討論会の話題から

第 64 回放射線化学討論会
超短パルスレーザー加工現象の解明に向けたポンプープローブイメージングにおける干渉縞解析

早稲田大学 理工学術院総合研究所
寺澤 英知*, 鷲尾 方一
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
佐藤 大輔, 小川 博嗣, 田中 真人, 黒田 隆之助
産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門
澁谷 達則
東京大学 物性研究所
盛合 靖章, 小林 洋平
東京大学大学院 工学系研究科附属 光量子科学研究センター
坂上 和之

1 はじめに

超短パルスレーザーによる材料加工技術は，加工素材の種類に依存せずに副次的に生じる母材への熱影響を極めて低減させることで，高精細な形状加工を実現させることが期待できる[1]．我々は，この加工技術向上を目指し，加工現象のメカニズム解明に向け，超短パルスレーザー（ポンプ光）で加工現象を誘起するポンプープローブイメージングに関する研究を行ってきた[2–4]．

これまでの研究の中で，透明誘電体材料の一つである石英ガラスにおいて，ポンプ光を試料内部に集光することによって生じる内部加工現象に対して，プローブ光による透過イメージングを行ったところ，ポンプ光照射領域の周辺に干渉縞が観察された[3]．その干渉縞が確認された透過イメージの一つを Fig. 1 に示す．

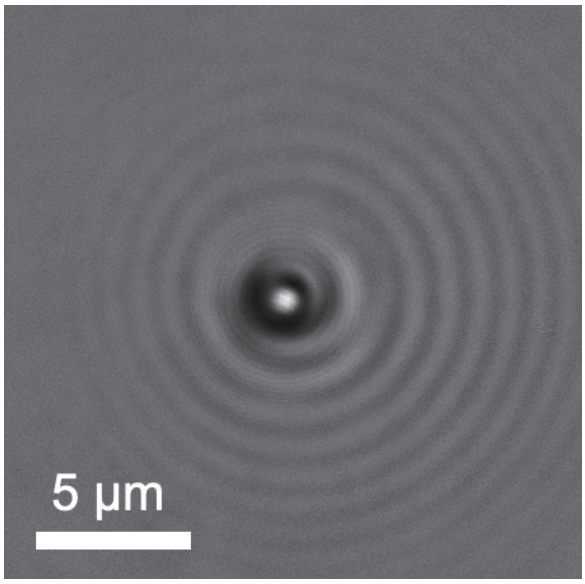

Figure 1. Time-resolved transmission image with interference fringes[3].

Interference fringe analysis in pump-probe imaging for elucidation of ultrashort pulse laser processing phenomena
Eichi Terasawa* and Masakazu Washio (*Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University*), Daisuke Satoh, Hiroshi Ogawa, Masahito Tanaka and Ryunosuke Kuroda (*OPERANDO-OIL, National Institute of Advanced Industrial Science*), Tatsunori Shibuya (*RIMA, National Institute of Advanced Industrial Science*), Yasuaki Moriai and Yohei Kobayashi (*The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo*), Kazuyuki Sakaue (*Photon Science Center, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo*),
〒169–0072 東京都新宿区大久保 3–4–1
TEL: 03–5286–3893, FAX: 03–3205–0723,
E-mail: wisdom_terasawa@akane.waseda.jp

我々はこの干渉縞が，ホログラムによる微粒子計測技術[5]に用いられる干渉縞と類似していることを確認した[3]．この技術は，観察対象である微粒子の情報（大きさや形状，位置，屈折率）を，測定光の入射波とその入射波が微粒子によって散乱された散乱波の二つの波が干渉することによって生じる干渉縞から測定する．我々が観察した干渉縞と対応させると，観察対象がポンプ光照射による材料の状態変化領域，入射波がプローブ光，散乱波がポンプ光による状態変化領域において散乱したプローブ光となる．ホログラムによる微粒子計測技術で微粒子の情報を獲得できていることを踏まえると，我々が観察した干渉縞からポンプ光照射による材料の状態変化領域の情報について同様に獲得できると考えられる．

本研究では，我々がポンプ－プローブイメージングで観察した干渉縞を解析することで，ポンプ光照射によって生じた加工状態を推定することを目的とした．その一環として，ホログラムによる微粒子計測技術で用いられている干渉縞解析手法の電磁場再構成モデルを利用し，我々が観察した干渉縞イメージから三次元電磁場再構成を行った．さらに，その再構成結果を評価するために，干渉縞が確認された加工状態と同様のものの三次元走査イメージを測定し，その再構成結果との比較を行った．

2　実験

本実験で使用したポンプ－プローブイメージング装置は，チタンサファイアフェムト秒レーザーをレーザー光源として使用し，加工用のポンプ光には基本波の波長 800 nm，透過測定用のプローブ光には BBO 結晶によって二倍波変換した波長 400 nm のレーザー光を使用した．測定試料は石英ガラスである．実験装置および実験条件の詳細は参考文献[4]を参照されたい．

干渉縞解析手法として，ホログラムによる微粒子計測技術で用いられている三次元電磁場再構成モデルの一つである，Rayleigh-Sommerfeld Back-Propagation[6,7]を使用した．

上記の干渉縞解析による三次元電磁場再構成結果を評価するため，透過プローブ光による三次元走査イメージを取得した．その三次元走査イメージの測定手法の概要を Fig. 2 に示す．観察対象である加工状態に対して，対物レンズを 2.5 μm 間隔で 50 μm の範囲で z 方向に走査して焦点を変えながら，加工状態の三次元走査イメージを取得した．

3　実験結果と考察

Figure 3 に，加工終状態の干渉縞イメージから三次元電磁場再構成モデルから再構成した結果と Fig. 2 で測定した加工終状態の三次元走査イメージ結果の一部を示す．それぞれ，$y = 0$ μm における x 軸方向の光強度分布を横軸に，z 軸方向の位置を縦軸として，規格

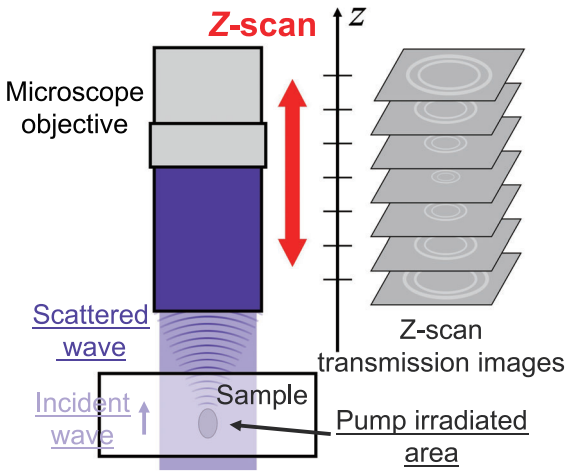

Figure 2. Measurement method of z-scan transmission images.

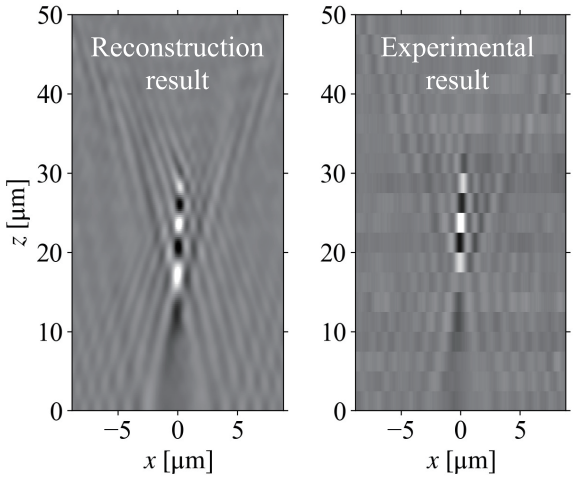

Figure 3. Reconstruction result (left) and experimental result (right).

化した透過光強度をグレースケールで示した．電磁場再構成は，三次元走査イメージにおける $z = 0$ μm の一枚の干渉縞イメージを用いて行った．x 座標と y 座標の原点は，加工終状態の中心として定義した．これらの結果の比較から，再構成結果が三次元走査イメージ結果をおおよそ再現していることが確認された．この結果から，我々が観察してきた干渉縞が，加工状態の三次元構造を反映するようなホログラムであると考えられる．現在，再構成結果と三次元走査イメージ結果の比較のより定量的な評価や加工過渡状態での干渉縞に対する解析，今回得られた三次元再構成結果が意味する材料状態変化領域の特性について検討を行っている．

4　おわりに

超短パルスレーザー加工現象解明を目指して行ってきたポンプープローブイメージングにおいて観察された干渉縞から加工状態を推定することを目的とし，加工状態で確認される干渉縞を解析し，電磁場の三次元再構成を実施した．加工終状態の測定で観察された干渉縞の再構成結果は，三次元走査イメージ結果をおおよそ再現していることが確認された．この結果から，この干渉縞は三次元の加工状態を反映するホログラムであると考えられた．今後は，干渉縞と加工状態の比較や電磁場シミュレーションの利用から，干渉縞から加工状態の加工形状や屈折率などの特定の物理量の推定手法を確立させることを目指す．

〈謝　辞〉

本研究の一部は，NEDO 委託事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」，及び NEDO 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」により実施しました．関係各位の皆様に御礼申し上げます．

〈参 考 文 献〉

1) T. Shibuya, D. Satoh, M. Tanaka, H. Ogawa, R. Kuroda, Jpn. J. Appl. Phys., 58 (2019) SIIA02.
2) D. Satoh, T. Shibuya, E. Terasawa, Y. Moriai, H. Ogawa, M. Tanaka, Y. Kobayashi, R. Kuroda, Appl. Phys. A., 126 (2020) 795.
3) 寺澤 英知, 鷲尾 方一, 佐藤 大輔, 盛合 靖章, 小川 博嗣, 田中 真人, 黒田 隆之助, 澁谷 達則, 小林 洋平, 坂上 和之, 放射線化学, 111 (2021) 67.
4) E. Terasawa, D. Satoh, T. Shibuya, Y. Moriai, H. Ogawa, M. Tanaka, K. Sakaue, M. Washio, Y. Kobayashi, R. Kuroda, J. Laser Micro/Nanoeng., 16 (2021) 194.
5) S. Barkley, T. G. Dimiduk, J. Fung, D. M. Kaz, V. N. Manoharan, R. McGorty, R. W. Perry, A. Wang, Comput. Sci. Eng., 22 (2020) 72.
6) F. C. Cheong, B. J. Krishnatreya, D. G. Grier, Opt. Express., 18 (2010) 13563.
7) L. Dixon, F. C. Cheong, D. G. Grier, Opt. Express., 19 (2011) 16410.