

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360100
 研究課題名 (和文)
 ベッセルビームを用いたレーザーアブレーションによるマイクロ 3 次元加工
 研究課題名 (英文)
 Micro 3D processing by laser ablation with a Bessel beam.
 研究代表者
 高田 保之 (TAKATA YASUYUKI)
 九州大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：70171444

研究成果の概要：

本研究の目的はレーザー微細加工に「深い焦点深度」を有するベッセルビームを適用することにより、簡便なレーザー微細加工手法を開発することである。ベッセルビームによるレーザー加工では表面ダメージが生じ易いことが欠点として知られているが、加工雰囲気真空にするなど試料表面の酸化を防ぐことにより加工ダメージを大幅に低減できることが分かった。またベッセルビームを発生させる際に用いるアクシコンレンズに要求される加工精度は照射するレーザー光の波長が短いほど、アクシコンレンズ頂角が小さいほど高くなることを数値解析により見出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2008 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：レーザー加工・ベッセルビーム・熱工学

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術は近年の基盤技術のうち最も重要な技術の一つであり、電子機器やデバイスを始めとした製品の小型化・高性能化・高集積化に重要な役割を果たしている。従来の工具を用いた機械加工は接触加工であるため、求められる加工精度がマイクロ・ナノオーダーになると工具と加工対象の接触によって生じる工具の変形による加工精度の低下が問題となってくる。工具の磨耗による

磨耗粉が汚染物質となる影響も無視できない。このような問題を解決する加工法の一つとしてレーザー加工がある。レーザー加工は非接触加工であるため、工具を必要としない。そのため工具の変形の問題が生じないため、機械加工の問題点を解決することが期待されている。また、イオンビームや電子ビームなどを利用した他の非接触加工と比べて、レーザー加工は大気中で加工が可能のため、高真空装置などを必要とせず、被加工物の大き

さが装置に制限されない利点がある。

一方レーザー加工を行う際、光を波長程度の小さな径まで集光すると、焦点深度も波長程度と極端に浅くなるため、焦点距離の厳密な制御と正確な光学系のアライメントが必要になる問題が存在する。この焦点深度が浅い問題を解決するため、深い焦点深度を有するベッセルビームが着目した。ベッセルビームは伝播軸に対して等しい角度で交わる光が干渉することによって、伝播軸に沿って軸状に高光強度部が生じるビームである。半径方向の光強度分布が0次ベッセル関数の2乗で表されることからこの名で呼ばれている。

ベッセルビームは1954年にMcLeodにより命名されたアクシコンと呼ばれる光学素子による集光状態の一つで、1987年にDurninらによって提案された。さらにIndebetuwによってアクシコンレンズを用いた集光でベッセルビームが発生することが示された。ScottらはCO₂レーザーを用いてベッセルビームを生成し、パイレックスガラス(厚さ3mm)に貫通穴あけ加工を行った。吉泉らは加工用ビームとしてベッセルビームについて検討を行った。Marcinkeviciusらはフェムト秒レーザーを用いてベッセルビームを発生させ、シリカ内の改質加工を報告した。一方、不透明体へ加工は、干渉によって生じるベッセルビームでは光が遮られ加工に必要なエネルギーが得られなくなりうまく加工ができなくなると思われていたため、これまでなされてこなかった。しかし、近年松岡らによってベッセルビームが不透明体に対しても厳密な位置および照射パルス数の制御なしに再現性良くテーパの少ないマイクロドリル加工ができることが実証された。微細加工に非常に有用なベッセルビームの特長を利用した研究はこれまでに幾つかなされており、例えば松岡らは、深い焦点深度を有するベッセルビームを用いて、厳密なワークディスタンスの制御なしに、再現性良く厚み20μmのステンレス箔に開口径が数μmのレーザー加工を行なった。しかしながら、ベッセルビームでは加工穴周囲に多重リング構造が観測され、試料の照射側表面の広い範囲にこのリング構造によるダメージが生じることが報告されており、ベッセルビームのデメリットであると指摘された。

2. 研究の目的

上述したように、これまでのベッセルビームを用いた不透明体微細加工の研究は可視光のナノ秒パルスレーザーを光源として金属材料を加工対象としたものが主であったが、光と物質の相互作用は光の波長やパルス幅、物質の物性値によって大きく変化することから、加工特性も併せて変化することが予測される。本研究ではベッセルビームを広範

な3次元微細加工へ展開させるために検討すべき下記課題を、最も基本的な3次元加工であるドリル加工および溝加工にて実験および数値解析により検討した。1. 加工ダメージの低減。ベッセルビームは中心の鋭いピークに加え、多数のリング状の副次ピークが存在することから加工ダメージが生じ易いことが欠点となっている。本研究では加工ダメージの低減を試みた。2. 材質・波長によるマイクロドリル加工特性の把握。紫外光(波長355nm)を用いてシリコン、セラミックス(AIN)に溝加工を行い、熱的加工(シリコン)と化学結合切断(セラミックス)の加工メカニズムの違いによる溝加工特性を比較した。3. アクシコンレンズの形状が理想的な形状からずれた場合にベッセルビームの集光に及ぼす影響。理想的な形状からのずれの代表的な問題として、円錐回転軸と底面のなす角が理想的な状態(垂直)からずれた場合のベッセルビームのプロファイルを数値解析により求め、低面のずれ角の影響を検討した。

3. 研究の方法

実験装置の概略図と写真を図1に示す。光源にはナノ秒パルスYAGレーザー(パルス幅約10ns、繰返し周波数10Hz、ビーム断面内光強度はニアガウシアン)を使用した。使用波長は第二高調波(波長532nm:可視光)、第三高調波(波長355nm:紫外光)、および第四高調波(波長266nm:紫外光)である。光源のビーム直径は約8mmで、それを4倍に拡大した後、絞りによって直径10mmに切り出すことで断面一様強度分布(トップハット)を得た。集光素子には合成石英製のアクシコンレンズを用いた。半頂角は77.5°、80°、85°、87.5°、89°の5種類を使用した。ビームはこのレンズに垂直に入射し集光される。照射パルス数は光路中に配置したシャッターを用いて制御した。また照射パルスエネルギーは適当なNDフィルターを光路中に挿入することによって制御した。なお、ワークデ

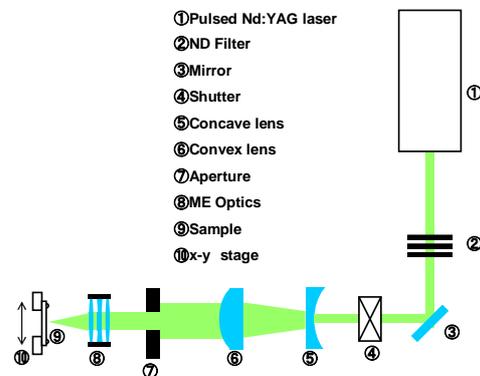


図1 実験装置概略図

イスタンス(アクシコンレンズの頂点と試料表面の距離) および照射スポットの $1/e^2$ 強度径内の平均エネルギー密度(照射エネルギー密度)は、フレネルの回折の式を用いた数値計算によって求めた。数値計算において、光源は完全なコヒーレント光であるとした。加工対象試料は試料ホルダーに固定し、試料ステージに挿入される。試料ステージは xy 方向の位置制御を、PC 制御による電動ステージで制御できる。電動ステージの位置決め精度は x 軸, y 軸ともに $5 \mu\text{m}$ である。なお, z 軸方向は手動の精密ステージで位置合わせを行った。

4. 研究成果

① 加工ダメージの低減

SUS304, 銅およびアルミニウムへの貫通穴形成のための照射パルスエネルギー密度の加工しきい値を求めるために、照射パルスエネルギー密度と平均アブレーション率の関係を求め、得られたしきい値をわずかに超えた照射パルスエネルギー密度で SUS304, 銅およびアルミニウムへ貫通穴を形成した。貫通穴のレーザー入射側(表面)の走査型レーザー顕微鏡写真を図 2 に示す。照射パルスエネルギー密度は SUS304: $6.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, 銅: $14.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, アルミニウム: $6.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$ であり、照射パルス数は 100 である。SUS304 および銅の照射側表面には穴の周囲の変形・変色に加え、凸レンズ集光ビームによる加工では見られない同心円状の痕や変色が広範囲に観察される。SUS304 および銅で観察される同心円状の痕の間隔は約 $2.5 \mu\text{m}$ であり、計算から求められた副次ロブの間隔約 $2.6 \mu\text{m}$ と良く一致している。これらの痕は

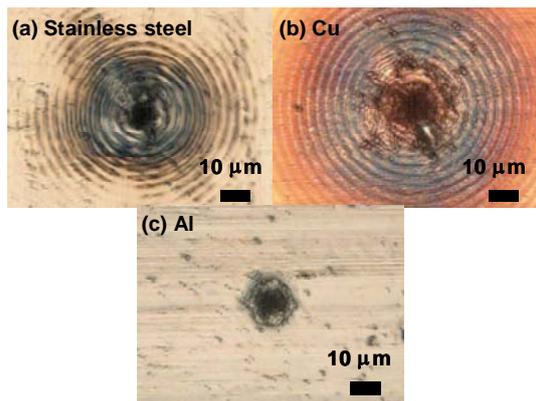


図 2 貫通穴のレーザー入射側(表面)の走査型レーザー顕微鏡写真。(a) SUS304 ($6.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, 厚み: $20 \mu\text{m}$), (b) Cu ($14.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, 厚: $20 \mu\text{m}$), (c) Al ($6.3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, 厚み: $18 \mu\text{m}$)。照射パルス数: 100。

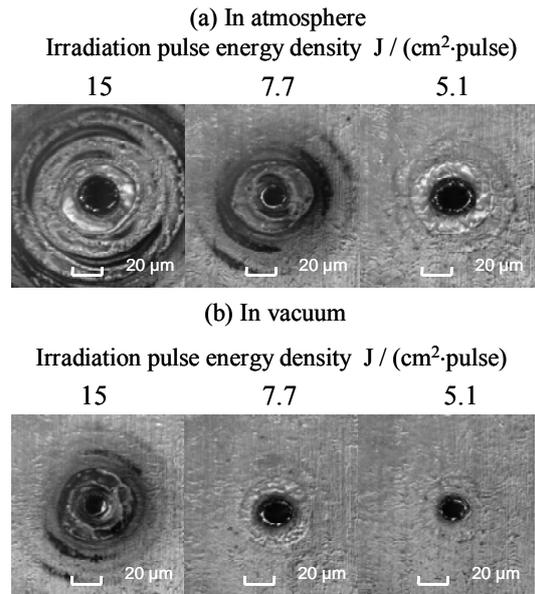


図 3 照射パルスエネルギー密度を変化させて SUS304 に大気中および減圧下で形成した貫通穴(表面)の、代表的な走査型レーザー顕微鏡写真。照射パルス数: 100。

照射側表面にのみ観察されて裏面では観察されないで、副次ロブのエネルギーによって溶解しその後凝固したものと考えられる。また広範囲に観察される変色領域は、副次ロブのエネルギーによって試料表面が酸化されたものである。一方、アルミニウムでは SUS304 や銅とは対照的に表面の広範囲におよぶ同心円状の痕や変色がほとんど観察されず、穴周囲の一部の変形・変色のみが観察された。

図 3 に、照射パルスエネルギー密度や照射パルス数を変化させて SUS304 に大気中および減圧下で形成した貫通穴の、代表的な走査型レーザー顕微鏡写真を示す。大気中および減圧下における加工の共通点として、照射エネルギー密度が低くなるにつれて照射側表面の同心円状の痕や黒く変色している範囲が小さくなる様子が観察される。また照射パルス数を 200 から 100 へと半減させても加工ダメージの低減が観察された。大気中と減圧下の加工結果を比較すると、照射パルスエネルギー密度が同じであれば、減圧下では試料表面の同心円状の痕や表裏両面における穴周囲の変色が大幅に低減されている。また、減圧下では加工する際に発生するプラズマブームによるレーザー光遮蔽効果を低減できることから、大気中より少ない照射パルスエネルギー密度で貫通穴を形成することができた。今回、厚さ $20 \mu\text{m}$ の SUS304 に、照射パルスエネルギー密度 $3.8 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$, 照射パルス 100 で、穴直径(表面)が $10 \mu\text{m}$ 以下の加工ダメージが殆ど無い貫通穴を形成できた。貫通穴の径に着目すると、照

射パルスエネルギー密度の低下に伴い、表面および裏面の穴径の減少が観察された。一方照射パルス数を 200 から 100 へと半減させても、加工ダメージが低減されるものの、穴径はほとんど変化していなかった。

② アブレーションメカニズムの違いがマイクロ溝加工におよぼす影響。

電子機器の材料として重要な窒化アルミニウムに対して異なるレーザー波長 (532 nm : 可視光, 266 nm : 紫外光) にてマイクロ加工を行った。可視光による加工は熱加工プロセスが支配的であるのに対して、紫外光の場合は光化学反応プロセスが支配的となるため、両者の結果を比較検討することにより、アブレーションメカニズムの違いがマイクロ溝加工におよぼす影響を知ることができる。加工の際に生じるダメージを検討した結果、可視・紫外光ともにエネルギー密度が大きいほど、ステージの移動速度が大きいほど、試料表面のダメージが顕著になった。また、エネルギー密度がほぼ等しい条件では、532nm 波長と比較して移動速度が大きい場合でも 266nm 波長ではダメージが低減されていることが分かった。溝深さの測定結果を図 4、図 5 に示す。図 4、図 5 において可視光

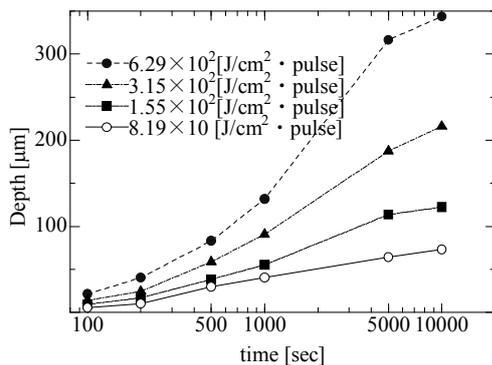


図 4 照射時間と溝深さの相関。レーザー波長 : 532 nm, ライン速度:10μm/s.

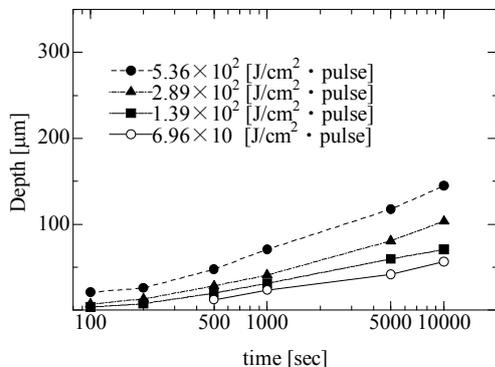


図 5 照射時間と溝深さの相関。レーザー波長 : 266 nm, ライン速度:10 μm/s.

では紫外光と比較して同一パルス数の照射による溝深さが大きくなっており、加工速度が大きくなっていることが判るが、照射パルス数が増加するに従い、溝深さが一定以上から進展しにくくなり加工速度が著しく低下している。紫外光の場合は加工速度の低下は比較的小さい。

可視光による加工は、高エネルギー密度による試料材料の溶解、蒸発に起因し、試料表面では激しい熱衝撃が生じる。それに対し紫外光による加工は、光化学反応が関与するため熱による影響が低減され、表面ダメージの低減につながると考えられる。ステージの移動速度が大きくなると表面のダメージが大きくなる原因については、ステージ自体に振動が生じることに起因すると考えられる。本実験では波長532 nmにおけるスポット径は6.5 μmであり、波長266 nmで3.3 μmとなっており、およそ等しいエネルギー密度における可視光と紫外光の溝深さ及び溝幅の差異はこのスポット径の差に起因するものと思われる。また、照射パルス数の増加に従い深さ方向への加工進行速度に差が生じる原因は、ドリル加工でも同様の報告がなされているように、可視光では溝の進行に伴い加工位置での温度が試料融点に達することが出来なくなり熱加工の進行が止まるのに対して、紫外光ではその段階でも光化学反応により加工が行われるためだと考えられる。これに加え、ベッセルビームによる加工では、溝の入口幅が大きくなる傾向が得られた。これは、ドリル穴加工においてアキシコンレンズの半頂角が鋭角であるほど穴のテーパが大きくなる報告があるように、本実験で用いたレンズは半頂角が80°と比較的小さかったことから、ドリル加工同様に入口幅が大きくなる結果となったと思われる。

③ アキシコンレンズの形状が理想的な形状からずれた場合にベッセルビームの集光状態に及ぼす影響。

アキシコンレンズの形状が理想的な形状からずれる場合のベッセルビームの集光に及ぼす影響を数値解析により検討した。理想的な形状からのずれの代表的な問題として、円錐回転軸と底面のなす角が理想的な状態(垂直)からずれた場合のベッセルビームのプロファイルを数値解析により求め、底面のずれ角の影響を検討した。まず底面のずれ角が大きくなるにつれてメインピークの強度が低下して、1次、さらには高次の副次ピークがしだいに4つの点に分割されていく様子が再現され、実際に問題となっている現象の発生を数値解析により確認した。ビームの波長とアキシコンレンズ半頂角をパラメーターとして、検討を行った結果、入射ビームの波長が短いほど、また、レンズ半頂角が小さいほど、底面誤差の影響

を受け易いことを明らかにした。この原因は、波長が短くなるほど、半頂角が小さくなるほどレーザー光の光路差が生じ易いためと結論づけた。ベッセルビームの強度分布はレンズにより回折した光の干渉によって得られる。二つの波が干渉するとき、同位相であれば振幅は強められ、逆位相であれば弱めあう。理想的なアキシコンレンズを用いた集光では、レンズ中心を通る伝播軸から等しい距離にある同一半径上のビームはすべて伝播軸上に存在する集光点までの距離が等しくなる。レーザービームは波長、位相のそろったコヒーレント光であるので、等しい距離を進むビーム同士は位相が揃い強めあうことになる。一方、角度ずれが存在する際には同一半径でのビームであってもレンズ厚さやレンズ斜面への入射角の違いによって光路差が生じ、この光路差により位相差が生じ、強度が低下すると考えられる。

光路差に影響を及ぼす要因として、レンズ半頂角と波長が考えられる。半頂角に注目すると、波長 266 nm、半頂角 77.5°の条件では底面ずれ角が 30°程度で副次ピークの分割が見られるのに対し、波長 266 nm、半頂角 87.5°では 60°程度で副次ピークの分割が見られることから、半頂角が小さいほど底面ずれ角の影響が大きくなる。半頂角が小さいほどレンズを通過するレーザー光の光路差が大きくなり、位相差が生じやすくなる。

次に波長に注目すると、波長 266 nm、半頂角 77.5°の条件では底面ずれ角が 30°程度で副次ピークの分割が見られるのに対し、波長 532 nm、半頂角 77.5°では 50°程度で副次ピークの分割が見られることから、波長が短いほど小さな底面ずれ角でメインピークの強度低下が起きていることがわかる。これは波長が短いほど同じ光路差であっても位相ずれ量が大きくなるためである。波長が異なるとレンズの屈折率が変化することも要因として考えられるが、波長 532 nm と 266 nm におけるレンズの屈折率の違いはわずかであり、影響は小さいと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

①河野 正道ら、「ベッセルビームを用いたレーザーマイクロ加工」光アライアンス (査読無し), 20 巻, pp.7-10, 2009

②Y. TAKATA et al., "MICRO OSCILLATION HEAT PIPE FABRICATED ON SILICON WAFER", Proceedings of the ICNMM2008 (査読有), pp.62082, 2008

〔学会発表〕(計 8 件)

①Shinji Kawauchi et al., "Study on work damage reduction in micro-drilling using a nano-second pulsed Bessel laser beam", Conference on Laser Ablation 2007, 2007年9月, テネリフェ・スペイン

②川内進司ら、「ベッセルビームを用いた金属のマイクロドリル加工において材質が加工ダメージにおよぼす影響」, 日本機械学会九州支部・中国四国支部合同企画沖縄講演会, 2007年10月, 沖縄

③川内進司ら、「ベッセルビームを用いたマイクロドリル加工における材質による加工ダメージの相違」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2007, 2007年11月, 京都

④乙藤 拓人ら、「パルスベッセルレーザービームを用いたマイクロドリル加工」, 日本機械学会九州支部第 39 回学生員卒業研究発表講演会, 2008年3月, 福岡

⑤川内 進司ら、「紫外光ベッセルレーザービームを用いたマイクロドリル加工」, 日本機械学会 2008 年次大会, 2008年8月, 横浜

⑥Masamichi KOHNO et al., "Laser Micro/Nano-Machining with a Bessel Beam", ICCE-16 (招待講演), 2008年7月, 昆明, 中国

⑦Shinji KAWAUCHI et al., "Laser micro-Processing with a Bessel beam", KAIST-Kyushu University Joint Seminar 2008, 2008年9月, デジョン, 韓国

⑧乙藤 拓人ら 「ナノ秒パルスレーザーによる窒化アルミニウムへのマイクロ加工」, 日本機械学会九州支部講演会, 2009年3月, 福岡

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 保之 (TAKATA YASUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 70171444

(2) 研究分担者

河野 正道 (KOUNO MASAMICHI)

研究者番号: 50311634