

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - a > YAGレーザーの開発

小テーマ： 半導体レーザー直接利用

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 瀧口義浩、稲田晴彦

1. はじめに

半導体レーザーを高出力化することで、より高効率のレーザー加工機にすることが可能である。その際の問題は、LD 単体では高輝度を得ることが困難であり、多くの LD を束ねた LD アレーによって高輝度化を達成するしか現状方法がないことであり、それぞれの LD 間のコヒーレンスが低いために、ビームを細く集光し、光の集光密度を上げることがやはり難しい。そこでこれを解決する手段として2つの手法を検討した。まずは、光学的に、LD からのビームを縮小光学系を介して縮小投影することで、光密度を向上させようと考えた。あるいは、本プロジェクトの別サブテーマである金属鏡を特殊形状に加工することで、LD アレーからの光を集光できないか検討を進めた。また、レーザー加工における使い勝手を向上させるためには、ファイバー出力にて利用できることが望ましい。その際のファイバーのコア径を可能な限り小さくすることは、やはり光の集光密度を向上させるためには重要であり、これらの光学系の最適化が不可欠となる。さらに、レーザー加工の高速性を高めるためには、多軸駆動のロボットアームとの接続は有効であり、本研究では、LD を高い光密度で集光することと、これを光ファイバーに導入し、さらに、これをロボットアームに接続して、模擬的なレーザー加工実験まで行なうことが重要な目的とした。これによる本研究の成果が、産業化への道を開くことになる。

2. LD アレーの駆動と集光

図1に示すように、10段×2列のLDバーからなるアレーを導入し、連続400W程度の出力を得た。それぞれのLDバーは、1cmの長さで、厚さが数100ミクロンである。これらが、電極に挟まれて積層されている。中心波長は808nmの近赤外線領域の光であり、1バーあたり20W以上の出力が確保可能である。

このLDアレーを、本試作で開発した電源で駆動することで、高輝度の連続光を得ることができる。この光を集光することにより、プラスチックや木材、あるいは、食材などの比較的柔らかな材料のレーザー加工が可能となる。そこで、この光を集光するには、上記のように2つの手法がある。

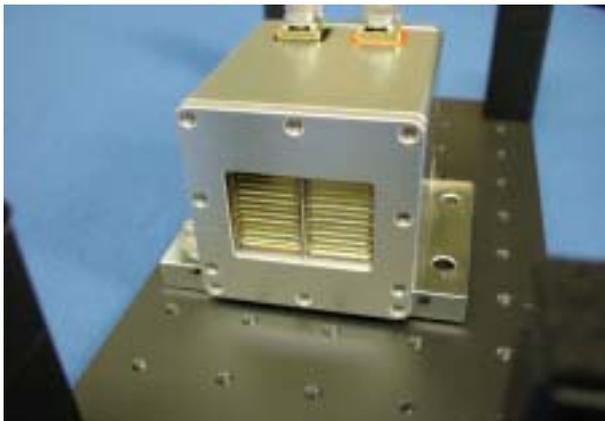


図1 LDアレーの正面写真

幅1cmのLDを10×2個スタックしたモジュールからの400Wに達する808nmの光を用いてLD直接加工を行うことで、小型・高効率のレーザー加工装置を地域産業に提供可能である。

## 2-1. レンズ集光

LD アレーからの光は、個々の LD ではコヒーレントな光ではあるが、全体ではコヒーレントではなく、平面波として扱うことができない。そのため、この光源からの光を集光するには、縮小光学系を用いることで、光の集光が可能となる。図2には、その構成例を示した。この系が

最も単純な光学系であり、長焦点レンズと短焦点レンズの焦点距離の比が縮小倍率となる。LD アレーの出射面の

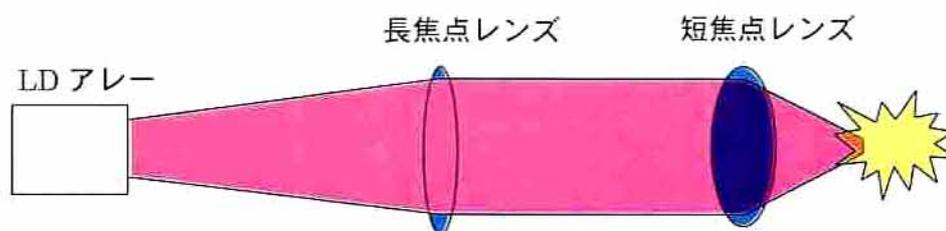


図2 縮小光学系によるLDアレーの光の集光

全体のサイズが、およそ 25mm 四方であるため、これを 1.3mm のサイズまで絞るには、通常の結像レンズ系を用いておよそ 20 : 1 の縮小光学系が必要になる。ここで、1.3mm 角の集光により、30% のロスを見込んで、およそ  $20\text{kW}/\text{cm}^2$  の集光密度を達成できる。この程度の光密度になると、808nm の赤外線を受取る上述の材料の加工が容易に行なえるようになる。

その際の結像ロスは、LD からの光の広がりに対する長焦点レンズの直径によって決められる。本来は LD をレンズの焦点位置に配置した上で、その LD からの光が全て受光できるようなレンズの直径が必要になる。

また、LD からの出力は図3に示すように楕円状のビーム出力になっている。これは、LD の発光面が一方向に薄く、その垂直方向で広がっていることに起因しており、光の回折現象がその根幹にある。よって、薄い発光方向では、回折が大きく、より広がったビームが発生し、垂直方向では、光の広がりが少ない。

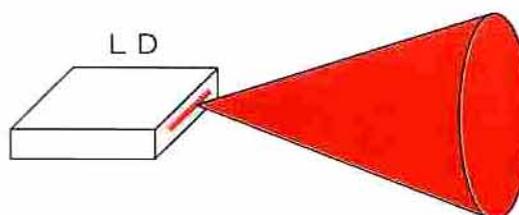


図3 LDからの楕円状出射ビーム形状

そのために、図3に示したような楕円形状の出力となる。よって、アレー状の場合には、これらの楕円形状ビームが多数重なり合ったビームとなる。長焦点レンズの開口数は、このような複雑な LD からの光ビームの結合効率を左右するため、レンズの口径も十分大きくする必要がある。

また、より実用的な応用のためには、個々の LD からのビームをひとつずつ処理するための、マイクロレンズアレーやマイクロミラー、あるいはマイクロプリズムアレーなどを用いる方法も重要ではあるが、本プロジェクトでは、そこまでの詳細検討をすることができていないため、ここではこれ以上触れないこととした。

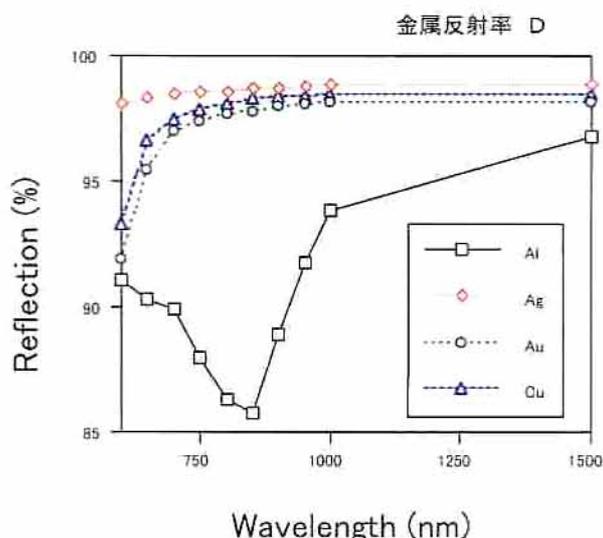


図4 金属の垂直反射率における波長依存性

## 2 - 2 . 金属平面ミラーによる LD の集光

一方、光の集光系として、本プロジェクトのサブテーマである金属鏡の開発において作製された金属円錐導波ミラーの導入によって、LD の高効率集光と、アシストガスの導入などの多機能レーザー加工ヘッドへの応用を進めることも重要であった。

金属は、その反射特性として、図 4 に示したような波長依存性を有していることが分かっている。高い反射率を有するのは、銀がよいと分かるが、コストと化学的な安定性を考慮して、ここでは長波長側には銅を、そして短波長側ではアルミメッキをした材料を用いることとした。本研究において用いる LD の波長が 808nm であるために銅を構造および反射材として用いた。

始めに、銅の平板ミラーを作製し、それを用いたレーザービームの集光実験を行なった。図 5 に示したように、LD からの光を 2 枚の楔形に配置した銅金属ミラーで多重反射をさせて、先端の開口部に導波した。銅板に入射した光は、その反射率と反射角に対応して多重に反射するが、反射回数が増えるに従って、ビームの銅板に入射する角度が増えていく。そのため、ある程度の回数の反射を起こすと、今度は、ビームが入射した方向に戻ってきてしまう。それを考慮して、レーザーの入射角度と、銅板の間の角度を調整して、より多くの光が伝送されるように設置する必要がある。

図 6 には、ヘリウムネオンレーザーを用いて、模擬的な実験を行なった例を示した。ヘリウムネオンのレーザー光をレンズを用いて入射部において直径 1cm 程度まで広げ、それを銅ミラーに導波させた様子である。最終的に、多重反射したビームが射出部から異なる方向に出射しているために、たくさんの並行ビームがスクリーンに投影されている。射出部では、これらの光が全てオーバーラップしているために、入射させた光の 8 割以上が伝送され、厚さ 1mm 程度の射出部に集

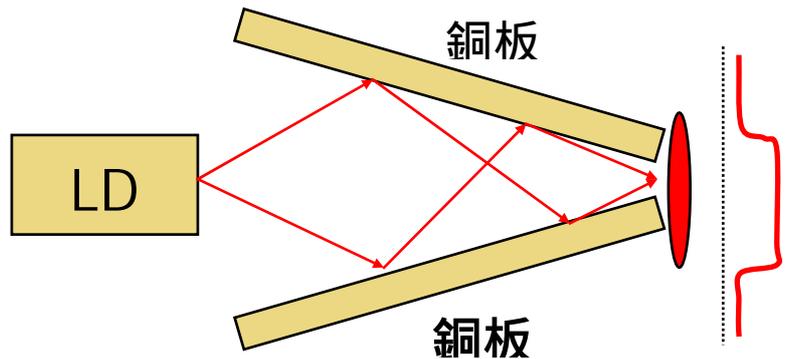


図 5 LD バーからの発散光の銅金属鏡によって集光する際の実験配置例



図 6 ヘリウムネオンレーザーを用いた楔形配置させ銅金属ミラーによる集光実験の様子

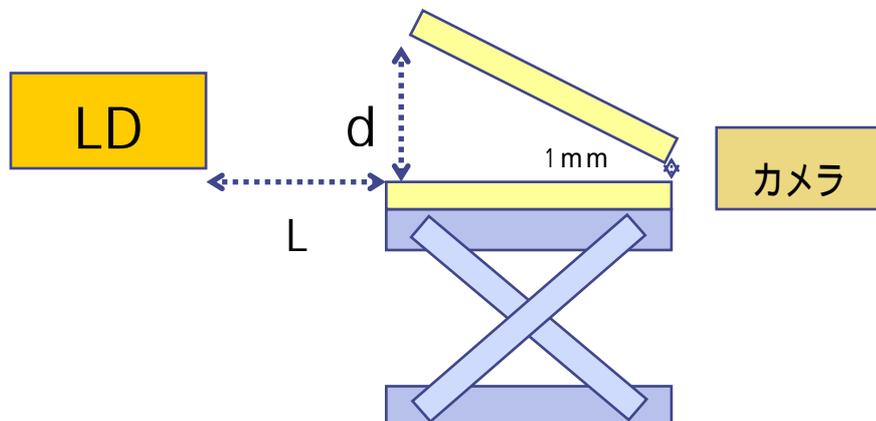


図 7 出射ビーム形状の評価手法の概要

光されていることが分かった。

より詳細に、ビームの伝送性能を評価するために、図7に示したように、CCD カメラを用いて、出射部からのビームの出力形状を計測した。銅板の出射部の広さが1mmとし、入射部の広さDと、LDの相対的位置Lをパラメーターとしてその出力を観測した。

図8には、LDを銅板の入射部に近接させ(L=0)、銅板の入射部の広さDを5mmから15mmまで変えたことにより、出射部からの輝度とプロファイルの変化を示している。水平方向と垂直方向でプロファイルの形状は変化するが、ここでは、水平方向のプロファイ

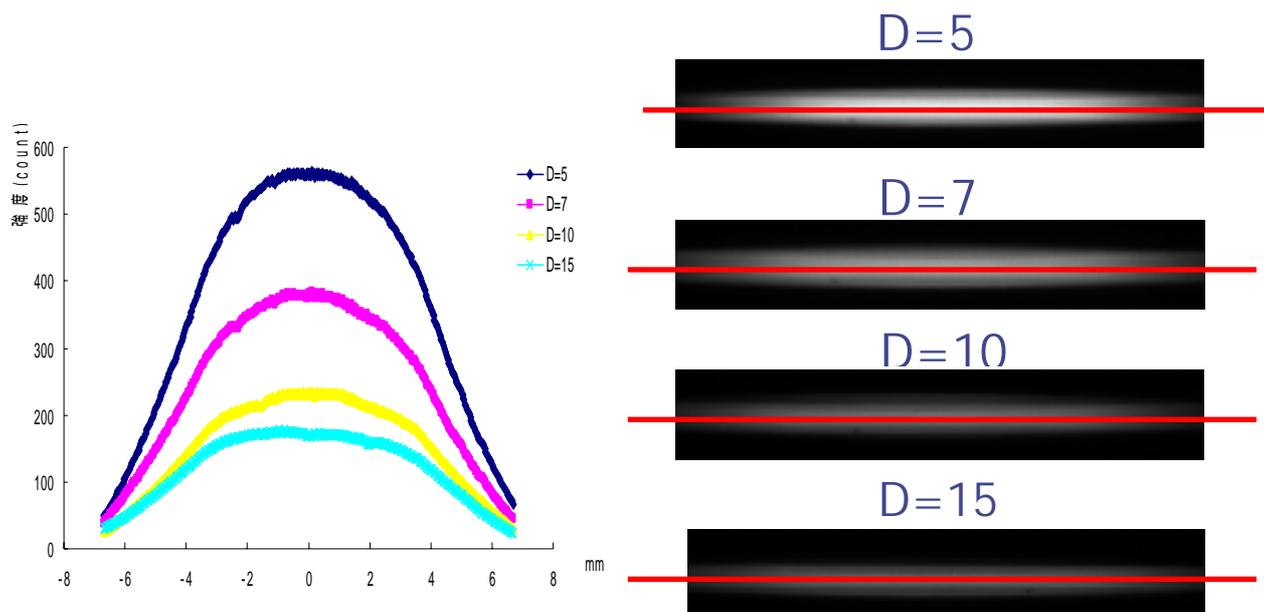


図8 LDを入射口に設置し(L=0)、Dを変えた際の出射ビームパターンとその強度プロファイルの計測例

ルを左の図に示した。このほかに、Lを変えて実験を行なったが、基本的には同じビーム形状を得ることとなった。つまり、楔構造の角度が重要な伝送特性を決めるパラメータとなっている。この結果より、LDアレーからの光を金属平面鏡を用いて均一に集光可能であることがわかった。これを用いれば、レーザーによる直線加工が容易になるものと推測される。

さらに、LD直接による励起のもうひとつ重要な応用として、LD直接による固体レーザーロッドの励起がある。一般には、LDからの光をレーザーロッドに効率良く集光させるために、LDをロッドに近接させ、ロッドの回りを白色散乱体、あるいは金属コートした散乱体を用いて、ロッドを散乱光成分でも励起できるように工夫している。本金属ミラーを用いることで、LDをロッドに近接する必要性がなくなると同時に、より大型のアレーを用いてロッドを強励起することも可能となると考えられる。

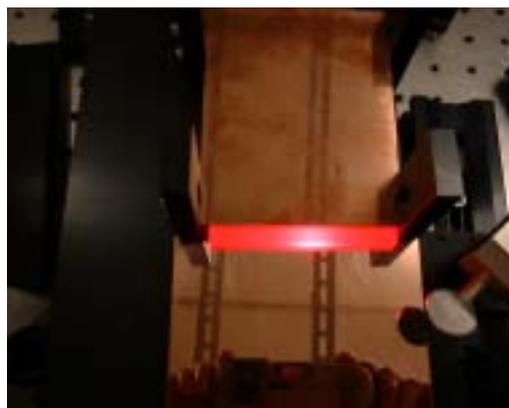


図9 LD励起の銅ミラーによるYAGロッド励起模擬実験例

そこで、図7における配置を用い、出射部の開口を1mmとして、模擬的にレーザーロッドを励起する構成を取らせたのが、図9である。中央部分を強く励起できていることが分かる。この実験では、ビームの照射形状をより明確にし、ロッドがどの程度均一に励起できるのかを確認するのが目的の実験であるため。入射部には、直径を1cm程度に広げたヘリウムネオンレーザーを用いている。これによりロッドの中心に対して比較的均一な励起が可能であることを証明している。LDアレーの出力部の形状を考慮して行なった実験である。

### 2 - 3 . 円錐状ミラーによる LD の集光の試み

次に、上記のような平面ミラーによる集光の試みをさらに進めて、開口径10mmと出射部の開口1mmを目指して金属の円錐ミラーを用いたLDの集光に関して、検討を行った。図6などでは、直径1cmのレーザービームを平面ミラーに導入した訳であるが、これを3次元的に集光させたのが、この円錐状ミラーである。図10には、直径10mmの開口部を有し、出射部が直径1mmの銅でできた円錐ミラーを用いた実験系を示している。長さは10mmであるため、図8における $D = 10$ の場合の集光特性と同じで、これが3次元方向に集光されることになる。では、グリーンレーザーをレンズを用いて一端直径1cmまで広げて、円錐ミラー部に導入し、内部を伝搬した光がスクリーンに同心円状に出力されている様子を示した。

図8における $D = 5$ の状態を、入射径10mmのままで達成するには、円錐ミラーの長さを2倍にする必要がある。さらに集光効率を高めるには、円錐ミラーを3倍の30cmにすることが必要となる。そこで、本研究では、現時点での加工技術の極限であろう長さ30cmで、入射径10mm、出射径1mm程度の円錐ミラーの作製を試みた。

LDを直接集光させるには、この円錐鏡の直前にLDを配置し、円錐の軸を通るようにビームを伝送させることが必要となる。

そこで、図11には、この30cmの円錐ミラーを設置し、その入射部にグリーンレーザーを配置し、このビームの入射角度を自動ステージで変えながら、その結果得られた透過光強度の角度依存性を評価した。出力強度は、ホトダイオードを用い、コンピューターを介して、自動ステージを回転させ、その際の光強度を電圧に変換してデータとして取り込ん

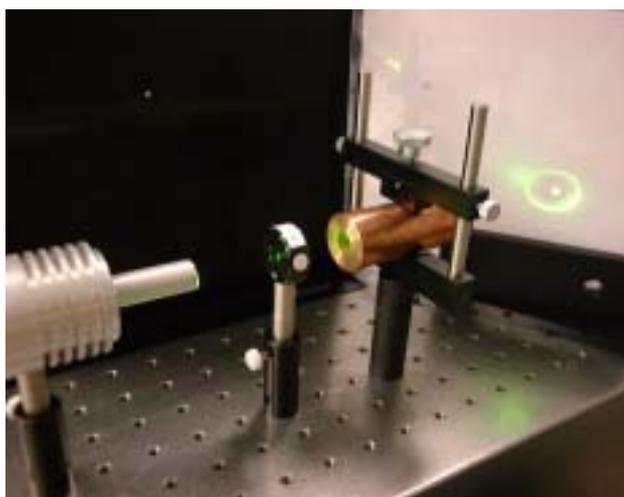


図10 円錐状の銅ミラーを用いた集光実験の例



図11 長さ30cmの円錐ミラーの評価状況の写真

だ。このようにして得られたデータを、10cmの長さで、内部を銀メッキしたものと比較したのが図 12 である。銀のほうが、532nm の緑色の波長での反射特性がよいので、銅の 30cm の円錐ミラーに比較して、多少の透過特性が高くなっている。特に、多重反射成分である角度の大きな領域では、この反射特性の差が顕著に現れている。銅の 30cm 円錐ミラーでは、メインのピークに引き続き、およそ 5 度程度のフレ角のところでは 2 番目の反射ピークが得られている。

いずれにしても、30cm と長い円錐ミラーの試作ではあったが、高い精度で研磨ができており、LD 直のレーザー加工用ヘッドへの応用の可能性があることがわかった。

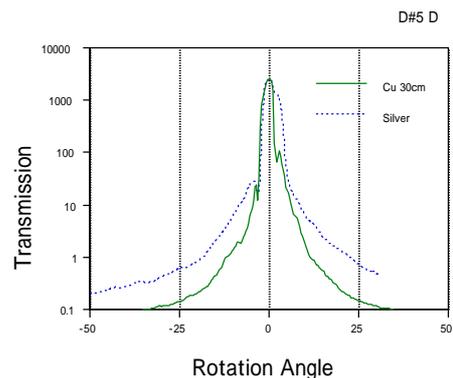


図 12 30cm 円錐ミラーと 10cm 銀メッキ円錐ミラーの伝搬特性

### 3. ロボットアームとの接続

ロボットアームにこのような LD あるいは LD を搭載したヘッドを取り付けることで、LD 直のレーザー加工装置にコンピューター制御での高品位加工の可能性が広がる。さらに、ロボットレーザー加工装置の全体の安定性を増し、かつ作業性を高めるために、光ファイバーを用いて導いたレーザー光を、6 軸駆動の小型ロボットアームと接続することで、3 次元 LD 直接レーザー加工を可能とすべく、基礎実験を進めた。



図 13 6 軸駆動ロボットによるレーザー加工系

高輝度レーザーを、光ファイバーにて伝送し、これをロボットのアームに取り付けた。また、その光の出射点を観測するための CCD カメラも同じアームに取り付けることで、画像処理によるフィードバックを用いた高機能レーザー加工を可能とする。

図 13 には、ロボットアームに光ファイバーと、レーザーの加工状況を確認する CCD カメラを取り付けた状態を示している。基本的なロボット加工システムの形状はこのようになる。あとは、加工材料に応じた波長と輝度のレーザーを光ファイバーに導入することで、任意形状の加工ができるようになる。

ロボットの駆動には、以下に示すような加工試料の形状と加工方法に合わせて、プログラミングをおこなった。

## 加工目的

YAG レーザーや LD 直のレーザー加工装置の大きな特徴であるファイバー伝送を生かして、ロボットアーム先端部にファイバー出射口を図 14 に示したように取り付け、ステンレスの円盤ホルダ上に載せた蓋の 4 個所（図 15 参照）を溶接する為のプログラミングを行った。

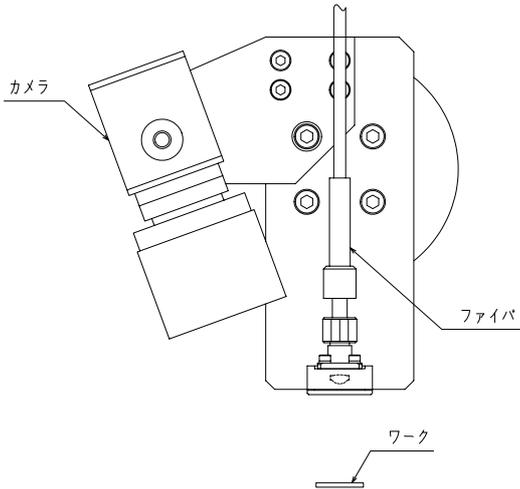


図 14 ロボットアーム先端部取り付け形状

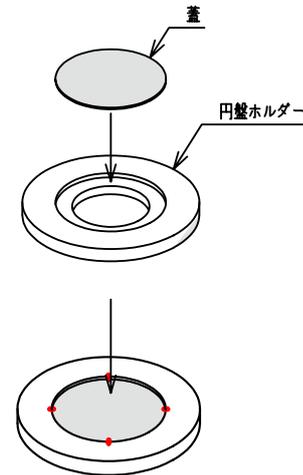


図 15 ワーク（溶接対象物）

## 内容

パレット上に置かれたワーク溶接部の位置は、ロボットの直交座標系を用い、ティーチングユニットにて教示を行った。溶接位置への移動は、動きがわかりやすいよう、円弧補間（MVR 2）を用いた。

### M V R 2

始点（P11）、終点（P12）、参考点（P14）を指定して、始点 終点まで参考点を通らない方向に円弧補間で移動

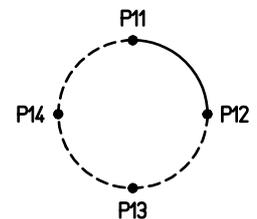


図 16 ワークの補完処理方法

## 基本プログラム

10 MVS P11	現在位置より P 1 1 へ直線補間動作
20 DLY 1.0	動作終了後、1 秒間停止
30 OVRD 25	動作速度を最高速度の 2 5 % に指定
40 MVC P11,P12,P13	P 1 1 を始点・終点とし、通過点上を円周移動（図 16 参照）
50 M_OUT(1)=1 DLY 0.5	外部へ信号出力 0 . 5 秒（レーザー照射開始信号）
60 WAIT M_IN(10)=1	入力信号受け取りまで待機（レーザー照射終了まで）
70 OVRD 100	動作速度を最高速に指定（1 0 0 %）
80 MVR2 P11,P12,P14	始点 P 1 1 から終点 P 1 2 まで円弧補間移動
90 M_OUT(1)=1 DLY 0.5	以下、P 1 4 点溶接まで繰り返し
100 WAIT M_IN(10)=1	

```

110 MVR2 P12,P13,P14
120 M_OUT(1)=1 DLY 0.5
130 WAIT M_IN(10)=1
140 MVR2 P13,P14,P12
150 M_OUT(1)=1 DLY 0.5
160 WAIT M_IN(10)=1
170 END

```



図 17 グリーンレーザーを用いて、ロボットを用いたレーザー加工の模擬実験の様子  
ワークの位置に応じて加工手順をこなしている

図 17 には、上記のプログラムを用いて、実際に低出力グリーンレーザーを光ファイバーに導入し、ロボットを動かしながら、カメラで動作観測を行なっている様子を写真で示したものである。動作がスムーズになされ、ロボットの位置精度もmm以内であることが分かった。

さらに、円柱状のワークの側面をレーザー加工することを考慮した駆動を行なってみたのが図 18 に示したものである。レーザー出射部がワークの面に対して垂直になるように位置の移動を行なっており、ほぼ、実用可能な模擬実験となった。あとは、必要なレーザーエネルギーを光ファイバーを介して伝送することができれば、レーザー加工をロボットを用いて行なうことが可能となる。

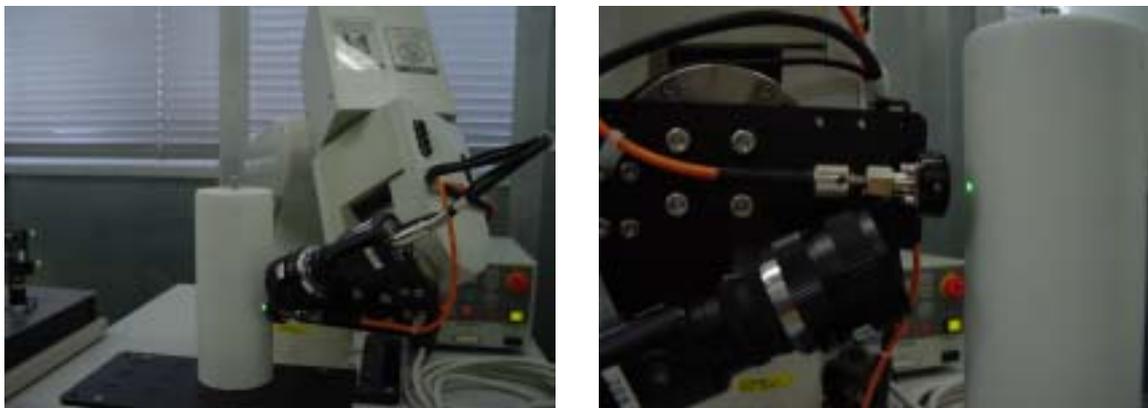


図 18 円柱状のワークの側面に対して、レーザービームが垂直に当たるようにロボットアームを駆動させた模擬実験の様子

#### 4. まとめ

光導波路の基礎検討として行った銅反射鏡を2枚用いた実験では、3スタックのLDアレーを入力部とし、出力部の開口を1mm幅にして出力の空間パターンを2次元観測した結果、入射部のLDアレーの出射パターンではなく、導波路の配置に強く依存した出力になることを確認した。一方、円錐状の導波路を導入してその透過特性を評価したところ、LDビームの広がり角と円錐の頂角とで決まる光学的な反射形状により、入射角によっては透過率が十分稼げないことがわかった。

ロボットアームにファイバーを取り付けて3次元加工の模擬動作をさせた際に、レーザーの位置決め精度が、ロボットアームの駆動速度とその駆動パスによってかなりの影響があることがわかった。当初の100ミクロンの位置精度を達成するには、ロボットの駆動を低速とし、移動によるトルクが少ない状態で加工することが、現在のシステムに対して有効であることがわかった。

金属導波路の形状とその表面処理などの多くのパラメータの最適化設計を提供し、加工業者における研磨技術の向上を指導し、かつ系全体のコンパクト化および高伝送効率化が不可欠である。その際の集光スポットサイズと、そこにおける除熱とデブリ処理に関しても詳細な検討が必要である

#### 5. 今後の課題

LD直のレーザー加工は、上記のようなさまざまな新たな技術を併用することで、より高度で高効率、高精度の加工を可能とする。本研究では、加工の精度といった意味では、最終的には数ミクロンの繰り返し精度を目指したが、実際には、ロボットアームの移動時から停止した際の慣性によるぶれ、位置決め精度、アシストガスの噴出の影響、加減速時のレーザーの制御など、連続加レーザー工に至っては、かなりの問題点があり、方式を十分に検討する必要があることが分かった。

#### 6. 本研究の成果と期待

高効率でコンパクトなLD直接加工装置が提供できれば、808nmの波長で吸収特性の高いさまざまな材料の容易な加工を提供できる。レーザー加工を大掛かりな装置による加工業者のみの道具ではなく、より生活に近いところでの高精度加工に利用できることとなる。