

# CW レーザー加工による金属状態の研究

米田研究室 山本 拓磨

2019年3月8日

## 1 序論

レーザーは集光させることで、簡単に高エネルギー密度状態を実現でき、産業分野では精密加工から厚板の切断などが行われている。特に、レーザーが高出力化され、数 10 kW レベルまで達した今、数 100 mm を超える鋼材の切断・溶接が行われるようになってきた。[1] しかし、単純にレーザーのプラズマ中の電子臨界密度や溶融金属の光学屈折率を考えると、レーザー光が加工材料内部まで透過的に入射することは不可能であり、100 mm を超える加工時の切断部の金属状態は、その流体的なダイナミクスも含め未だ詳細には解明されていない。[2] 今後レーザー加工は、より付加価値の高い加工法に向かっていくと言われているが、そのためには加工部金属状態のリアルタイムな計測が要求されており、その手法の開発要求も高い。これら計測としてのプローブとしては、100 keV を超える X 線、中性子ビーム、超音波ビームなどが必要となる。これらハード X 線や中性子ビームは、現在 SPring-8 や JPARC などの施設が利用できるが、このような施設で高出力レーザー加工部を試験できるシステムはない。そこで本研究では、高出力レーザー加工部の金属状態の詳細計測を大型ビーム施設のユーザーハッチ内で行うシステムを開発する。数 100 W のレーザー加工を仮定すると、その融解点の速度は数 mm/s となり、加工点は高速度で移動して行ってしまう。一方、高エネルギー光子ビームなどは、観測系も含め、空間の 1 点で観測をする必要がある。このため、高強度レーザーの加工点が空間に固定される加工模擬システムを作る必要がある。実際に SPring-8 など非弾性散乱計測を統計よく行うためには、1 点のデータ取得に 30 分程度の時間を要するが、加工速度を考えると数 10 m の加工部を用意する必要がある。そこで本研究では、円筒形状の加工試料を回転、軸方向に移動させることにより、100 mmφ、500 mm 程度の試料サンプルで、この状態を維持することを目指した。加工部の観測に要求される空間分解能は、10 μm 程度であり、加工点の位置制御も高精度が要求される。そこで、レーザーによる照射位置をリアルタイムで計測し、それを試料の位置制御システムにフィードバックさせるシステムを構築した。

## 2 空間分解能に対する要求

レーザー加工において、その加工部は少なく見積もっても金属の融解温度にまで達する。具体的には、一般的なステンレス鋼 SUS304 においては 1000~1500°C といたった数 1000°C オーダーの温度が、レーザー加工時には 1ms 以内といった極めて短時間で変動する。[4] そのため、熱膨張がもたらす観測系の空間分解能への影響は推敲する必要がある。そこで、熱膨張の空間分解能に対する影響を推算するため、モデル化を行う。熱拡散率を  $\alpha$ 、温度を  $T$  と置くと、1次元空間における熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

によって示され、境界条件を設定することで、熱伝導現象を理解することができる。また、熱拡散率は

$$\lambda = \alpha \rho c \quad (2.2)$$

の関係式を満たすことより、レーザー照射による加工点を 50 μm とし設定した場合、図 2.1 のようなレーザー照射モデルを考えることができる。

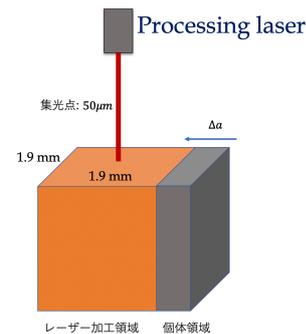


図 2.1 レーザー照射モデル

図 2.1 のようなレーザー照射による拡散が一辺  $a$  の正方形に拡散するモデルでは、レーザー出力を  $P$ 、レーザー加工領域に流入してくる固体領域の速度を  $\Delta a$ 、溶け込み深さを  $L$  とすると、

$$P = a \times \Delta a \times L \times \rho \times c \quad (2.3)$$

となる。これらより、レーザー加工による出力別の溶け込み深さと固体流入速度の関係性を求めると図 2.2 に示す通りとなる。

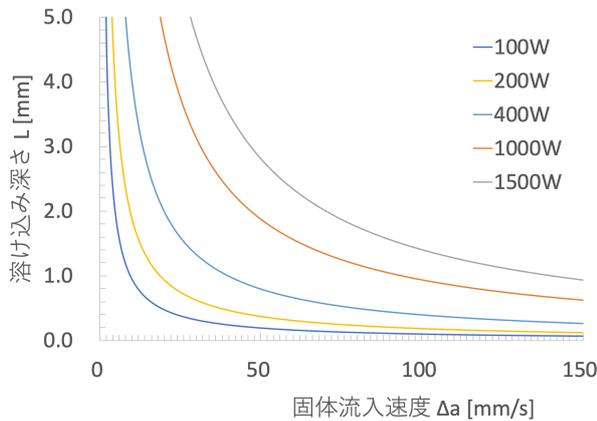


図 2.2 溶け込み深さと固体流入速度の相関性

例えば、レーザー出力が 400 W で試料の溶け込み深さ 1 mm を得るためには、40 mm/s の掃引速度で加工点に固体金属が流入する必要があるとわかる。

今、上記の条件下で熱膨張を考える。図 2.1 のモデルでは直方体を考えたが、実際にはターゲットは薄肉円筒形状である。そのため、図 2.3 のような薄肉円筒形状モデルを考える。



図 2.3 薄肉円筒形状モデル

このようなモデルを考慮する場合、熱膨張による変化量を  $\Delta L[m]$ 、試料の融解温度を  $T_2$ 、外部温度を  $T_1$ 、加熱領域を  $L[m]$  と仮定すると、

$$\Delta L = \alpha(T_2 - T_1)L \quad (2.4)$$

の関係式が導け、今回の条件下では半径で  $8.7 \mu\text{m}$ 、つまり直径方向には  $17.4 \mu\text{m}$  の熱膨張が考えられる。そのため、この熱膨張の影響が円筒の加工精度から来る真円とのずれに積算される形で制御に影響してくることとなる。この結果から熱膨張の影響を打ち消すためには空間分解能  $17.4 \mu\text{m}$  が要求されることとなる。

### 3 制御系と観測系および命令の伝達方式について

#### 3.1 制御系と観測系

制御系の概要は図 3.1,3.2 の通り。

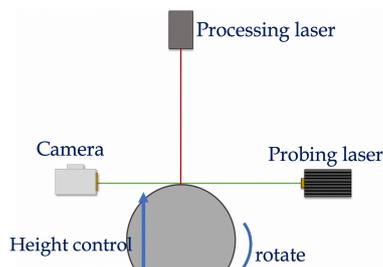


図 3.1 制御系と観測系 (断面)

プローブレーザーの対して加工用のレーザーを直角に配置し、加工部が CCD カメラによって観測できる用に設定した。また、円筒試料を回転させ、高さ方向に制御できる用にしている。

以上の要求を踏まえた上で全体の系の俯瞰図を図 3.2 に示す。

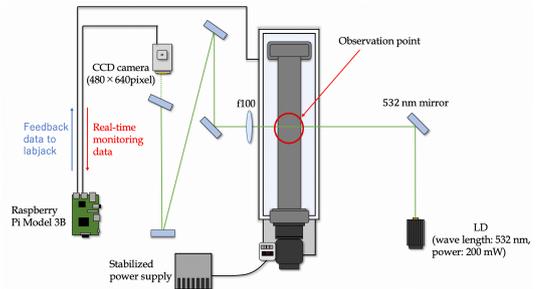


図 3.2 制御系と観測系 (俯瞰)

円筒を回転させるために DC モーターに接続し、回転速度を可変することで実効的な掃引速度を可変にすることでどのような溶け込み深さにも対応できるようにしている。また、高さ方向の制御を行うために、CCD カメラから取得した画像を解析し、解析したデータを元に命令を回転試料の下部に配置した電動 Z 軸ステージによって高さ方向の制御を可能にしている。

#### 3.2 通信方式

本研究では、Z 軸ステージの内部構成に関しての公式なマニュアルが無く、ブラックボックスと化していたため信号の伝送経路を解析した。

コンピュータと Z 軸ステージ間でのシリアル通信は USB を用いて行った。まず、コンピュータ上にて、python3.6 によって自作プログラムを組み、条件によって実行する命令が変更されるようにした。その命令は Little Endian の byte 文字列であり、それが USB を介して送信される。送信されると、Z 軸ステージが何かしらの挙動や返り値を示し、そのレスポンスの結果をコンピュータが受信し、解析・フィードバックシステムの改善を行うという流れで行った。その結果、信号の伝送経路は図 3.3 の通りになることが判明した。なお、図中の FT232BM はワンチップ USB-シリアル変換インターフェースの FT232BM(Future Technology Devices International Ltd.) のことである。

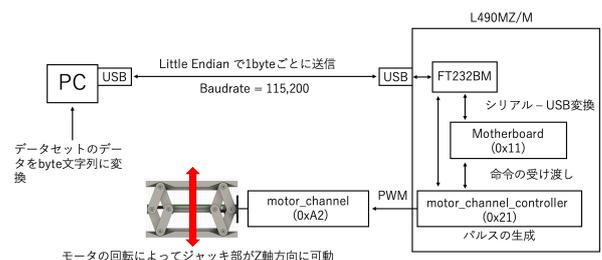


図 3.3 信号の伝送経路

図 3.3 で示した伝送経路を意識した上で、通信遅延を意

識したプログラムの作成とその最適化を行った。

### 3.3 画像解析

画像データを2値化する際、またフレーム内に現在位置の可視化フレームを作成する際には、OpenCV (Open Source Computer Vision Library) と呼ばれる Intel の開発したオープンソースのライブラリを使用した。本研究執筆当時使用したバージョンは 2.4.13.6 となる。実際 CCD カメラ (MTV-6368, MINTRON Inc.) を用いてキャプチャした画像を2値化した畳み込みをかける前に、2値化した画像をプログラムで処理ができる形に変換する必要があった。そのため、2値化した画像データから明度によってある閾値を設けることでバイナリに落とし込み、配列に保存した。実際の環境では CCD カメラの1フレームは  $640 \times 480$  pixel であったので、配列としては 640 列 480 行の配列として処理した。その後、図??のような配列の各要素を行方向に加算して、 $640 \times 480$  の2次元配列を  $1 \times 480$  の1次元配列として畳み込みをかけた。プログラム内で処理した1次元配列に対してある閾値よりも大きな場合と小さな場合でさらに2値化をかけることで、回転体とレーザー光の境界面を判定し、制御することで回転体の位置の特定とその制御を可能にした。

さらにその後、プログラム内部で回転体の位置を判定し、判定位置によって Z 軸ステージの加速度と速度を可変に切り替える構成を構築した。例えば、回転体が画像フレームの中心位置付近にある時には加速度を上げ、移動速度を下げることで、フィードバックとしての応答性能は維持したまま慣性の影響を抑えることで、微細な運動を可能にした。

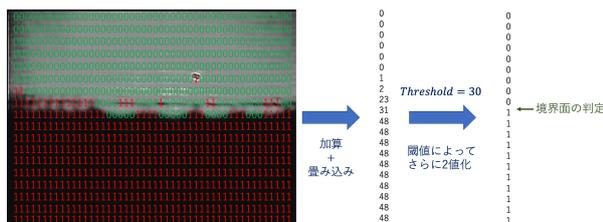


図 3.4 プログラム内の処理の例

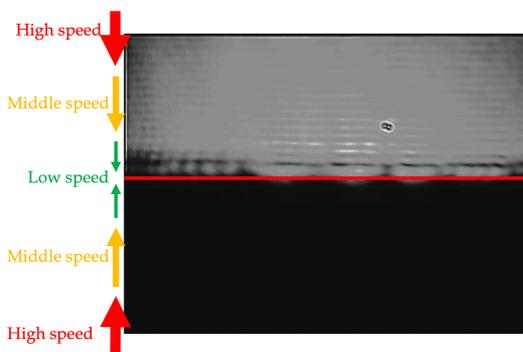


図 3.5 速度・加速度可変システム

以上より、画像解析によって取得した画像データを2値化させ、配列に変換し、それをコンボリューションするこ

とで、現在位置を特定部位に対象を合わせる必要が無く、フレーム全体としての平均をとった中心位置の判別に成功した。さらに副次的に、加工部以外の領域に対しても画像解析をかけ、平均化しているため、最大  $128\mu\text{m}$  の大きさのデブリ等、イレギュラーな要素を排除して境界面の判定ができることが明らかになった。

## 4 フィードバック制御の結果

### 4.1 試料静止状態での制御結果

試料静止状態での制御結果を図 4.1 に示す。

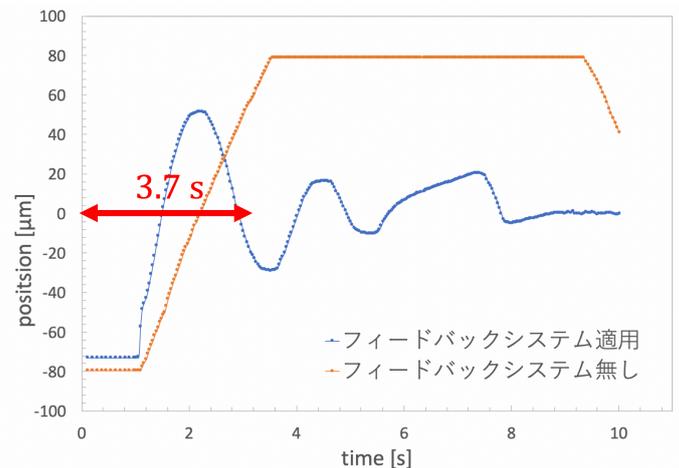


図 4.1 試料静止状態での制御結果

図 4.1 より、高さ方向制御フィードバックシステムに有用性があることが明らかになった。回転体がカメラのフレームに収まる範囲は  $\pm 240$  pixel であるので、フィードバックシステムを適用していない場合には画面外にまで回転体の揺動が及ぶのに対して、フィードバックシステムを採用した場合には、画面内に回転体の境界線が常に収まり続けた。初速に関しても、1 s 付近について、回転体の揺動の微細な加速度を検知し、事前に逆方向に回転体の揺動を超える速度と加速度で、ラボジャッキを振ることができていることが確認された。また、9 s 付近においては、フィードバックシステムによって  $\pm 2$  pixel  $\approx 1.3 \mu\text{m}$  の精度で固定されている。この地点位においては、フィードバックのない場合に比べて、少なくとも  $78.7 \mu\text{m}$  の制動が効いていることとなり、フィードバックシステムの有用性が確認された。しかし、回転試料が空間分解能の要求値に達するまでには 3.7 s もの時間がかかっており、フィードバック制御に対して大きな応答遅延が発生していることが判明した。

### 4.2 速度加速度分割制御

前節での、高さ方向制御フィードバックシステムを適用した結果、制御のアンダーシュート・オーバーシュートの安定化までに 3.7 s の時間を有するといった問題が発生した。そこで、本節では、速度および加速度の安定化までの時間を短縮するため、また、制御について、回転体の揺動に対する応答性をよりあげるために、取得した画像に対し

て位置判定を行い、回転体の位置に対して速度・加速度を可変に変速するシステムを考案した。変速回数を変更し、比較したデータを図 4.2 において示す。

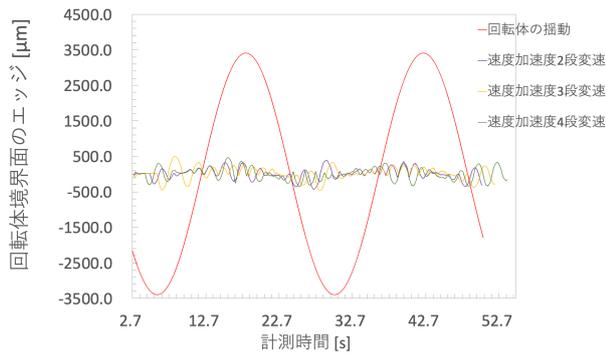


図 4.2 速度・加速度可変システムの適用

図 4.2 より、制御後の揺動を計測すると、平均値として揺動が最小に抑えられた者は 3 段階変速を行ったシステムであった。具体的には、フィードバック無しの場合の回転体の揺動が上方向に 3.3 mm、下方向に 4.2 mm の揺動であった。それに対して、速度加速度を 3 段階変速させたシステムでは、上方向に 54.1  $\mu\text{m}$ 、下方向に 96.6  $\mu\text{m}$  と各々の方向に対して 1/60 倍と 1/43 倍の制御が実現した。

なお、制御が上方向と下方向について制御制度が約 2 倍違っているのは、回転体のみで質量が 3 kg あるため、そのとき、下方向には Z 軸ステージに 29.4 N の力が掛かり続けていることになるため、Z 軸ステージの慣性力が上方向の制御に対して大きくなってしまいうためであると考えられる。

次に、速度加速度変速システムにおいて、Z 軸ステージの完成によるオーバーシュート、アンダーシュートの制御について論点を進める。3 段階変速システムにおいて、図 4.3 において任意の 3 秒間の制御に着眼する。

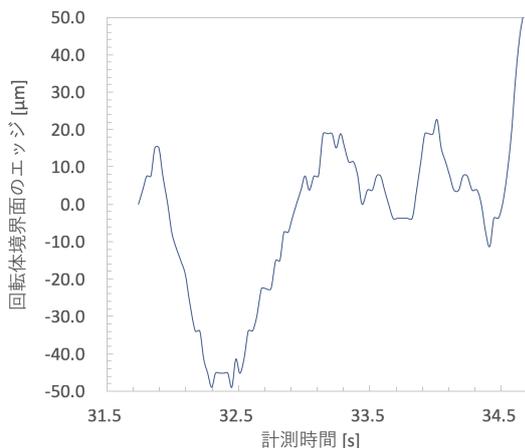


図 4.3 変速システムにおけるオーバーシュート・アンダーシュート

図 4.3 より、図 4.1 にも観測されていた回転体のオーバーシュートとアンダーシュートが観測されるが、それが目標値の空間分解能 20  $\mu\text{m}$  に達するまで、0.5 s で到達していることが確認された。そのため、速度加速度変速シ

テムを用いた場合、オーバーシュートアンダーシュートの抑制効果が確認された。

## 5 まとめと今後の展望

長時間・長距離加工面を安定して測定できるよう、高さ方向の制御系は Raspberry Pi 3 Model B をプログラム動作兼通信用マイコンとして使用し、観測系から取得した映像を元に画像解析を行い 2 値化した後に、配列に組み込み、行方向に畳み込みをかけ、設けた閾値によって再び 2 値化処理をかけることにより回転体の境界線をエッジとして検出することに成功した。さらに、画像解析を行った結果として得られた配列を元に、約 10 ms 毎に回転体の現在位置を取得し、常に回転体のエッジが画像の中心方向に向かう命令を、回転体のエッジ位置によって速度・加速度のパラメータも任意に変換しながら全てが自動的にラボジャッキに送信され制御されるシステムを高さ方向制御フィードバックシステムとして開発した。熱膨張モデルからレーザー加工における熱膨張の空間分解能に対する影響は約 20  $\mu\text{m}$  だとわかった。下方向と上方向についてそれぞれ 97  $\mu\text{m}$  と 54  $\mu\text{m}$  の範囲で高さ方向の位置制御を可能とした。以上の結果からフィードバックシステムは外部要因に対しても内部要因に対しても振動抑制に有効な手立てであるということが評価される。今後、速度・加速度を調整し目標値である空間分解能 20  $\mu\text{m}$  を達成した上で、実際にレーザーを照射し、金属状態の詳細観測を行う。

## 参考文献

- [1] 片山 聖二, "レーザー加工の現状と展開", 生産と技術 第 67 巻 第 4 号 (2015)
- [2] 米田 仁紀, "Warm Dense Matter 物性", Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81, Suppl.2005
- [3] Hitoki YONEDA and Shigeaki NISHIO, "Compton Scattering Measurement to Detect Momentum Distribution of Electrons in Warm Dense Matter", Plasma and Fusion Research, Volume 12(2017)
- [4] Mingjun Zhang, Zheng Zhang, "Analysis of mechanisms of underfill in full penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser", Optics and laser Technology 98, 97-105 (2018)
- [5] Cang Zhao, Kamel Fezzaa, "Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction", SCIENTIFIC REPORTS (2017)