

レーザー加工でのリアルタイムモニターの開発

米田研究室 竹内 楓

1. はじめに

レーザー加工は現在幅広い分野で使用されている加工技術である。レーザー切断は高出力のCWレーザーを用いてターゲットを溶かしながら加工を進める熱的プロセスで、レーザー照射によってターゲットを融解し、それをMPaレベルの高圧のアシストガスによって吹き飛ばすことで加工を進める。また、近年のトレンドとして、高強度かつ軽量な新材料の開発が盛んにおこなわれている。特に注目を浴びているのは炭素繊維複合材料 (CFRP) やセラミック基複合材料 (CMC) などの複合材料である。ただし、これらの複合材料は高強度がゆえに難加工材として考えられており、現在使用されているニッケル合金などと比較しても耐熱性が高い。そのため、急激なエネルギーを極小領域に非接触照射できるレーザー加工はこれらの加工を可能にするポテンシャルを大いに秘めており、多数の研究報告がなされている。しかし、レーザー焦点部分は様々な相互作用が複雑に絡み合い、かつそれが時空間的に大きく変化している複雑なプロセスで、その相互作用の変動により、一定のパラメータで切断を続けても品質が一定にならないという問題点がある。それを解決するため、近年のレーザー加工機ではフォトセンサーを取り付け、光量を測定することで加工不良を自動で判別し、レーザーパラメータを適切に変更しながら加工を行っている[1]。しかし、この制御システムは加工不良の原因が分からないことや、近年主流になってきている深層学習による制御システムに採用しにくい。

そこで、本研究ではフォトセンサーのみでなく複数の観測装置を設置することでCWレーザー加工中の多次元データのリアルタイムモニターの開発を行った。具体的には、レーザーヘッドを固定しターゲットを動かしながら加工を行う装置を開発し、その周りにレーザー加工中の内部と外部の温度や原子状態をモニターするための分光システム、加工品質をモニターするためのカメラの設置を多方向に行った。また、フレアの観測のためにシュリーレン光学系も設置した。分光システムはイメージング分光システムを採用し、さらに線スペクトル獲得のための高分散、連続スペクトル獲得のための低分散の分光システムを同時にモニターすることで、どの位置からスペクトルが発生しているのか、どの程度の温度であるか、及び原子状態はどのようなものであるかを同時に観測することができている。品質確認用のカメラについては、切断後の切断表面をモニターし、加工後のスパッタの観察を行っているものと、切断断面をモニターし加工後の切断面の評価を行っているものが搭載されている。

これらのシステムが全て同時に、かつ長時間のデータ取得が可能なリアルタイムモニターの開発を行った。

2. 原理

2.1 新たな観測装置の選択

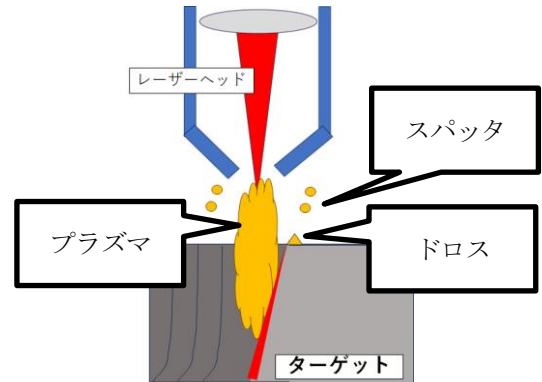


図1 レーザー加工の模式図

図1はレーザー加工の模式図である。ターゲットにレーザーを照射した際に生じるメルトは同軸から吹き付けるアシストガスにより吹き飛ばされる。この際、ターゲットからターゲットプラズマの観測や、火花(スパッタ)やドロスが噴き出てきてしまう。これらの状態はターゲットに到達前のレーザーエネルギーを吸収してしまうことからレーザー加工に悪影響を与えているとされている。そのため、これらをモニターすることは重要である。また、ターゲット内部の温度及び原子エネルギー状態は効率的なレーザー加工をモニターするのに重要である。例えば切断が行われている状態に対して内部温度が高い方と低い方があった場合、高い方は低い方に対して余分にエネルギーを吸収してしまっていると考えられる。そのため、同じ切断状態であれば温度が低い方がより少ないエネルギーで切断が行われていることになり、効率的である。

これらを観測対象とし、モニターの開発を行う。まず、プラズマに対してはシュリーレン法を用いて観測を行う。この手法は屈折率の一次微分をモニターする手法であり、目に見えない空間の密度変化をモニターすることができる。メルト、スパッタはカメラを用いて直接観測を行う。ターゲットから飛び出た原子及び内部の原子状態、温度状態については発光スペクトルを観測することで状態をモニターする。

2.2 発光スペクトル観測

発光には大きく2種類、温度による発光と原子等のエネルギー準位間の遷移による発光がある。温度による発光はプランクの熱放射式で表され、波長域に対して連続スペクトルとなる。エネルギー準位間の遷移による発光はそのエネルギー準位に応じた特定の波長のみの発光となり、その原子状態によりある広がりを持った線スペクトルとなる。このスペクトルは原子に固有であるため、原子や原子状態の同定に使用される。

2.3 フーリエ変換

フーリエ変換は、ある軸で得られた情報をその周期波成分ごとの重ね合わせとして表現し、周波数成分を調べることができる。本研究では得られた光量の時間分解データを用いて時間フーリエ変換、品質モニター用の切断断面情報を空間フーリエ変換し、その周波数成分の特徴量の探索を行った。

3. 装置の作成

3.1 レーザー加工プラットフォームの作成

従来のレーザー加工装置は、加工されるターゲットを固定し、レーザーヘッドを動かしながら加工がおこなわれている。しかし、この方法ではレーザーヘッド外部への観測装置の設置が困難になる。そのため先行研究では非常に簡易的な外部モニターの追加にとどまっていたり、レーザー同軸方向のみのモニターしか行われていなかったりする。またレーザーヘッドやアシストガスをうけない等、実際のレーザー加工とはかけ離れた状態での加工実験が行われている例もある。

そこで、本実験では実機で使用されているレーザーヘッドを用いて同軸で高圧のアシストガスを吹き付けながら、そのヘッドを固定しターゲットを動かすという手法を取った。具体的には、0.3mmのステンレステープをターゲットとし、それを上部にある巻き取り装置を用いて一定速度で巻き取りながら加工を行う。このターゲットは50mの長さがあり、30分以上の長時間加工が可能になる。また、従来はレーザーヘッドに固定された形で存在するファイバーレーザーは本実験では1枚のミラーを介して入社させている。こうすることで、レーザーヘッドに返ってきた光の調査をより詳細に行うことができる。作成したレーザー加工装置を図2に示した。

こうすることにより、レーザーヘッド外部に、レーザー焦点部に焦点を合わせた観測装置の設置を行うことができる。

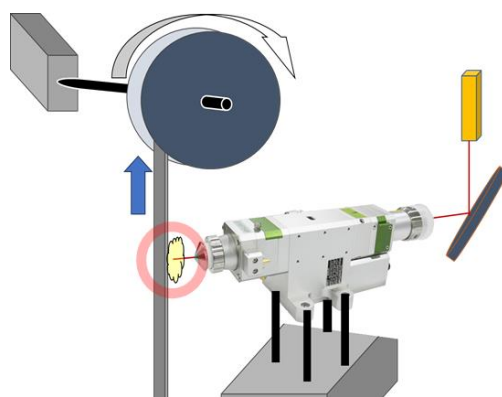


図2 本研究で作成したレーザー加工装置

3.2 切断後のターゲット観測装置の設置

作成したレーザー加工装置に、2つのモニターを用いて切断表面及び切断断面のモニターが可能な観測装置を作成した(図3参照)。一つ目のモニターでは、切断表面のモニターを行っている(図3左側)。このモニターはフォトルミネッセンスのようにターゲットを照らしながらモニターされており、切断部分に付着するドロスやスパッタにより発生する凹凸によって白く光るようになっている。そのため、画像解析により2地価を行うことでドロスやスパッタの量の概算が可能になっている。また、同時に切断幅もモニターを行った。

2つ目のモニターでは切断断面をモニターしている(図3右側)。このモニターは切断後、2つに切断されたターゲットの一方のみをローラーの障害物により上に持ち上げることでその断面を見ることが可能になっている。このモニターで観測した断面データは空間フーリエ変換を行い数値化した。

このように、表面及び断面を加工中にモニターすることが可能になっている。

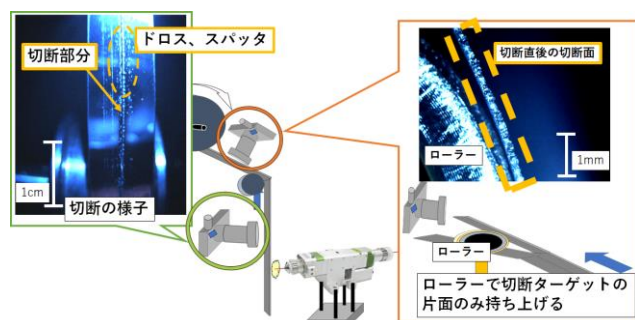


図3 加工装置と品質モニターシステムの設置

3.3 観測装置の設置

作成した加工装置に図4のように多数の光観測システムを設置した。まず、レーザー散乱光を観測するため、1 μ mのバンドパスフィルタ(BP)を装着したフォトセンサーを反射光、散乱光、透過光観測用に大きく3か所に設置した。

また、散乱光、反射光観測方向には、BP600nm、BP800nm、BP900nmを装着したフォトセンサーが搭載

されたフォトセンサーシステムを設置し、レーザー光の波長以外の光の散乱をモニターすることができるシステムを構築した。

また、反射方向及び散乱方向にはイメージング分光器が設置されている。反射方向に設置されているイメージング分光器はレーザー照射部をレーザーヘッド側から観測しており、ターゲット内部の発光観測を行っている。ターゲット内部は高温状態であるため、主に連続スペクトルの観測が行われている。

散乱方向(レーザー軸に垂直方向)に設置されているものは、レーザー加工を側面からモニターしているような形で設置してある。そのため、ターゲットから飛び出ている発光をモニターすることができる。ターゲット外部に飛び出してくる原子の観測を行うことが可能になっている。この部分は比較的低密度であるため線スペクトルの観測が行われる。

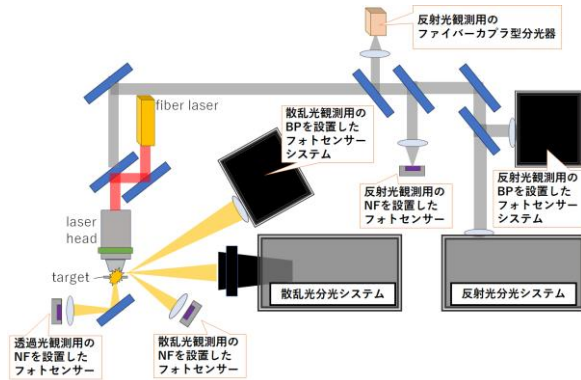


図4 多方向に設置した複数のPDおよび分光器

また、これらの観測装置にさらにシュリーレンの観測装置を立体的に装着した。

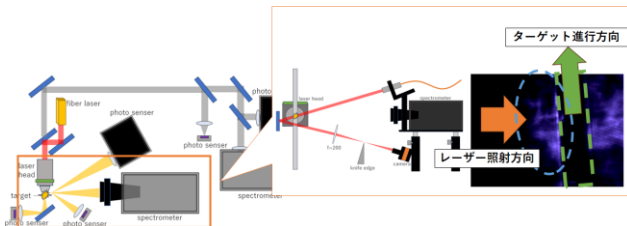


図5 シュリーレン観測装置の設置

これらすべての観測装置は全て同時にモニターできている状態となっている。

3.4 加工実験

表1 実験で使用したパラメータ

レーザー出力/W			
45(切断不可),76,109,139,205,230,272			
レーザー波長	アシストガス	ガス流	加工速度
1070nm	エアー	40L/M	7mm/s

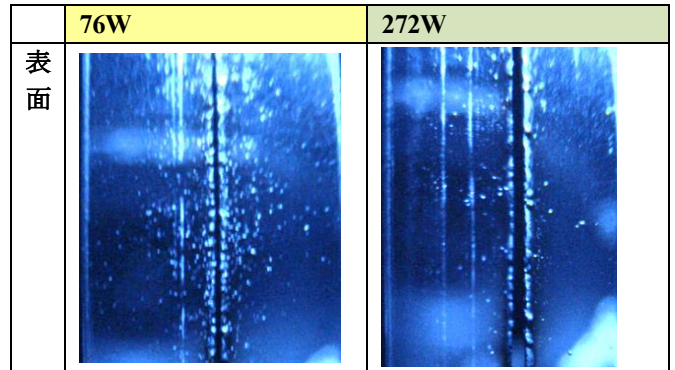
上記パラメータを用いて、各レーザー出力における信号を全て同時に取得した。45W では切断が行われなかった。また76W では切断深さが3mmに到達しなかった部分が存在した。それ以上の出力では切断は100%行われた。45Wを赤、76Wを黄、それ以上の出力を緑で今後のグラフでは表現をしている。

4. 観測結果

4.1 品質モニター結果

まず、表面のモニター結果の一部を表2に掲載する。

表2 表面品質モニター結果



この画像から、まず切断幅のレーザーパワー依存性を調査し図6にまとめた。

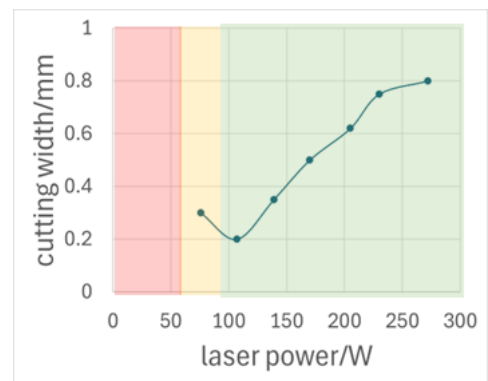


図6 切断幅のレーザー出力依存性

この結果から、レーザーの出力を上昇させると切断幅が上昇するという結果となった。切断幅はそのままターゲット材料のロスにつながるため小さい方が良いとされている。

次に、二値化を用いた表面付着物の観測結果を行い図7に示した。

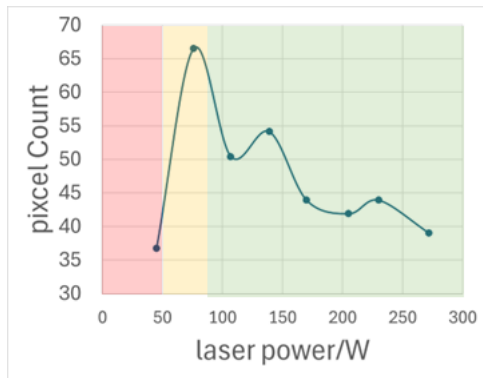


図7 付着物の量のレーザー出力依存性

この結果から、付着物の量はレーザーパワー上昇により減少するという結果となった。付着物の量は少ない方がいいとされている。

この結果から、表面モニターを用いることで、レーザー表面品質及び切断幅というレーザー加工に重要な要素を同時に取得できたこととなる。

続いて、断面モニターの結果及びその断面フーリエ変換結果を表3に示す。

表3 断面品質モニター結果

	76W	272W
断面		
フーリエ変換		

フーリエ変換の結果から特徴的なピークを持つ周波数の強度が減少傾向にあることが分かった。このピーク強度をレーザーパワーごとに図8にまとめた。

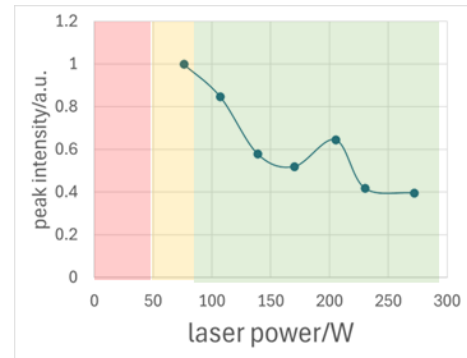


図8 ピーク周波数強度のレーザー出力依存性

この結果から、レーザーパワーを上昇させるとピーク強度が減少傾向にあることが分かる。周波数ピーク強度は断面の凹凸の大きさに対応していることから、この結果からレーザーパワーを上昇させると断面の滑らかさが上昇しているということが分かった。

以上の結果からどちらのモニターも高分解能なモニタリングに成功している。このデータを用いてレーザー出力の最適化を行うとすると、滑らかさ、付着物の量に対して切断幅の結果がトレードオフの関係にあることが分かる。そのため、すべての結果に対して最適値を求めることはできない。どの品質が重要かは生産者が決定し、そこに対しての制御を行うとすると、それぞれのデータに対応した観測装置の設置が必要である。そのため、従来の光量モニターのみではなく、それぞれに対応した観測装置の設置が必要であることが改めて示された。

4.2 分光観測結果

背面反射光を分光観測した結果の一部を図9にまとめた。

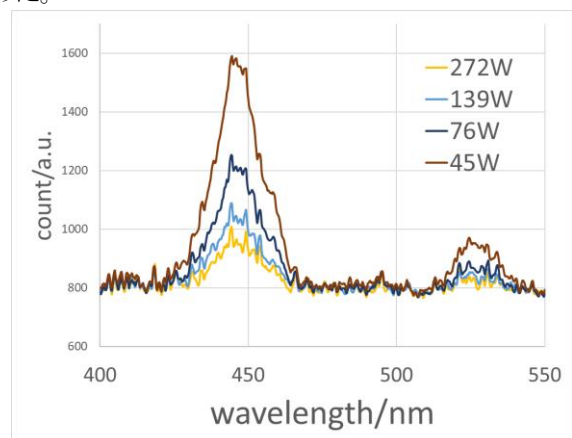
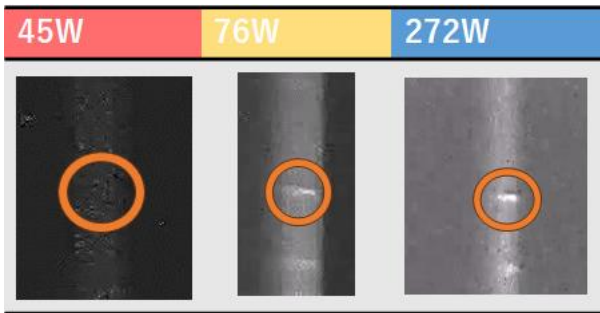


図9 反射光のスペクトルのレーザー出力依存性

この結果から、レーザーパワーを上昇させるとスペクトル強度は減少し、440nm付近の連続スペクトル上に出現している線スペクトルの線幅が上昇していることが分かる。これは、レーザーパワーを上昇させた

ことによりレーザー焦点部に滞在する原子が減ったことを示している。
これと対応した結果が側面から見たスペクトルに現れている。側面から見た鉄原子スペクトルのレーザーパワー依存性について、表4にまとめた。

表4 散乱する鉄原子スペクトルの強度依存性

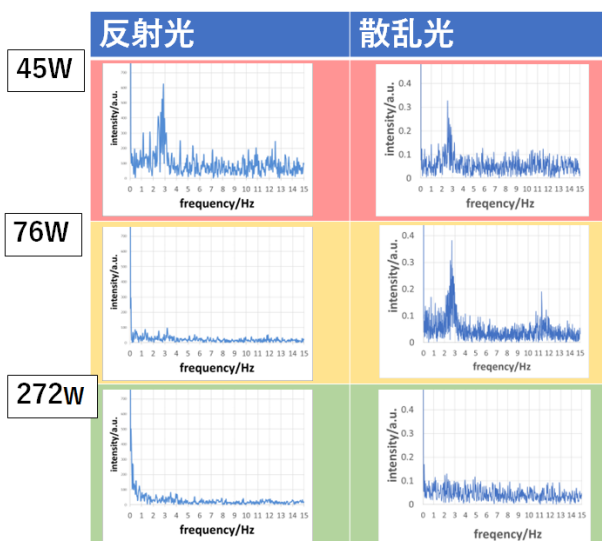


この結果から、レーザーパワーを上昇させていくとスペクトル強度が上昇していることが分かる。これは、前述のターゲット焦点部に滞在していた原子が、より強いレーザーの照射では高エネルギー状態で外部に飛び出していることが分かった。また、飛び出しが観測されたのはターゲット下部からのみであり、ターゲット上部からの観測はされなかった。これはプラズマがターゲットからレーザー照射側に放出されなかったことに近いが、これは本研究のターゲットの薄さでは発生するプラズマの量が少なく、アシストガスによって容易に吹き飛ばされてしまうことに起因すると考える。シュリーレンの観測結果からもプラズマは観測されなかったため、本研究ではプラズマは放出されなかったと考えることができる。

4.3 Fourier 観測結果

観測した光量のフーリエ変換結果は表5の通りである。

表5 反射光及び散乱光のフーリエ変換結果



これらの結果から以下のことが考察される。まず、切

断ができない状態の45Wでは、散乱光及び反射光どちらも2.5Hz付近にスペクトルが確認された。これは切断ができていない状態でターゲットに生じているホールからレーザー側に飛び出てくるメルトやスパッタの放出に関係があるものだと考える。

次に、切断率が100%でない76Wでのデータでは、反射光からはスペクトルが観測されず、散乱光のみ2.5Hzのスペクトル及び11.5Hz付近にも新たなスペクトルが確認された。2.5Hzは前述同様レーザー側への飛び出しによるものだと考える。11.5Hzのピークは、散乱光にのみ生じていることからドロスなどの付着物による加工干渉が起きていることや、クラスタリングと呼ばれる、不完全なエネルギーを持った原子の飛び出しが定期的に起きている可能性を示唆するデータとなっている。

切断率が100%となっている状態ではいずれの出力も同様の結果が確認され、反射及び散乱光はほぼ一定の値をとっていたことからピークの確認はされなかった。

以上から、反射光だけでなく散乱光のモニターによって不完全切断の診断が可能である可能性があることが考えられ、多方向観測の重要性が再確認された。

4.4 相関関係の調査

本研究の最終目標は取得した光量のデータを複合した特徴量の抽出であるが、本研究ではまず各光量のデータを独立に考え、それぞれの光量データと品質のデータの相関を調べた。表6にその一部を掲載している。

表6 加工品質と各種光量の相関

	散乱光量	散乱方向 鉄原子スペクトル強度	反射方向 鉄原子スペクトル強度
切断幅	0.929	-0.643	0.07
付着物の量	-0.263	-0.108	0.40
断面	0.261	-0.071	0.45

	散乱光量 (BP600nm装着)	散乱光量 (BP800nm装着)	散乱光量 (BP900nm装着)
切断幅	0.857	0.857	0.881
付着物の量	-0.731	-0.659	-0.395
断面	-0.595	-0.714	-0.476

それぞれの品質との相関関係についての考察を行う。

・切断幅

切断幅は散乱光量との相関が比較的大きいという結果となった。切断幅はレーザー出力の増加によって増加しており、本実験のようなごく薄いターゲットでは反射光の光量そのまま切断厚さに影響するという結果となった。また、各種BPを装着した散乱光量に関しても相関が強く出現しており、より高温状態の鉄がターゲットから飛び出していると推測される。鉄イオンの強度に関しては大きな相関は現れなかったため、切断幅とイオン化状態に関しては関連が少ないと考え

る。

・付着物の量

付着物の量は全体的に相関が低かったが、BP800nmを装着した散乱光に相関が現れた。山本らの研究によれば [2]、可視域の長波長側で特徴的なスペクトル信号の確認が報告されている。また、石黒らが行った実験 [3] でも、加工不良を起こすパラメータでは 800nm 付近のスペクトルに大きな変化がみられている。この論文によるとアシストガスに含まれる窒素のスペクトルが現れているとのことであるが、詳細な情報は不明である。しかし、アシストガスに関連してスパッタの量が増えていることが考えられ、重要な特徴量であるともいえる。分光データとは非常に相関が低く、スパッタと鉄のイオン化状態について関連は少ないと考える。

・断面の滑らかさ

断面の滑らかさに関しては、散乱光量の BP を装着したフォトセンサーとの相関が若干あり、特に BP800nm を装着したものに強い相関を示した。こちらも前述同様アシストガスと吹き出しに関連した結果だといえる。

いずれの結果も、鉄の分光データに関して強い相関を示すものは見つからなかった。本実験では鉄の中性スペクトルの調査を行ったが、今回の結果から、アシストガスに関連したスペクトルの調査をすることで相関関係の発見可能性があると考えられる。

5. 結果と展望

本研究では、レーザー加工中の特徴量抽出を目的とし、長時間計測可能なレーザー切断プラットフォームの開発を行った。また、そこに従来多く採用されているフォトセンサーだけでなく、その分光スペクトルを多方向から観測、さらに品質のモニターまでもすべてリアルタイムで計測できるシステムの構築に成功した。得られたデータから、切断中、切断不可時に特徴的な信号や周波数成分を反射光、散乱光から獲得することができ、品質との相関も多方向に設置したことで加工の状態とモニターすべき観測対象を結びつけることができた。

加工プラットフォームの周りには散乱光、反射光、透過光を観測するためのフォトセンサーとイメージング分光器を多数設置し、フォトセンサーは特定の波長のみを透過するフィルターを複数用意し、加工に特徴的なデータの抽出を行った。実験結果から、分光器から観測されたデータからは鉄の中性子スペクトルが多数観測された。鉄イオンのスペクトルは観測されなかった。また、そのデータから光の点滅のフーリエ変換を取ると特定の出力時には 2.8Hz と 11.5Hz 付近に

特徴的なスペクトルが現れた。

また、切断品質と散乱光量の相関の結果から、鉄のスペクトルよりも品質との相関の強い発光を示す波長帯を確認できた。

今後の展望としては、より厚いターゲットを用いた加工を行うことを考えている。本実験では薄いステンレスのテープを用いてそれを巻き取る形で加工を行った。より厚いターゲットではこの機構は動かすことができない。そのため、現状の案として、図 10 のように自動で回転する旋盤装置に所望の厚さの空洞筒を固定し、それをさらに 1 軸のステージ上に乗せることで、テープよりも厚い円筒ターゲットをらせん状に連続的に加工できるようになり、品質モニタリング以外のセットアップはそのまま流用できるようなセットアップになっている。そのため、より厚いターゲットでの観測、および新たな品質モニタリングシステムの構築を行いたい。

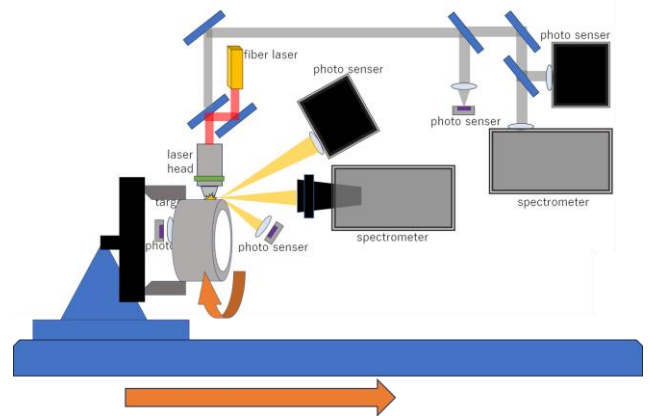


図 10 より厚いターゲットを加工できる加工装置

また、当初の目的である制御システムの構築に向けて、加工装置のフィードバック回路システムの構築が必須となる。それも併せて行い、各種信号を基にした加工システムの構築が求められる。

参考文献

- [1] Hasan Tercan, Toufik Al Khawli, Urs Eppelt, Christian Bscher, Tobias Meisen, Sabina Jeschke, "Improving the laser cutting process design by machine learning techniques", Prod. Eng. Res. Devel. 11:195203(2017 年)
- [2] 山本 拓磨, "令和 2 年度 修士論文 金属レーザー加工におけるその場計測手法の研究", 電気通信大学大学院情報理工学専攻 (2021 年)
- [3] Mizuki Ishiguro, Rui Fukui, Shin'ichi Warisawa, Naoyasu Narita, and Hironobu Miyoshi, "Laser Cutting Defect Recognition Using Conversion of Processing Light Information into Spectrogram Images Spectroscopic Measurements in Multiple Work Surface Conditions and Extraction of Spectral Data Features Based on Processing Principle", Int. J. of Automation Technology Vol.15 No.5 (2021 年)