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—

中島利勝** 大橋一仁** 孫 黎曦*** 実盛健郎***

Dressing of Resinoid Bond Wheel with Moving Heat Source (1st Report)
—Transformation of Wheel Surface with a Single Pulse Irradiation of YAG Laser—

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

The purpose of this study is to establish a thermal dressing technique with moving heat source for resinoid bond wheel, in which heat resistance of bonding material is markedly lower than that of vitrified bond. In this paper, a single pulse of CW : YAG laser introduced as a heat source is irradiated on resinoid bond abrasive stick to make clear a fundamental phenomenon of laser dressing, analyzing transformation, profile of resinoid surface, stiffness of grain mounting and so on. Main conclusions obtained in this paper are as follows : (1) Transformation of resinoid bond, releasing abrasive grain and vaporization of bonding material take place with laser irradiation. (2) The depth and diameter of heat affected structure increases with increasing power density and irradiating time of a laser beam. (3) A stiffness of grain mounting decreases as a distance to an abrasive grain from a beam center decreases in heat affected surface.

Key words : resinoid bond wheel, YAG laser, thermal dressing, moving heat source, single pulse irradiation, transformation, heat affected structure, stiffness of grain mounting

1. 緒 言

レジノイド砥石は、ビトリファイド砥石に比べて大きな弾性を有するために工作物に対する衝撃が少なく、さらに個々の砥粒の切込み深さが平均化して仕上面粗さが向上するなどの優れた特徴を有する。その反面、熱伝導率が低く、弾性が大きすぎるため高い加工精度を得るには不利であったが、近年ではボンドの改良、フィラーの混入あるいは無気孔化¹⁾などの改良が施されている。特に、無気孔のレジノイド砥石を用いる場合、ツルージングでは十分な砥粒の突出量を確保できないためドレッシングによってチップポケットを生成し、切れ刃を突き出させることが必要となる。無気孔レジノイド砥石のドレッシングには、GC 砥石²⁾あるいは遊離砥粒³⁾⁴⁾などを用いて、機械的に結合剤を微量ずつ除去する方式が一般的であり、ドレッシング砥石の諸元をはじめとする多くの条件の設定が試行錯誤的に行われているのが現状である。レジノイドボ

ンドは、ビトリファイドボンドに比べて耐熱性が著しく低いという特徴を有する。したがって、強力な熱源でレジノイド砥石の表面を走査、加熱すれば砥粒切れ刃周辺の砥石表層部の結合剤が劣化あるいは除去することで結合剤面が後退し、結果としてドレッシング効果がもたらされることが十分考えられる。

本研究では以上の点に着目し、無気孔レジノイド砥石の移動熱源によるドレッシング法を確立することを目的とする。まず本報では、熱源としてYAG レーザ⁵⁾を選定し、無気孔レジノイド砥石表面の1点に連続励起(CW) YAG レーザ光を極短時間照射し、砥石表面の変質機構ならびに表面特性の変化などの基礎的知見を明らかにすることでレーザドレッシングの可能性について検討する。

2. レジノイド砥石の加熱による強度変化

本実験で用いた無気孔レジノイド砥石(SA 60-50-0)は、粒度60のSA砥粒をフェノール樹脂で結合させたもので、砥粒率は50 vol%である。レジノイド砥石の強度に及ぼされる熱影響を明らかにするため、砥石を電気炉内で加熱し自然冷却の後、JIS R

* 原稿受付 平成5年3月11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

Fig. 1 Variation of bending strength [σ_f] with temperature [θ]

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

1601に基づき曲げ強度を測定した。図1に加熱温度 θ と曲げ強度 σ_f との関係を示す。砥石の曲げ強度は、加熱温度の上昇に従って直線的に低下し、およそ470°Cに達するとレジノイドは炭化し、結合強度が完全に失われることがわかる。しかし、SEMによる観察結果から、砥粒には熱影響が及ぼされていないことを確認している。この結果は、砥石作用面近傍に大きな熱勾配を与えることで局部的にレジノイドの強度を低下させることが可能であり、レーザドレンシングの可能性を示唆するものである。

3. 実験方法および条件

3.1 YAG レーザの単発照射実験

図2は、本実験に用いた実験装置の概略図である。実験は、X-Y ステージ上に固定したレジノイド砥石片(40×10×5 mm)にレンズにより集光したYAG レーザ光を単発照射する方式で行った。照射したレーザ光は、連続励起波(CW)をON/OFF制御することで短時間矩形状に出力させたものである。照射時間は、信号発生器によって所期のパルス時間 t に設定された一つの矩形波をレーザ発振器のQスイッチドライバに入力することで制御した。なお、パワー密度は

Table 1 Laser irradiation conditions

Laser type	CW Nd : YAG, multi-mode
Wavelength	1.064 μm
Focal length	50 mm
Spot size	ϕ 800 μm
Focal position	$\Delta a = -5.0 - +5.0$ mm
Power density	$F = 0.03 - 17.6$ kW/cm ²
Irradiating time	$t = 10 - 300$ ms

Table 2 Removal conditions of heat affected zone

Brush	Brass shank brush ϕ 13×30 mm Diameter of wire : 0.1 mm
Peripheral speed	0.5 m/s
Pressure	5.03×10^4 Pa
Feed rate	2.0 mm/s

Fig. 3 Measuring apparatus for stiffness of grain mounting

各実験前に集光レンズの出口側でパワーメータにより計測し、設定値であることを確認した。主な実験条件は表1のようである。また、照射後の砥石表面に垂直軸で回転するワイヤブラシでブラッシングを施し、熱劣化した部分を除去することでレーザ照射の影響領域を解析した。ブラッシング条件は表2のようである。砥石表面の観察にはSEMを用い、レーザ照射部の形状測定には触針式表面粗さ計を用いた。

3.2 砥粒支持剛性の測定方法

ドレンシングによって砥石表層部に突出された砥粒は、研削抵抗に耐えられるようにボンドにより支持されていなければならない⁶⁾。研削の際に砥粒切れ刃には主分力と背分力との合力が作用するが、作用する方向は加工条件により異なる。本報では、図3のようにマイクロビッカース硬度計の圧子を頂角120°、先端丸み半径80 μm の円すい状ダイヤモンドに変更し、砥石表面の一つの砥粒の中央に100 gfの垂直荷重を与えた場合の変位量を電気マイクロメータで検出し、砥粒の支持剛性を求めることでボンドによる保持力を

Fig. 4 SEM photographs of resinoid surface irradiated with YAG laser

Fig. 5 Relations between transformation and power density $[F]$ or irradiating time $[t]$ of laser

推考した。

4. 砥石表面の変質機構

4.1 砥石表面の変化形態

図4は、CW: YAG レーザを極短時間照射することによるレジノイド砥石表面の変化形態ならびにブラッシング後の表面の観察例である。また、図5は変化形態とレーザ照射条件との関係をパワー密度 F と照射時間 t について示したものである。砥石表面には、レーザ照射条件により4つの形態の変化が生じる。高いパワー密度のレーザ光を極短時間照射する場合は、aのように砥粒間のボンドが上方に飛散するが、砥粒に熱影響は及ぼされていない。一方、低いパワー密度のレーザを長時間照射する場合は、bのように砥粒への熱影響はないもののボンドの熔融した痕跡が確認される。a, bともにボンドのみが変化しているがその形態が異なるのは、主に照射条件による砥石表面の温度勾配の影響によるものと考えられる。さらに

パワー密度および照射時間が増加すると、cのようにボンドの熔融に加えて砥粒が砥石表面から離脱する。この現象は、砥粒の熱伝導率がレジノイドボンドに比べてかなり大きいので、砥粒の表層部で発生した熱が砥粒とボンドとの界面まで伝導し、結合力が低下することに起因すると考えられる。高いパワー密度のレーザ光を長時間照射すると、dのように中心部が蒸発により除去⁷⁾され、クレータが生成される。クレータの周りのレジノイドは熔融して周囲に向かって流動しており、激しい加熱のため球状となった砥粒も観察される。

これらのことからわかるように、レジノイド砥石にYAGレーザを照射する場合、ボンドの変質、砥粒の損傷、表層部の除去の順に変化が進行する。また、パワー密度と照射時間についてそれぞれの変化の境界条件は図5のように双曲線状となり、パワー密度 F が增大するほど急速に変化するが、高いパワー密度で照射時間を高速に制御すればドレッシング能率の向上が図れることがわかる。また、A, B, CおよびDは、それぞれa, b, c, dにブラッシングを施した結果である。図のように変化領域のほぼ全域が除去され、熱劣化したボンドとともに砥粒も除去され凹部が生成される。そして、それまで表面下に存在した砥粒が出現する。しかし、変化領域の周辺部にはエッジが現れた状態で支持される砥粒も確認され、照射条件によってはボンドのみの除去も可能であることが裏付けられる。

4.2 レーザ照射による変質領域

図6は、レーザ照射によって蒸発が発生した砥石表層部および熱劣化した組織をブラッシングにより除去した後の断面形状を測定した例である。図から、レー

Fig. 6 Profile of irradiated section and weakened structure

(a) Depth of removal [Y_c] with laser irradiation (b) Depth of weakened structure [$(Y_c)_b$] with laser irradiation**Fig. 7** Relations between depth of affected structure and power density [F] or irradiating time [t]

ザ照射領域の中心付近は除去されており、その周囲のボンドが熔融流動した部分は比較的大きな盛上がりとなることからわかる。また、盛上がりの体積は除去体積よりかなり大きい。したがって、盛上がりの生成は、ボンドの流動に加えてレジノイドが瞬時に加熱されることで膨張することが大きくかかわっていることがわかる。これにブラッシングを施すと、図に示された盛上がりを含めた熱劣化層が除去される。ここで、レーザー照射による除去部の深さならびに平均径*をそれぞれ Y_c , D_c とし、盛上がりの平均径*を D_p とする。また、ブラッシングにより除去した熱劣化部の深さを $(Y_c)_b$, 平均径*を $(D_c)_b$ とし、以下でレーザー照射による変質領域の解析を行う。

4.2.1 パワー密度および照射時間の影響

図7(a)はパワー密度 F および照射時間 t と除去

深さ Y_c との関係を示すものである。砥石表面のボンドだけが熱影響を受ける場合には Y_c はほぼ零となり、表層部はほとんど除去されないが、砥粒の離脱が生じると表面に残留する離脱跡が Y_c として表され、 F および t の増加とともに Y_c は大きくなる。 F および t がかなり増大し表層部の蒸発が発生すると Y_c はかなり大きくなるが、 F および t に対する変化が小さくなる。これは、砥石表層部の蒸発とともに熱エネルギーが放出されるためと考えられる。熱劣化層を除去すると、(b)のように照射後の表面よりかなり内部までレーザー照射の影響が及んでいることが明らかであり、ボンドのみが熱影響を受けていても砥粒の保持能力が不十分であれば $(Y_c)_b$ はかなり大きくなること伺える。また、砥粒が離脱する状態では、表層部の蒸発の場合に比べてブラッシングによる除去量の割合が増大する。

図8(a)はレーザー照射による平均除去径 D_c , (b)は平均盛上がり径 D_p , (c)は熱劣化部の平均径 $(D_c)_b$ とパワー密度 F および照射時間 t との関係を示すものである。(a)では、砥粒の離脱跡も D_c として表されるため、砥粒の離脱状態から照射条件が激しくなるに従って増大し、表層部の蒸発が発生するとあまり変化せず、定性的に Y_c と一致している。また、(b)に示す D_p は、ボンドのみが熱影響を受ける状態から増大し、急激な加熱によってレジノイドボンドが膨張することがわかる。 F および t が増大し砥粒の離脱が発生すると、 D_p は照射スポット径を超える。すなわち、照射領域内で発生する熱が伝導し、照射領域外に熱影響を及ぼすことを表している。熱劣化部の平均径 $(D_c)_b$ は(c)のようになるが、特筆すべきは $(D_c)_b$ が(b)に示す D_p にほぼ一致していることである。すなわち、レーザー照射によって膨張したレジノイドボンドは必然的にその材料特性が変化し、強度が低下することがわかる。

4.2.2 焦点位置の影響

次に、レーザー光の焦点位置を砥石表面から移動させることによる影響を検討する。図9に焦点位置の変化量 Δa と除去深さ Y_c および熱劣化部の深さ $(Y_c)_b$ との関係を示す。また、図10には平均除去径 D_c , 平均盛上がり径 D_p および熱劣化部の平均径 $(D_c)_b$ との関係を示す。 Δa は、焦点位置が砥石内部の場合を負、逆の場合を正で表す。 Δa が零から外れるほど照射面積は増大し、パワー密度が低下する。したがって、砥石表面は Δa の変化により表層部の蒸発、砥粒離脱、ボンドの変化の順に異なる変形形態となり、 Δa の零を中心にはほぼ対称である。なお、図の照射条件の場合

* 砥石の組織は、砥粒が三次元的に複雑に分布する構造であるため、除去部および盛上がり部は必ずしも同心円状に分布しない。そのため、表面の写真および数方向の断面形状の測定結果から各部の平均径として値を決定した。

(a) Diameter of removal [D_c] with laser irradiation (b) Diameter of upheaval [D_p] with laser irradiation (c) Diameter of weakened structure [$(D_c)_b$] with laser irradiationFig. 8 Relations between diameter of affected structure and power density [F] or irradiating time [t] Fig. 9 Relations between depth of removal or weakened structure [Y_c , $(Y_c)_b$] and focal position [Δa] Fig. 10 Relations between diameter of removal, upheaval or weakened structure [D_c , D_p , $(D_c)_b$] and focal position [Δa]

Fig. 11 Measuring method for displacement of abrasive grain

には Δa の変化によってパワー密度がかなり低下するため、ボンドは飛散することなく溶融、膨張する。このような変化形態の移行に伴う図のような各変化領域の規模の変動は、図7および8におけるパワー密度のみを変化させる場合の変動に対応している。なお、図10において Δa が約 -1.5 mm から 1.5 mm まではパワー密度が大きいため、スポット径内の熱影響がスポット径の外側まで及んでいる。更に Δa の変化量が大きい場合は、スポット径が大きくなるため表層部が蒸発しても熱影響がスポット径内にとどまり、図8(b)の結果と必ずしも一致しない。

5. 砥粒支持剛性の変化

本報では、図3の装置を用い図11に示す方法で砥粒に一定荷重を作用させた場合の変位量を測定し、レーザ照射が砥粒支持剛性に及ぼす影響について検討した。すなわち、一つの砥粒に 15 gf を負荷する場合の砥粒のレベルを基準とし、加えて 85 gf を負荷することによる変位量 H_c を測定した。個々の砥粒の位置は、レーザ照射領域の中心から各砥粒の中心までの距離 l を写真から求めた。なお、SEM による観察では、円すい状ダイヤモンドとの接触による砥粒の損傷は確認されなかった。以下では、レーザ照射による砥石表面の砥粒支持剛性の変化を検討するため、図5を

Fig. 12 Relations between displacement of abrasive grain [H_c] and distance from beam center [l]

基に砥石表面に変化が生じ、表層部の砥粒が残留しボンドの飛散、熔融状態となる比較的小さいパワー密度または照射時間に設定した。

図 12 (a) は、異なる照射時間の場合について個々の砥粒の変位量 H_c を示すものである。平均盛上がり径から各条件における表面の変化領域の限界を $D_p/2$ で示す。レーザー照射の影響を受けない砥粒は周囲のボンドにより十分支持されるため、その平均変位量は図中の破線で示す約 $2.5 \mu\text{m}$ であるが、周辺のボンドに熱影響が及ぶと明らかに変位量 H_c が増加し、砥粒の支持剛性を低下させることがわかる。すなわち、変化領域外に分布する砥粒については支持剛性の変化はほとんどないが、照射領域内の砥粒の変位量は照射領域の中心に近づくに従って増加し、離脱寸前の砥粒では H_c がかなり大きくなる。また、(b) は照射時間を一定にして異なるパワー密度のレーザー光を照射した場合の変位量 H_c の変化である。この場合も、(a) と同様照射領域の中心に近い砥粒ほど H_c が増加するが、パワー密度の低下に従って変化が緩やかになることがわかる。

以上の検討結果から、YAG レーザ照射条件を微妙ではあるが適切に制御することで砥石表面の砥粒に熱影響を及ぼすことなくレジノイドボンドの除去が可能であることがわかる。無気孔レジノイド砥石のドレッシングにレーザー光を用いることの有効性については、

ドレッシングを施した砥石を用いた研削実験結果によって検討する必要があるが、別報にて行う予定である。

6. 結 言

レジノイドボンドの低い耐熱性に着目し、YAG レーザを熱源とする無気孔レジノイド砥石の熱的ドレッシング法の可能性を明らかにするため、YAG レーザの単発照射実験によって砥石表面の変質機構など作用面生成の基礎現象を検討し、以下の結果が得られた。

- (1) レジノイド砥石表面はレーザー照射によってボンドの変質、砥粒の離脱、表層部の蒸発の順に変化が進行し、ボンドの変質形態はパワー密度の増加によって膨張から上方へ飛散する状態となる。
- (2) レーザ照射による熱影響部の規模は、パワー密度および照射時間の増大によって大きくなるが、表層部の蒸発が生じると変化はわずかとなる。
- (3) 砥石表面のボンドにはレーザー照射による熱影響が及ぼされると膨張し、強度低下部の平均径は平均盛上がり径にほぼ等しい。また、照射条件によっては砥粒に熱影響を与えることなくボンドの除去が可能である。
- (4) 焦点位置が砥石表面から変化することによるパワー密度の低下に伴って、表面の変化形態および熱影響層の規模は焦点位置の変化量が零の位置を中心としてほぼ対象に変化する。
- (5) レーザ照射によって変化領域内の砥粒の支持剛性は、照射領域の中心部に分布する砥粒ほど低下し、パワー密度または照射時間が増大するほど変化は顕著となる。

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) 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.
- 2) 周 立波, 庄司克雄, 厨川常元, 海野邦彦: 極微粒ダイヤモンドホイールによるセラミックスの鏡面研削 (第 1 報), 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 71.
- 3) 細川 晃, 安井平司, 中園 汎, 工藤 和生, 久留須誠: レジノイド CBN 砥石の目直しに関する研究 (第 3 報) —— 仕上面粗さに及ぼす目直し条件の影響, 精密工学会誌, **56**, 11 (1990) 2093.
- 4) 兄玉 隼, 山田良二: レジノイドボンド CBN といしのツルーイング・ドレッシングと研削性能—第 1 報 ツルーイング・ドレッシング, 豊田工機技報, **22**, 1 (1981) 18.
- 5) 金 鐘信, 渡部武弘, 吉田嘉太郎: CBN ホイールのレーザードレッシングの試み, 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 445.
- 6) 井上英夫: 超砥粒砥石のツルーイングとドレッシング, 機械と工具, **26**, 10 (1982) 46.
- 7) レーザ協会編: レーザ応用技術ハンドブック, 朝倉書店, (1981) 66.