高速繰り返しQスイッチ発振YAGレーザーにおける 1パルス加工量と加工音の相関性の研究

栗田 恒雄, 大野 幸彦*, 森田 昇**

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)

*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)

**千葉大学 工学部機械工学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

Study of the Relationship between Groove Cross-Sectional Area per Pulse of High Repetition Q-switched YAG Laser and Strength of Processing Sound

Tsuneo KURITA, Tomohiko ONO*, and Noboru MORITA**

Graduate school, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

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

**Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

(Received October 14, 1998)

The goal of the research is to construct a laser processing system for the manufacture of stepped shapes. In order to achieve this goal, this study aims to clarify the relationship between the strength of laser processing sound and groove cross-sectional area per pulse when a Q-switched YAG laser beam was applied for laser grooving. The main findings of this study are as follows: 1) The relationship between the strength of the processing sound and groove cross-sectional area per pulse of Q-switched laser beam could be expressed by a straight line on a log-log chart even if the applied laser energies were changed, and 2) The gradient of the straight line showed different values when two types of work materials were processed by a Q-switched YAG laser.

Key Words: Q-switched YAG laser, Ceramic material, Groove cross-sectional area, Processing sound, Monitoring

1. 緒 論

工具と被加工材料の接触によって加工が行われる機械加工とは異なり、レーザー加工はエネルギーを直接被加工材料に加えて材料の除去等を行うために、加工特性が材料の硬さに依存しないこと、また材料表面に照射されるレーザー光の焦点径は理論的にはレーザー光の波長と同じ値にまで小さくすることができるので非常に精密な加工を行うことが可能であるなどの特徴を備えている。しかし、レーザー加工ではこれらの長所を利用して加工することが可能な反面、加工工具が存在しないために除去される量あるいは加工される深さをほぼ一定に保つことが困難であるし、更に熔融、蒸発などの現象が連続的に発生するために、加工特性をモニタリングすることが極めて困難であるなどの問題をもっている。これらのことから、レーザー加工における利点を十分に活用するために、加工状態を監視し、特定の情報を用いて加工特性を制御できるレーザー加工システムを開発することができれば、レーザー加工の

高度化に資することができると考える。これを達成するために、加工の情報として加工中に発生する加工音を用いることが試みられている¹⁻¹⁰⁾。本研究の最終目標はレーザー加工時に発生する加工音を用いて加工状態を監視し、制御を行うレーザー溝加工を対象とした加工システムを開発することである。加工条件を変化させて加工特性の制御を行う場合、種々の加工条件を複雑かつ緻密に変化させる必要がある。この制御中に発生した加工音を用いて加工状態の監視を行うためには、加工条件の変化に対して影響を受けない基本的な加工音と加工特性との関係を求めることが重要である。筆者らは、加工音と加工特性の関係としてYAGレーザー光1パルスを照射したときに増加する加工穴の断面積とそのときの加工音の関係に注目し、照射周波数1Hzの低速繰り返しQスイッチ発振YAGレーザーによる穴あけ加工を行い、1パルス当たりの加工穴断面積と加工音に含まれる特定の周波数の音圧レベルとの関係を求め、両者の間にはある幅を持つ直線関係が存在することを実験的に明らかにした¹¹⁾。しかしレーザー光1パルスに

よる加工穴断面積の変化は少なく、それに依存する加工穴断面積の測定誤差などのために、両者の関係にある幅を持つ直線関係としてしか表わすことができなかった。この関係が正確に表現でき、かつ様々な加工条件との関係が明らかになれば、低速繰り返しQスイッチ発振YAGレーザー1パルス照射時の加工音と加工特性との関係から、レーザー光1パルス照射の連続が溝加工であると考えて、レーザー溝加工時の加工特性を加工音から監視することが可能になると考える。本研究は、1パルスのYAGレーザー光で除去される加工溝断面積の大きさと加工音の強さとのより正確な関係を、高速繰り返しQスイッチ発振YAGレーザーを用いた様々な加工条件における溝加工の結果を用いて明らかにすること、およびこの関係におよぼす被加工材料の影響をセラミック系材料を対象として実験的に明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置

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装置の構成を示す。レーザー発振器は、連続励起のTEM₀₀シングルモードYAGレーザー光を発振する装置に、AO-Qスイッチが付加しているLAY-615型である。なお本論文では、付属しているQスイッチによって照射周波数を500Hz～50kHzの範囲で変化させる高速繰り返しQスイッチ発振動作によるレーザー光を、Qスイッチ発振YAGレーザーと記述する。

数値制御ステージにセットした被加工材料にQスイッチ発振YAGレーザーを照射し、発生した加工音はレーザー光照射点から40mmの距離で、被加工材料の表面に対して30deg傾けて設置したコンデンサマイクロフォンで集音してから騒音計を用いて増幅し、DAT(Digital Audio Tape)レコーダに収録した。収録した加工音はFFT解析装置を用いて、加工音強さの時間に対する変化を計測した。なお、加工音の強さと対比させる加工溝断面積は、被加工材料の断面を#1000のダイヤモンド研削砥石によって形成し、走査型電子顕微鏡(SEM)像を用いて測定した溝断面積で表現した。

3. 実験結果

3.1 加工音強さの測定

Fig.2に、被加工材料として($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) セラミックを選

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

Fig.2 Relationship between groove volume increase rate and sound pressure level.

定し、Qスイッチ周波数2kHzおよびレーザーエネルギー1.10J/sの条件でステージ移動速度を0.01～4.0mm/sに変化させて溝加工を行った時に発生した加工音を周波数分析し、設定したQスイッチ周波数の整数倍の周波数における音圧レベルと加工量の関係を示す。同図には4種類の周波数における音圧レベルと単位時間当たりの除去体積(加工溝体積増加速度)との関係を示しているが、いずれの周波数の場合とも、加工溝体積増加速度と音圧レベルの関係は直線で表すことができる。このことは加工音と加工溝体積増加速度の関係を表現するのに、特定の周波数における音圧レベルを用いなくてもよいことを示している¹²⁾。そこで本報では、加工中に発生する加工音の代表値として加工音の強さを用いる方法を試みた。Fig.3は、被加工材料として($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックおよび($\text{WC} + \text{Co}$)超硬合金を選定し、ステージ移動速度1mm/s、Qスイッチ周波数3kHzおよびレーザーエネルギー1.40J/sの条件で溝加工を行った時に発生した、加工音強さの加工時間に対する変動の状態を示す。Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工時には、同図に示すように同型の信号が繰り返し出力されており、またこの信号の繰り返されている時間間隔は、加工条

Fig.3 Distribution pattern of the strength of processing sound versus processing time.

件として設定したQスイッチ周波数の逆数に等しくなること、および、被加工材料が異なると個々の信号の振幅が異なっていることなどから、各々の波形はQスイッチ発振YAGレーザー1パルスの照射に伴い発生した加工音に対応すると考えることができる。本研究では、Qスイッチ発振YAGレーザーの照射時に検出された信号の最大振幅を加工音の強さ(Pa)と定義した。

3.2 加工溝断面積の測定

Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工において、被加工材料上にレーザー光の焦点径を直径とする円を想定したとき、その部分にQスイッチ発振YAGレーザーが照射される回数は、ステージ移動速度を v (mm/s)、焦点径を d (μ m)、Qスイッチ周波数を q (kHz)とすれば、 $(d \cdot q)/v$ で計算される値で表すことができ、本研究ではこの回数の最大値を最大照射数と定義している。最大照射数を変化することにより、Fig.4に示すように加工される溝の断面積は異なってくる。本報では、同図の溝断面の面積を計算して、特定の加工条件における加工溝断面積と定義した。なお、Fig.4には被加工材料として選定した($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックおよび(WC+Co)超硬合金について、Qスイッチ発振YAGレーザーにより加工した溝断面の形状を示している。同じ加工条件であっても超硬合金の断面積はセラミックスの場合に比較して非常に小さいのが特徴的である。

3.3 加工溝断面積と加工音強さの関係

Fig.5に、($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックおよび(WC+Co)超硬合金を被加工材料としたときの、最大照射数に対する加工音の強さおよび加工溝断面積の関係を示す。($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックを被加工材料とした場合、加工溝断面積は最大照射数の増加に対して約3000回までは急激に増加するが、それ以上最大照射数を増加しても緩やかな傾向で増加す

Laser energy: 1.40 J/s, Initial width of groove: 80 μ m,
Stage travel speed: 0.01 ~ 1.5 mm/s, Q-sw. frequency: 3 kHz

Fig.4 SEM images of processed groove.

Laser energy: 1.40 J/s, Initial width of groove: 80 μ m,
Stage travel speed: 0.01 ~ 1.5 mm/s, Q-sw. frequency: 3 kHz

Fig.5 Strength of processing sound and groove cross sectional area versus maximum incident times of laser beam.

るだけである。その時に測定した加工音の強さは、最大照射数の増加に対して約3000回までは急激に減少、それ以上の値になると緩やかに減少する傾向を示す。一方(WC+Co)超硬合金の場合、変化の傾向はセラミックの場合と同様であるが、加工溝断面積、加工音強さの値ともセラミックに比較して小さな値となっている。この様に、加工条件は全く同じであっても、被加工材料によりレーザー光の最大照射数に対する加工溝断面積および発生する加工音の強さが大きく異なる現象が存在することを実験的に明らかにした。

4. 考 察

本研究の目的は、Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工において、レーザー光1パルスにより除去される加工溝断面積と、その時に発生した加工音の強さとの関係を実験的に明らかにすることである。すでに記述したように、筆者等は外部回路でQスイッチユニットを制御して任意の周波数のレーザー光を照射できる装置を製作し、1Hzのレーザー光を被加工材料に照射して、1パルス当たりの加工穴断面積とその時に発生した加工音に含まれる特定の周波数の音圧レベルとの間に直線関係が存在することを明らかにした¹²⁾。

ただしこの実験においては、

- 1) 低速繰り返しQスイッチレーザーを用いて行った穴あけ加工における加工穴断面積を算出するために、穴の最も深い位置が現われるまで#1000ダイヤモンド砥石で研削したが、研削作業時の微妙なダイヤル調整により、最も深い穴の位置を観察することが必ずしも容易ではなく、算出した加工穴断面積に誤差を生じていた可能性があること、
- 2) 実験の精度を高めることを目的として、同一条件における実験を何度も繰り返して実施するためには多くの時間が必要であること、

等から、加工穴断面積と加工音の音圧レベルの関係は、ある程度の誤差が存在することを前提として、幅を持った直線で表現せざるを得なかった。このため本報告の実験では、Fig.4に示した溝断面形状から算出した加工溝断面積を用いてQスイッチ発振YAGレーザー1パルスあたりの加工溝断面積を算出することを試みた。この方法を用いることにより、同一条件で加工した時の1パルスにより加工された複数の断面を容易に研削加工することにより求めることができ、それらの平均値を用いればある加工条件における断面積を既発表の論文¹²⁾において用いた手法よりも正確に算出することができる。しかし、Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた場合でも、1パルスのレーザー光による加工溝断面積の変化が少ないことは低速繰り返しQスイッチレーザーを用いた場合と同様なので、Fig.5に示した実験結果および以下の方法を用いてQスイッチ発振YAGレーザー1パルスあたりの加工溝断面積を算出した。

Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工において、最大照射数 N の時の加工溝断面積を V 、 N_0 の時の加工量を V_0 とすれば、最大照射数 N における1パルスあたりの加工溝断面積 V_p は、

$$V_p = (V - V_0) / (N - N_0) \quad (1)$$

の式を用いて求めることができる。Fig.5に示す曲線の何箇所かにおいて N および N_0 に対応する加工溝断面積の値を選んで V_p を算出した。また加工音の強さは、Qスイッチ発振YAGレーザーによる溝加工において最大照射数が N の時に発生した値を計測して用いた。

4.1 加工溝断面積と加工音の強さの関係におよぼす加工条件の影響

Fig.6に、($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックを被加工材料とした場合の、Qスイッチ発振YAGレーザー1パルスにより除去された加工溝断面積と、その時の加工音の強さの関係を示す。同図においてパラメータはQスイッチ発振YAGレーザー1パルスのエネルギーである。この値は供給したレーザーエネルギーおよびQスイッチ周波数の組み合わせで、0.2～0.62mJ/パルスの範囲で変化させた。同図から両者は対数グラフ上で直線関係を示すこと、およびQスイッチ発振YAGレーザー1パルスのエネルギーを変化させてもほぼ同一直線で表わされることが理解できる。このことは、レーザー加工条件である平均レーザー出力、Qスイッチ周波数およびステージ移動速度が変化しても、被加工材料が一定ならば、Qスイッチ発振YAGレーザー1パルスが照射された時に発生する加工音の強さを測定すれば、その時に除去される加工溝断面積の大きさを実験的に求めることができることを示している。

4.2 加工溝断面積と加工音の強さの関係におよぼす被加工材料の影響

加工溝断面積と加工音の強さの関係におよぼす被加工材料の影響を実験的に明らかにするために選定した4種類の被加工材料を、エネルギー分散形X線分光器(EDS)を用いて定性分析した結果をFig.7に示す。同図(a)、(b)に示し

Fig.6 Relationship between groove cross sectional area per pulse and strength of processing sound.

た($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)および Si_3N_4 セラミックでは主成分以外の元素は検出されず、主に標記の成分のみで構成されていると思われる。一方(WC+Co)および(WC+TiC+TaC+Co)超合金は、同図(c)、(d)に示すように標記元素以外に、製造工程で用いられる触媒であるFeあるいはAl等が検出されているが、主成分は炭化物を構成している金属元素とCoである。なお、定性分析に用いた測定器の特性で、酸素あるいは窒素等の軽元素は検出できない。Fig.8は、4種類の材料すべてを対象にして、レーザーエネルギー1.40J/s、Qスイッチ周波数3kHzおよびステージ移動速度0.01～1.50 mm/sの条件で、Qスイッチ発振YAGレーザー1パルスによ

Fig.7 Qualitative analysis of work material with EDS.

り除去される材料の加工溝断面積とそのときの加工音の強さの関係を求め、同一のグラフにまとめた結果である。1パルスのレーザー光により除去される材料の加工溝断面積の大きさが同じ場合、超硬合金に比較してセラミック材料が除去されるとき加工音は大きな値を示している。

同図から理解できる特徴的な現象は、2種類のセラミック材料および2種類の超硬合金の1パルス当たりの加工溝断面積と加工音の強さの関係は各々両対数グラフ上で直線で表すことができることである。Fig.9は最大照射数800の条件で加工された溝加工の断面のSEM像であるが、(WC+Co)超硬合金の場合(同図(b)参照)レーザー光の影響を受けたと考えられる溝は形成されているが、実際には溝の内部にレーザーエネルギーにより溶融した材料が再凝固したと思われる部分が多く残存しており、溝の一部しか被加工材料から除去されていないことがわかる。これに対して($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミック材料の場合(同図(a)参照)には、再凝固したと考えられる部分は超硬合金に比較すると少なく、かなりの部分が除去されている。即ち、同じ大きさの領域にレーザー光が影響をおよぼしているとしても、実質的には($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックの場合が(WC+Co)超硬合金よりも多くの材料が除去されていることになり、この差が加工音の強さの差として影響していると考えられる。

5. 結 論

1パルスのレーザー光で除去される被加工材料の加工溝断面積の大きさと加工音の強さとの関係を、Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工の結果を用いて明らかにし、更にこの関係におよぼす加工条件および被加工材料の影響を実験的に明らかにすることを目的とし実施した研究で得られた結論を、以下に記述する。

1) Qスイッチ発振YAGレーザーを用いた溝加工において、($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックおよび(WC+Co)超硬合金を被加工材料とした場合、レーザー光の最大照射数に対する加工音の強さおよび加工溝断面積の関係を実験的に求めた。その結果、最大照射数が増加すると加工溝断面積はある最大照射数までは急激に増加するが、それ以上最大照射数を増加すると緩やかな増加傾向を示す。一

Fig.8 Relationship between strength of processing sound and groove cross sectional area per pulse.

Fig.9 SEM images of cross sections of processed groove.

方加工音の強さに関しては加工溝断面積とは逆の傾向で減少する。(WC+Co)超硬合金の場合にも変化の傾向は同様であるが、いずれの値とも($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)セラミックを被加工材料とした場合より小さな値となる。

- 2) Qスイッチ発振YAGレーザーの1パルス当たりのエネルギーを、平均レーザーエネルギーおよびQスイッチ周波数の組み合わせにより変化させて実験を行い、1パルス当たりの加工溝断面積の大きさとその時に発生した加工音の強さの関係を求め、いずれの大きさのエネルギーを供給した場合にも、両者は両対数グラフ上で1本の直線で表すことができることを実験的に明らかにした。
- 3) Qスイッチ発振YAGレーザー1パルス当たりの加工溝断面積の大きさと加工音の強さの間に存在する直線関係は、($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)および Si_3N_4 セラミックと(WC+Co)および(WC+TiC+TaC+Co)超硬合金で傾向が異なることが実験的に明らかになった。この理由としては、材料除去特性の違いが考えられる。
- 4) Qスイッチ発振YAGレーザー1パルスによる加工溝断面積の大きさと加工音の強さの関係を、低速繰り返しQスイッチレーザーを用いた実験の場合よりも精度を高く表すことができることが明らかとなった。この結果、Qスイッチ発振YAGレーザー1パルスを照射したときに発生する加工音の強さを測定すれば、その時除去される加工溝断面積の大きさを求めることができることが明らかとなった。

参考文献

- 1) G. V. Arbach, R. L. Melcher, and C. E. Scranton: IBM Tech. Disclosure Bull. **25** (1983) 5092.
- 2) C. E. Yeack, R. L. Melcher, and H. E. Klauser: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 1043.
- 3) T. Miyazaki, T. Uemura, and Y. Yamamoto: Ann. CIRP. **22** (1973) 67.
- 4) M. T. Brienza and A. J. DeMaria: Appl. Phys. Lett. **11** (1967) 44.
- 5) 宮崎 俊行, 田中 義弘: 精密工学会誌 **55** (1989) 508.
- 6) 宮崎 俊行, 田中 義弘: 精密工学会誌 **55** (1989) 1421.
- 7) 宮崎 俊行, 徳永 剛, 田中 義弘: 精密工学会誌 **55** (1989) 2069.
- 8) W. W. Duley and Y. L. Mao: Appl. Phys. **27** (1994) 1379.
- 9) R. D. Rawlings and W. M. Steen: Optics and Laser in Engineering **2** (1981) 173.
- 10) P. Sheng and G. Chryssolouris: J. Mater. Process. Technol. **43** (1994) 145.
- 11) 栗田 恒雄, 大野 幸彦, 森田 昇: レーザー研究 **25** (1997) 88.
- 12) 栗田 恒雄, 大野 幸彦, 森田 昇: レーザー研究 **26** (1998) 754.