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——

中島利勝** 大橋一仁** 孫 黎曦*** 実盛健郎† 八木大輔***

Dressing of Resinoid Bond Wheel with Moving Heat Source (2nd Report)
— Dressing Effect with YAG Laser —

Toshikatsu NAKAJIMA, Kazuhito OHASHI, Li Xi SUN, Kenrou JITSUMORI and Daisuke YAGI

There is a possibility that resinoid bond wheel may thermally be dressed by scanning the heat source on the wheel surface, because bonding material is lower heat resistance than other ones. In this paper, the dressing effect on resinoid bond wheel with YAG laser beam is discussed, observing the acting wheel surface and investigating the grinding characteristics of the wheel dressed by scanning YAG laser beam. Main conclusions obtained in this paper are as follows: (1) Irradiation of YAG laser on resinoid bond wheel surface results in the dressing effect. (2) The effective dressing conditions concerning the peripheral wheel speed and the feed rate of laser beam are determined by the heat energy provided on wheel surface, the transitional characteristic of heating and the width of affected region by scanning of laser beam during one revolution of wheel. (3) Resinoid bonding material become brittle and weak and/or abrasive grains are damaged by irradiation of YAG laser on the wheel surface. (4) Under the same heat energy provided on wheel surface, surface finish increases with a decrease of the peripheral wheel speed in dressing and an increase of the feed rate of laser beam.

Key words: resinoid bond wheel, YAG laser, dressing, grinding characteristic, relative dressing time

1. 緒 言

従来から使用されている無気孔レジノイド砥石は、ドレッシング抵抗による形状精度の低下、砥粒切れ刃を結合剤が覆うことによるドレッシング直後の切れ味の劣化などのため、その使用が重研削を中心とした範囲に限られている。この砥石に、近年試みられているレーザによる熱エネルギーを利用した非接触のドレッシング¹⁾²⁾を施すことにより前述の問題が克服されれば、精密研削への適用も期待される。

そこで本研究では、移動熱源によるレジノイド砥石のドレッシング技術を確立することを目的とし、前報³⁾において連続励起(CW) YAG レーザ光を無気孔レジノイド砥石表面に極短時間照射し、砥石表面変質機構ならびに表面特性の変化などを検討することで、レーザによるドレッシングの可能性を明らかにした。

続いて本報では、まずレジノイド砥石の表面にレーザ光を走査させることによって、このドレッシングの基礎現象ならびにレーザ光による熱影響領域の規模を把握し、これらの知見をもとに回転するレジノイド砥石の作用面にレーザ光を照射することによってドレッシングを行い、砥石表面観察および研削性能からレーザによるドレッシング効果を検討する。

2. ドレッシングおよび研削性能評価方法

図1はYAGレーザによるレジノイド砥石のドレッシング法を模式的に示したものである。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作用面に対して送り速度 S_d で移動するテーブル上に固定した集光レンズからレーザ光を照射

することによって行った。焦点位置は砥石台の移動により調整可能であるが、本実験では、レーザ光の焦点が砥石表面となるように設定した。なお、ドレッシング前にあらかじめ単石ダイヤモンドドレッサでツルーイングを行った。主なドレッシング条件は表1に示すとおりである。さらに、ドレッシングされ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、各種研削結果を解析することによってドレッシング条件と砥石の研削性能との関係を明確にした。また、ドレッシング後ならびに研削加工後の砥粒切れ刃の突出量および砥石半径方向の切れ刃分布は、触針式粗さ計で砥石円周方向の形状を測定し、パーソナルコンピュータで処理することによって求めた。

3. YAG レーザによる砥石表面の変化形態

レーザ光によるドレッシングの基礎現象を明らかにするためレーザ光の走査実験を行い、ドレッシング機構および走査速度の影響について検討する。前報で、レーザ光のパワー密度が変化すると、砥石表面の変質速度は異なるものの同様な変質形態となることが確認されているので、本報ではドレッシングに要

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for laser dressing

* 原稿受付 平成6年6月9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

† 正 会 員 松下電器産業(株) (門真市松葉町2-7)

Table 1 Dressing conditions

Grinding wheel	Resinoid SA 60-50-0
Laser type	CW Nd : YAG, Multi-mode
Wave length	1.064 μm
Focal length	50 mm
Focal position	$\Delta a = 0$ mm
Power density	15.2 kW/cm ²
Peripheral wheel speed	$V_{sd} = 0.007 \sim 3.0$ m/s
Feed rate of heat source	$S_d = 0.007 \sim 3.0$ mm/rev of G. W.

Table 2 Condition of grinding test

Grinding method	Cylindrical plunge grinding
Grinding wheel	Resinoid SA 60-50-0 ($\phi 389 \times 50$ mm)
Workpiece	S 45 C ($\phi 165 \times 10$ mm)
Grinding speed	$V = 46.8$ m/s
Speed ratio	$K_v = 0.0213$
Plunge speed	$v_p = 2.0$ $\mu\text{m/s}$
System stiffness	$k_{sy} = 14.17$ N/ μm
Coolant	Soluble type

Fig. 2 SEM photographs of resinoid bond abrasive stick surface scanned with YAG laser beam

する時間の短縮を考慮して、比較的高いパワー密度とした。

図2は、走査速度 $V_{sd} = 0.061$ m/s でレーザ光を走査されたレジノイド砥石表面およびこれらの熱影響領域を除去した表面の観察例である。レーザ光の照射によって砥石表面の変化形態は図に示すように走査方向に沿ってレジノイドボンドの飛散による盛上がりが生じ、砥粒の脱落および熱影響による変形も確認された。また、 V_{sd} が小さい場合は、砥石表層部の蒸発の発生も確認された。この表面から熱影響領域を除去すると、主にレジノイドボンドが除去され、初期表面に存在した砥粒のうち残留しているものも認められる。

図3(a)は、レーザ光の走査速度 V_{sd} がレーザ光によって除去された領域の幅 W_g および熱影響領域の幅 $(W_g)_b$ に及ぼす影響を、また(b)はレーザ光によって除去された領域の深さ Y_g および熱影響領域の深さ $(Y_g)_b$ に及ぼす影響を示すものである。図のように、 V_{sd} が 0.034 m/s 以下の領域では表層部が蒸発するため、走査速度が減少するに従って除去深さ Y_g 、幅 W_g ともに急激に増加する。 V_{sd} が 0.034 m/s 以上の領域では砥粒の離脱領域となり除去深さはほぼ一定値となり、砥粒の離脱に起因する深さに相当する。一方、除去幅は走査速度の増加とともに若干減少する。走査速度が 0.056 m/s 以上では砥石表面の砥粒には熱影響が及ぼされていないが、その間のレジノイドボンドは上方に飛散する状態で冷却凝固し、砥粒の離脱は生じなくなる。さらに 0.204 m/s 以上では表面の変化はみられなくなる。また、 V_{sd} が 0.061 m/s 以下では熱影響領域の除去に伴って初期の砥石表面に存在した砥粒およびレジノイドボンドが完全に除去され、内部の組織が新たな表面となるため、

Fig. 3 Relationships between depth or width of affected structure and scanning speed of YAG laser beam

走査速度の減少に従って熱影響深さ $(Y_g)_b$ はかなり深くなり、熱影響幅 $(W_g)_b$ も盛上がり部分の欠落によって増大する。 V_{sd} が 0.061 m/s を上回ると表面の砥粒には熱影響が及ぼされず、その間のレジノイドボンドが脆弱化する状態となる。したがって、熱影響深さは V_{sd} が 0.061 m/s 以下の場合ほど大きくないが、走査速度の増加とともに徐々に減少する。一方、熱影響幅 $(W_g)_b$ は V_{sd} の限界である 0.204 m/s までほぼ直線的に減少する。一定条件のシングルポイントドレッシングを用いる場合、機械的ドレッシングでは、主にドレッシングの干渉量とトラバース速度によって、砥石作用面性状が決定されるが⁴⁾、本報で検討したドレッシング方式では、以上の結果から、砥石周速度ならびにドレッシングのトラバース速度が作用面性状を決定づけ、砥石周速度がトラバース速度にかなり制約をもたらすことがわかる。

4. YAG レーザによるドレッシング効果の検証

図4はレーザ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った場合の背分力 $P(t)$ 、寸法生成速度 $R(t)$ 、砥石摩耗量 d_0 の変化過程を表したものである。なお、レーザ光の照射によって砥石表面が膨張するため、 d_0 は膨張した砥石表面からの後退量とする。砥石1回転あたりのレーザ光移動量 $S_d = 0.3$ mm の場合は、砥石と工作物との干渉開始後、研削初期において図2に示した砥石表面から膨張した脆弱な盛上がり部分が工作物と干渉するため、寸法生成速度はほとんど零に等しく砥石の切込み量のほとんどが砥石摩耗量となる。その後、盛上がり部分の脱落に従って、砥石内部に存在した切れ刃が出現するため、寸法生成速度が徐々に増加し、やがて一定速度で材料除去が行われるようになる。これに伴って砥石摩耗量も緩やかな増加に転じる。また、研削背分力は砥石と工作物との干渉直後はほぼ零であり、その後徐々に増加し、一定になる。一方、 $S_d = 1.0$ mm の場合は、砥石と工作物との干渉開始直後から研削背分力 P が急激に増加し、ピークでは約 15 N/mm まで達する。しかし、この間寸法は生成されず、砥石摩耗量もわずかで、砥石を切り込んだ量のほとんどがかつぎ量⁵⁾ となる。研削背分力がほぼピークに達した時点で寸法生成が開始され、寸法生成の進行に伴って研削背分力は減少し、やがて定常状態へ移行するが、定常状態では $S_d = 0.3$ mm

Fig. 4 Evaluation of dressing effect on cylindrical plunge grinding process

Fig. 7 SEM photographs of dressed surface and acting surface in grinding

mm/s でレーザ光を照射した後と研削後の砥石作用面を観察した結果である。不均一なドレッシング表面となる $S_d=2.1$ mm の場合は、照射跡と照射跡の間にツルイーグ面のまま変化していない部分が存在する。この砥石作用面で研削加工を行うと、盛上がりを含めた熱影響領域は除去され、レーザの照射跡に沿って深い溝が生成されるが、溝の間のツルイーグ面には研削痕跡が残留することから、切れ刃がほとんど突出していないツルイーグ面が激しく工作物と接触していることがわかる。ドレッシング効果が確認された $V_{sd}=0.03$ mm/s の場合は砥石表面が全面にわたって熱影響を受けており、レジノイドボンドは一部溶融しているもののほぼ飛散する状態となり、砥粒の中にはレーザ光の熱影響によって溶融したもの（A）も観察される。このような作用面で研削加工すると、熱影響を受けた結合剤および砥粒は除去され、その下に存在する砥粒が切れ刃として出現する。なお、レジノイドボンドの表面には微小な凹凸が現れていることから研削において主に砥粒切れ刃が工作物と接触しているものと思われる。さらに砥石周速度が大きい $V_{sd}=0.22$ mm/s の場合はレーザ光の照射領域の重量量は大きくなるが、砥石表面の温度上昇の過渡特性のため、砥石表面に及ぼされる熱影響は小さく、ボンドのみが溶融、飛散し砥粒にはほとんど熱影響が及ぼされていない。この作用面で研削すると作用面に存在した脆弱化したレジノイドボンドが除去され、ツルイーグ面に現れていた砥粒が切れ刃として作用していることがうかがえる。

5. 砥石作用面における切れ刃の分布状態

図8は、砥石作用面形状を砥石の円周方向に測定した例および同一ドレッシング時間（ $t_d=27.1$ s/mm）における3つの条件でドレッシングし、研削した後の砥石作用面の砥粒突出量の分布を表すものである。図のように測定された個々の砥粒切れ刃の先端高さをツルイーグした表面を基準として Z で表し、その突出量を砥石の運動方向に向かって個々の砥粒の前方に存在する結合剤表面から砥粒切れ刃の先端までの高さ h_r で表す。

(a) はドレッシング効果が不十分である場合、(b), (c) はドレッシング効果が確認された場合を示す。(a) では、(b), (c) に比べて全般的に突出量が小さく、ドレッシング効果が不十分であることを裏付けている。また、ドレッシング効果が認められる (b) および (c) の場合は、 V_{sd} の小さい (c) のドレッシン

Fig. 8 Definition of level or projecting height of cutting edges and effect of dressing conditions on distribution of projecting height

Fig. 9 Variation of accumulative cutting edges with dressing conditions

グ条件が (b) よりもおおよそ $30 \mu\text{m}$ 以上突出した砥粒が多く、十分なチップポケットが生成されることがわかる。このように、一定のドレッシング時間では、 V_{sd} を大きくするに従って砥粒の突出量は減少する傾向にあるが、 V_{sd} を極端に大きくすると突出量の不足を招く。このことは、 V_{sd} が大きくなるに従ってレーザ光の照射領域の重量が大きくなるが、砥石表面の昇温の過渡特性によって砥石作用面が変質するだけの温度上昇が生じないためである。

図9は図8で示したドレッシング効果が現れる2つの条件について、ツルイーグ面を基準として、所定の深さまでに存在する砥粒切れ刃数すなわち累積砥粒切れ刃数⁶⁾ N_g の変化をドレッシング直後とその後砥石台移動量 $d(t)=200 \mu\text{m}$ まで研削した砥石表面について示したものである。 $V_{sd}=0.15$ m/s の場合は、ドレッシングによって砥石面が大きく膨張し、砥粒切れ刃が深さ方向に広く分布する。この砥石作用面で研削加工すると、レーザ光照射によって脆弱化した表層部が除去され、作用面がかなり後退するが、砥粒切れ刃の深さ方向の分布状態はドレッシング後の状態と同様である。一方、 $V_{sd}=2.0$ m/s の場合はドレッシング後の砥石表面の膨張は極めて小さく、おおむねレーザ光の照射によって砥石作用面がわずかに後退する。砥粒切れ刃の深さ方向の分布状態は、 $V_{sd}=0.15$ m/s の場合と比較すれば切れ刃先端の高さがそろっている。この作用面で研削すると、わずかに作用面が後退し、レーザ光による熱影響があまり深くまで及ぼされていないことがわかる。なお、砥粒切れ刃の分布状態は研削前と同様である。以上の砥石作用面性状の解析結果から、あらかじめツルイーグによって切れ刃先端をそろえた場合には、砥石の単位幅あたりのドレッシング時間 t_d が等しい条件でも砥石周速度を大きく、砥石1回転あたりのレーザ光の移動量を小さくすることで砥粒切れ刃の突出量が減少し、切れ刃先端高さが比較的揃う傾向にある。従って、従来

Fig. 10 Relationships between grinding results and dressing conditions

の機械的ドレッシングの場合と同様に切れ刃の突出量とその分布状態には相関関係が存在する。

6. 研削結果によるドレッシング条件の評価

図10(a), (b), (c)はそれぞれ定常背分力 p_s 、仕上げ面粗さ $(R_{\max})_s$ およびドレッシング後の砥石損耗体積 V_a とドレッシング条件との関係を示す。なお、 V_a はドレッシングによる砥石作用面の膨張を考慮せず、ツルーイング面からの損耗量である。いずれの図においても図5で、ドレッシング効果が現れた三つの単位幅あたりのドレッシング時間($t_d=19.3, 27.1, 58$ s/mm)のドレッシングについて示す。なお、図中の白抜きの点は V_{sd} が大きいため十分なドレッシング効果が確認できなかった条件である。(a)からわかるように、背分力 p_s は単位幅あたりのドレッシング時間 t_d が長くなるほど減少し、また、 t_d が等しいドレッシング条件でも V_{sd} が大きくなるに従って p_s が増大する。このことは、 t_d が大きくなるのに伴って砥石作用面が受ける熱エネルギーが大きくなり、また t_d が等しい場合は前述の砥粒切れ刃の状態の解析からも予測できるように、 V_{sd} が大きくなるに従って突出量の大きい切れ刃が少なくなることに起因すると思われる。なお、 V_{sd} が減少するに従って小さくなった p_s が再び急激に増大しているが、これは V_{sd} が小さくなることで S_d が砥石1回転あたりのレーザーによる熱影響幅を上回るため、作用面上にレーザー光が照射されないツルーイング面のままの部分が残留するためである。

また、(b)に示す仕上げ面粗さ $(R_{\max})_s$ の変化は、(a)の背分力の変化とは対照的に t_d が大きくなるに伴って仕上げ面粗さが増大し、また等しい t_d のドレッシング条件でも V_{sd} が大きくなるに従って粗さが改善される。このことは、図9に示した砥石作用面における深さ方向の切れ刃分布から推測できる。すなわち、あらかじめツルーイングを施した砥石作用面にレーザー光を照射する場合、作用面が受ける熱影響が少ないほどツルーイングによってその先端が揃えられた砥粒切れ刃が多く存在するようになるためと考えられる。

研削初期の砥石損耗量 V_a はそのほとんどが、ドレッシングによって脆弱化した砥石表層部が研削によって除去されたものであるが、(c)に示すように $t_d=58.0$ s/mmの場合は他の t_d の場合に比べて V_a がかなり大きく、ドレッシングによる熱影響がかなり深くまで及んでいることがわかる。 t_d が小さくなるに従って砥石作用面に与えられるエネルギーが減少するため、熱影響が領域も浅くなり、 V_a は小さくなる傾向にあるが、 $t_d=19.3$ s/mmの場合は $t_d=27.1$ s/mmの場合に比べて大きくなる。これは $t_d=19.3$ s/mmの場合の領域は熱エネルギーの観点から $t_d=27.1$ s/mmの場合に比べて浅いことが予測で

きるが、(a)に示すように研削抵抗が大きくなるため、 V_a に高い研削抵抗による砥石の摩耗が加味された結果と考えられる。

7. 結 論

本報で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) YAGレーザー光をレジノイド砥石の作用面に照射することによってドレッシング効果がもたらされることが確認された。
- (2) YAGレーザーによるドレッシングの限界は砥石1回転あたりのレーザー光照射による熱影響幅、砥石作用面の単位面積に与えられる熱エネルギーおよびレーザー光の照射によるレジノイド砥石表面の熱的特性によって決定される。
- (3) レーザー光によって砥石作用面に与えられる熱エネルギーが大きい場合は、砥粒に熱影響が及ぼされ、レジノイドボンドの炭化に伴う砥石作用面の膨張が生じるが、熱影響領域は研削によって速やかに除去され、内部に存在した砥粒が切れ刃として現れる。また、小さい熱エネルギーが与えられる場合は、砥粒に影響は及ぼされず、主に結合剤が変質するが、研削において表層部の結合剤が除去され、チップポケットが生成される。
- (4) 単位幅あたりのドレッシング時間を長くするほど砥粒切れ刃の突出量は増大するが、切れ刃の深さ方向の分布が不均一となることによって研削抵抗は小さくなり、仕上げ面粗さは大きくなる。
- (5) 単位幅あたりのドレッシング時間が等しくても、砥石の周速度を上げることによって砥石作用面に及ぼされる熱影響が小さくなり、研削抵抗は大きくなるが仕上げ面粗さは改善される。

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) 田牧純一、杉野 豪、北川武揚：電着CBNタイルのYAGレーザードレッシング(LAD)に関する研究、1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1994) 823。
- 2) 金 鐘信、渡部武弘、吉田嘉太郎：レーザー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、25 (1992)。
- 3) 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レーザー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。
- 4) 中島利勝、宇野義幸、橋 達人：単石ドレッシングにおける2,3の問題——ドレッシングの摩耗およびドレッシング条件が研削結果に及ぼす影響、砥粒加工学会誌、34, 1 (1990) 21。
- 5) 岡村健二郎、中島利勝：研削の過渡特性(第1報)——かつぎ現象の解明、精密機械、38, 7 (1972) 580。
- 6) 中園 汎、安井平司、久留須 誠：レジノイドCBN砥石の目直しに関する研究(第1報)——砥石作用面の生成過程、精密機械、55, 6 (1989) 1073。