊にかかるパルス数の相対確率密度をカラープロットで表している。フルエンス 0.6 J/cm² ではパルス数 5 程度で破壊が起き、パルス数 10² まで破壊閾値は減少する。これは 10² パルスまで蓄積効果があることを示している。パルス数 10² を越え、0.35 J/cm² 付近で傾きが緩やかになり、インキュベーションが停滞する。その後パルス数 10⁵ 程度から再びインキュベーションが顕著となり、0.05 J/cm² ではほぼ破壊が起きない。銅におけるインキュベーションが 0.35 J/cm²、0.05 J/cm² で閾值的に振る舞うことがわかった。

当日は分布形状と合わせた詳細な議論を行う。

[1] C. S. R. Nathala *et al.*, *Appl. Phys. A*, **122**, 107 (2016).

[2] 高林圭佑 他、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 19p-B2-7 (2024).

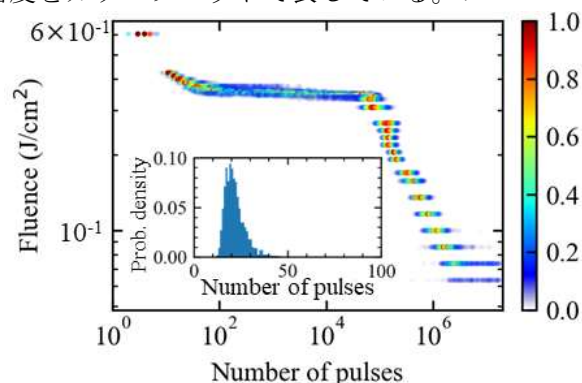


Fig.1 Incubation effect on copper. inset: a probability density of the accumulated pulse number for ablation at a fluence of 0.41 J/cm².

直線偏光 2 色レーザーによる絶縁体のイオン化確率の理論的研究 2

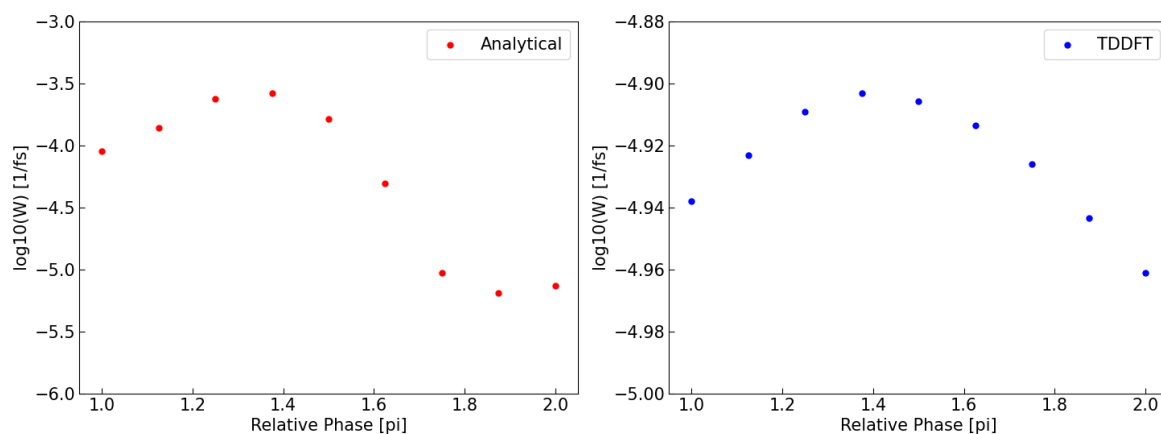
Analytical formula on ionization rate in dielectrics under linearly polarized laser field 2

¹QST 関西研, ²東大院工 ○谷 水城^{1,2}, 石川 顕一², 乙部 智仁^{1,2}¹KPSI ²The Univ. of Tokyo., °Mizuki Tani^{1,2}, Kenichi L. Ishikawa², and Tomohito Otobe^{1,2}

E-mail: tani.mizuki@qst.go.jp

超短パルスレーザーを固体材料に照射した時、短時間のうちに光吸収による電子励起が生じ、やがてアブレーション等の非可逆的变化をもたらす。レーザーを 2 色にすると非金属材料の光吸収効率が上昇することについて、理論・実験の両面から調べられてきた[1-5]。我々も、2 色高強度レーザー場中の誘電体の電子励起確率の解析解について研究してきた[6]。今回はこれを拡張し、トンネル電離で重要な 2 色のレーザー場の相対位相を自由なパラメータとして扱えるようにして、 α -SiO₂ を模した等方的 2 バンドモデル(バンドギャップ 9 eV)に適用して実時間第一原理計算(時間依存密度汎函数理論, TDDFT)との比較を通じてその有効性を検証する。

図 1 に、光子エネルギー 1.55 eV (波長 800 nm) と 3.1 eV (波長 400 nm)、を等量(5 TW/cm²)ずつ混ぜて照射した場合の電子励起確率の相対位相依存性を示す。赤ドットで表現した我々の解析解による計算値と、青ドットで表現した TDDFT による計算値が共に相対位相 1.4 π 付近で極大をとっており、傾向がよく一致している。特に、前者で大胆な近似を行ったにも関わらず、それぞれの絶対値が対数スケールで良い一致を見せている。講演では、これらの詳細について報告する。

図 1 2 色レーザー場中の α -SiO₂ の電子励起確率の相対位相依存性

参考文献

- [1] X. Yu, Z. Chang, P. B. Corkum, and S. Lei, *Opt. Lett.* **39**, 19 (2014).
- [2] T. Otobe, Y. Shinohara, S. A. Sato, and K. Yabana, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 024706 (2019).
- [3] P. Martínez, E. Smetanina, I. Thiele, B. Chimier, and G. Duchateau, *Phys. Rev. A* **103**, 033107 (2021).
- [4] M. Tani, K. Sasaki, Y. Shinohara, and K. L. Ishikawa, *Phys. Rev. B* **106**, 195141 (2022)
- [5] P. Venkat and T. Otobe, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 044401 (2022)
- [6] M. Tani and K. L. Ishikawa, 83rd JSAP Autumn Meeting 21a-A306-3 (2022)

超短パルスレーザー強度変調加工における シリカガラス内部欠陥形成のアブレーション効率への影響

Effect of Internal Defect Formation in Silica Glass on Ablation Efficiency in Ultrashort-Pulsed Intensity-Modulated Laser Processing

産総研¹, 東大物性研² ◦吉富 大¹, 小川 博嗣¹, 高田 英行¹, 小林 洋平², 奈良崎 愛子¹

AIST¹, ISSP Univ. Tokyo² ◦Dai Yoshitomi¹, Hiroshi Ogawa¹, Hideyuki Takada¹,

Yohei Kobayashi², Aiko Narazaki¹

E-mail: d.yoshitomi@aist.go.jp

超短パルスレーザー加工は熱影響領域を抑制できることから高品位な微細加工に有用である。マルチショット照射では、先行パルスによる加工結果が後続パルスの加工に影響を及ぼすため、経時変化する加工状況に応じてパルス強度などのパラメータを動的に変調することにより加工効率や品位を最適化できる可能性がある。パルス強度の変調により加工効率やクラックなどを最適化した例が報告されている[1-3]。我々は、パラメータの動的変調にリアルタイムモニタリングとAI最適化を統合したデータ駆動型システムの開発を進めている。これまで、パルス強度の変調効果についての基礎的知見を得るために、透明材料（シリカ、サファイア）のパーカッション穴加工について効果を検証してきた。今回は、シリカガラスについてこの原因を調査した結果を報告する。

ショット数を変えて比較した結果から、減少ランプでは初めに強いパルスが照射されることによって破壊閾値の低下が起き、全体の加工量に差異が生じることが分かった。低繰り返しでも起きていることから、破壊閾値の低下をもたらす効果は先行パルスによる過渡的效果ではなく、永続的效果であることが示唆される。永続的效果として内部欠陥の形成が考えられるため、加工痕底部の顕微 PL 測定を行った。シリカの点欠陥の一種である非架橋酸素ホール中心 (NBOHC)からの発光が観測された。両方向のランプにおいて照射累積パルスエネルギーが等しい条件での発光量を比較したところ、減少ランプの方が顕著であった (Fig. 1)。内部欠陥形成による吸収の増加が破壊閾値の低下の大きな一因となっていることが確認できた。得られた強度変調と欠陥形成・加工効率の関係性の知見は、加工効率と品位のバランスを考慮した強度変調シーケンス最適化の指針となる。

謝辞：本研究成果の一部は、NEDO の委託事業と天田財団の助成による。

[1] K. Shimahara et al. *Comm. Eng.* **2**, 1 (2023).

[2] J. Hattori et al. *CIRP Annals.* **72**, 185 (2023).

[3] P. Balage et al. *Micromachines* **14**, 1158 (2023).

[4] 吉富 大 他 応用物理学会 2022 年

春季学術講演会 24p-E106-14.

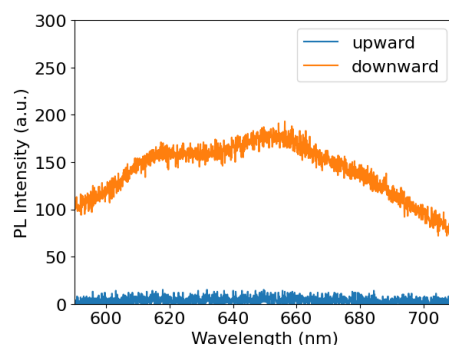


Fig. 1 PL spectra of the samples irradiated with upward and downward ramping pulses.

TTM+MD 計算に基づく Al スラブ超高速融解過程の臨界的振る舞いの解析

A critical behavior of the ultrafast melting process of Al slab based on TTM+MD simulation

東大院工 ◯加藤洋生, 石川顕一

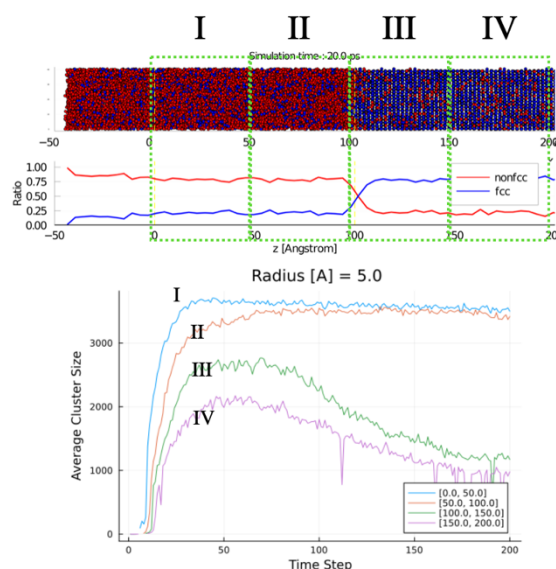
School of Engineering, the University of Tokyo, ◯Hiroki Katow, Kenichi L. Ishikawa

E-mail: hkatow@atto.t.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒スケールの超短パルスレーザーを用いたレーザー加工は、高精度かつ高効率な材料表面加工技術として期待される。レーザー加工現象を記述可能な理論の開発は、加工プロセスの効率化への応用が見込まれる。加工現象は時間・空間的にマルチスケールで展開される複雑な現象であることに加え、物理系が極端な非平衡状態にあることに特徴がある。我々のグループはこれまで巨視的スケールでの非平衡温度ダイナミクスの特徴などを明らかにしてきたが[1]、非平衡性がミクロな相転移プロセスへ与える影響はこれまで多くは議論されてこなかった。非平衡系に特有のフェムト秒スケールで進行する相転移としては、Z. Lin と L. V. Zhigilei らが Au 薄膜の空間的に不均一な融解過程の存在を分子動力学 (MD) シミュレーションから報告している[2]。最近の超高速電子線回折による観測は不均一融解過程の存在を支持している[3]。Al 薄膜でも同様の過程が報告されている[4]が、相転移ダイナミクスの構造的特徴づけは十分に行われてこなかった。本研究では、フェムト秒パルスレーザー照射によるアルミニウム薄膜表面の超高速融解過程の原子スケールでのシミュレーションを行った。

電子系を熱拡散方程式で、イオンは古典分子動力学計算で記述する TTM+MD 法を用いた[5]。これをデータ科学的アプローチで解析することで、我々は結晶構造の乱れが作るクラスターが成長し液相へ相転移する際に臨界的振る舞いを示すことを明らかにした (図)。

参考文献 [1] H. Katow and K. L. Ishikawa, *Applied Physics A*, volume **129**, 165(2023)., [2]Z. Lin and L. V. Zhigilei *Phys. Rev. B* **73**, 184113 (2006), [3] M. Z. Mo et al., *Science* **360**, 1451–1455 (2018), [4] Meng et al. *App. Phys. A* (2022) 128:520, [5] D. S. Ivanov and L. V. Zhigilei *Phys. Rev. B* **68**, 064114 (2003).



図：TTM+MD 計算による Al 薄膜表面の超高速融解過程のシミュレーション (上段) と、固液界面近傍の 4 領域(I-IV)での非 FCC 構造のクラスターサイズの時間発展の様子 (下段)。

深層学習を用いたレーザー溶接過程のシミュレータ開発

A deep learning-based simulator for laser welding

パナソニックホールディングス¹, 東大物性研², 東大理³ ◦原 伸夫¹, 荒木関 渉¹,

中橋 昭久¹, 隈川 顕¹, 中井 出¹, 北村 嘉朗¹, 和田 紀彦¹,

乙津 聡夫², 遠藤 翼², 田丸 博晴³, 小林 洋平²

Panasonic Holdings Corporation¹, ISSP Univ. Tokyo², IPST Univ. Tokyo³ ◦Nobuo Hara¹,

Wataru Arakizeki¹, Akihisa Nakahashi¹, Akira Kumagawa¹, Izuru Nakai¹, Yoshiro Kitamura¹,

Toshihiko Wada¹, Toshio Otsu², Tsubasa Endo², Hiroharu Tamaru³, and Yohei Kobayashi²,

E-mail: hara.nobuo@jp.panasonic.com

電気自動車における車載二次電池や電子部品などを代表に高生産性を実現できるレーザー溶接が注目されている。しかし、レーザー溶接の大きな非線形性を反映して、加工条件によって加工結果が複雑かつ大きく変化するため、目的に応じた加工条件最適化には多くの時間を要する。また求められる溶接品質が厳しくなる傾向にあり、被加工物や環境の変動によって生じる製造バラツキの影響も無視できなくなりつつあり、最適化に要する時間が更に伸びている。

我々はこれまで加工と測定を全自動で行う実験装置 (マイスターデータジェネレーター(MDG)) の開発に取り組んできた[1]。さらに本システムを土台として、加工現象を模擬する独自開発深層学習ネットワーク (マイスターデータラーナー(MeDaL)) によって、製造バラツキも評価可能なシミュレータ開発に取り組んでいる。Fig.1 にレーザー溶接データ取得のセットアップを示す。溶接時には反射光などのインプロセスでの加工挙動を評価し、溶接後には外観や溶接強度といった加工結果を評価する。Fig.2 に開発した深層学習ネットワークの概念図を示す。レーザー強度・形状・速度といった加工条件に対して、複数の実験を行った際の加工挙動および加工結果が表現できるよう、変動を集約したシードおよびネットワーク内の重みを学習する。本講演では開発したシミュレータについて、実験系や学習アルゴリズム、検証結果の詳細を報告する。レーザー溶接に対して被加工物や環境の変動によって生じる製造バラツキを模擬するシミュレータ開発を示したこの成果は、レーザー溶接条件の自動探索に留まらず、他加工プロセスへの展開も期待できる。

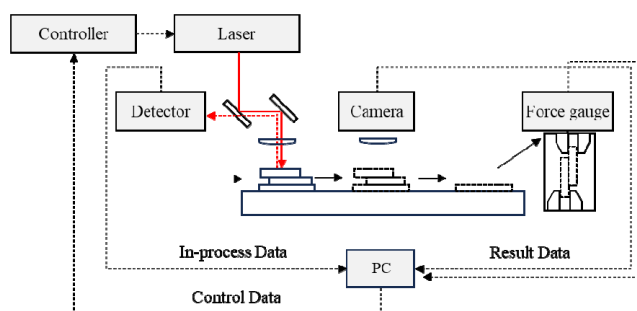


Fig.1 Experimental setup

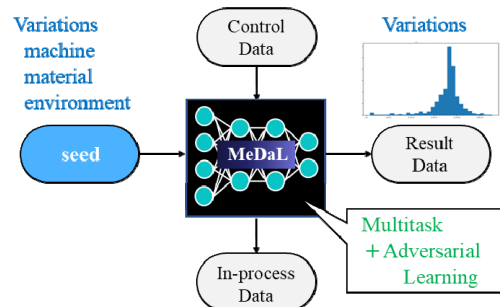


Fig.2. Diagram of Meister Data Learner (MeDaL)

[1] Y. Kobayashi et al., “Fully Automated Data Acquisition for Laser Production Cyber-Physical System”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 27, 1(2021).

光干渉計を用いたホログラフィックレーザー加工のインライン計測と 成形ビームのフィードバック制御

In-line measurement of holographic laser processing using optical interferometry and feedback control of shaped beam

宇都宮大オプティクス 梅津 廉, 早崎 芳夫, 長谷川 智士

Center for Optical Research and Education (CORE), Utsunomiya Univ.

E-mail: hasegawa_s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

超短パルスレーザーによる材料アブレーションは、種々の材料の精密微細加工を可能にし、電子部品や機械部品、医療機器を含む様々な用途に利用されている。そのため、超短パルスレーザーアブレーションは、将来のモノづくりのマスクスタマイゼーションにおいて、重要な役割を果たすと期待されている。波長、パルス幅、パルスエネルギー、パルス繰り返し周波数、パルス照射数を含む様々なレーザー照射条件が加工に影響を与えることが知られている。本研究では、レーザー照射条件の効率的な探索を目的として、超短パルスレーザーを用いたホログラフィックレーザー加工で得られた構造の光干渉計によるインライン計測を行い、その計測結果をもとに成形ビームの最適化を行うことで、所望の加工形状を得ることに成功した。

フェムト秒レーザー（中心波長 1028nm, 繰り返し周波数 10kHz, パルス幅 150fs）は、対物レンズ（シグマ, 20x, NA=0.40, f=10mm）を用いて試料（スライドガラス）表面に集光照射された。試料を自動ステージで走査（100 μ m/s）してレーザーパルスを照射することで、溝構造が作製された。加工の終了後に、レーザー加工機に取り付けられた光干渉計（KEYENCE, WI-5000）の測定範囲まで試料を自動ステージで移動させ、加工された構造の3次元形状が自動で計測された。

照射されたビームパターンは、強度が均一な72本の多点ビームから構成された。所望のV溝構造を得るために、照射ビームパターンを構成する各ビームスポットの強度が調整された。Fig. 1は、多点ビーム強度を調整する重み係数 α を0.10, 0.15, 0.20とした場合、最終的に得られたV溝形状の高さ画像の溝形状のプロファイルを示す。結果より、所望のV溝形状を有する加工に成功した。発表では、重み係数 α を変化させた際のV溝形状の評価について考察する。

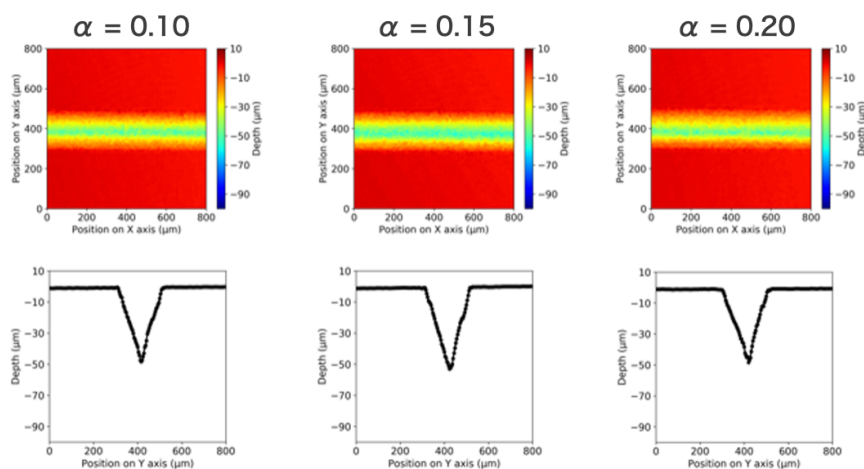


Fig. 1 Structure fabricated by holographic laser processing with $\alpha = 0.10, 0.15, 0.20$.

深層学習超解像を用いた Wavelet-based BOS 法による超音速流れの空間解像度の向上

Improvement of Spatial Resolution in Supersonic Flow Using Wavelet-based BOS Method with Deep Learning Super-Resolution

奈良高専¹ ○(B)前田 和輝¹, 須田 敦¹, 廣 和樹¹, 中村 篤人¹, 福岡 寛¹

NIT, Nara College¹

○Kazuki Maeda¹, Atsushi Suda¹, Kazuki Hiro¹, Shigeto Nakamura¹, Hiroshi Fukuoka¹

E-mail: fukuoka@mech.nara-k.ac.jp

近年、レーザー技術の進展に伴い、レーザーアブレーションをはじめとする、レーザーと物質の相互作用によって発生する急激な密度変化や衝撃波を伴う現象の研究が活発化している。これらの現象を詳細に捉えるために、背景の歪みから流れ場の密度変化を定量的に計測できる Background Oriented Schlieren (BOS) 法が注目されている。Wavelet-based BOS (W-BOS) 法は、正弦波状の背景画像に連続ウェーブレット変換を用い、その位相差から定量的な密度勾配分布を算出する手法である¹⁾。超音速流れの可視化に必要なハイスピードカメラを用いた高速撮影において、フレームレートと撮影画像の解像度はトレードオフの関係にある。そこで本研究では、W-BOS 法に深層学習に基づく超解像技術を適用することで、超音速流れにおける空間解像度の向上を目的とする。本報告では、超解像モデルに学習させるデータセットの種類が高解像度画像を復元する精度に与える影響を明らかにする。

本実験では、簡易的に超音速流れを可視化するために、開放型小容積衝撃波管を用いる。流れ場の密度勾配の可視化には、W-BOS 法を用いる。本報告では、連続ウェーブレット変換前の画像に超解像を適用する。W-BOS 法における実験画像は、正弦波状の周期的なデータで構成されているため、超解像との親和性が高いと考えられる。図 1 に、超解像による復元の評価手順を示す。超解像による復元の精度を定量的に評価するため、高解像度画像は、Bicubic 法を用いて縮小され、超解像により元の大きさに復元される。超解像には、単一画像超解像手法である Enhanced Deep Super-Resolution Network (EDSR) を使用した。復元倍率は 8 とした。学習用データセットは、2K 解像度の一般画像群である DIV2K データセットおよび実験により作成したデータセットの 2 種類である。

図 2 に、2 種類のデータセットを学習させた超解像モデルを用いて復元した画像の衝撃波管中心軸 ($y/D = 0$) の輝度分布の比較を示す。図 2 の (a), (b) および (c) は、それぞれ比較用の元画像、DIV2K データセットおよび実験画像を学習させた結果得られた分布である。実験画像を学習させた場合の輝度分布は、DIV2K を学習させた場合よりも元画像の分布に近いことが確認できる。このことから、超解像モデルに実験により作成したデータセットを学習させることで、元画像の正弦波状の分布を正確に復元できることが示唆される。

図 3 に、超解像モデルを用いて復元した画像に連続ウェーブレット変換を行い、密度勾配を算出した結果を示す。DIV2K データセットを学習させた場合の密度勾配画像は、元画像と比べて全体的に粗く、衝撃波の形状があまり一致していないことを示している。実験画像を学習させた場合では、一様流での密度勾配の変動が少なく、比較的、円弧状の衝撃波をよく捉えられている。以上のことから、W-BOS 法に超解像技術を用いるうえで、正弦波状の実験画像を学習させた超解像モデルを用いて復元することが望ましいと考えられる。

1) 赤塚純一 et. al, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 784 (2011), pp.2391-2400.

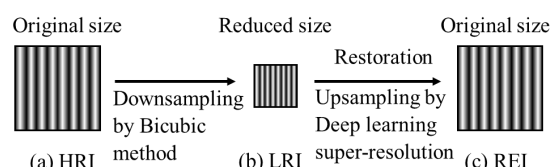


Fig.1 Evaluation procedure for restoration. (HRI: high-resolution image, LRI: low-resolution image, REI: restored image)

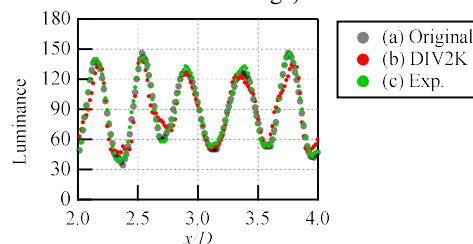


Fig.2 Comparison of luminance distribution.

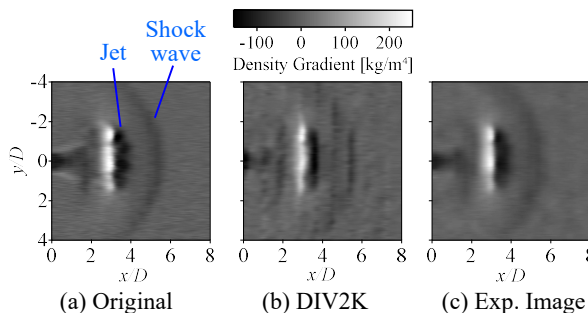


Fig.3 Comparison of density gradient images.

ガラス表面におけるフェムト秒レーザー生成超音波の干渉計測

Interferometric measurement of ultrasound

generated by femtosecond laser pulses on a glass surface

宇都宮大オプティクス [○]渡辺竣斗, 山内楓, 小松宗太郎, 早崎芳夫*

Utsunomiya Univ. CORE, [○]Shunto Watanabe, Kaede Yamauchi, Sotaro Komatsu, Yoshio Hayasaki

*E-mail: hayasaki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

フェムト秒レーザーを物質に集光照射すると、多光子励起によるキャリア生成とその後の拡散・再結合、電子から格子へのエネルギー移動とその拡散が起こる。これらの一連の物理プロセスの中で、物質にレーザー照射点から外側への力が加わり、励起領域の周辺に圧縮応力層が形成される。その後、圧力波として放出され、遠方で広帯域のレーザー生成超音波として観測される。

我々の研究室では、レーザー生成超音波が、対象物の状態や構造による変化を期待できるため、マイクロフォン(10Hz~200kHz)を用いた計測により、アブレーション量と音圧の間のモノトニックな関係を明らかにした[1]。また、穴加工の実験から、穴深さの増加に対する音圧の低下を観測した。物体中の音速と物体の構造サイズの簡単な計算から予想はされていたが、穴深さの違いによる音の周波数スペクトルに変化はなかった。そこで、MHz オーダーの周波数を計測可能とするレーザー生成超音波計測用光干渉計測の実現する。

フェムト秒レーザーの集光照射によって生じた超音波は、空气中、サンプルの表面と内部を伝わる。超音波の到達したサンプル表面に微小な変位を与える。干渉計の物体光路の反射鏡をそのサンプル表面とすることで、微小変位を観測する。本研究では、サンプル表面と参照鏡に対して対物レンズを配置したリニック干渉計を採用した。

図1は、実験システムを示す。レーザー加工用の光パルスは、中心波長 1025nm, パルス幅 129fs のフェムト秒レーザーから、焦点距離 10mm, 開口数 0.40 の対物レンズを用いてサンプルに集光照射された。また、レーザーパルスの一部を切り出して光検出器に入射し、超音波計測のトリガとして使用した。超音波計測用レーザーには半導体レーザー(波長 639nm)を光源とし、焦点距離 4mm, 開口数 0.55 の対物レンズを用いて、サンプルと参照鏡に集光照射された。干渉光は、ピンホールを介して光検出器に入射し、電気信号は、オシロスコープを介してコンピュータで取得する。

図2は干渉信号の時間変化を示す。サンプルはガラスとした。フェムト秒レーザーは超音波計測器側のガラス表面に1パルス集光照射した。パルスエネルギーは 30 μJ であった。超音波計測用のレーザーはフェムト秒レーザーと同軸になるように調整した。ノイズを減らすために移動平均フィルタをかけた。青い線がトリガ信号である。赤い線が干渉光の光強度変化である。トリガ信号から 23ns 後に干渉光の変化が確認された。

- [1] Y. Hayasaki and T. Miura, "Femtosecond laser drilling controlled with laser-generated ultrasound pressure," *Applied Physics B* **130**, 220 (2024).

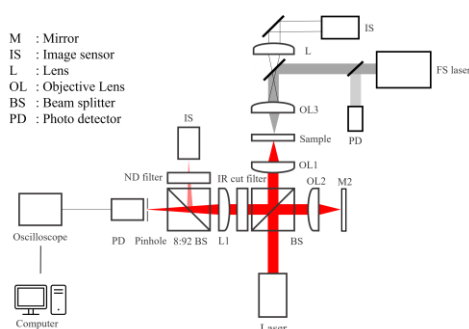


図1 実験光学系。

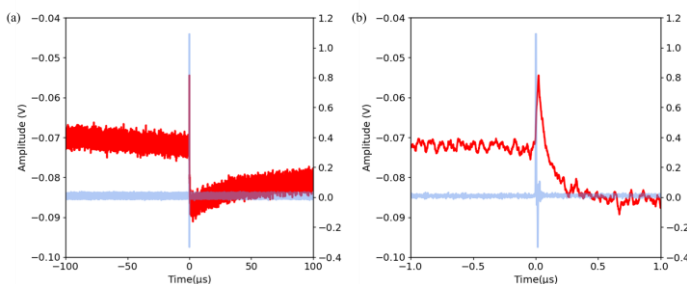


図2 (a) 1パルスに干渉信号の変化と(b)その拡大図。

深層学習による超短パルスレーザー照射による格子構造変化の定量化**Deep learning-based quantification of structural changes induced by ultrashort pulses irradiation**理研光量子¹ ○谷 峻太郎¹RAP, RIKEN¹

E-mail: shuntaro.tani@riken.jp

超短パルスレーザーの高機能化が進み、バースト加工やパルスエネルギー変調加工など様々な時間領域の自由度へのアクセスが可能になってきた。これらの自由度を活用することで、加工の更なる高効率化・高品質化・多機能化が実現されてきている[1, 2]。一方、マルチスケールな時間領域におけるパラメーター制御の自由度によりパラメーター空間は大幅に拡大し、目的に応じた加工パラメーター最適化をより困難なものとしている。超短パルスレーザーによる物質改質を例に挙げると、フェムト秒スケールの光励起過程から始まり、ナノ秒スケールで準安定状態へと緩和し、さらに多パルス照射によるマイクロ秒-ミリ秒スケールでの 10 桁以上に渡る時間領域において、時々刻々と変化する物質状態に応じた光による状態の制御の自由度があり得る。我々はこのようなダイナミックに変化する状態に対する制御パラメーター最適化をデジタル空間で実現すべく、深層学習を用いた加工現象の定量化と基盤モデル構築に取り組んでいる。本発表では、超短パルスレーザーによる物質状態変化を、低周波ラマン分光の視点で深層学習を用いてモデル化した結果について報告する。

深層学習によるモデル化のためには良質な加工データを大量に収集する必要がある。本研究では 10 cm^{-1} から 1400 cm^{-1} の範囲においてラマンスペクトルを空間分解能 400 nm で取得可能な低周波ラマン顕微鏡を構築し超短パルスレーザー照射機構を組み込むことで、全自動でさまざまなレーザーパラメーターに対する加工・測定実験を行い、測定結果に基づくパラメーターフィードバックを行う実験系を構築した。半導体材料を対象として、パルス照射ごとのラマンスペクトル変化を測定し、結晶状態がアモルファス化する過程を広範なパラメーター空間に対して取得した。このようにして得られたレーザー加工パラメーターとラマンスペクトル変化を学習データとして、格子構造変化を定量化する深層学習モデルを開発した。

[1] K. Obata et al., *Int. J. Extrem. Manuf.* **5** 025002 (2023)[2] K. Shimahara et al., *Commun. Engineering* **2**, 1 (2023)

開放型楕円容器の形状と集束される衝撃波の圧力との関係に関する数値解析

Numerical Calculation of Relationship Between Shape of Open Elliptical Reflector and Pressure of Focused Shock Wave

奈良高専¹, 東京大² ○(B)谷口 真爽¹, 須田 敦¹, 廣 和樹¹, 福岡 寛¹, 中川桂一²

NIT, Nara College¹, Univ. of Tokyo²

○Masaya Taniguchi¹, Atsushi Suda¹, Kazuki Hiro¹, Hiroshi Fukuoka¹, Keiichi Nakagawa²

E-mail: fukuoka@mech.nara-k.ac.jp

本研究では、水中衝撃波を集束させる方法として、楕円型容器の一方を開放した開放型楕円容器に着目した。レーザー等を用いて容器の焦点で水中衝撃波を発生させると、楕円の反射定理により衝撃波は他方の焦点へ集束され、局所的な高圧領域が生まれる。これまでに、容器の形状の変化が、衝撃波集束時の圧力に影響を与えることは報告されているが、容器の形状と衝撃波集束地点の定量的な圧力値との関係に着目した研究は少ない。本報告では、数値計算を用いて開放型楕円容器の形状と衝撃波集束現象との関係性を解明し、衝撃波集束時の圧力を容器の形状から予測する方法について議論する。

数値計算は、汎用衝撃解析ソフト ANSYS AUTODYN 2021R1 を使用し、平面对称非定常圧縮性ラグランジュ方程式に基づいて行われた。図 1 に開放型楕円容器をモデル化した計算領域を示す。計算領域全体は、水で満たされている。水の状態方程式は、Mie-Gruneisen の状態方程式である。開放型楕円容器の第一焦点には、レーザーによる圧力上昇を模擬した初期圧力を与えた。図中に示す、 L_s および L_L は楕円の短辺半径および長辺半径である。形状のパラメータは、容器の開放度合いを表す開放率 $L_0/2L_L$ 、楕円の扁平率 F および容器の大きさである。容器の大きさのパラメータとして、 L_L を用いる。扁平率を固定し、 L_L のみを変化させることで、容器を相似的に変化させることができる。本稿では、容器の大きさを変化させた結果を示す。 L_L は 15, 25, および 50 mm まで変化させた。

楕円容器の大きさに対する衝撃波集束時のピーク圧力の影響を調べるため、図 2 に各 L_L の開放型楕円容器における衝撃波集束時のピーク圧力 P_{peak} の数値計算結果を四角のプロットで示す。図 2 より容器を拡大すると、 P_{peak} が減少することを確認できる。この原因として、開放型楕円容器の拡大による衝撃波伝播距離の増加が考えられる。本研究では、 L_L からピーク圧力を予測するための関係式 $P_{\text{peak}} = A(2L_L)^{-2/3}$ を作成した。この関係式は、セドフ・テイラー解により算出した。ここで A は定数である。この関係式が本研究の数値計算結果に適用できることを確認するために、図 2 に、 $P_{\text{peak}} = A(2L_L)^{-2/3}$ の値を実線で示す。定数 A は各大きさの開放型楕円容器における集束時のピーク圧力から、最小二乗法により決定した。図 2 より、関係式と数値計算結果はよい一致を示していることを確認できる。この結果は、 $P_{\text{peak}} = A(2L_L)^{-2/3}$ を用いることで、任意の大きさの開放型楕円容器で得ることのできるピーク圧力を予想できる可能性を示している。発表時には、 $P_{\text{peak}} = A(2L_L)^{-2/3}$ の導出原理および開放率や扁平率を変更した場合における衝撃波集束時の圧力の予測方法についても議論する予定である。

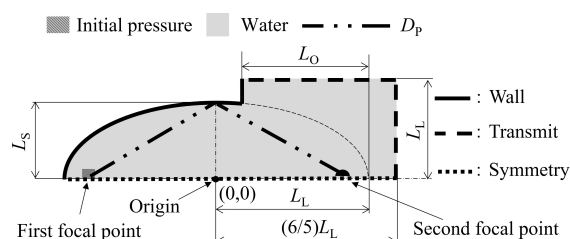


Fig.1 Calculation area.

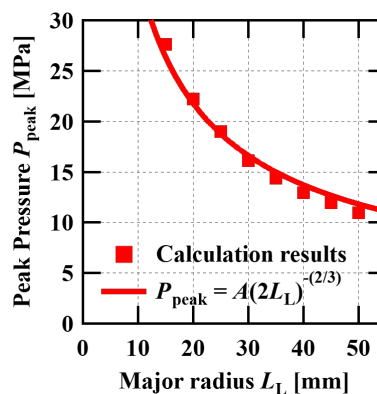


Fig. 2 Relationship between reflector size and pressure at shock wave focusing.