レーザによる微細加工

宮崎俊行*

Laser Microprocessing

Toshiyuki MIYAZAKI

1. はじめに

レーザ加工は、レーザ光を微小領域に集中し、その部分のみを加工する方法である。それゆえ、本質的に微細加工法であると考えられる。しかし、装置の高出力化（数十 kW）に伴い、製鉄プロセスにも使用されるようになってきている。また、焦点をはずしてパワー密度を低くし、広い範囲にわたる表面処理法もあり、全てを微細加工としてまとめることはできない。ここでは、高パワー密度を必要とする微細領域の除去加工法を中心として紹介する。

2. 加工目的

レーザ加工の目的は次のように分類できる。すなわち、(1)新しい形状の創製、(2)材料特性の改善、(3)新しい材料の合成、(4)表面のクリーニング（材料のごく表層のみを除去し、材料本来の特性を出す）である。

(1)は除去、接合、あるいは気相、液相の固体化による形状創製であり、(2)は表面改質など、(3)は薄膜の合成など、(4)は除去ではあるが、これをごく表面層にのみ限定する表面清浄である。しかし、これらはまったく独立した現象ではなく、どの面に注目するかによる。たとえば、蒸発除去により形状を作るとき、その除去されたものを利用すれば、蒸着膜を形成できるし、汚染された物体表面にこの工程を行い、汚れを除去すれば清浄化

Fig.1 Processing due to heating in metals

となる。しかし、いずれにせよ、この除去現象は、原子、分子、ナノオーダ、あるいはサブミクロンオーダのクラスターで発生するものであり、必然的に微細加工である。

加工機構は、加熱により材料に熔融、蒸発を起こす場合と、熱化学反応、あるいは、紫外光レーザによる爆発的な分解現象（アブレーション）の場合がある。加熱による加工は、Fig.1のようにパワー密度（面密度）で模式的に示すことができる。

アブレーションはポリマーの光分解反応において見いだされたものであり、レーザ照射部において中性原子、分子、正負イオン、クラスター、電子、光（光子）が爆発的に放出され、固体表面が除去される現象と説明される。特に、波長が短いエキシマレーザはその光子エネルギーがポリマー結合の解離エネルギー以上であるため、直接、結合を切断し、分解できる。この現象を模式的に示したも

*千葉工業大学工学部（〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1）

のが Fig.2 である。これは、フェムト秒レーザなどの高輝度レーザによる多光子吸収によっても起こる。

Fig.2 Processing due to ablation

3. 各種微細加工

本加工は、微小領域のみに加工エネルギーを集中するものであるから、加工条件の第一はレーザビームの集光性である。また、リソグラフィ技術で開発されたビームエネルギーの照射法を工夫することにより各種形状加工を行うこともできる。すなわち、(1)ビームを直接レンズによって集光・照射する方法、(2)マスクの形状を、あるいは、マスクを組み合わせて各種形状を作り、それを転写する方法、(3)マスクを密着させて直接その形状を転写する方法である。(2)の方法は、マスクの像を光学系で拡大、縮小できるので柔軟性に富むシステムを構築できる。

一方、NC 装置によって2軸(x,y)の位置を制御し、加工量によってz方向を制御すれば、三次元立体形状を創製できる。回転を加えてより複雑な形状加工も試みられている。

3.1 整形ビームによる加工

Fig.3 に示すように、各種形状のマスクを用意

Fig.3 Shape modification method with mask

し、そこを通過したビームを集光すれば、その形状に応じた加工ができる。しかし、レーザビームの強度分布は一様ではない。たとえば、ガウス分布であれば、中央部分が最も強く、周辺は弱い。ため、Fig.3 の中央部分の加工量は周辺部より大きくなる。それゆえ、マスクへ入る前のビーム強度分布を一様にする必要がある。このためにビームホモジナイザが用いられ、カライドスコープの利用などいくつかの方法が考えられている。

また、大きな面を加工するのに、スポットビームを走査しながら照射する方法もあるが、線状のビームをその直角方向に走査し、刷毛で塗装するように照射することも可能である。もちろん、十分なパワー密度を実現できることが必要である。

Fig.4 にガウス分布ビームの線状化の方法例を示す。この方法では、ビームの密度を一様化するために不要の部分を排除するなど、効率を低下させることになる。

このビーム (Nd:YAG レーザ) を用いて窒化ケイ素セラミックス(Si_3N_4)を加工した例を Fig.5 に示す。線状ビームの直角方向に移動して得られた溝の断面である。理想的には断面が矩形状になるはずであるが、逆台形となっている。これは、隅の部分は熱伝導の次元が中央部とは異なるためであると考えられる。すなわち、熱伝導は中央部では深さ方向への一次元であるが、隅においては深さ、横方向の二次元的になること、およびパワー密度が完全には一様となっていないためであろう。しかし、この台形であることを利用して、V溝の加工が可能である。すなわち、ビームを横方向へずらし表面層を加工し、つぎに、これを繰り返して深い方向へ加工していく。その結果、V型

Fig.4 Arrangement of lenses and mask for linear beam

Fig.5 Cross section processed with linear beam

の形状加工ができる。

結晶化ガラスセラミックスの加工例を Fig.6 に示す。加熱による除去加工であるから、溶融体残留物を完全に除去することは不可能であり、寸法精度を出すことはできない。この材料の形状加工は、研削加工によるが、このレーザ加工を前加工として適用すると、作業時間を 1/3 程度に短縮できる。

Fig.6 Cross section of processed notch in crystallized glass ceramics

3.2 NC 装置による形状加工

スポットビームと NC 装置の組み合わせにより板材の各種形状の切断加工ができる。これは生産現場で利用度の高い技術である。切断可能な板厚、切断速度、得られる加工面粗さなど、非常に重要なテーマである。特に、kW オーダ出力の CO₂ レーザによる高速切断は重要であるが、ここでは、特殊形状の加工例を述べる。

Fig.7, Fig.8 は Q スイッチ Nd:YAG レーザによるダイヤモンドと工具鋼に歯車形状を加工した例である^{3,4)}。ともに大気中加工である。Fig.7 は機械的加工では不可能な材料にも加工できるとい

Fig.7 Processing of diamond gear with NC apparatus

う例として示したものである(歯先円直径 0.8mm, モジュール 0.08 mm, 厚さ 0.3 mm). 一方, Fig.8 は工具鋼の歯車列(厚さ 0.1 mm, 歯先円直径 1.2 mm, モジュール 0.12 mm)であり, ラックと組み合わせてあり, これに往復直線運動を加え, 歯車を回転できる.

熔融・蒸発による加工であるから, 表面には残留層が形成され, 滑らかではない. たとえば, 3.4

Fig.8 Gear train of tool steel

節でも述べるが, ダイヤモンドの加工部表面はアモルファス化しているものと思われる.

なお, 工具鋼の歯車列を回転した時の歯面粗さ (R_{max}) は, 最初 11 μm であったが, 約 10^4 回転した結果 8 μm となった. さらに, ラップ砥粒 (アランダム #500, #1000, 20 wt%) を供給しながら回転した場合, 10^3 回転した結果, 粗さは約 2.5 μm , 7 μm となった. 回転後の歯面には熔融残留層の剥離などが観察された.

加工表面に残留する熱影響層を減少させるためには化学反応を併用した加工法が用いられる. これについては後述する.

3.3 Q スイッチ周波数と加工量の関係を利用した三次元形状加工

一般に, 深さ方向の除去量は加工時間, パワー密度により制御する. 生産用に多用される Q スイッチ発振レーザーの出力特性 (パルス当りの出力, パルス幅など) は周波数に依存する. したがって, 材料除去特性も異なる. この周波数-除去量 (加

工深さ) の関係を用いて, モデル形状の高さを Q スイッチ周波数に変換し, x,y 方向は NC 制御によって形状加工を試みた例を Fig.9 に示す⁵⁾. 百円硬貨の表面形状を窒化ケイ素に彫刻した例である (加工部の長辺は 16 mm). 比較的残留層の少ない材料であるため, 滑らかな面が得られている.

Fig.9 3-D processing due to modulated Q-switched YAG laser

3.4 レーザ援用加工

加熱加工における熔融・蒸発除去では, 必ず加工表面に加工変質層 (熔融再凝固層, 熱変質層) が残留する. この層が生成しない方法として化学反応による除去がある. レーザによる微小な照射部のみに加熱を併用して化学反応を促進し, 一部分のみの除去を行うものである (レーザーアシストケミカルエッチング).

本加工は, 最初, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiC}$ セラミックスなどに適用され, その有効性が示された. また, この方法はダイヤモンドにも有効である. たとえば, KOH 水溶液 (10 wt%) におけるダイヤモンドの Nd:YAG レーザ加工面のラマン分光分析結果を Fig.10 に示す⁶⁾. 大気中加工では, 加工面はアモルファス化している. 一方, KOH 水溶液中では 1333 cm^{-1} においてダイヤモンドの鋭いピークがあり, 熱影響層のない加工を実現している.

なお, 単結晶ダイヤモンドは Nd:YAG レーザ光 (1.06 μm) を透過しやすく, 加熱できない. しかし, 金属板 (SUS430) の上にこの材料を配置し, 上から透過したレーザービームを金属板に照射し, 金属を加熱する. その結果, その部分の化学液が突沸・

ガス化してダイヤモンドが熱化学反応し、加工が進む。この方法を用いて高温高压合成単結晶ダイ

Fig.10 Raman spectrum of laser processed diamond

Fig.11 Pivot bearing of diamond

ヤモンドにピボット軸受け状の穴を製作した例を Fig.11 に示す。

一方、この方法は金属箔材の精密切断にも有効である。たとえば、厚さ 10 μm の SUS304 箔を

Q スイッチ Nd:YAG レーザで切断したときの切断カーフ幅は、大気中: 29 μm , 水中: 12 μm , KOH 水溶液中(20 wt%): 7 μm であった⁸⁾。また、切断部の外観は KOH 溶液中加工が最も優れており、大気中、水中で観察された溶融物の付着や熱影響による変色はほとんど見られない。

この加工は液中であるから、泡や液面の波の発生がビームの集光性に影響する。それゆえ、加工部の構成には工夫が必要であることはいままでもない。

3.5 紫外光によるアブレーション加工

アブレーションは、特に紫外光によるポリマー加工で顕著な現象である。ns オーダの短パルスのエキシマレーザや Nd:YAG レーザの高調波光により 1 発のパルスでサブミクロンの層の除去が可能である。すなわち、加工深さ方向はサブミクロンの精度が可能である。なお、この深さは吸収係数、エネルギー密度で決まることは当然である。また、マスクによりビームを整形し、縮小光学系を用いれば、1 パルス当りの体積除去量は非常に微小なものにすることができ、微細な形状加工が可能である。

Fig.12 Polymer processing with excimer laser

Fig.12 にエキシマレーザによるポリマーの加工例を示す⁹⁾。エッジの鋭い加工が可能である。

Nd:YAG レーザの 4 倍高調波(266 nm)を用い、ポリイミドを試料とし、加工位置を 5 軸ステージで制御した微小な三次元形状の加工も試みられて

いる。直径 1 mm 程度の風車とその軸受け、地球儀などの製作例がある¹⁰⁾。

3.6 フェムト秒レーザ加工

フェムト秒レーザ加工には、パルス幅 100 fs 程度、波長約 770 nm のチタンサファイヤレーザが主として使われている。このレーザはパワー密度が非常に高く、 10^{13} W/mm^2 に達する。それゆえ、多光子吸収が起こり、紫外光と同じ作用となる。また、加熱作用としては熱拡散長が短いため、周囲への熱影響がない加工が行われる。

Fig.13 に単結晶ダイヤモンドの微細な四角形の切断加工例 (1 J/mm^2 , パルス幅 150 fs, 送り速度 $5 \mu\text{m/s}$, 2 回走査) を示す¹¹⁾。除去物付着のないクリーンな加工である。なお、ダイヤモンドにおいては、高いエネルギー密度か、遅い走査速度によって鋭いエッジの切断が可能である。

Fig.13 Micro-square cutting of single-crystal diamond by fs laser

3.7 マーキング

マーキングは表面の一部分を周囲とは異なる形態に加工し、目視によって識別できる状態を長期間保持して目的を達成する。それゆえ、ごく表層だけ変化させればよく、各種の加工形態が考えられる。たとえば、表面酸化、熱変質、表層溶融、表面脱色、表層除去などである。IC パッケージ、シリコンウェハへのマーキングなど非常に広い範囲に利用される技術であり、レーザ加工技術として最も使われるものの一つである。

方法としては、マスクパターンを投影する方法とガルバノミラーでビームを走査する方法がある。特に、後者の方法はコンピュータにより自由にパターン形状を制御できるため、柔軟性に富む方法である。

ここでは、着色に関する実験例を紹介する。ジルコニアセラミックスを加熱するとその周辺は黒化する。穴加工(穴直径 0.15 mm)周辺の変色例を Fig.14 に示す¹²⁾。これは加熱により酸素が欠乏したためと考えられる。

Fig.14 Blackening of zirconia ceramics

また、金属を大気中で加熱すると表面層に酸化膜が生じ、その厚さによって各種色調を呈する。レーザ加工痕周辺が変色するのはよく経験することである。SUS304 における Nd:YAG レーザのパワー密度と色調の関係を Lab 色差法 (Z JIS8730) で表示した結果もある¹³⁾。

3.8 その他

いろいろな加工法があるが、造形、フォーミング、クリーニングについて述べる。

造形は液体あるいは粉末をレーザエネルギーにより固体化して形状を作る方法である。微細な形状創製には、細いビームによって液体高分子の微小部分を重合化し、それを繰り返して全体の形状を作る。特に、フェムト秒レーザによって μm オーダの形状を作ることができる。これは、近赤外光では重合しないが、特に密度の高い部分で発生する二光子吸収(紫外線に対応)によっては重合して固体化する現象を利用している¹⁴⁾。二光子吸収はパワー密度の 2 乗に比例して起こるため、ビームスポット中心部でのみ生じる。

レーザフォーミングは造船関係で古くから利用されている技術をレーザによって行うものである。mm オーダの板材の成形が試みられているが、 μm オーダの箔を用いて、サブミリオーダの構造体を作る試みもある¹⁵⁾。

形状を造る加工とは異なるが、ごく表層のみを除去すれば材料表面をクリーニングできる。除去量を多くすればさび取りや付着した不純物の除去も可能である。

この作用はごく表層であり、力の作用も少ないため、美術工芸品に長期間にわたり付着した汚れを除去するのにも利用される¹⁶⁾。

4. 最後に

レーザによる微細加工の一部について、実験結果を中心として紹介した。この技術はナノテクノロジーに関連する分野もあり、いわゆる加工というイメージとは大きく離れた分野にもつながっている。今後、ますます微細化の方向へ展開するものと思われる。

参考文献

- 1) 田中義弘, 徳永剛, 宮崎俊行: 整形線状ビームによる三次元レーザ加工, 精密工学会誌, Vol.60, No.3 (1994), pp.397-401.
- 2) T.Miyazaki, Y.Tanaka and T.Tokunaga: Linear-shaped YAG Laser Beam with Uniform Power Density Distribution Applied to Machining of Ceramics, Annals of the CIRP, Vol.43, No.1(1994), pp.167-170.
- 3) 宮崎俊行, 三宅正二郎, 田中義弘, 渡部修一: 微小ダイヤモンド歯車の製作, 日本機械学会第70期(1992)全国大会講演論文集, Vol.E, 411-412.
- 4) T.Miyazaki, Y.Tanaka, T.Tokunaga and S.Yoshioka: Gear Cutting with YAG Laser Beam, Pro. Laser Material Processing Conference, ICALEO'97(1997), Ser.A, pp.99-10.
- 5) 高橋良夫: 周波数変調された Q スイッチ YAG レーザーのセラミックス加工への応用, 応用物理, Vol.57, No.11(1988), pp.1789-1797.
- 6) 宮沢肇, 三宅正二郎, 宮崎俊行, 渡部修一, 村川正夫: ダイヤモンドのレーザアシスト熱化学加工に関する研究, 精密工学会誌, Vol.61, No.3 (1995), pp.415-419.
- 7) H.Miyazawa, S.Miyake, S.Watanabe, S.Takeuchi, T.Miyazaki and M.Murakawa: Laser Microcontouring of Diamonds, Proc. ICALEO'95(1995), pp.381-390.
- 8) 宮沢肇, 矢川浩, 三宅正二郎: レーザによる金属箔材の精密切断, レーザ協会誌, Vol.26, No.2・3(2001), pp.62-67.
- 9) 丸文株式会社カタログ(2003-2004).
- 10) 吉井啓太, 甲斐晶寛, 金口和男, 吉田正和, 河村良行: 紫外パルスレーザによる微小立体加工法に関する研究(3), 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, p.393.
- 11) H.Miyazawa, S.Takeuchi, M.Murakawa, M.Murakawa and K.Shihoyama: Processing of Diamonds by Short Pulse Lasers, New Diamond and Frontier Carbon Technology, Vol.13, No.6(2003), pp.353-364.
- 12) 吉岡俊朗, 小林忠司, 田中義弘, 山本恭栄, 宮崎俊行: ジルコニアの QswYAG レーザ加工特性と黒化およびクラックの発生, 精密工学会誌, Vol.55, No.7(1989), pp.1277-1282.
- 13) 小出兼一郎, 宮崎俊行, 三須直志, 吉岡俊朗, 田中義弘: YAG レーザによる SUS304 の色調マスキング特性, 2003 年度精密工学会秋季学術講演会, p.324.
- 14) S.Maruo and S.Kawata: Two-Photon-Absorbed Near-Infrared Photopolymerization for Three-Dimensional Microfabrication, J. Microelectromechanical Systems, Vol.7, No.4 (1998) pp. 411-415.
- 15) S.Yoshioka, T.Miyazaki, T.Misu, R.Oba and M.Saito: Laser forming of thin foil by a newly developed sample holding method, J. Laser Application, Vol.15, No.2 (2003) pp. 96- 100.
- 16) 小原寛, 荒井恒憲, 緑川克美: レーザ応用工学, コロナ社(1998)p.87.

(2003 年 9 月 24 日 受付)