

レーザープロセスにおけるリアルタイム計測技術に関する調査研究

寺澤英知*

(2025年2月28日受理)

Survey on real-time measurement technology in laser process

TERASAWA Eichi

Abstract

The laser process is expected to play a pivotal role in supporting advanced manufacturing. However, the post-processing inspection phase remains time-consuming, which limits productivity. As a result, interest has grown in real-time inspection technology that aims to eliminate the need for conventional inspection steps. Given the complex and high-speed nature of laser-process phenomena, the development of real-time measurement technology capable of accurately capturing these phenomena is essential for achieving effective real-time inspection. This report presents the findings of a survey on real-time measurement technology in the laser process.

1 はじめに

レーザープロセスとは、レーザーを使用して材料の切断、穴あけ、溶接などの加工を施すことであり、金属、半導体、誘電体、透明材料など様々な材料に対して加工が可能である。レーザープロセスは、高精細な微細加工が可能であることや非接触加工が可能であること、プロセス用レーザーのデジタル制御性が高いこと、金型などを用いずに比較的自由度の高い形状加工ができること、割れやすい脆性材料などの難加工材料でも高品質な加工が可能であることなど多くの利点を有する。レーザープロセスの種類は、三つに大別できる(図1)。「除去プロセス」、「改質プロセス」、「接合プロセス」の三つである。これらのプロセスは、それぞれが優位性をもち、幅広い産業分野で応用されている。レーザープロセスの高精度・非接触の性質を活用し、半導体基板の微細ビアの穴あけ¹⁾や血管を広げるのに必要なステントの切断・溶接プロセスなど²⁾に使用されている。スマートフォンのディスプレイで用いられる高強度ガラスの切断³⁾、自動車のエンジン部品の焼入れ⁴⁾やバッテリーの溶接⁵⁾な

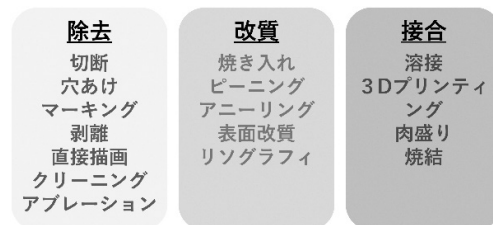


図1：レーザープロセスの種類

どへの利用が有名である。

レーザープロセスでは、プロセス後の検査工程に時間を要し、生産性が頭打ちになるという課題がある⁶⁾。図2に、従来の検査工程の一例を示す。一般的に、プロセス後に、外観検査を行い、その後一部を抜き取り検査し、検査が完了する⁷⁾。現状、この外観検査や抜取検査に時間を要している。そこで注目されているのが、リアルタイムプロセス検査技術である。リアルタイムプロセス検査では、プロセス中にリアルタイムで検査を行い、プロセス終了後には検査も同時に完了する。これにより、これまでに時間を要していた検査工程をスキップでき、生産工程の短縮・生産性の向上が期待される。また、全数検査を可能にしたり、リアルタイムでプロセス条件をフィードバック制御できたり、不良発生メカニズムを解

* 分析計測標準研究部門 放射線イメージング計測研究グループ

明したりできるなどのメリットがある。

レーザープロセスでは複雑な物理現象が生じており、これらの現象がプロセス品質に直結する。図3に、レーザープロセスにおける物理現象の推移の例を示す⁸⁾。なお、今回は超短パルスレーザーによる除去プロセスの例を取り上げて説明する。レーザーが試料に照射されると、電磁場伝播および光励起が非常に早い時間で生じる。その後、電子に吸収されたエネルギーが格子に移り、熱として拡散していく。融点を超えていると熔融状態となり、流体として流動する場合もある。そして、圧力波の発生などによりアブレーションが生じ、最終的には形状が形成される。プロセス品質を評価する際に、これらの複雑・高速現象と紐付けながら検討することは非常に重要であり、検査工程で品質をよりの確に評価するためには、これらの現象を計測できるようなリアルタイム計測技術の導入が本質的に求められる。

前述のように、レーザープロセスは、未来のものづくり現場を支える技術として期待されているが、プロセス後の検査工程に時間を要し、生産性が上がらないという課題があり、そこで従来の検査工程をスキップできる「リアルタイム検査技術」が注目されている。レーザープロセスは、複雑・高速の現象によってなされており、「リアルタイム検査技術」の実現には、レーザープロセスの複雑・高速現象を計測できる「リアルタイム計測技術」

が鍵となる。本報告では、レーザープロセスにおけるリアルタイム計測技術に関する調査結果を報告する。

本報告は、産業技術総合研究所の計量標準総合センターの2024年度新人研修の一環として、1年間調査を行ったものである。調査対象は、学術論文（国内・国際論文、原著・総説論文など）、学術会議（国内・国際会議）、企業での実例（Web ページ検索）などである。レーザープロセスの対象は、除去・改質・接合、連続波・パルスレーザープロセスなど全般である。Web 上での検索キーワードは、レーザープロセス中のリアルタイム計測、in situ 計測、モニタリングなどである。

2 レーザーとレーザープロセス

本章では、本報告の計測対象であるレーザープロセスに使用されるレーザーと、そのレーザープロセスについて簡単にまとめた。

2.1 レーザー

レーザー (Laser) は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字であり、放射の誘導放出による光増幅という意味で、誘導放出を利用して光共振器内で光を増幅させ発生させた光である。レーザーは、照明で利用されるような一般的な光源と異なり、単色性や直進性、コヒーレンス性などの特徴をもつ。これらの特徴により、製造や通信、医療、研究など、様々な分野で応用されており、レーザープロセスもその一つである。

ここで簡単に、レーザーの発生原理について説明する。レーザーは、光共振器内に置かれた光増幅器によって増幅され、その光共振器内で光が発振することで発生する。光増幅器はレーザー媒質（固体、液体、気体・ガスなど）のことであり、別の光源などからエネルギーを供給されてレーザー媒質の原子や分子は励起状態となる。この励起状態の原子や分子が基底状態に戻る際に光子を放出し（自然放出）、その光子が光共振器内で周回している間に、他の励起状態の原子や分子に対して誘導放出を誘発する

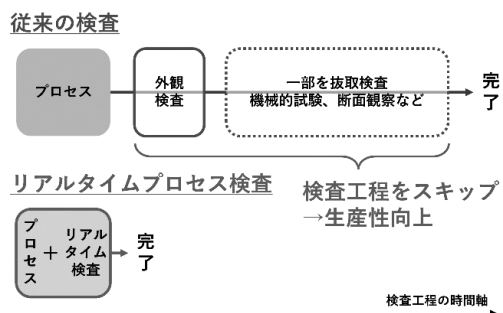


図2：従来の検査とリアルタイムプロセス検査（文献7）を参考）

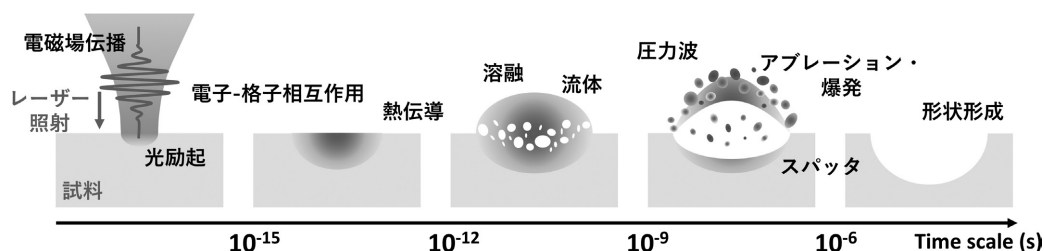


図3：レーザープロセスにおける物理現象の推移の例（除去プロセスの場合）

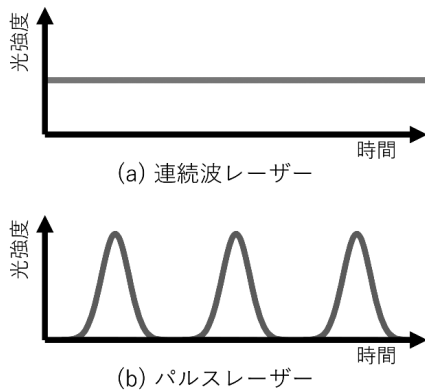


図4：連続波レーザーとパルスレーザーの違い

ことで、自然放出光が増幅されていく。そして、光増幅による利得と光共振器内の損失(内部で吸収や散乱など)が釣り合った時に初めてレーザーが発振し、レーザー光が発生する。

レーザー発振は連続波発振とパルス発振に大別でき、それらの発振方法で得られたレーザーのことをそれぞれ連続波レーザー (Continuous Wave laser, CW レーザー)、パルスレーザー (Pulse laser) という。これらのレーザーは時間的な出力の仕方が異なり、連続波レーザーは連続的にレーザー光を出力し、パルスレーザーはパルス状で断続的にレーザー光を出力する(図4)。連続波レーザーとパルスレーザーの特性の違いは、レーザープロセスやそのプロセス現象にも大きな違いをもたらす。本節では、レーザープロセスの現象を理解するために重要となる連続波レーザーとパルスレーザーの特徴や発生方法などをまとめた。本節の内容は、文献⁹⁻¹²⁾を参考にした。

2.1.1 連続波レーザー

連続波レーザーは、時間軸上で連続的にレーザー光を出力するものである。パルスレーザーとして比較して、連続波レーザーの特徴は、時間的に安定かつ一定で照射できることである。レーザープロセスの観点でいえば、より安定的なプロセスだったり、均一な加工品質を実現できたりするなどの利点につながる。

連続波レーザーの発生方法について説明する。レーザーを発生させるには、光を増幅する光増幅器と光を閉じ込める光共振器が必要になる。光増幅器のレーザー媒質は、連続波レーザーの場合、気体レーザーだとCO₂レーザーやHe-Neレーザー、固体レーザーだとErファイバーレーザーやYbファイバーレーザー、半導体レーザーなどが有名である。レーザー媒質に関してより詳しく知りたい場合は、文献¹²⁾などを参考にされたい。光共振器は、ファブリ・ペロー (Fabry-Perot) 型やリング型、分布帰

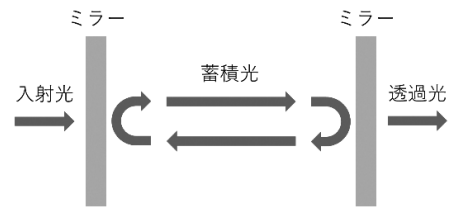


図5：ファブリ・ペロー共振器

還形などがあり、本項では、代表的なファブリ・ペロー型の共振器について簡単に説明する。

ファブリ・ペロー共振器は、二枚の対向するミラーによって構成され、その間を光が往復する。ここでは、このファブリ・ペロー共振器における連続波レーザーの反射光と蓄積光、透過光の強度について考えてみる^{13,14)}。なお、ここでは、ミラーに散乱損失がなく、共振器内に一定の損失があるものとする。図5における二つのミラーの振幅反射率および振幅透過率を、左側のミラーのものを r_1 、 t_1 、右側のミラーのものを r_2 、 t_2 とする。また、共振器内に損失のある媒質が存在するものとし、その複素透過率を t とする。その際、共振器内で損失がない場合は $t = 1$ となる。

共振器に入射する電場の振幅を E_0 とした場合、まず、反射光の電場振幅を考える。図5の左側から電場を入射させる場合、左側のミラーから透過した成分を足し合わせたものが、反射光の電場振幅となる。共振器1往復あたりに生じる電場振幅の位相遅れを δ とすると、反射光の電場振幅 E_r は、

$$\begin{aligned} E_r &= -E_0 r_1 + E_0 r_2 t_1^2 t^2 e^{-i\delta} + E_0 r_1 r_2^2 t_1^2 t^4 e^{-2i\delta} + \dots \\ &= -E_0 r_1 + E_0 t_1^2 r_2 e^{-i\delta} \sum_{n=0}^{\infty} (r_1 r_2 e^{-i\delta})^n \\ &= E_0 \frac{r_1 t^2 e^{-i\delta} - r_1}{1 - r_1 r_2 t^2 e^{-i\delta}} \end{aligned}$$

となる。次に蓄積光の電場振幅を考える。蓄積光を考えるにあたり、まずは入射光と同方向に伝播する成分を考えることにする。反射光の電場振幅の計算と同様に考えると、蓄積光の電場振幅 E_c は、

$$\begin{aligned} E_c &= E_0 t_1 + E_0 r_1 r_2 t_1^2 t^2 e^{-i\delta} + E_0 r_1^2 r_2^2 t_1^4 e^{-2i\delta} + \dots \\ &= E_0 t_1 \sum_{n=0}^{\infty} (r_1 r_2 t^2 e^{-i\delta})^n \\ &= E_0 \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 t^2 e^{-i\delta}} \end{aligned}$$

となる。なお、実際には入射光と逆方向に伝播する成分も存在する。最後に透過光の電場振幅を考える。透過光の電場振幅 E_t は、蓄積光の電場振幅が右側のミラーから透過した成分と考え、

$$E_t = E_c t_2 = E_0 \frac{t t_2}{1 - r_1 r_2 t^2 e^{-i\delta}}$$

となる。

光強度 I は、電場振幅 E を用いて $I = |E|^2$ となるため、以上の電場振幅を用いて、反射光強度 I_r 、蓄積光強度 I_c 、反射光強度 I_t は、

$$I_r = I_0 \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

$$I_c = I_0 \frac{T_1}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

$$I_t = I_0 \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

となる。上記の式において、右側のミラーの反射率と共振器内の損失を $r_m = r_2 t$ とまとめ、入射光強度を $I_0 = |E_0|^2$ それぞれのミラーの強度反射率および強度透過率を、 $R = |r|^2$ および $T = |t|^2$ とした。なお、蓄積光強度は、電場振幅 E_c と同様に、逆方向に伝播する成分も存在するため、実際は $2I_c$ となる。

2.1.2 パルスレーザー

パルスレーザーは、時間軸上で断続的にレーザー光を出力するものである。基本的には一定の繰り返し周波数でレーザーパルスを出力する。連続波レーザーとして比較して、パルスレーザーの特徴は、より高いピーク出力のレーザーを発生できることである。ピーク出力とは、1つのパルスレーザーにおいて最も高い出力のことである。レーザープロセスの観点でいえば、高いピーク出力によって、瞬間的にレーザーエネルギーを注入できるため、より高速なプロセスだったり、より効率的なプロセスができたりするなどの利点がある。特に、超短パルスレーザーと呼ばれるパルス幅がピコ秒 (10^{-12} 秒) からフェムト秒 (10^{-15} 秒) 程度であるパルスレーザーは、連続波レーザーやそれよりも長いパルス幅のレーザーと比較して、加工周辺部の熱影響が極めて少なく、高精密かつ高品質な微細加工を可能にすることが知られており、レーザープロセスの分野で非常に注目されている。

パルスレーザーは、一般的にパルス幅によってレーザーを分類することが多く、ミリ秒レーザー (millisecond laser, パルス幅が 10^{-3} 秒)、マイクロ秒レーザー (microsecond laser, パルス幅が 10^{-6} 秒)、ナノ秒レーザー

(nanosecond laser, パルス幅が 10^{-9} 秒)、ピコ秒レーザー (picosecond laser, パルス幅が 10^{-12} 秒)、フェムト秒レーザー (femtosecond laser, パルス幅が 10^{-15} 秒)、アト秒レーザー (attosecond laser, パルス幅が 10^{-18} 秒) のように呼称する。この中でも、ナノ秒レーザーは短パルスレーザー、ピコ秒レーザー・フェムト秒レーザーは超短パルスレーザーと呼ばれる。

パルスレーザーの発生方法について説明する。パルスレーザーの発生には、連続波レーザーと同様に光増幅器と光を閉じ込める光共振器に加えて、パルス発振させる機構が必要となる。パルス発振の手法には、主に「直接変調法」、「外部変調法」、「Qスイッチ法」、「モード同期法」がある¹⁶⁾。以下では、それぞれのパルス発生手法について、簡単に説明する。

直接変調法とは、直接的なレーザーのオン・オフ制御によって、パルスレーザーを発生させる方法である。この手法は、半導体レーザーで使用されており、半導体レーザーの電流制御によって、パルスの時間波形を制御する。

外部変調法とは、連続波レーザーなどのレーザー出力を外部の変調器によって制御し、パルスレーザーを発生する方法である。外部の変調器には、音響光学変調器などが用いられる。

Qスイッチ法とは、共振器の品質を意味するQ値 (Quality factor) を制御 (スイッチ) して、パルスレーザーを発生させるものである。具体的には、光共振器内に、共振器内の損失 (Q値と関連する値) を制御する機構を導入し、レーザー媒質で十分に利得が得られる状態で、ある瞬間に損失を下げてレーザーが発振させる状態にすると、光共振器内の光が急激に増大し、それと同時にレーザー媒質で吸収されたエネルギーが消費されることで、パルスレーザーとして出力される。Q値の制御手法は、外部からの信号で能動的にオン・オフする光変調器、もしくはパルス自身の強度によって損失が受動的に変化する可飽和吸収素子が用いられ、それぞれのことを能動Qスイッチ、受動Qスイッチという。

モード同期法とは、光共振器内に存在する周波数モード (縦モード) の位相を固定 (同期) することで、周波数モードの位相が同期した箇所でも光が強め合い、パルスレーザーが発生する。モード同期法は、Qスイッチ法と同様に、能動モード同期と受動モード同期がある。能動モード同期は、外部の制御型の光変調器 (音響光学変調器など) を用いて、その外部の変調信号によってモード同期させるものである。受動モード同期は、可飽和吸収という性質をもつ素子を光共振器に導入するもので、可飽和吸収とは、光強度が高いと吸収率が低く、光強度が

低いと吸収率が高く働く性質で、この性質によって光強度が高い成分のみが受動的に残ることでパルスレーザーが生じる。有名な可飽和吸収機構として、カーレンズ効果、非線形偏波回転、半導体可飽和吸収素子などがあげられる。受動モード同期によって、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーを発生することができる。

各手法についてより詳しく知りたい方は、文献⁹⁾⁻¹²⁾を参考にされたい。

2.2 レーザープロセスの種類

レーザープロセスの複雑・高速現象を計測する際、レーザープロセスの種類について理解しておくことは、計測対象の現象や計測技術などを考える上で重要となる。本節では、レーザープロセスを「熱的プロセス」と「非熱的プロセス」に大別して、それぞれを簡単にまとめた。

2.2.1 熱的プロセス

本報告書において、レーザープロセスの熱的プロセスとは、レーザーが物質に照射された際、材料の温度が上昇し、その熱エネルギーによる材料の熔融等でプロセスを行うことをいう。この熱的プロセスは、ナノ秒以上のパルス幅をもつレーザーや連続波レーザーで生じるとされており、溶接（ステンレスや銅など）や3Dプリンティングなどの接合プロセスや、アニーリングなどの改質プロセス、切断や穴あけなどの除去プロセスなど様々なものに使用されている。熱的プロセスの場合は温度上昇による熔融等が主なプロセス現象となるため、レーザー照射による材料の温度変化の計測・評価が重要となる。

2.2.2 非熱的プロセス

本報告書において、レーザープロセスの非熱的プロセスとは、レーザーが物質に照射された直後、物質の電子系と格子系の間で非熱的状態になっているプロセスのことをいい、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーで生じるプロセスのことをいう。図6にフェムト秒レーザー照射時の非熱的プロセスの概念図を示す。フェムト秒レーザーが物質に照射されると、まずそのフェムト秒程度の時間領域で物質の電子系エネルギーが急上昇する。フェムト秒レーザーの超短パルス性によって、電子系エネルギーの上昇に格子系エネルギーは追従されず、電子系エネルギーと格子系エネルギーの間で非熱的状態になる。このような超短パルスレーザーによる非熱的プロセスは、熔融以外の現象（アブレーションなど）も生じるとされ、プロセス後の材料の加工部周辺の影響が極めて少ないなどの利点がある。非熱的プロセスは、特に熱的プロセスでは困難とされる透明材料（ガラスなど）の微細加工に応用されており、ガラスの微細な穴あけや切

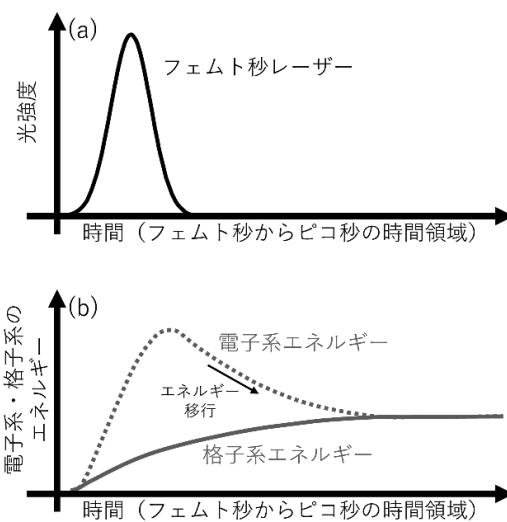


図6：(a) フェムト秒レーザーの光強度分布と (b) そのパルスレーザー照射時の電子系・格子系のエネルギー（非熱的過程）

断などの先端的な除去プロセスに使用されている。非熱的プロセスの場合、熱的プロセスと同様に温度変化も重要となるが、フェムト秒からピコ秒の時間領域の非熱的状态もプロセス現象を計測する上で重要になる。

3 レーザープロセスのリアルタイム計測

本章では、本報告で調査されたレーザープロセスのリアルタイム計測技術についてまとめた。本調査結果は、レーザープロセス全般に対して、計測手法、観察対象・現象の観点から調査を行った。

まず初めに、今回調査されたプロセス中のリアルタイム計測技術の一覧を表1に示す。表1のリアルタイム計測技術は、特に文献¹⁶⁾⁻¹⁹⁾を参考にして得られたものである。

以下で、表1に記載されたリアルタイム計測技術について簡単に述べる。

「カメラ・高速カメラ計測」は、プロセス中の表面状態や形状をイメージングする手法である。なお、イメージングする際に照明を必要とする場合がある。溶接、3Dプリンティング、肉盛り、切断、穴あけなどのプロセスに利用されている。

「X線計測」は、基本的にプロセス中の材料内部をX線透過イメージングし、プロセス中に材料内部のボイドやキーホール、液体と固体の境界などを観察することができる。溶接、3Dプリンティングなどのプロセスに利用されている。

表1：リアルタイム計測技術の一覧

計測手法名	観察対象・現象
カメラ・高速カメラ計測	表面状態・形状
X線計測（放射光も含む）	内部状態 （ポイドなど）
超音波計測	内部状態 （ポイドなど）
光干渉断層計測	表面高さ （プロセス中の穴の深さ）
ポンプ・プローブ計測	表面状態、高速現象 （ 10^{-15} 秒から 10^{-9} 秒）
熱放射計測	温度、入熱量
プラズマ発光計測	入熱量、内部状態*
アコースティック エミッション計測	入熱量、内部状態*
レーザーエネルギー計測	入熱量、 反射・吸収エネルギー

* 他の計測結果との紐付けが必要

「超音波計測」は、超音波トランスデューサーや超音波発生用のレーザーなどによって、プロセス中の材料表面に超音波を発生させ、材料内部のポイドなどからの反射・透過波を測定するものである。これによりポイドなどの欠陥を検知することができる。溶接、3Dプリンティング、肉盛り、穴あけなどのプロセスに利用されている。

「光干渉断層計測」は、材料表面からの反射光と参照光の干渉解析により材料表面高さを測定するものである。これにより、特にレーザー溶接中の穴の深さをリアルタイムで計測することができる。レーザー溶接に限らず、3Dプリンティング、焼結、穴あけ、除去などのプロセスにも利用されている。

「ポンプ・プローブ計測」は、プロセス用レーザーをポンプ、計測用短パルスレーザーをプローブとし、ポンプからプローブを一定時間遅延させ、その遅延時間分遅れた現象を測定する技術である。材料からの反射光を測定することで、材料表面の状態などを観察できる。また時間分解能は、プローブのパルス幅に対応するため、フェムト秒レーザーを用いれば、フェムト秒時間領域の超高速現象を測定できる。高速現象（ 10^{-15} 秒から 10^{-9} 秒）の測定に適している。穴あけ、表面改質、アブレーションなどのプロセスに利用されている。

「熱放射計測」は、材料熔融状態から生じる熱放射を測定する技術であり、プロセス中の表面温度や入熱量を測定できる。溶接、3Dプリンティング、肉盛りなどに利用されている。

「プラズマ発光計測」は、レーザープロセス中に発生するプラズマ光をイメージングや分光により測定するも

のである。表面形状や内部状態、入熱量などを直接的に計測するわけではないが、プロセス中に発生するプラズマには、入熱量や内部状態などと関係があることが報告されており、他の計測結果との紐付けることで、入熱量や内部状態の計測が可能になる場合がある。溶接、3Dプリンティング、肉盛り、穴あけ、アブレーションなどのプロセスに利用されている。

「アコースティックエミッション計測」は、プロセスで生じた音（アコースティックエミッション）を測定するもので、「プラズマ発光計測」と同様に、音と入熱量や内部状態などの計測結果との紐付けることで、それらの計測が可能になる場合がある。溶接、3Dプリンティング、肉盛り、切断、穴あけ、アブレーションなどのプロセスに利用されている。

「レーザーエネルギー計測」は、プロセス用レーザーを照射した際に材料から反射されたエネルギーを測定するものである。反射されたエネルギーを測定することで、実際にプロセスのために吸収されたエネルギーなどに関連する情報を得ることができる。溶接、切断、アブレーションなどのプロセスに利用されている。

これらのリアルタイム計測技術は、2.2で述べた「熱的プロセス」と「非熱的プロセス」によっても大別された。以下では、その二つのプロセス毎の利用事例を簡単に述べる。

3.1 熱的プロセスへの利用事例

本節では、レーザー溶接中の高速カメラ計測の事例を紹介する。参考文献^{20, 21)}において、二つの銅の棒材の溶接中の接合状態・形状を高速カメラで観察された。この銅の棒材は、自動車のモーターなどに使用されているヘアピンと呼ばれるもので、二つの銅の棒材の溶接のこともヘアピン溶接という（図7）。この二つの銅の棒材が溶接されている過程を高速カメラによって計測している。本事例は、二つの棒材が正しく接合されているか確認するもので、その溶接中の接合過程を高速カメラで捉

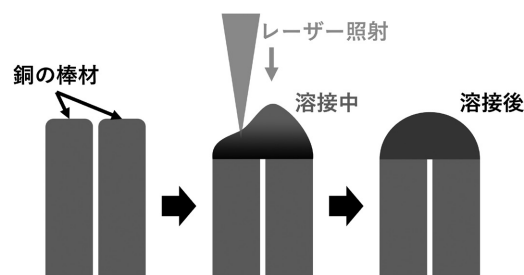


図7：ヘアピン溶接の様子

えることができている。例えば、他のプロセス条件で、接合が上手くいかなかった場合は、このように高速カメラで観察することにより、その形状形成過程を可視化し、原因の解明やプロセスパラメータの最適化などを行うことができる。

他にも、レーザー溶融中の合金内部の X 線計測結果²²⁾や金属のレーザープロセス中の熱放射計測の研究事例²³⁾がある。

3.2 非熱的プロセスへの利用事例

2.2.2でも述べた通り、非熱的プロセスの場合、フェムト秒からピコ秒の時間領域の現象が重要であり、その時間領域の高速現象を計測するには、より高い時間分解能が必要である。そのためには、短パルスレーザーでプローブする、ポンプ・プローブ計測が最適となる。ポンプ・プローブ計測とは、ポンプ(今回の場合はプロセス用レーザー)が照射された後、特定の遅延時間を付けて短パルスレーザーをプローブとして照射し、そのプローブの変化をとらえるものである(図8)。前述の通り、時間分解能は、プローブのパルス幅に対応するため、フェムト秒レーザーを用いることで、フェムト秒からピコ秒の時間領域の超高速現象を測定できる。私はこれまで、ポンプ・プローブ計測を用いて超短パルスレーザープロセスのプロセス現象を計測した事例があり、物質表面の自由電子密度の増加など超高速現象を高時間分解計測に成功した²⁴⁾²⁶⁾。この事例も含め、ポンプ・プローブ計測はプロセス現象のメカニズム解明を目的とした研究で利用されることが多い。

4 レーザープロセスのリアルタイム計測技術の将来展望と期待

本節において、レーザープロセスのリアルタイム計測技術の将来展望と期待について議論する。

表1において、現状のリアルタイム計測技術は二つ大別されることが分かった。一つがポンプ・プローブ計測より上部の項目で、測定のためにプローブ(例えば、高速カメラの場合は照明光、X線計測の場合はX線、ポンプ・プローブ計測の場合はパルスレーザー)を用いているものである。もう一つが熱放射計測より下部の項目で、そのようなプローブを用いていないものである。このプローブの有無によって、観察対象・現象にも傾向があり、プローブ有りの計測の場合は表面・内部形状、プローブ無しの場合には入熱量になる。これらの分類からリアルタイム計測技術において、この「表面・内部

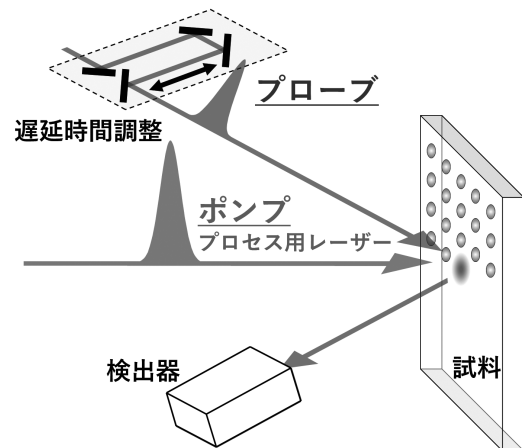


図8: ポンプ・プローブ計測手法の一例

形状」と「入熱量」が重要な計測対象であることがわかる。

前章の3.2でも説明した通り、レーザープロセスの高速現象のリアルタイム計測には、ポンプ・プローブ計測技術が適している。しかし、前述した通り、現状はレーザープロセスのメカニズム解明を目的としたものが多い。今後、レーザー加工機などの実機への実装を想定した、プロセス品質(特に「表面・内部形状」と「入熱量」)の評価や検査を可能にするリアルタイム計測技術の研究開発が、ますます重要になると予想される。

また、金属材料などをプロセス対象とした場合、その内部状態を観察したいというニーズは非常に高い。例えば、レーザー溶接中に発生するボイドの観察である。ただし、金属材料の場合、先程のポンプ・プローブ計測で使用するレーザーは基本的に透過せず、内部状態を観察するのは困難である。そこで重要となるのが、X線計測技術である。X線計測は、金属材料の内部を非破壊で直接イメージングできる唯一の技術である。現状、X線を用いて高速計測を行う場合には放射光を利用しているが、放射光は大型施設であるため、例えば生産ラインへのリアルタイム検査技術としては適していない。リアルタイム計測技術として利用するには、高出力かつ短パルスの小型X線源やより効率的なX線イメージング検出器の開発が重要となる。

上記で記載したリアルタイム計測技術は、それぞれの優位性を有するが、レーザープロセスは複雑な物理現象が生じており、一つの計測手法で網羅的に捉えるのは困難である。このような複雑な物理現象を捉えるためには、複数の計測技術を併せた複合計測技術の開発が必要となる。例えば、ポンプ・プローブ計測とX線など、表1で記載した技術を併せることで、より多面的に現象を捉

えることができる。また、その複合データ解析に対して、AI解析を用いることで、特徴量の抽出などから測定コストの削減や高速化が見込まれる。今後これらの技術を併せることで、複合リアルタイム計測技術を用いたリアルタイム検査技術の実用化も期待される。

5 まとめ

本報告では、レーザープロセスにおいて検査工程短縮の鍵となるリアルタイム計測技術について調査した。まず、要素技術となるレーザーとレーザープロセスに関する基礎的知識を簡単にまとめた。そして、現在使用されているレーザープロセスのリアルタイム計測技術についてまとめた。その中で、熱的プロセスおよび非熱的プロセスへの利用事例を紹介した。今後、レーザープロセスのリアルタイム計測に向けて、ポンプ・プローブ計測技術の活用やX線計測技術の活用、それらの計測技術を併せた複合計測技術が重要であることがわかった。将来的には、X線・レーザー等の先端量子ビームを複合活用したリアルタイム検査技術を実用化させ、製造・材料などの産業・科学の発展に貢献したい。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、加藤英俊研究グループ長、佐藤大輔主任研究員、小川博嗣主任研究員、黒田隆之助ラボチーム長に多くのご指導をいただきました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京大学 物性研究所, DUVレーザーで半導体基板に世界最小の穴あけ加工を実現—4法人で半導体後工程技術を開発. <https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=23292>, accessed 28 January 2025.
- 2) TRUMPF, Producing medical products with lasers. https://www.trumpf.com/en_INT/solutions/industries/medical-technology/, accessed 28 January 2025.
- 3) Coherent, Display Manufacturing. <https://www.coherent.com/industrial/displays>, accessed 28 January 2025.
- 4) アマダ微細溶接事業部, エンジン部品 | レーザー溶接 | 焼き入れ. <https://www.awt.amada.co.jp/ja/whoweare/laserweldingresistanceweldingapplicationsindustriesnewtechnologies/industry/car/engineparts/>, accessed 28 January 2025.
- 5) IPG Photonics Corporation, I. P. G. Laser Welding. <https://www.ipgphotonics.com/solutions/laser-materials-processing/laser-welding>, accessed 28 January 2025.
- 6) 鳥越功. レーザ加工学会誌, 28, 77-81 (2021).
- 7) Panasonic, お役立ち資料 - レーザ溶接システム - 生産設備ソリューション - 事業内容 - パナソニック プロダクションエンジニアリング株式会社. <https://www.panasonic.com/jp/company/ppe/jigyolaserwelding/download.html>, accessed 28 January 2025.
- 8) Y. Kobayashi, T. Takahashi, T. Nakazato, H. Sakurai, H. Tamaru, K. L. Ishikawa, K. Sakaue, and S. Tani, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 27, 1-8 (2021).
- 9) 山下真司. 光ファイバ通信・計測のための光エレクトロニクス. 株式会社サイエンス社, (2022).
- 10) ヤリイヴ - イエー 光エレクトロニクス 基礎編 原書 6版. 丸善出版, (2010).
- 11) ヤリイヴ - イエー 光エレクトロニクス 展開編 原書 6版. 丸善出版, (2014).
- 12) レーザーハンドブック 第2版. (2005).
- 13) W. Nagourney, Quantum Electronics for Atomic Physics and Telecommunication - Second Edition. Oxford University Press. (2014).
- 14) 小柴裕也. 早稲田大学 博士論文, (2022).
- 15) 光響, kimura-h. パルス発振 - 直接変調法, 外部変調法, Qスイッチ法, モード同期法. <https://www.symphotony.com/products/ultrashort/ultrashortmenu/pulse3/>, accessed 28 February 2025.
- 16) D. Wu, P. Zhang, Z. Yu, Y. Gao, H. Zhang, H. Chen, S. Chen, and Y. T. Tian. Journal of Manufacturing Processes, 75, 767-791 (2022).
- 17) R. McCann, M. A. Obeidi, C. Hughes, É. McCarthy, D. S. Egan, R. K. Vijayaraghavan, A. M. Joshi, V. Acinas Garzon, D. P. Dowling, P. J. McNally, and D. Brabazon. Additive Manufacturing, 45, 102058 (2021).
- 18) M. Yao, J. Sheng, F. Kong, and W. Tong. Optics & Laser Technology, 177, 111074 (2024).
- 19) Y. Wan, S. Tata, O. Seemann, E. Y. Levine, E. Kroupp, and V. Malka. Science Advances 10, eadj3595 (2024).
- 20) 株式会社ノビテック, レーザー溶接可視化解析 ハイスピードカメラ「Phantom ×可視化照明」. <https://www.nobby-tech.co.jp/welding/visible>, accessed 28 February 2025.
- 21) 株式会社ノビテック, 銅端子のヘアピンレーザー溶接のハイスピード可視化. <https://www.nobby-tech.co.jp/>

- media/welding/welding_casestudy/CopperWelding_VEO1310, accessed 28 February 2025.
- 22) Z. Ren, L. Gao, S. J. Clark, K. Fezzaa, P. Shevchenko, A. Choi, W. Everhart, A. D. Rollett, L. Chen, and T. Sun. *Science* 379, 89-94 (2023).
- 23) R. Dai, A. Cohen, T. Stoll, K. Wudy, and F. Kize. *Measurement* 242, 115896 (2025).
- 24) D. Satoh, T. Shibuya, E. Terasawa, Y. Moriai, H. Ogawa, M. Tanaka, Y. Kobayashi, and R. Kuroda. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 126, 1-8 (2020).
- 25) E. Terasawa, D. Satoh, T. Shibuya, Y. Moriai, H. Ogawa, M. Tanaka, K. Sakaue, M. Washio, Y. Kobayashi, and R. Kuroda. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 16, 194-198 (2021).
- 26) E. Terasawa, D. Satoh, S. Maru, T. Shibuya, Y. Moriai, H. Ogawa, M. Tanaka, K. Sakaue, M. Washio, Y. Kobayashi, and R. Kuroda. *Optics Letters* 47, 3728 (2022).

