

透明材料のフェムト秒レーザー加工時の温度分布の超高速精密計測

東京大学 機械工学科

講師 伊藤 佑介

(2020 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020234-C2)

キーワード：フェムト秒レーザー，ガラス，高速計測

1. 研究の目的と背景

電子機器や光学機器のさらなる高性能化のために、ガラスやダイヤモンドをはじめとする透明材料に微細かつ精密な加工を施す技術が求められている。これらの材料は、硬脆性と透明性故に加工が困難な材料であるが、フェムト秒レーザーを用いるとエネルギーを吸収させることができるため、微細加工を施すことが可能である。そのため、フェムト秒レーザーは透明材料への微細加工のための有効なツールとして注目されている¹⁾。しかしながら、透明材料のフェムト秒レーザー加工における光吸収は非線形的で複雑な過程を経るため、材料が励起・加熱され、加工に至る過程を明らかにすることが困難である。

また、近年、フェムト秒レーザーと連続波レーザーを同時照射することによる、高効率なフェムト秒レーザー加工法である、過渡選択的レーザー加工法 (Transient and selective laser processing: TSL 加工法) が注目されている²⁾。この手法では、フェムト秒レーザー照射によって励起された領域に対し連続波レーザーを吸収させることによって、材料内部を爆発的に加熱することで、超高速加工が実現される。TSL 加工法は、穴あけ加工²⁾、溝加工³⁾、内部加工⁴⁾、接合加工⁵⁾へと応用されており、そのメカニズム解明には加工時の温度分布を正確に把握することが必要である。

このように、従来のフェムト秒レーザー加工法や、それを発展させた TSL 加工法のメカニズムを探る上で、高速で変化する温度分布を精密に計測する技術の開発が求められる。そこで本研究では、ポンプ・プローブ法とマッハ・

ツェンダー干渉計を複合することによる、高速温度分布計測法を開発することを目的とする。

2. 研究方法

2-1 ポンプ・プローブ法による高速観察

本研究では、ポンプ・プローブ法によるイメージングシステムを構築することで、材料内部の超高速現象を観察・計測する。ポンプ・プローブ法では、加工用のポンプ光と観察用のプローブ光を用意することによって、高速現象を写し出す方法である。1つのレーザー光を2つに分岐し、光学遅延ステージを用いることで、ピコ秒からナノ秒の超高速現象を観察することが可能である。また、数百ナノ秒からマイクロ秒オーダーの計測に関しては、2つの異なるレーザー光源を用い、電氣的に同期させる。これによって、高速現象を観察できる (図 1 (a))。

2-2 マッハ・ツェンダー干渉計による温度計測

本研究では、マッハ・ツェンダー干渉計を用いて温度情報を取得する。このマッハ・ツェンダー干渉計と、ポンプ・プローブ法を組み合わせることによって、高速で変化する温度分布を計測する⁶⁾。

マッハ・ツェンダー干渉計では、上記のプローブ光を、さらに2つのビームに分岐する。一方を試料光として試料内部を通過させ、他方を参照光とし、試料の外部を通過させる。この2つのビームをカメラの素子上に重ね合わせることで、干渉縞を生成する (図 1 (b))。このとき、試料内

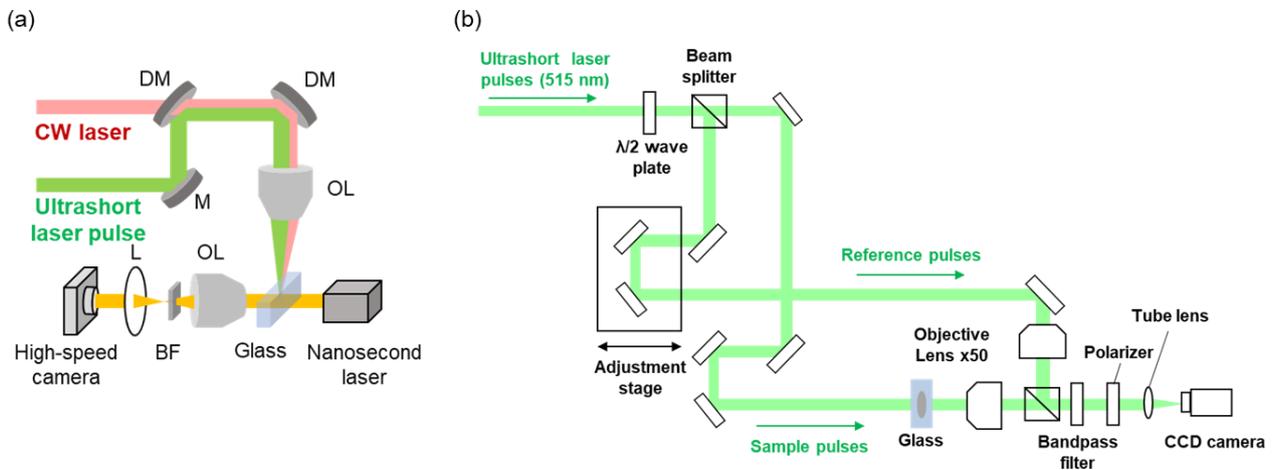


図 1 (a) TSL 加工の様子を、プローブ光で観察している様子の概念図。このとき、ポンプ光とプローブ光には異なる光源を用いている。(b) マッハ・ツェンダー干渉計。

部の屈折率が変化すると、干渉縞に歪みが生じる。レーザ加工時、温度が変化すると、それによって屈折率が変化する⁷⁾。

$$\frac{dn}{dT} = \frac{n^2 - 1}{2n} \left(-\gamma + \Lambda_0 \gamma + \tau_0 \right)$$

ここで、 n は屈折率、 T は温度である。他のパラメータは、物性に依存する。本研究で用いた無アルカリガラスの各種パラメータは文献から得られなかったが、石英ガラスとカルシウムアルミネートガラスの文献値⁷⁾ と、無アルカリガラスの成分を考慮し、石英ガラスとカルシウムアルミネートガラスが 7:1 の割合で混ざっていると仮定し、無アルカリガラスの係数を定めた (表 1)。

表 1 各種パラメータの材料依存性

	γ	Λ_0	τ_0
Fused silica glass	0.13×10^{-5}	0.17	2.4×10^{-5}
Calcium Aluminate glass	2.15×10^{-5}	0.65	2.2×10^{-5}
Alkaline-free glass	0.38×10^{-5}	0.23	2.38×10^{-5}

屈折率が変化すると、それによって、試料光と参照光の間の位相差が変化するため、干渉縞が歪む。この歪みを抽出することによって、温度分布の抽出を試みる。

2・3 干渉縞の歪みの解析方法

図 2 (a) のように、画像の横方向に x 軸を、縦方向に y 軸を取ると、各座標における画像の明度 m は次のように表せる。

$$m(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 y + \phi(x, y))$$

ここで、 a は背景に由来する明度、 b は干渉縞に由来する明度、 f_0 は干渉縞の空間周波数、 ϕ は位相変調量を表す。この式の三角関数を指数関数の形に変換すると以下のようになる。

$$m(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 y) + c_0^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 y)$$

ただし、

$$c(x, y) = \frac{b(x, y) \exp(i\phi(x, y))}{2}$$

である。干渉縞画像に対して 2 次元フーリエ変換を行うと、変換後の画像の各座標における明度は以下の式によって表される。

$$M(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x, f_y - f_0) + C^*(f_x, f_y + f_0)$$

フーリエ変換後の画像の中から干渉縞の成分となる範囲の画像情報のみ抽出する。干渉縞の成分は図 2 (b) において、緑枠で囲われた箇所である。この緑枠で囲われた領域

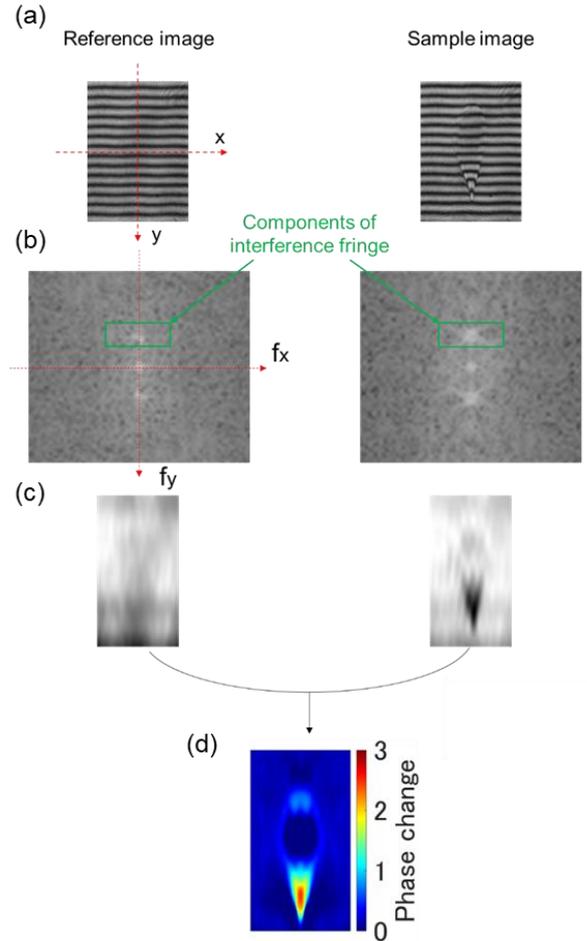


図 2 (a) 干渉縞画像。左は、加工前の参照画像で、右が加工中の画像。(b) 画像(a)に対し 2 次元フーリエ変換を施した後の画像。(c) 画像(b)内の緑枠内を逆フーリエ変換した画像。(d) (c) で得られた 2 枚を使い、抽出された位相差分布。

を抽出した後の画像の各座標における明度は以下の式によって表される。

$$\tilde{M}(f_x, f_y) = C(f_x, f_y - f_0)$$

その後、干渉縞の成分を抽出した画像に逆フーリエ変換を行い、もとの干渉縞の画像から干渉縞の情報のみを抽出した画像を得る。この画像の各座標における明度は以下の式によって表される。

$$\tilde{m}(x, y) = c(x, y) \exp(2\pi i f_0 y) = \frac{b(x, y) \exp(2\pi i f_0 y + i\phi(x, y))}{2}$$

この操作をサンプル画像とリファレンス画像に対してそれぞれ行う。リファレンス画像の処理後の各座標における明度は以下の式によって表す。

$$\tilde{m}_0(x, y) = \frac{b_0(x, y) \exp(2\pi i f_0 y + i\phi_0(x, y))}{2}$$

縞の情報のみを抽出したサンプル画像とリファレンス画

像の各座標における明度を比較することで以下の式によって各座標における位相変化を求めることができる。

$$\Delta \phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y)$$

$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[\tilde{m}(x, y)]}{\text{Re}[\tilde{m}(x, y)]} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[\tilde{m}_0(x, y)]}{\text{Re}[\tilde{m}_0(x, y)]} \right\}$$

以上により、位相変化分布を抽出する。位相差と屈折率の関係と、屈折率と温度の関係を用いることで、温度分布を抽出する。なお、厚み方向の情報が積算されないよう、加工現象は完全に軸対称な現象だと仮定することで、逆アーベル変換を適用している。

2・4 TSL 接合法

本研究では、フェムト秒レーザーを使用した加工法の中でも、加熱の影響が重要となる TSL 接合法における加工過程の温度分布を計測する。TSL 接合法の概念図を図3に示す。TSL 接合法では、フェムト秒レーザーにより励起された領域が連続波レーザーにより加熱され、熔融したガラスが基板間に排出され、冷却されることで接合が実現する。励起用のフェムト秒レーザーには、波長 800 nm の Ti: Sapphire レーザ光源を、連続波レーザーには波長 800 nm のファイバレーザーを用いた。プローブ光には、Yb: KGW レーザから発振する光の第2高調波である波長 515 nm のフェムト秒レーザーを用いた。TSL 接合法と、高速温度分布計測法を組み合わせた実験系を図4に示す。本システムにより、高速に時間変化する温度分布を計測する。

3. 実験結果

3・1 TSL 接合法における加工過程の高速観察結果

図5に、本手法により得られた画像を示す。ガラス内部に生成された干渉縞が、時間経過に伴い歪む様子が捉えられている。100 μs 間連続波レーザーで加熱し、その後レーザー

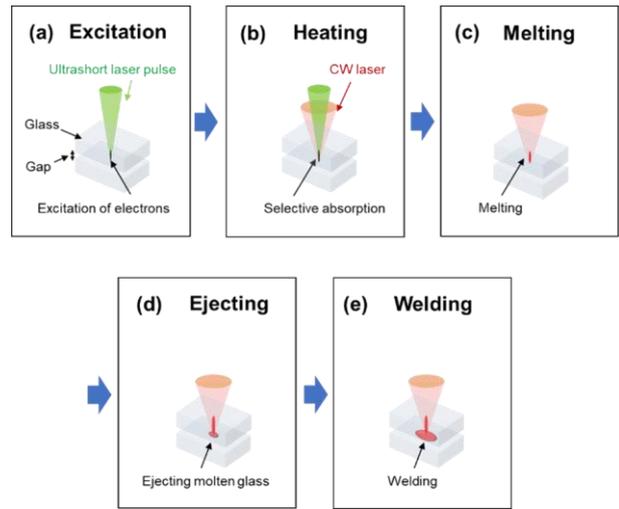


図3 TSL 接合法。(a) ガラス基板を2枚重ね、上のガラスの裏面付近にフェムト秒レーザーを照射し、励起領域を生成する。(b),(c) 励起された領域に連続波レーザーを吸収させ、加熱・熔融する。(d) 熔融したガラスを、2枚の基板間に排出させる。(e) 熔融物が冷却されることで、接合が実現する。

を止めると、徐々に干渉縞の歪みが小さくなっていくことが分かる。これは、熱伝導により基板が冷却される過程を示している。

3・2 温度分布計測結果

図5に示した干渉縞の歪みを解析し、温度分布を抽出した結果を図6に示す。100 μs 以下では、上方へ向かって高温領域が拡大し、それ以降では、レーザー照射の停止に伴い、温度が低下していく様子を定量的に写し出した。TSL 接合において、熔融したガラスが排出される結果、基板内部

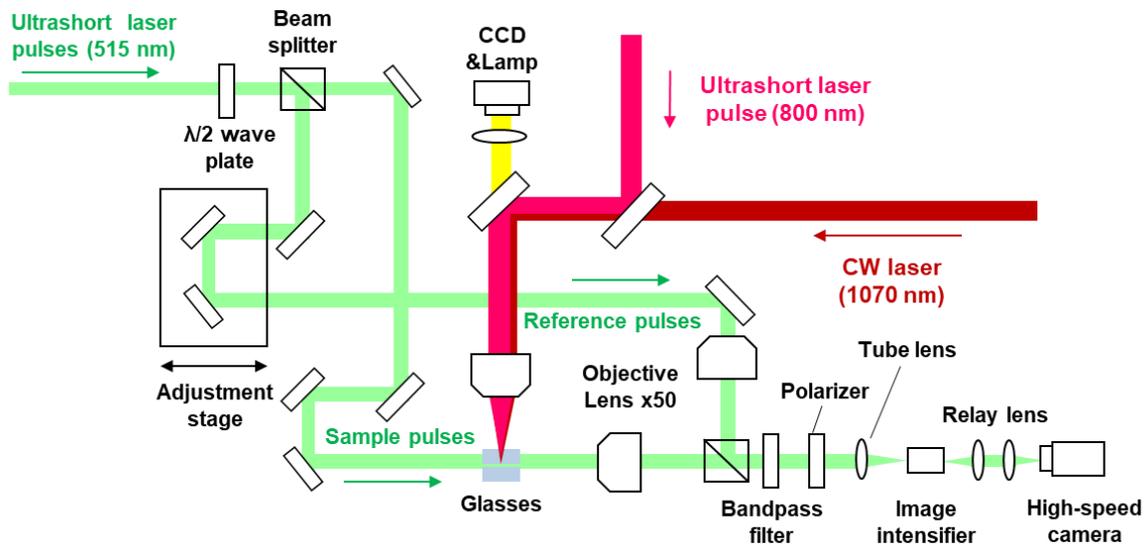


図4 TSL 接合法、ポンプ・プローブ法とマッハ・ツェンダー干渉計を複合した高速温度計測システムを、TSL 接合システムに導入することにより、材料が高速で加熱される際の温度分布を計測する。

に空洞が生じる。空洞の領域では試料光の光路長が大きく変化してしまうため、その周囲ではエラーが生じやすい。こうしたエラーを解消していくことが今後の課題である。

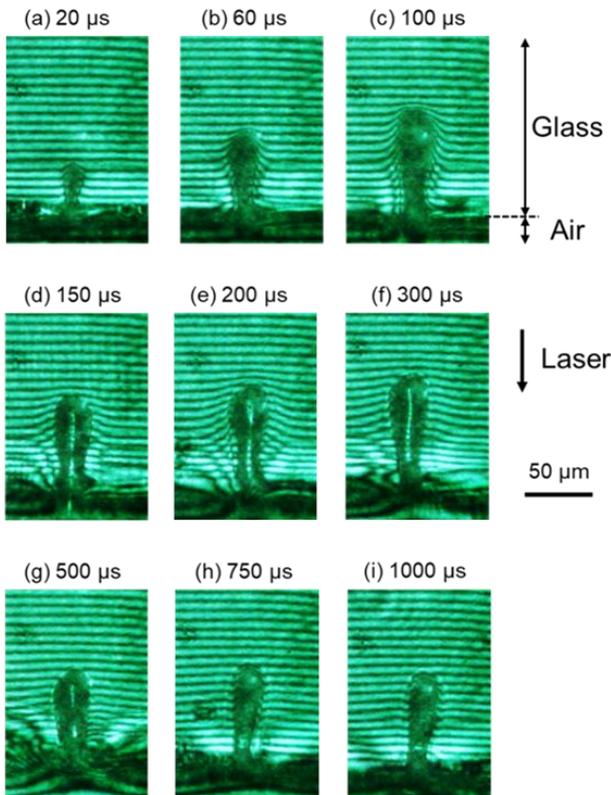


図5 2枚のガラスのうち、上側のガラスが加熱され、空気（基板間隙）中へ溶融ガラスが排出される過程の高速干渉計測結果。

4. 結論

ポンプ・プローブ法とマッハ・ツェンダー干渉計を複合することによる、高速温度分布計測法を開発した。本手法では、温度変化によって屈折率が変化することに着目し、レーザ加工時に生じる干渉縞の歪みから屈折率変化の情報を抽出し、そこから温度分布を取得した。フェムト秒レーザを利用した加工法の中でも加熱の影響が顕著であるTSL接合法における温度分布計測を実現した。

この計測法は、種々の加工手法における加工メカニズムの解明に繋がるのみならず、光と材料の最初期の過程を探るツールとしても機能することが期待され、基礎科学の発展にも貢献すると考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の奨励研究助成（AF-2020234-C2）を受け実施されたものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Koji Sugioka and Ya Cheng, “Femtosecond laser processing for optofluidic fabrication,” *Lab on a Chip* 12, 3576–3589 (2012).
- 2) Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Naoyuki Miyamoto, and Naohiko Sugita, “Ultrafast and precision drilling of glass by selective absorption of fiber-laser pulse into femtosecond-laser-induced filament,” *Applied Physics Letters* 113(6), 061101 (2018).
- 3) Chaoran Wei, Reina Yoshizaki, Yusuke Ito, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita, “High-speed microgroove processing of

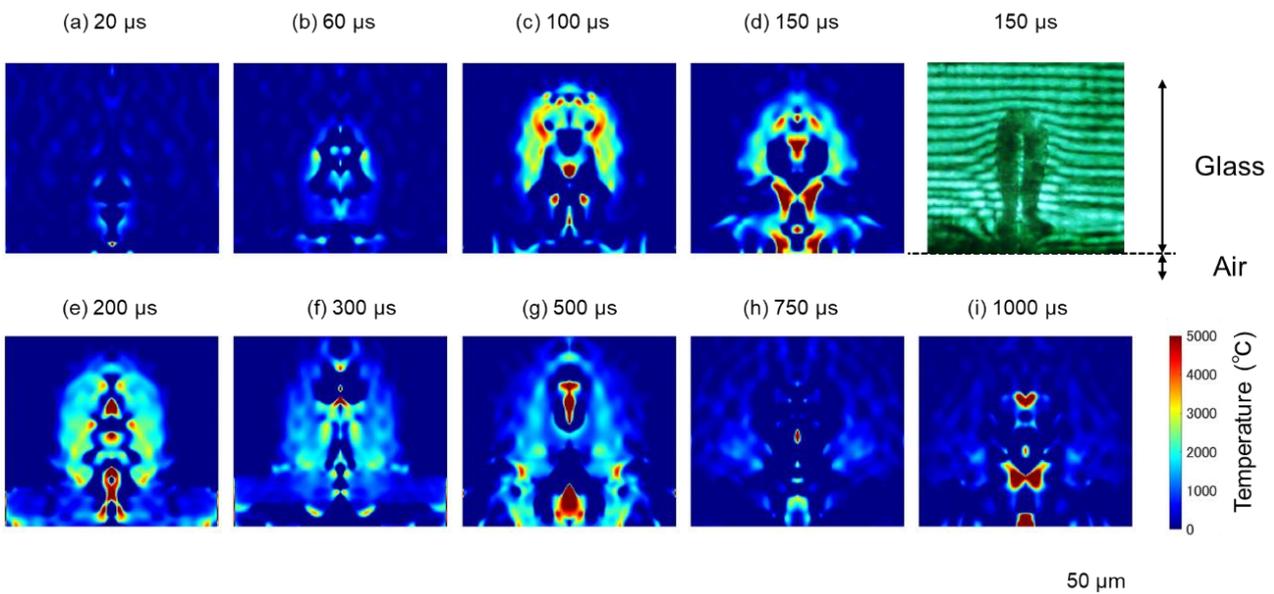


図6 TSL接合時の上側ガラス内部の温度分布の高速計測結果。

glass by expanding high-temperature region formed by transient and selective laser absorption,” *Optics Express* 30(18), 32280–32291 (2022).

- 4) Naoyuki Miyamoto, Yusuke Ito, Chaoran Wei, Reina Yoshizaki, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita, “Ultrafast internal modification of glass by selective absorption of a continuous-wave laser into excited electrons,” *Optics Letters* 45(11), 3171–3174 (2020).
- 5) Shunya Yoshitake, Yusuke Ito, Naoyuki Miyamoto, Reina Yoshizaki, and Naohiko Sugita, “Ultrafast and large-gap microwelding of glass substrates by selective absorption of continuous-wave laser into

transiently excited electrons,” *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 71, 157–160 (2022).

- 6) Yusuke Ito, David Veysset, Steven E. Kooi, Dmitro Martynowich, Keiichi Nakagawa, and Keith A. Nelson, “Interferometric and fluorescence analysis of shock wave effects on cell membrane,” *Communications Physics* 3, 124 (2020).
- 7) Roy M. Waxler and G. W. Cleek, “The effect of temperature and pressure on the refractive index of some oxide glasses,” *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 77A(6), 755–763 (1973).