加工音を用いたYAGレーザー加工溝深さ変化のモニタリング

栗田 恒雄, 大野 幸彦*, 仲井 強**

工業技術院機械技術研究所 (〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2)

*東京都立科学技術大学工学部機械システム工学科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6)

**東京都立科学技術大学大学院 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6)

A Study of Groove Depth Profile Monitoring Using the YAG Laser Processing Sound

Tsuneo KURITA, Tomohiko ONO,* and Tsuyoshi NAKAI**

Mechanical Engineering Laboratory, 1-2 Namiki, Tukuba, Ibaraki 305-8564

*Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

**Master grade school, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

(Received May 6, 1999)

The final goal of this research is to construct a laser processing system to manufacture stepped shapes by utilizing detected processing sound. In order to achieve this goal, the basic investigations concern analyzing the relationship between laser processing characteristics and processing sound. The main purpose of this report is to verify experimentally the possibility of monitoring the processed depth profile by using the value and fluctuation of the sound pressure level of processing sound. The main findings of this research are as follows: (1) The relationship between the depth of groove and sound pressure level can be represented by linear equation when $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ ceramic is used as the work material. (2) There exists a linear relationship between both fluctuations of bottom roughness of processed groove and sound pressure level when the laser energy per pulse is kept constant. (3) The depth profile of processed groove can be monitored by using processed sound.

Key Words: YAG laser, Laser grooving, Processing sound, Acoustic monitoring, Ceramic material

1. 緒 論

セラミックなどの硬質材料は硬度が高い特徴に加えて、熱伝導率が高い、比重が小さい等の理由から、先端材料として様々な分野の製品に応用されている¹⁾。しかし、高硬度、高脆性等の理由により、製品として必要な形状に精度よく加工することが困難である。レーザー加工は非接触加工であるために被加工材料の機械的特性に影響を受けず加工することが可能で、セラミックなどの硬質材料を加工するのに有効であると考えられるが、物理的接触によって加工を行わない、加工時に加熱、溶融、蒸発等のプロセスが連続して発生する等の理由により加工状態を把握することが非常に難しい。従って、レーザー加工時に発生する様々な出力から加工状態、加工品位などを監視するレーザー加工システムを開発することは非常に有効であると考えられる。このようなシステムを構築するために、レーザー加工時に発生するプラズマ²⁾、レーザー加工時における被加工材料の温度³⁾、被加工材料の振動^{4,5)}、アシストガス吹き付け時の反響音^{6,7)}等のようなレーザー加工時に発生する出力を利用し加工状態を把握する試みが行われている^{8,9)}。本研究の最終目標は、レーザー加工時に発生する様々な出力のうち、加工時に発生する音響を用いて加工状

態を把握、制御するレーザー加工システムを開発することである。その最終目標の前段階としてステップ形状を創成することを対象としたレーザー溝加工において、加工時に発生する加工音を用いることにより加工状態を把握することを考え、本報では加工状態の把握に必要な溝加工時に発生する加工音と溝深さ、および音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅との関係を実験的に求めること、またその関係を用いて加工時に発生した加工音をもとに加工溝の縦断面形状をモニタリングすることを目的として研究を行った。

2. 実験機器および実験方法

2.1 実験機器

Fig.1にレーザー加工時に発生する加工音を検出および分析するために用いた実験機器の構成を示す。レーザー加工機は連続励起の TEM_{00} シングルモードYAGレーザーにAO-Qスイッチを付加したものをを用いた。加工音と加工特性の関係を示すために溝加工を行い、発生した加工音をレーザー光照射点から40mm、被加工材料の表面に対して30°の位置に設定したコンデンサマイクロフォンで集音してからFFT解析装置に収録した。収録した加工音より周波

Fig.1 Experimental setup for a detection and an analysis of a laser processing sound.

数特性を求め、特定周波数における音圧レベルの時間変化を求めた。一方、溝加工した被加工材料を、溝方向に対して、溝の最も深い底面が現れるまでダイヤモンド砥石を用いて研削し、加工溝の縦断面形状を求めた。研削によって現れた縦断面形状を走査型電子顕微鏡によって撮影し、加工されている部分を観察した。

2.2 実験方法

筆者らは、レーザー溝加工において発生した加工音と加工特性との相関性を実験的に求めている^{10,11)}。しかし、溝深さ、溝断面積などの加工特性は加工した溝の横断面形状を数ヶ所計測し、それらの値を平均することによって算出している。また加工音も溝加工開始時から終了時までの全域について収録した音を分析している。このため加工音と加工特性の関係は各々平均化された状態におけるデータを基にして求めたものであり、溝加工中に発生する加工音のゆらぎと加工特性との相関性を考察する場合、従来の相関性を適用することは難しい。従って本研究では溝の長さが1.25mmであるレーザー溝加工をおこない、加工中に発生した加工音と溝の縦断面形状を比較し、両者の相関性を実験的に求めた。またこの相関性が、加工条件の変化によってどのように変化するかを明らかにした。なお、前報においてレーザーパルスを照射したときに発生した音圧の最大振幅である加工音の強さと、溝の横断面形状における1パルスあたりの除去溝断面積との間に相関関係が存在することを実験的に示しているが¹¹⁾、加工のモニタリングを目的とした本研究では、レーザー加工機の駆動音等加工以外の雑音を排除すること、加工音圧の最大振幅をFFT解析装置によって自動的に抽出することが難しいなどの理由より、加工音として特定周波数における音圧レベルを考え、特定周波数における音圧レベルの時間変化を測定した。

次に、これらの結果が加工音を用いた加工状態のモニタリングに有効であるかどうか知るために、レーザー加工機の加工条件をレーザーエネルギー0.62mJ/pulse、Qスイッチ周波数1kHzと一定で、ステージ移動速度のみを変化させることによってAl₂O₃+TiCを設定した形状に加工し、発生した加工音から溝の縦断面形状のモニタリングをおこなった。このモニタリング結果と、実際に加工された溝の縦断面形状を比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 加工音と加工特性の関係

3.1.1 加工音と溝の縦断面形状の関係

レーザー溝加工中に発生する加工音とそのとき形成された溝の縦断面形状との関係を知るために、レーザー加工条件をレーザーエネルギー0.25mJ/pulse、ステージ移動速度0.1mm/s、Qスイッチ周波数1kHzとしたときの加工音の周波数特性において、特定周波数10kHzにおける音圧レベル成分の時間変化とそのときに加工された溝の縦断面形状を求めFig.2に示す。Fig.2において溝の縦断面形状は、上部が加工された溝底面側、下部は被加工材料の表面側を示している。また、加工された縦断面形状の変化をわかりやすく示すために溝底部周辺のみを、縦方向に拡大して表示し、加工時間と特定周波数における音圧レベル、加工時間と加工溝をそれぞれ対応させた。この図より、特定周波数における音圧レベルの時間変化と加工された溝の縦断面形状における溝底部の変化を比較すると、両者の変化は非常に類似していることが確認できる。

さらに両者に定量的な関係が存在するかどうかを調べるため、同図の加工開始点からある時間経過した何点かににおける溝深さと音圧レベルの値を測定し、両者の関係を表した結果をFig.3 (a)におけるステージ移動速度0.1mm/sの直線として示す。この結果から、加工された溝深さと、その時に発生した加工音に含まれる特定周波数における音圧レベルの値は強い相関関係が存在することが理解できる。

次に上記の関係が加工条件および被加工材料を変化させた場合においても成り立つかどうかを確認するために、同様の実験と測定を行った。Fig.3 (a)に、ステージ移動速度を更に0.05および0.15mm/sの2段階追加して実験した結果を示す。同図より特定周波数の音圧レベルと溝深さの間には、ステージ移動速度を0.05~0.15mm/sの範囲で変化させた場合にも直線関係が存在することが確認できた。またこれらのステージ移動速度の場合に、溝深さが10μm変化すると特定周波数における音圧レベルが約5dB変化しており、すべての直線の勾配は等しいことが明らかとなっ

Fig.2 Fluctuations of sound pressure level and bottom of groove versus processing time. Laser energy: 0.25 mJ/s, stage travel speed: 0.1 mm/s, Q-sw. frequency: 1 kHz, and work material: Al₂O₃ + TiC.

Fig.3 Relationship between depth of groove and sound pressure level. Q-sw. frequency: 1 kHz.

た。一方、Qスイッチ周波数1kHz、ステージ移動速度を0.05mm/sとし、レーザーエネルギーを0.25および0.62mJ/pulseに変化させた場合の両者の関係を同図(b)に示す。この図より供給したエネルギーを変えた場合にも音圧レベルと溝深さの間には直線関係が存在するが、両者の直線の勾配は大きく異なっていることが理解できる。つぎに、特定周波数における音圧レベルと溝深さの相関性におよぼす被加工材料の影響を調べるために、被加工材料 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ および $\text{WC} + \text{Co}$ で求めた結果を同図(c)に示す。被加工材料が $\text{WC} + \text{Co}$ の場合には $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ の場合とは異なり、音圧レベルと溝深さの間には相関性が存在しないことが見いだされた。

3.1.2 音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅の関係

前章においてレーザー溝加工時に発生した加工音の特定周波数における音圧レベルとそのとき加工された溝深さとの間には、被加工材料を $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ としたとき、各々の加工条件において定量的な相関関係が存在することを示した。このことは、加工中に発生した特定周波数における音圧レベルとそのとき加工された加工溝の溝深さは1対1に対応していることを示している。しかし、加工条件の変化に対してこの直線的な関係は種々変化する。一方実際のレーザー加工では、種々のレーザー加工条件を広い範囲で変化させることが考えられる。そのため、レーザー加工の状態を監視するには、加工特性と加工音との相関性が加工条件の変化することによってどのように変化するかを

系統的に調査することが重要である。

従って本章では、レーザー溝加工時に発生した加工音の周波数特性における特定周波数の音圧レベルの変化とそのとき加工された溝の縦断面形状における溝深さのゆらぎに注目し、加工条件の変化に対する両者の関係を実験的に示した。

Fig.4はレーザーエネルギーを0.25～0.62mJ/pulseの範囲で変化させ、それぞれのレーザーエネルギーにおいてステージ移動速度を0.02～0.15mm/sの範囲で変化させた音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅の関係である。なお、音圧レベル変化量は、それぞれの加工条件において加工をおこなう際発生した加工音をFFT変換して周波数成分10kHzにおける音圧レベル値の時間に対する変化を求め、その結果から音圧レベルの高い順から3番目、低い順から3番目を選びそれらの差とした。また、加工溝深さのゆらぎ振幅は、それぞれの加工条件における溝の縦断面形状を求め、溝深さの変化から十点平均粗さ(R_z)を読みとり、その値とした。まず、加工溝深さのゆらぎ振幅と音圧レベル変化量との関係を示す。被加工材料は $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ で、ステージ移動速度およびQスイッチ周波数を何段階かに変化させた。同図はレーザーエネルギーをパラメータとして示しているが、この値が一定であれば加工条件に依存せずに加工溝深さのゆらぎ振幅と音圧レベル変化量との関係は直線で表すことができ、その勾配は供給するレーザーエネルギー量に依存していることが理解できる。同図に一般性を与えるために、これら直線の勾配とレーザーエネルギーの関係を示したのがFig.5である。なお、ステージ移動速度を変化させたときの加工溝深さのゆらぎ振幅と音圧レベル変化量の直線の勾配は各加工条件における点が比例関係にあると仮定して、最小2乗法によって比例定数を求めた。これより、レーザーエネルギーの逆数とFig.4の各直線の勾配の値の間には直線関係があることが見いだされた。このことは加工溝深さのゆらぎ振幅と音圧レベル変化量との間に存在する直線関係における傾きが、供給するレーザーエネルギーを0.25～0.62mJ/pulseの範囲で変化させる限り、レーザーエネルギー量の逆数に対応して直線的

Fig.4 Relationship between the height fluctuation of bottom of groove and the width of fluctuation of sound pressure level. Stage travel speed: 0.05 ~ 0.15 mm/s, Q-sw. frequency: 1 ~ 5 kHz, and work material: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.

Fig.5 Relationship between inverse value of laser energy and proportional constant.

に変化することを示している。

3.2 溝の縦断面形状モニタリング

本研究の最終目標はレーザー加工時に発生する音響を用いて加工状態を制御するレーザー加工システムを開発することである。前章において実験的に求めた関係が本研究の最終目標を達成するために有効かどうか確認するために、“3.1 加工音と加工特性の関係”における実験結果を用いて溝の縦断面形状をモニタリングすることを試み、加工実験を行った。

Fig.6に溝の縦断面形状をモニタリングする概念図を示す。これは希望の縦断面形状をレーザーエネルギー 0.62mJ/pulse, Qスイッチ周波数1kHz, 被加工材料 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ の一定条件においてステージ移動速度を0~1.5mm/sの範囲で変化させることにより加工し、その際発生した加工

Fig.6 Structure of monitoring system.

音から加工特性と加工音に関する実験データを用いて溝の縦断面形状をモニタリングするものである。溝の縦断面形状をモニタリングするために、4つの要素を用いた。

(1) 平均溝深さとステージ移動速度の関係

Fig.7に平均溝深さとステージ移動速度の関係を示す。平均溝深さは、溝深さを溝の進行方向に対して垂直に切断した断面において被加工材料表面から最も深い部分の距離とし、溝深さの値を4回求めそれらの平均値とした。この図より平均溝深さを入力すると、溝深さとステージ移動速度の関係をj用いて、その平均溝深さを加工するのに必要なステージ移動速度が導き出せる。なお、Fig.7の関係を求めた実験条件において、横断面形状の溝幅はステージ移動速度を変化させても変化しない。

(2) ステージ移動速度と平均音圧レベルの関係

Fig.8にステージ移動速度と平均音圧レベルの関係を示す¹⁰⁾。平均音圧レベルは、溝加工中に発生した加工音をFFT解析装置により解析し、周波数成分10kHzにおける音圧レベルの時間変化曲線から求めた平均値とした。この図より、あるステージ移動速度を代入すると、そのステージ移動速度で溝加工を行ったとき発生する加工音の平均音圧レベルを示す基準加工音が導き出せる。

(3) 加工

実際に加工を行うことを示しておりステージ移動速度を代入すると、代入したステージ移動速度で加工を行い、加工された溝の縦断面形状を示す実加工形状、加工中に発生した加工音における特定周波数の音圧レベルと定義する実加工音が出力されると考えた。

(4) 音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅の関係

Fig.4において求めた関係である。このシステムの場合、ステージ移動速度のみ変化させているので、レーザーエネルギーは一定である。“3.1.2 音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅の関係”においてレーザーエネルギーが一定の場合、音圧レベル変化量と、加工溝深さのゆらぎ振幅の関係は、直線で表現できることが明らかになっている。ここでは、加工条件からレーザーエネルギーが0.62mJ/pulseであることが分かっているので、Fig.4においてレーザーエネルギー0.62mJ/pulseにおける直線関係を用いた。ただし、音圧レベル変化量が負の値で代入された場合はFig.4の係に

Fig.7 Relationship between mean depth of groove and stage travel speed. Laser energy: 0.62 mJ/pulse, Q-sw. frequency: 1 kHz, and work material: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.

Fig.8 Relationship between stage travel speed and sound pressure level. Laser energy: 0.62 mJ/pulse, Q-sw. frequency: 1 kHz, and work material: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.

直接音圧レベル変化量を代入することができないので、加工溝深さのゆらぎ振幅は音圧レベル変化量の絶対値を代入した結果に負符号をつけた値で導き出すものとした。

次にFig.6をもとにモニタリング形状創製のためのプロセスについて述べる。加工したい溝の縦断面形状を表す設計形状から読みとった溝深さの値を平均溝深さとし、平均溝深さとステージ移動速度の関係を用いて、設計形状を加工することができるステージ移動速度を算出する。そのステージ移動速度に従いNCステージを制御して実際に加工を行った。またステージ移動速度は、ステージ移動速度と平均音圧レベルの関係に代入して基準加工音を算出した。ステージ移動速度と平均音圧レベルの関係、および平均溝深さとステージ移動速度の関係における平均音圧レベル、平均溝深さは溝加工中の平均値を求めているので、これらの値を通常加工が行われたときに発生する加工音、加工される溝深さと考えた。基準加工音と実際に加工を行ったときの特定周波数における音圧レベル値の差を、通常発生する加工音と実際に発生した加工音の差と考え、この値を音圧レベル変化量とした。音圧レベル変化量を音圧レベル変化量と加工溝深さのゆらぎ振幅の関係に代入し出力された加工溝深さのゆらぎ振幅は、通常の加工で創成できる加工溝深さと実際に加工された溝深さの差と考えられる。また、“3.1.1 加工音と溝の縦断面形状の関係”において加工音の特定周波数における音圧レベルとそのとき加工された溝深さは1対1に対応することが明らかとなっているので、加工溝深さのゆらぎ振幅と設計形状との和をモニタリング形状と考えた。この結果と、加工された溝の縦断面形状である実加工形状との比較を行った。

Fig.9は、溝の縦断面形状に2段のステップ形状を設定した設計形状と、モニタリング形状および実加工形状の縦断面形状を同時に示している。なお実加工形状は、被加工材料を研削して溝の縦断面形状を創成し、SEMで断面形状を撮影して求めた。同図に示すようにこの研削作業時の誤差が主要な原因で、実加工形状はすべての加工位置においてモニタリング形状よりも小さな値(溝が浅いことに対応する)となるのであるが、モニタリング形状と加工形状の差は50 μm 未満の値であって、ほぼ一致していると評価できる。従って被加工材料を $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ とし、ステージ移動速

Fig.9 Depth profile of processed groove and monitored result. Laser energy: 0.62 mJ/pulse, Q-sw. frequency: 1 kHz, and work material: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.

度のみを変化させたレーザー溝加工において、加工音を検出・解析すること、および事前に収集して解析した加工条件と加工音および加工音と加工特性との相関性に関するデータを用いることで、縦断面形状をかなりの精度で検出できることが証明できた。

4. 結 論

本研究で示した結論を以下に記述する。

- 1) YAGレーザー加工をおこなったときの溝深さとそのとき発生した加工音の特定周波数における音圧レベルとの関係を求め、両者の間には被加工材料を $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ としたとき定量的な関係が存在することを実験的に示した。一方、被加工材料を $\text{WC} + \text{CO}$ とした場合、相関は得ることができなかった。
- 2) レーザーエネルギーの逆数とステージ移動速度を変化させたときの加工溝深さのゆらぎ振幅と音圧レベル変化量の直線の傾きとの間には、比例関係が存在することを明らかにした。
- 3) 加工音を基に作成した溝の縦断面形状であるモニタリング形状と、実際に加工を行いもとめた実加工形状の比較をおこなった結果、両者の形状はほぼ一致し、本研究で示したモニタリングの方法は有効であることを実験的に示した。

参考文献

- 1) 今中 治：セラミックス加工ハンドブック（建設産業調査会、1987）p.602.
- 2) P. Sheng and G. Chryssolouris: J. Mater. Technol. **43** (1994) 125.
- 3) P. Sheng and G. Chryssolouris: J. Mater. Technol. **43** (1994) 145.
- 4) D. Charalabos: Manufacturing Science and Engineering ASME. **2** (1995) 487.
- 5) J. Yang, T. Sanderson, G. Graham, and C. Ume: Manufacturing Science and Engineering ASME. **68** (1994) 245.
- 6) Hongping Gu and W. W. Duley: Appl. Phys. **29** (1996) 550.
- 7) Hongping Gu and W. W. Duley: Appl. Phys. **29** (1996) 556.
- 8) W. W. Duley and Y. L. Mao: Appl. Phys. **27** (1994) 1379.
- 9) K. S. Chawla and J. Norrish: COMPUTER TECHNOLOGY IN WELDING. **3** (1992) 54.
- 10) 栗田 恒雄, 大野 幸彦, 森田 昇：レーザー研究 **25** (1997) 88.
- 11) 栗田 恒雄, 大野 幸彦, 森田 昇：レーザー研究 **27** (1999) 286.