移動熱源によるレジノイド砥石のドレッシング に関する研究 (第3報)*

—— Q スイッチ YAG レーザによるドレッシング性能の向上 ——

中 島 利 勝** 大 橋 一 仁** 八 木 大 輔***

Dressing of Resinoid Bond Wheel with Moving Heat Source (3rd Report)
—— Improvement of Dressing Effect with Q-switched YAG Laser ——

Toshikatsu NAKAJIMA, Kazuhito OHASHI and Daisuke YAGI

The purpose of this study is to establish a new dressing technique of resinoid bond wheel by scanning the point of heat source on wheel surface. Dressing effect with CW YAG laser is testified in previous report. In this paper, Q-switched YAG laser is selected as a dressing tool for making more improvement of dressing effect with YAG laser, and dressing mechanism and grinding characteristics of dressed resinoid bond wheel with Q-switched YAG laser are experimentally discussed by observing the acting wheel surface and analyzing some grinding results with dressed wheel. Furthermore, dressing effect with Q-switched laser is verified by comparing with that with CW laser. Main conclusions obtained in this paper are as follows: (1) Scanning Q-switched YAG laser beam on resinoid bond wheel surface results in better dressing effect than that with CW laser beam. (2) Dressing with Q-switched laser of 2kHz in Q-switch frequency brings out best grinding characteristics of resinoid bond wheel in those of all Q-switch frequency. (3) In lower Q-switch frequency, heat affected structure generated on dressed wheel surface is completely removed as soon as laser beam is irradiated because of radical and frequent variation of heat energy supplied with laser beam.

Key words: resinoid bond wheel, Q-switched YAG laser, dressing effect, dressing mechanism, grinding characteristics, Q-switch frequency

1. 緒 言

研削砥石のドレッシングに、現在一般的に行われている方式に代わって、レーザ光による熱エネルギーの利用を試みた例^{1,2)}がこれまでに報告されている。さらに最近では、レーザをツールイングに応用する研究³⁾も進められており、熱を利用した砥石作用面調整法の特長が明らかにされつつある。

本研究は、砥粒と結合剤の耐熱性が大きく隔たるレジノイド砥石⁴⁾の表面に熱源を走査させることによるドレッシング技術の確立を目的とし、前報⁵⁾において従来のドレッシング法では克服することが困難であった無気孔レジノイド砥石のドレッシング直後における切れ味の低下⁶⁾が、連続励起(CW)のYAGレーザを砥石表面に走査させることによって克服され、十分なドレッシング効果が得られることを明らかにしている。

本報では、非常に大きな尖頭出力を有するパルス状のQスイッチYAGレーザをレジノイド砥石表面に走査することによってドレッシングを行い、砥石作用面性状および研削結果を解析することによって、Qスイッチレーザのパルス特性およびレーザ光の走査条件がドレッシング機構ならびに砥石の研削性能に及ぼす影響を検討する。さらに、CWレーザの場合と比較検討し、QスイッチYAGレーザによるレジノイド砥石のドレッシングの有効性を検証する。

2. ドレッシングおよび性能評価方法

図1はQスイッチYAGレーザによるドレッシング方法と砥石作用面形状測定法の概略を示すものである。ドレッシング

は、所定の周速度 V_{sd} で回転するレジノイド砥石の作用面に、レーザ発振器から光ファイバで導き集光レンズで絞ったレーザ光を垂直に照射し、一定のテーブル送りによってレーザ光を砥石幅方向に送る方式で行った。レーザの平均出力は、Qスイッチ周波数によってかなり変化するが、本報ではレーザの励起ランプの電流ならびに電圧を一定にしている。レーザ光の焦点位置は砥石表面上になるよう設定した。なお、使用した砥石は、粒度60のSTA砥粒を用いた砥粒率50%の無気孔レジノイド砥石であり、各ドレッシングの前に単石ダイヤモンドドレッサによってあらかじめツールイングを施している。主なドレッシング条件を表1に示す。さらに、ドレッシングしたレジノイド砥石を用いて表2に示す条件で円筒プランジ研削実験を行い、その研削結果などからドレッシング効果および砥石の研削性能とドレッシング条件との関係を検討した。また、ドレッシング後および研削後の砥石表面の周方向の形状を表面粗さ計で測定し、得られた表面形状のデータをパーソナルコンピュータで処理し、個々の砥粒の突出高さと先端位置を求めた。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for laser dressing

* 原稿受付 平成9年1月6日

** 正会員 岡山大学工学部 (岡山市津島中3-1-1)

*** 学生会員 岡山大学大学院 (現、正会員 日本メクトロン(株); 稲敷郡茅崎町天室喜757)

Table 1 Dressing conditions

Grinding wheel	Resinoid bond wheel SA60-50-0 (φ405×50)	
Nd:YAG laser		
Mode	Multi-mode	
Wave length	1.064 μm	
Emission wave	Q-switch pulse wave	Continuous wave
Lamp current	34 A	
Q-switch frequency	1~5 kHz	
Focal position	0 mm	
Beam spot size	φ800 μm	
Dressing (scanning) speed	0.075~10 m/s	
Feed rate of laser beam	0.02~1.5 mm/rev of G.W.	

Table 2 Conditions of cylindrical plunge grinding test

Grinding wheel	Resinoid bond wheel SA60-50-0 (φ405×50)
Workpiece	S45C (φ160×10)
Grinding speed	44.9 m/s
Speed ratio	0.0213
Plunge speed	2.0 μm/s
Grinding fluid	Soluble-type

3. Qスイッチレーザのパルス特性

図2に本報で用いたQスイッチレーザパルス波形の一例とQスイッチ周波数 f がパルス幅（半値幅） t_h および尖頭出力 P_p に及ぼす影響を示す。なお、パルス波形は、NDフィルタで減衰させたQスイッチレーザをピンフォトダイオード（浜松フォトニクス社製G3476-01、遮断周波数：2GHz）に照射し、デジタルストレージスコープ（帯域：200MHz）に記録した。この波形から得られるパルス幅（半値幅） t_h 、Qスイッチ周波数 f およびレーザパワーメータによって測定した平均出力 P_m から、Qスイッチレーザの尖頭出力 P_p は次式によって求めることができる。

$$P_p = \frac{P_m}{f \cdot t_h} \quad (1)$$

いずれの励起ランプ電流 I_{lc} の場合も、Qスイッチ周波数が減少するに従ってパルス幅が短くなり、尖頭出力が増大する傾向にある。しかし、比較的大きな I_{lc} の場合には、周波数を小さくしても周波数の低い領域では尖頭出力およびパルス幅ともに変化が小さくなり、1kHzと2kHzではほとんど同様のパルス波形になる。これは、Qスイッチ周波数が小さくなると、Q値が低い間にYAGロッド内に蓄積されるエネルギー⁷⁾が限界に近いことを示している。

4. レーザ光の照射による砥石表面の変質形態

図3は、本報で選定したレジノイド砥石と同諸元のスティック砥石の表面にレーザを1パス走査させた場合の表面の変質形態である。CWレーザの場合は、前報で確認されたようにレー

Fig. 2 Relationships between maximum pulse intensity or pulse width of laser and Q-switch frequency

ザの照射によってレジノイド結合剤が熔融および飛散し、熱影響によって熔融した砥粒とともに砥石表面に残留している。一方、Qスイッチ周波数 f が1kHzの場合は、熱影響を受けた表面の組織は確認されず、完全に除去されている。このような変形形態は、CWレーザによるドレッシングでは確認されていない⁵⁾。ところが、 f が80kHzの場合は、CWレーザの場合と同様にレーザ光によって熔融した砥粒ならびに結合剤が砥石表面に残留する。これは、図2からわかるように、Qスイッチ周波数が小さい場合は、尖頭出力が極めて高いうえに非常に短いパルス波のレーザ光が得られるため、照射の際の激しい熱衝撃によって砥石表面の組織が熱影響を受けると同時に除去される結果である。一方、大きいQスイッチ周波数のレーザはパルス幅が長く、尖頭出力は低下するため熱衝撃が比較的小さくなり、CWレーザの場合と同様な変化が生じるものと考えられる。

図4は、励起ランプの電流が34AのQスイッチレーザをレジノイド砥石表面に1パス走査する場合のQスイッチ周波数 f およびドレッシング速度 V_{sd} が表面の変質形態に及ぼす影響を示すものである。図中の●で示すQスイッチ周波数が比較的低い場合は、図3(a)のようにレーザ光によって変質した砥石表面の組織が完全に除去され、新しい表面が出現する。これよりも周波数が高くなると、図3(b)あるいは(c)のように砥石表面に熱影響によって変質した結合剤ならびに砥粒の残留や砥粒の脱落が生じる。このような砥石表面の変形形態の分布から、砥石表面の組織がレーザの照射によって変質とともに除去されることにはQスイッチ周波数が大きく関与しており、図2に示したQスイッチレーザの特性を考慮すると、尖頭出力が約20kW以上、出力勾配がおおよそ $8 \times 10^4 \text{ GW/s}$ 以上の極めて急激な熱エネルギーの供給によって、変質した組織は瞬時に除去されるが、それよりも低い尖頭出力あるいは出力勾配では変質した組織を除去するだけの熱衝撃を与えることが困難であることがわかる。

5. Qスイッチ周波数によるドレッシング特性の変化

すでに述べたように周波数が約10kHz以下のQスイッチレーザをレジノイド砥石表面に照射する場合に、CWレーザでは発生しない特有の変質形態が現れることから、以下ではQスイッチ周波数が1、2および5kHzのレーザによるレジノイド砥石のドレッシング特性について検討する。

図5は、各周波数のQスイッチ

Fig. 3 SEM photographs of resinoid bond abrasive stick surface scanned with YAG laser beam

Fig. 4 Relationships between surface transformation mechanisms and dressing speed or Q-switch frequency

レーザでドレッシングした直後および総砥石切込み量 $200\mu\text{m}$ 研削後の砥石表面を SEM で観察した結果である。いずれの Q スイッチ周波数の場合も、ドレッシング後の砥石表面に熱影響を受けた組織が残留することなく、あたかも破面のようにレジノイド結合剤の結晶粒界ならびに砥粒が現れている。この観察結果からは Q スイッチ周波数による砥石作用面性状への影響を明確には確認できないが、いずれの Q スイッチ周波数の場合も、砥粒の突出およびチップポケットの生成が確認されており、ドレッシング効果が充分であることがわかる。また、研削後の砥石表面には若干の切りくずの付着が確認されるが、研削による表面性状の変化はほとんど観察されない。

図 6 は、3 種類の周波数の Q スイッチレーザおよび励起ランプ電流を同一にした CW レーザでドレッシングする場合にドレッシング速度 V_{sd} およびレーザ光の送り速度 S_d がレジノイド砥石のドレッシング効果に及ぼす影響を示すものである。図中の Δ は、使用した各レーザを砥石表面に 1 回走査させた場合の熱影響領域の幅 W_g を表す。また、各図に斜線で示す t_d は単位砥石幅あたりのドレッシング時間を表す。したがって、各斜線上のドレッシング条件では砥石表面に供給される理論的热エネルギーは等しく、 t_d が小さくなるとともにレーザ光により供給される熱エネルギーも減少する。なお以下、レーザによるドレッシング効果が充分か否かは、前報⁵⁾と同様にドレッシング後の円筒プランジ研削過程において研削抵抗の顕著なオーバシュート現象の発生とともに寸法生成が開始される場合をドレッシング効果が不充分であると判定した。まず、CW レーザの場合は、 t_d をおよそ 19.3s/mm に短くするまでドレッシング効果が現れる。しかし、CW レーザの照射による砥石表面の昇温特性⁵⁾によって、ドレッシング速度 V_{sd} が高速になるとドレッシングが不可能になる。次に、周波数 f が 1kHz の Q スイッチレーザの場合、 t_d によるドレッシングの限界は CW レーザの場合とほぼ同様であるが、大きい尖頭出力を有するパルスが発生するため、CW レーザではドレッシング効果が不充分である V_{sd} の大きい条件でもドレッシング効

$t_d = 22.3\text{s/mm}$, $V_{sd} = 0.15\text{m/s}$, $S_d = 0.334\text{mm/rev}$ of G.W.

Fig. 5 SEM photographs of acting wheel surface after laser dressing and grinding test

果が現れる。周波数が 5kHz の Q スイッチレーザの場合にも t_d のドレッシング限界は同様であるが、 1kHz のレーザに比べて

Fig. 6 Dressing effect with dressing speed and feed rate of laser beam

Fig. 7 Variations of temperature-rise of wheel surface in laser dressing

パルスの尖頭出力が小さくなるため、 V_{sd} が大きい条件ではドレッシングが不可能となりドレッシング効果の現れる条件がかなり制約される。一方、周波数が2kHzの場合は、 t_d が13.3s/mmまでドレッシングが可能になり、3種類の周波数の内でドレッシングに効果的な条件が最も広範に及ぶ。このことは、図2に示したように2kHzのQスイッチレーザのパルス特性が1kHzの場合とほとんど変わらないものの、単位時間あたりのパルスレーザの照射回数は1kHzの場合の2倍になるためである。したがって、2kHzのQスイッチレーザがレジノイド砥石のドレッシング時間の短縮にも寄与することがわかる。

図7は、ドレッシング開始からレーザが照射された直後の砥石表面の温度上昇 $\Delta\theta_s$ を赤外放射温度計で測定した結果である。なお、温度計の放射率はツルーイング後のレジノイド砥石表面を基準に設定している。図から明らかなように、いずれのレーザの場合もドレッシングの開始から砥石表面の温度は徐々に上昇した後に一定となる。しかし、CWレーザの場合には砥石表面の温度上昇が一定になるまでの過渡状態が長く、砥石作用面全体にわたって均一なドレッシングが施されない恐れがある。これに対して、Qスイッチレーザの場合にはいずれも速やかに定常状態に移行する。また、ドレッシングに伴って上昇する砥石表面の温度は、5、2kHzのQスイッチレーザの順に低く、1kHzの場合は僅かに温度が上昇する。これは、Qスイッチ周波数が大きいほどレーザパルスの尖頭出力は減少するもののパルス幅は増大し、平均出力が大きくなるためと考えられる。なお、CWレーザの場合には、熱影響を受けて高温になった組織が砥石表面に残留するためにより高温になる。なお、Qスイッチレーザでドレッシングされた砥石表面は、色ならびに光沢ともツルーイング面とはほぼ同様であるが、CWレーザでドレッシングされた表面は熱影響組織が残留するため、黒く変色することが確認された。このこと

を考慮すれば、CWレーザでドレッシングした砥石表面の放射率が設定値より大きくなり、実際の表面温度は、図に示すよりも更に高い可能性がある。

次に、砥石作用面における砥粒分布ならびに砥粒突出高さからドレッシング効果を検討する。

図8は、周波数 f が1、2および5kHzのQスイッチレーザならびにCWレーザでドレッシングを施した砥石表面における個々の砥粒の先端高さ Z と突出高さ h_r を示すものである。なお、前報⁵⁾で定義したように砥粒の先端高さをツルーイング面から各砥粒先端までの距離で表し、その突出高さを砥石の回転方向に向かって砥粒前方の結合剤表面の最深部から砥粒先端までの高さで表す。図中の●はドレッシング後、また○は砥石切込み量が100 μ mまで研削した後の砥石作用面上の砥粒を表す。Qスイッチレーザでドレッシングする場合は、高い尖頭出力を有するパルス状のレーザが照射されるため、ドレッシング直後の砥石表面においては、CWレーザの場合に比べて砥粒先端の分布は広い範囲にわたるものの砥粒の突出高さがかなり大きく、ドレッシング効果が顕著に現れている。特に、Qスイッチ周波数が2kHzの場合に最も砥粒の突出高さが大きく、高いドレッシング効果であることが伺える。このことは、図2に示したようにQスイッチ周波数が小さくなるに従って尖頭出力が大きくなるが、周波数が2kHzのパルス波形は1kHzの場合とほぼ同様でありながら、レーザの照射間隔が半分になるためである。また、CWレーザ光では砥石作用面上に熱影響を受けて飛散した組織が残留するため、ドレッシングによって表面が盛り上がり、研削に伴う工作物との干渉によって熱影響組織が除去され表面は後退するが、砥粒の分布および突出高さはほとんど変化しない。一方、Qスイッチレーザの場合は研削による砥粒の先端高さおよび突出高さの変化が非常に小さく、ドレッシング直後から砥粒切れ刃の状態が安定していることを示唆している。

Fig. 8 Relationships between projecting height of grain and position of grain top

Fig. 9 Relationships between grinding results and dressing conditions

6. 研削性能によるドレッシング条件の評価

次に、Qスイッチレーザでドレッシングを施したレジノイド砥石を用いて円筒プランジ研削を行い、その結果からドレッシング効果を評価する。

図9は、単位幅あたりのドレッシング時間 t_d が17.8s/mmでドレッシングした砥石を用いて円筒プランジ研削した場合の定常研削背分力 p_s 、ツルーイング面からの砥石表面の後退量 d_0 および仕上面粗さ $(R_{max})_s$ に及ぼされるドレッシング速度 V_{sd} の影響を示すものである。2kHzのQスイッチ周波数の場合が最も広範な条件でドレッシングが可能であり、1および5kHzの場合は、 V_{sd} がプロット点でおおよそ示す領域から外れるとドレッシング効果は現れず、研削時のセルフドレッシング⁵⁾が生じる。また、 f が2kHzの場合、 V_{sd} が約0.8m/sで仕上面粗さは若干大きくなるが、研削抵抗は最小となり砥石の切れ味が高くなる。したがって、砥石表面に与えられる理論的な熱エネルギーが等しくても、レーザの走査条件がドレッシング効果に影響を及ぼす。なお、 f が1kHzの場合も同様な傾向にある。 $(R_{max})_s$ は、 f が1kHzと2kHzの場合ではほぼ同様であるものの、 p_s は1kHzの場合が2kHzの場合よりもおよそ0.4N/mm高い。これは、1kHzの場合の砥石摩耗量 d_0 が、研削抵抗が大きいにも拘わらず2kHzの場合よりも小さくなっていることから、ドレッシングの際に熱エネルギーが砥石の組織に与える影響が、1kHzの場合は比較的浅い領域に止まるためと推察される。

これらの結果から研削背分力 p_s と仕上面粗さ $(R_{max})_s$ との関係を表したのが図10である。すなわち、研削結果が図の左下になるほど砥石の研削性能が理想的であることになる。図から、2kHzのQスイッチレーザでドレッシングした砥石が最も良好な研削性能であることがわかる。これに続いて、1kHz、5kHzの順に研削性能は低下する。ちなみに、 t_d を等しくしてCWレーザでドレッシングした場合は $(R_{max})_s$ が約5μmにおいて p_s がおよそ3.5N/mmであり、本報で設定した各Qスイッチレーザの場合ほど高い研削性能は得られない。すなわち、Qスイッチレーザによって研削性能は飛躍的に向上する。

7. 結 言

本報では、レジノイド砥石のドレッシングにQスイッチYAGレーザを採用し、そのドレッシング機構ならびにドレッシングした砥石の研削性能を検討することによってQスイッチレーザをドレッシングに用いることの有用性を検証した。本報で得ら

Fig. 10 Effect of Q-switch frequency on grinding characteristics

れた主な結論は以下のとおりである。

- (1) QスイッチYAGレーザによってレジノイド砥石に十分なドレッシング効果を与えられ、その効果はCWレーザの場合を上回る。すなわち、CWレーザを同様な条件で走査した砥石作用面に比べて、砥粒の分布は若干広範にわたるものの砥粒の突出高さが飛躍的に大きくなり、研削性能も高い。
- (2) Qスイッチ周波数が2kHzのレーザでドレッシングする場合に砥粒の突出高さが最も大きくなり、研削抵抗と仕上面粗さとの関係において、他の周波数のQスイッチレーザよりも良好な研削性能を与えることができる。
- (3) Qスイッチ周波数が2kHzの場合にドレッシング可能な条件が最も広範囲にわたり、しかもドレッシング効果が現れる限界の単位幅あたりのドレッシング時間が最も小さく、能率のより高いドレッシングが可能になる。
- (4) 比較的低い周波数のQスイッチレーザでドレッシングした砥石表面の組織は、レーザパルスの大きなエネルギー勾配に伴う衝撃力によって照射と同時に除去され、CWレーザの場合のような熱影響組織の残留はほとんど見られない。一方、比較的高いQスイッチ周波数のレーザを照射する場合、砥石表面はCWレーザの場合とほぼ同様な形態で変質する。
- (5) Qスイッチレーザでドレッシングする砥石の表面温度は、CWレーザの場合に比べて僅かしか上昇せず、Qスイッチ周波数が小さいほど表面の温度上昇は小さくなる。また、Qスイッチレーザの場合は、ドレッシング開始からの砥石表面の温度変化が速やかに定常状態に移行する。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 金 鐘信, 渡部武弘, 吉田嘉太郎: レーザドレッシングにおけるボンドの除去挙動, 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1992) 25.
- 2) N. Ramesh Babu and V. Radhakrishnan: Investigations of Laser Dressing of Grinding Wheels (Part II), ASME J. of Eng. for Ind., 111, August (1989) 253.
- 3) 田牧純一, 杉野 豪: 電着CBNタイルのYAGレーザツルーイング, 砥粒加工学会誌, 40, 2 (1996) 81.
- 4) 中島利勝, 大橋一仁, 孫 黎曦, 実盛健郎: 移動熱源によるレジノイド砥石のドレッシングに関する研究 (第1報)——YAGレーザの単発照射による砥石表面の変質機構, 精密工学会誌, 59, 12 (1993) 1967.
- 5) 中島利勝, 大橋一仁, 孫 黎曦, 実盛健郎: 移動熱源によるレジノイド砥石のドレッシングに関する研究 (第2報)——YAGレーザによるドレッシング効果, 精密工学会誌, 61, 4 (1995) 556.
- 6) 中島利勝, 宇野義幸, 森谷 守: レジノイド砥石の研削性能に関する研究 (第1報)——アルミニウム粉混入無気孔砥石の特性, 精密機械, 47, 10 (1981) 1240.
- 7) 小林 昭: レーザ加工, 開発社, 東京 (1984) 47.