

< 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 - c > 高性能化の研究

小テーマ： 金属鏡の開発と応用（フェーズⅠ,Ⅱ）

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、杉山昭、  
神田日佐幸、稲田晴彦

1. はじめに

本研究テーマにおける実証レーザーシステムは、超高輝度のレーザーを産業用の装置とするために、堅牢な光学的なシステムであると同時に、熱的、機械的あるいは電氣的、さらには人間工学的な知識を集大成した装置にすることが不可欠である。本レーザー装置の光学的な性能は、LD励起化を通して向上されるので、本サブテーマでは、それらの光学装置の光学的あるいは熱的、機械的な機能の向上を目指す。そのひとつの手法として、LDの冷却やレーザーロッドの冷却のために金属の光導波路型冷却構造を検討した。金属平面あるいは曲面の金属鏡研磨技術を、LD励起レーザー構造に導入し、機械的にも強固で冷却性能に優れた構造を目指す試みは世界的にも珍しい。特に、円錐状の金属内部を円錐状に切り出し、先端部を1mm以下の出射構造とし、その内面の先端部までを鏡面仕上げする手法はいまだに確立されていない。一方レーザーを用いた高精度加工の周辺技術としてのロボットによるレーザー加工アシストシステムの検討も進めた。

2. 平板光導波型励起

図1には、アルミ、銀、銅と金の反射率の波長依存性を示した。銅の金属板を用いた導波路は、800nmの波長において銀の次に反射率が高い材料である。また、熱伝導率についても、図2に示すように、銅は0にて403W/m/Kといった特性であり、銀が428W/m/Kであるのに対して、やはり2番目の特性を有する。図3には、これらの金属の線膨張率の温度依存性を示した。このデータからは、線膨張率に関しては、銅のほうが銀に比べてよいことが分かる。

これらの金属をレーザーなどの光学システムに用いる際の問題は、鏡面研磨した際の面の酸化とコストなどをも含めた総合的な特性である。ただし、ここで議論している鏡としての特性としては、酸化とコストがより重要である。酸化により反射率が低下すると、光の損失になると同時に、そこで発熱が問題となる。よって、コストと酸化の特性を考えて銅の金属板を用いた実験を開始した。

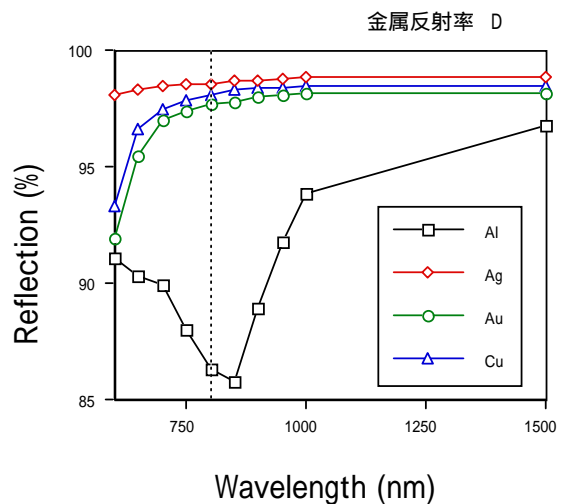


図1 金属表面の反射率

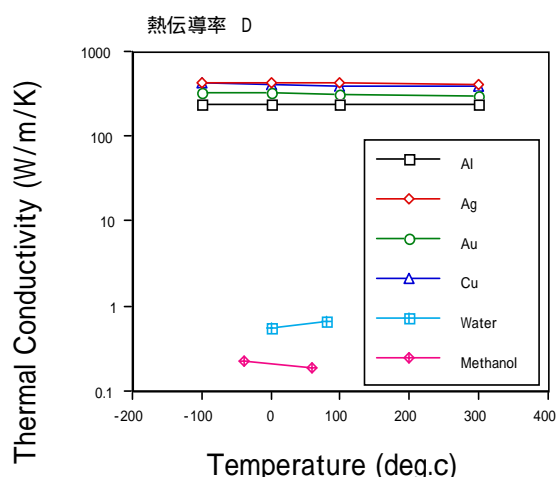


図2 金属と液体の熱伝導率

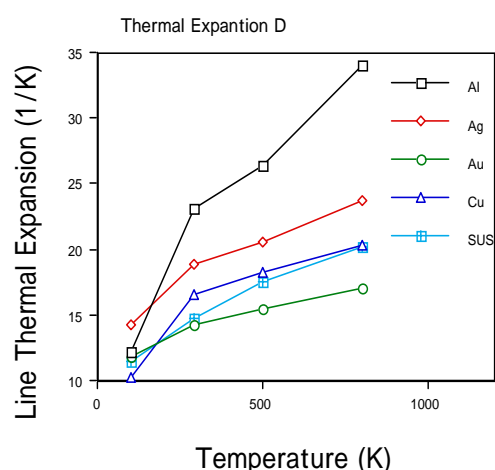


図3 金属の線膨張率

フェーズIでは、まずは10cm角の銅平板全面を研磨できる技術を導入することであり、導入後その研磨後の平坦性を100nm (rms)以下を目指す。さらには円錐状の曲面の金属鏡を目指す、その研磨技術を立ち上げる。また同時に、加工精度の向上を可能とするためには、加工部の平坦性の評価が不可欠で、その計測法の確立も進めた。

フェーズIIでは、この研磨精度を大型平面全面に対して、光の波長の少なくとも1/8程度の平坦性にすることによって、光の散乱損失を低減した集光と導光が可能とする。さら曲面に対して鏡面研磨を施すことを可能とし、局所的には50nm以下の研磨精度を達成し、スムーズな集光、導光を可能とする。さらには、それらの研磨鏡を用いた光集光系を用いたレーザー加工応用などの実験も行う。また、ロボットと光学系の接続を検討し、YAGレーザーやフェムト秒レーザーによるレーザー加工のための新たな加工ツールを提供したい。フェーズIとフェーズIIを通じて、冷却機構あるいはアシストガスの導入機構を有する銅製で金のメッキを施した金属鏡を開発することが本サブテーマの目的である。それは、ロボットに取り付けて高輝度レーザーを集光するレーザー加工ヘッドとなる。その鏡面により高輝度レーザー光の反射を行いながら、ミラー面を温度破壊から保護し、さらに、レーザー加工部の酸化を防止するといった多機能の光学素子を構築することが必要となる。この目的を達成するために、本小テーマでは、フェーズIでは銅の平坦面を金属研磨する技術を構築し、半導体レーザーの反射集光を目指した。フェーズIIでは、円錐曲面内部を鏡面研磨することで、レーザー加工ヘッドの開発を進めた。

## 2.1 平板鏡の作製と評価

銅の平面鏡は、本事業に協力いただいている小沢精密工業(株)に加工を依頼した。さまざまな条件にて加工と研磨を行い、その反射、熱、酸化特性などを検討した。作製を依頼した銅の鏡プレートは、図4に示したような単純な構造のものを準備した。ここでは、片面の研磨条件を変えて研磨を依頼している。機械的に切り出した銅にねじ穴加工などを行った後に、バフ研磨やラッピング研磨といった方法による表面研磨を行ってもらった。まずは、機械加工によって、大型の銅板より10cm角で厚さが1cmのものを切り出した。この状態では、銅表面は酸化しており、その平坦性も悪く、鏡面としての機能は皆無であった。これに導入したバフ・ラッピング研磨装置を用いて鏡面研磨を行なった。

このようにして研磨した銅鏡プレートの表面の平坦性を評価するためには、いくつかの手法がある。ステッパーと呼ばれる針を用いた接触型の表面形状計測法、光を用いた波面計測法、共焦点顕微鏡を用いた手法などである。まずは、浜松ホトニクス(株)へ依頼し、これらの表面の形状評価を行った。同社の保有する共焦点顕微鏡を用いて、面の評価を行った。図5と6にその2

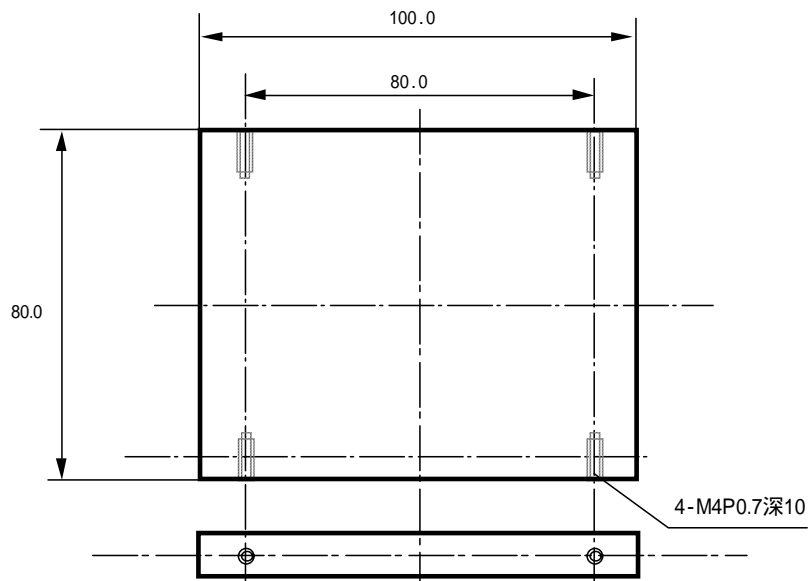


図4 銅鏡プレート

次元計測像と、その一部の断面プロファイルを示した。図5にはきれいな面を示し、図6にはボイドと傷部分のプロファイルを測定した例を示す。

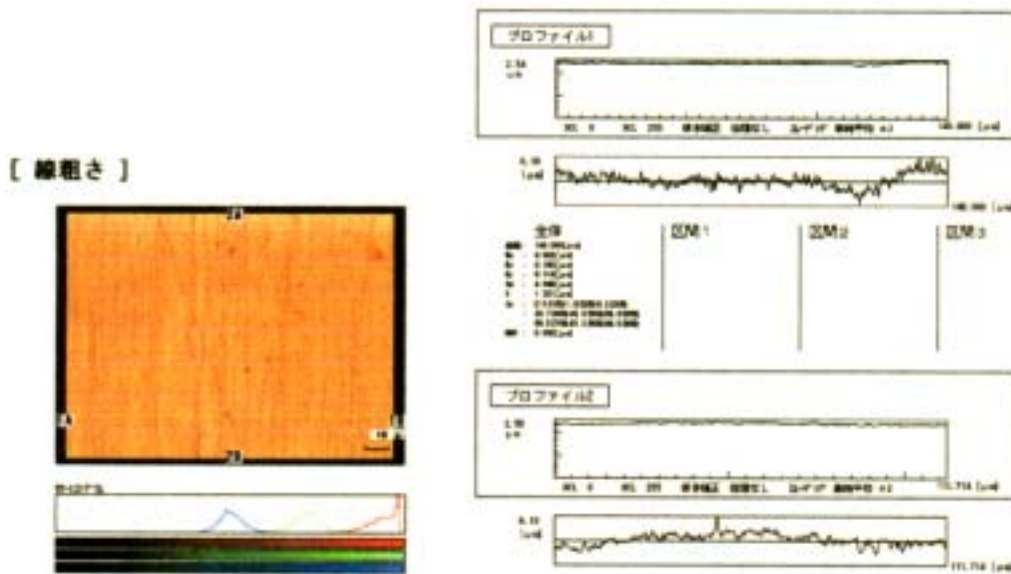


図5 共焦点顕微鏡による面の観測例1

図5における算術平均粗さは23nm程度、最小2乗粗さは30nmである。これらの数値は、JISの規格である。図6のそれに対応する値は、算術平均粗さ43nm、最小2乗粗さは、90nm程度である。いずれにしても、初期のものとはいえ、平坦さとしては、さらなる研磨技術の向上が必要であった。

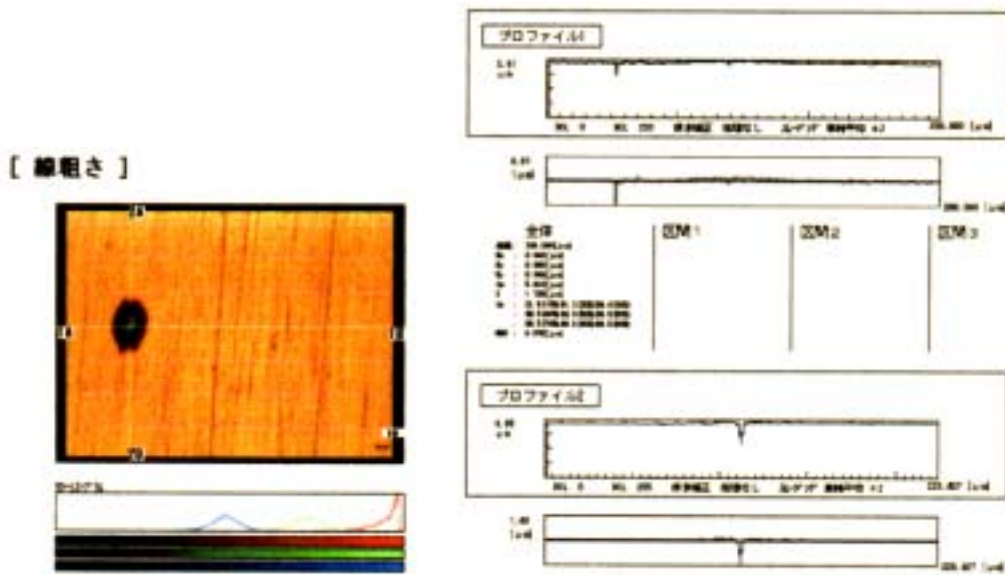


図6 共焦点顕微鏡による面の観測例2

## 2.2 光学特性の評価

これらの特性を有する銅平面鏡を用いて、その光学応答特性を評価した。実験のひとつの方法としては、図7に示したような構成を取った。すなわち、レーザー光を銅鏡ペアの開口方向から入射させ、他端からの出射する光の空間分布をスクリーンに投射するか、あるいは CCD カメラにて計測した。

ヘリウム・ネオンレーザーからの光を  $f = 20$  の短焦点レンズにて集光し、その発散する光を銅鏡に通している。これにより発散角の大きな半導体レーザーを疑似的に作っている。図8に見えるように、銅鏡の角度

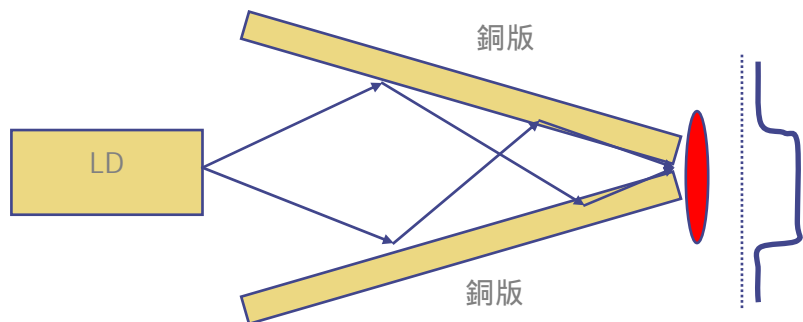


図7 実験の構成

を広げると、多重反射成分の透過ができなくなり、全て入射方向に反射してしまうことになるのは、容易に推測でき、実際にその様子が示されている。その臨界角は 11 度程度である。また、特徴として、銅鏡のなす角度を変えることにより、出射するビームの発散角度を調整できることが分かる。



図8 銅鏡のなす角度を変えたときの出射状態の写真

### 2.3 半導体レーザーの集光

次に、半導体レーザーを直接集光する実験を行った。図9に実験の構成を示した。出力側に CCD カメラを配置し、出射する光の出射端での空間強度分布を計測した。図10には、 $L = 0$  のときに得られた画像を示した。入力部の開口  $d$  を変えたときのパターンの変化を示している。左の像が CCD カメラによる投影像であり、その右が赤線で示した部分の強度プロファイルを取ったものである。

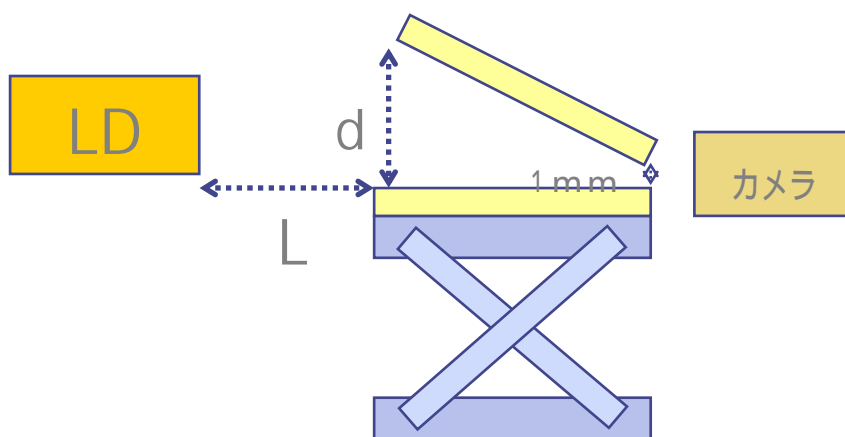


図9 半導体レーザーの集光実験

図11には、対向する鏡のなす角度を変えたときの入射ビームに対して出射するビームの強度を求め、その透過特性を、鏡の反射率を変えたとき関数として計算を行った結果である。鏡のなす角度を小さくすることで、ると、その多重反射による透過率が向上することと、鏡の反射率を向上させると、もちろん透過率が向上する様子を示した。銅の反射率が赤い線で示した場合に対応する。80%の透過率を達成するには、鏡のなす角度を2度以下にする必要があることがわかる。それが、銀の場合には、2.5度程度であることが、銀の場合の青い線によって示されている。いずれにしても、鏡の反射率と同時に、角度が重要なパラメータであることが明確になっている。

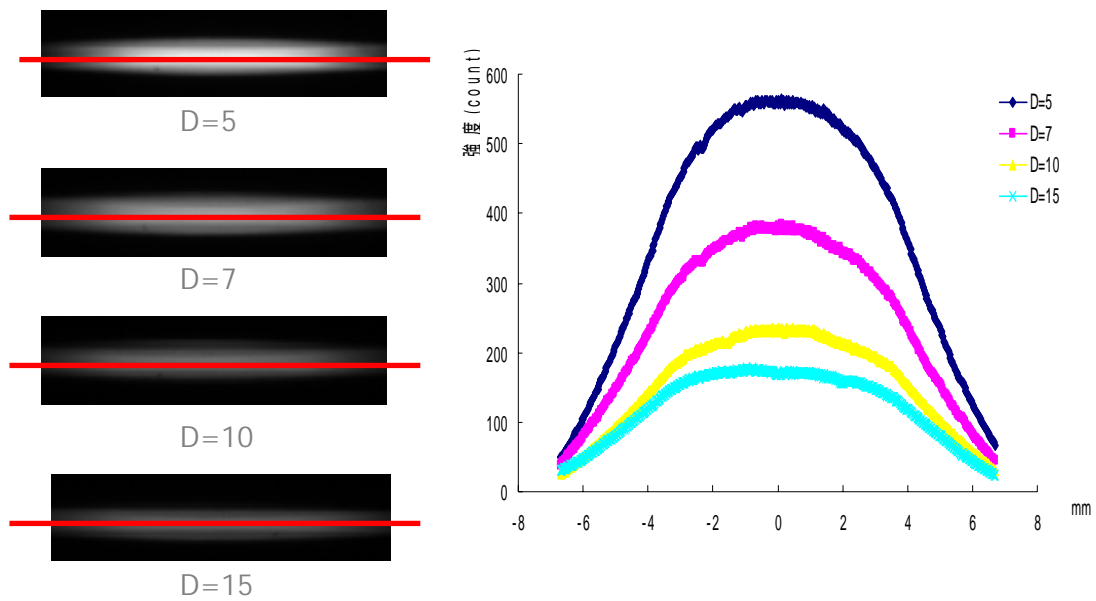


図 10 出射パターンとプロファイル(L=0)

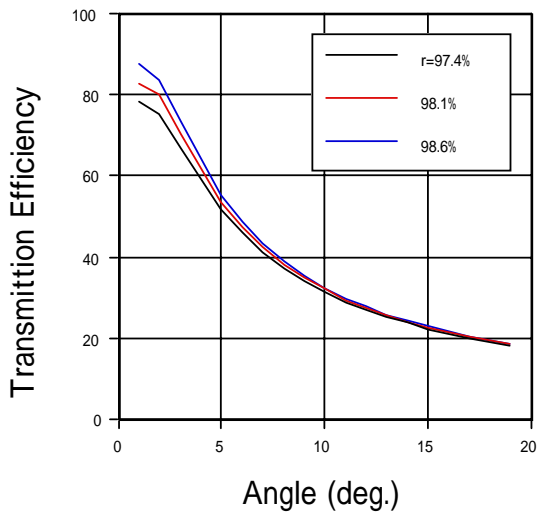


図 11 対向する鏡のなす角度と透過率の関係



図 12 ラッピング研磨例

## 2.4 反射面の研磨向上

上記のように、金属の反射鏡による多重反射導波路が、光の均一性を向上するのに有効であることがわかった。そこで、研磨面の反射特性を高めるために、さらに研磨精度を向上するためのラッピング技術に関して杉山研究員が担当し、以下に示すような研磨面の平坦性の向上を達成した。図 12 には、ラッピング研磨を用いて、真鍮のブロックの上半分を研磨した結果の図を示した。

このようにして研磨した面をザイゴの波面干渉計により波長オーダーの平坦性を確認すべく、業者に委託した。図 13 に示したように、その結果、約 5cm×10 cmの大きさの面において、平坦性の向上がみられ、ラッピング研磨した部分では、平坦性が 19nm と、研磨のない部分が 70nm であったのに対して 4 倍の精度の向上がなされた。このことは、ラッピング研磨による加工精度で、反射特性（表面のきずによる散乱の現象など）が達成可能であることが証明された。

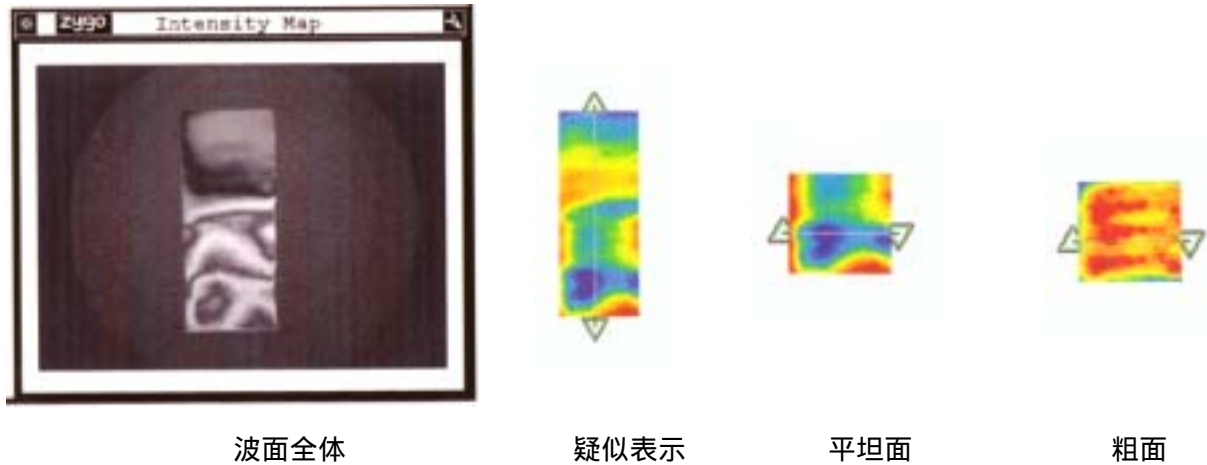


図 13 ザイゴ干渉計による波面観測例

### 3 . 曲面鏡

一方、平面の鏡を用いる場合のみではなく、光を 3 次元的に絞るために、曲面加工とその内面の研磨の検討を同じく杉山研究員の手により進めた。

研究の第 1 段として、円錐状に銅をくりぬき、その内部を鏡面研磨することを行った。1 .3 で検討したように、対抗する鏡とのなす角度が小さいほど透過特性の向上が計れる。しかしながら、円錐加工するための放電加工によって加工可能な距離は有限であるし、さらに、入射側の光ビームももちろん有限の大きさを持っている。そこで、とりあえず、円錐の頂角を 8 度として、その加工を試みた。8 度である明確な根拠はないが、10 mm の入射窓の大きさと、出射部の大きさ 1 mm、そして全体の長さを 100 mm 程度とするための概略の数値である。

そこで、1 . 3 の計算を再度用いて、8 度の角度での平面導波路の透過特性を、その反射率を関数として計算してもらった。

図 1 4 に、その計算結果を示した。透過率が 98% においては約 38% の透過率が達成可能である。もちろん、この数字は不十分である。他の光集光技術とコストと総合的な性能の比較において議論する必要がある。また、直線的な加工でなく、音響用スピーカーのなすコーン状の鏡も有

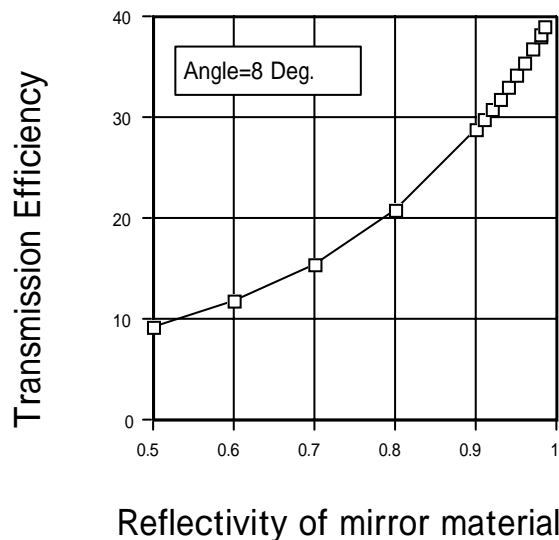
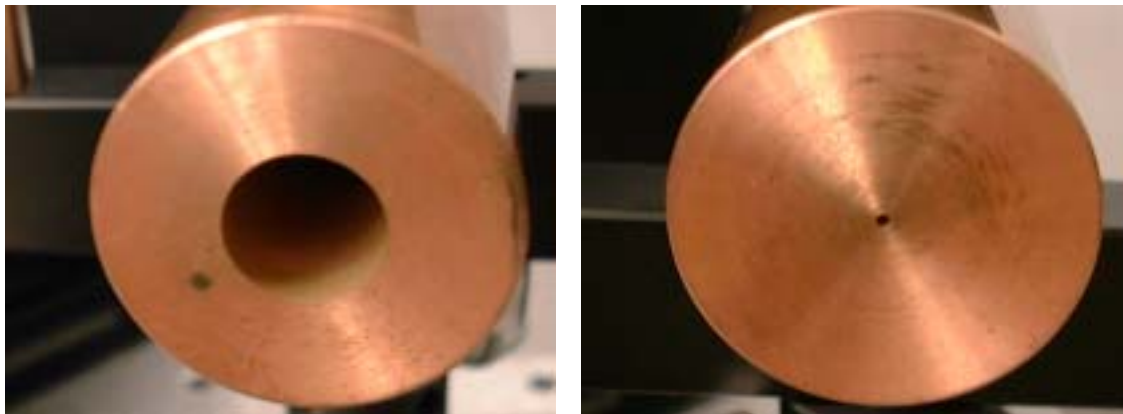


図 14 対抗角度が 8 mm としたときの平板の透過特性

効な技術であることは、柳沢研究員からの指摘にもあるように検討の余地はたくさんある。

いずれにしても、現状は、曲面の加工技術の向上が求められるので、実際に加工実験を開始した。



入射端

出射端

図 15 銅の円錐加工例

特殊な放電加工技術を用いて、銅の棒内部を円柱状にくり貫いた。その加工例を図 1 5 に示した。図 1 5 に示した銅の円錐は、内部を円すい状に加工すると同時に、外部には冷却水の流れる部分を作ったり、あるいは加工時の加工面の酸化を防ぐための不活性ガスの導入などが可能な加工を施すために、やや大きめの銅棒の加工を行った。図 1 5 の入射端の写真で明らかなように、放電加工を行ったままでは、内面の鏡面性はほとんどなく、ざらざらしている。

### 3 . 1 光実験

この状態で、取りえずレーザー光を導入し、その伝搬特性の初期的な確認を行った。図 1 5 の加工したものに、5 3 2 nm のレーザー光を、 $f = 20$  のレンズを介して導入した。この条件は、平面導波路実験におけるヘリウム・ネオ

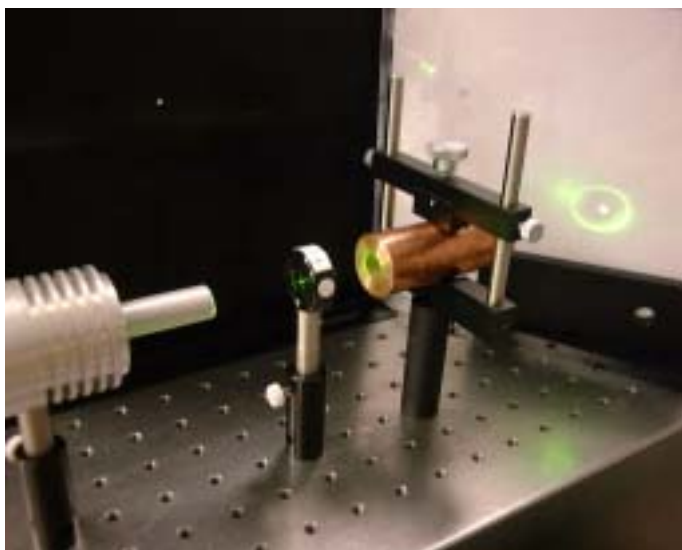


図 16 実験系の写真





図 17 出射ビームパターン

ンレーザーの使用と同じである。波長  $532\text{ nm}$  を用いたのは、より実際的な応用を目指す際に用いる波長であることによる。

図 17 には、得られた光の出射パターンの遠視野像の例を示している。光の入射位置を少しずらすと、得られるビームの形状が図に示すように変わる。図の左側のパターンにおける中心の点が直進成分にほぼ対応し、その周りのリングが、多重反射成分のうち、最後の反射をしてから出射端から放出された 1 次の反射ビームである。それより周りの多重反射成分に対しては、内部の反射率が低くて透過できていない。

導波路から得られる光をもちいた加工の場合、遠視野でなく近視野を用いるため、ビームの広がりほぼ出射部の加工最小サイズで決まる。この場合には、 $1\text{ mm}$  である。

いずれにしても、この構造にて内面を鏡面研磨して、最終的な透過特性の評価をさらに進めることとする。

ここで用いた円錐ミラーの長さは  $100\text{ mm}$  であるため、図 9 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。

図 10 における  $D = 5$  の状態を、入射径  $10\text{ mm}$  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  $30\text{ cm}$  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  $30\text{ cm}$  で、入射径  $10\text{ mm}$ 、出射径  $1\text{ mm}$  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 18 には、この  $30\text{ cm}$  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だ。このようにして得られたデー



図 18 長さ  $30\text{ cm}$  の円錐ミラーの評価状況の写真

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19である。銀のほうが、532nmのグリーン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まで2番目の反射ピークが得られている。

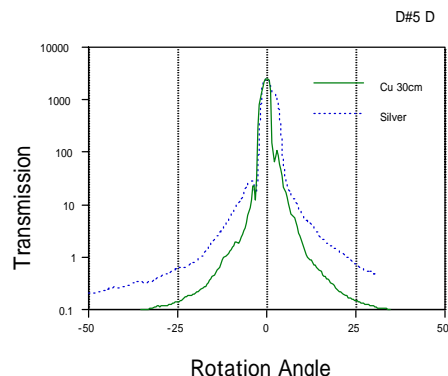
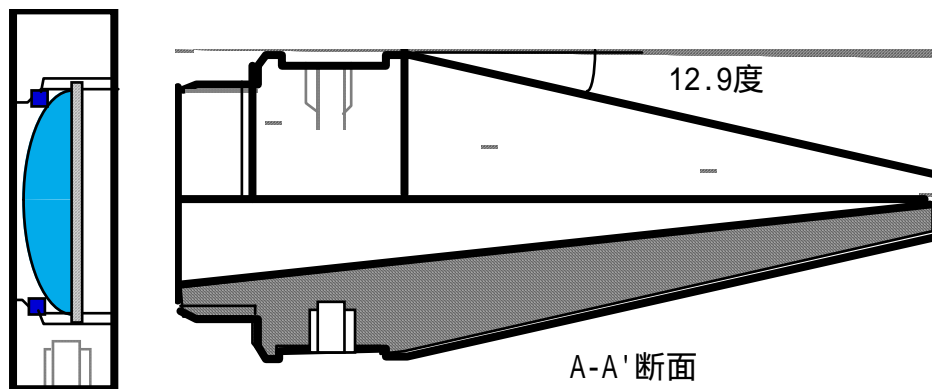


図19 30cm円錐ミラーと10cm銀メッキ円錐ミラーの伝搬特性

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。

以上のことから、円錐状金属鏡に対しても、それぞれの円錐の面に対して浅い角度での光入射が不可欠であることが理解される。つまり、角度が急過ぎることで、光が多重反射によりかなり早く減衰することが、全体の透過率を低下させることになる。そこで、入射する半導体レーザーやNd:YAGレーザーの光ビームの特性を考慮して、円錐鏡の入射部にあらかじめ焦点距離を最適化させたレンズをあらかじめ装着し、入射レーザービームを出射口に対して集光する方向で絞り込むことで、鏡面に対する入射角度を浅くすることができると考え、図20に示すように、平凸レンズを用いた円錐状金属鏡を開発した。その際、実際にロボットへの取り付けやレーザーによる加工飛沫の除去、さらには円錐部先端の放熱を行うために、円錐鏡内にガス導入が可能である構造を同時に作り込むこととした。



駿河精機  
F40-30

図20 レンズ付き円錐状金属鏡

図20に示すように、既製のレンズホルダーを円錐状鏡に直接捻じ込み可能な構造を取ることによって、全体のコストの低減も行っている。円錐鏡の入射部は、レンズとこの入射部の間に導入するシール用のプラスチックリングによりガスもれのない封じができるように考えた。もちろん、Oリングなどを挟むことで、より機密性が高くなる。今回の加工で重要な点は、先端の出射径をこれまでの1mmから、さらに小さくすることを試みたことと、

内部の鏡面精度を高めるために、2分割型、あるいは先端部と後段部の2段継ぎ足し構造などの導入を行ったことにある。これらは、特許化を検討している。このようにして作製したもののひとつにレンズを取り付け、ロボットのアームの替りに実験用のホルダーに取り付けた写真を図21に示した。

写真でも明らかであるが、入射する太陽光が先端の0.5mmの穴から十分透過している。定量的な評価は今後進めるが、継ぎ足し構造の金属鏡の透過特性がかなりよいものとなっており、808nmの半導体レーザーに対する反射特性では、高い透過特性が期待できる。これらを用いたレーザー集光実験を早急に進めることとした。



図21 レンズ付き金属円錐鏡のホルダー取り付け写真

図22には、これまでの実験で用いてきたグリーンレーザーを試作した円錐鏡に透過させた状態の写真を示している。高い透過率を示しているのが見て取れる。

#### 4. ロボットアームへの取り付け

さらに、ロボットによるレーザー加工アシストシステムは、光ファイバーにて導かれた加工用のレーザーを本研究で作製した円錐状金属レーザー加工ヘッドを用いて集光し、ロボットアームの6軸駆動により、3次元構造の加工を可能とする。ロボットアームは、操作が容易な言語と位置指定を行うことで、高度の操作が可能となった。その詳細に関しては、本報告書におけるLD直接加工のセクションにまとめたので参照願いたい。

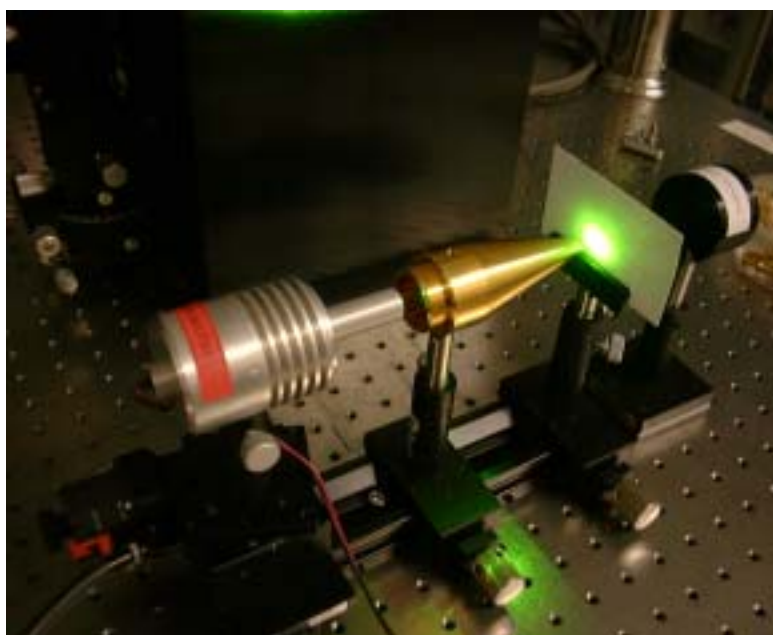


図22 グリーンレーザーによる透過計測の例

#### 5. まとめ

具体的な成果内容：バフ研磨装置を導入したことで、大型の平面研磨が可能となった。また、平坦性を評価するために、接触型面精度計測装置を導入し、両者を併用して10c

m角の銅板の平坦性の計測を可能とした。多数の鏡面研磨を実施し、その全面に渡って50 nm程度の平坦性を達成した。これは、当初予定に対して1 / 10 波長程度と、より精度の高い研磨を達成できたことになる。さらに円錐状の銅構造の内部の鏡面研磨に成功し、グリーンレーザーの集光および、アシストガスの導入を達成した。この円錐状レーザーヘッドは、6軸駆動ロボットに取り付け、レーザー加工のための基本動作を確認した。

本研磨技術は、さらに、金属研磨面をヒートパイプを組み合わせることで、金属研磨面に接続した熱源から効率良く熱を奪い取ることができるように応用展開を進めることができた。

金属鏡面研磨技術そのものは、光学的な特性のためのみではなく、さまざまな摩擦現象の低減などをもたらすために、多くの機械加工応用の基本技術として用いられることになる。この地域は、光技術とともに楽器産業や自動車産業が活発であり、楽器の装飾のための研磨への応用、自動車燃焼装置への応用などへの発展が期待される。この研磨技術を用いたレーザーヘッドによるレーザー加工は、これらの楽器あるいは自動車産業への展開へと飛躍的な技術を与えることになる。

本サブテーマによって得られた金属研磨技術を、実際のテラワットレーザーへ導入することが重要であるが、まったく新規な技術であるため、開発中のテラワットレーザーに導入するに至らなかった。今後は、金属鏡を用いた半導体レーザーの集光、あるいは、テラワットレーザーの集光による新規レーザー加工への応用を行なうこととしたい。さらに、金属研磨面を用いた熱伝導性の向上を確認し、レーザーの熱除去性能を高めるための冷却応用への展開を行なう。さらに、円錐内部の鏡面研磨は大変困難であり、円錐頂点の鏡面性は高いが、底面近傍の鏡面性を向上させる新たな手法の検討が不可欠である。また、ロボットにおいては、フェムト秒レーザー加工や紫外線レーザーによる加工を目指した場合には、駆動の安定性と位置精度が不十分である、これらの位置移動精度などを向上するためには、地域のロボット企業との連携が必要である。