極軟質レジノイド砥石による 表面あらさ改善過程の研究(第2報)*

—表面あらさ極小化現象を利用した仕上加工法の提案—

大橋一仁 ** 西川亮太 *** 塚本真也 ** 多田憲倫 † 中島利勝 ††

Improving Process of Surface Roughness with Super-soft Grade Resinoid Bond Wheel (2nd Report)

- Grinding Method Based on the Minimizing Phenomenon of Surface Roughness -

Kazuhiro OHASHI, Ryota NISHIKAWA, Shinya TSUKAMOTO, Noritomo TADA and Toshikatsu NAKAJIMA

The surface roughness decreases down to the minimum just after start of plunge grinding with a super-soft grade resinoid bond wheel, of which bonding material is prepared by the interaction of polyvinyl alcohol and thermosetting plastics. In this paper, the grinding method with the resinoid bond wheel is investigated for the finest surface finish of workpiece, based on such minimizing phenomenon of surface roughness. Main conclusions obtained in this paper are as follows: (1) The finest surface finish is obtained by spark-out grinding operation starting just at the moment on which the surface roughness of workpiece decreases down to the minimum. (2) The surface finish by this grinding operation decreases with decreasing the initial surface roughness, but the decrease in surface roughness during the spark-out grinding process increases with increasing initial surface roughness. (3) The repetition of this grinding operation without dressing makes the surface finish smaller than that by a general grinding operation with larger depth of cut before spark-out grinding.

Key words: super-soft grade resinoid bond wheel, plunge grinding, minimizing phenomenon of surface roughness, spark-out grinding, initial surface roughness, surface finish

1. 緒 言

ポリビニルアルコール(PVA)結合剤に十分な耐水性を与えるため、熱硬化性樹脂を混合反応させた極軟質レジノイド砥石は、主に難削材料あるいは軟質材料などの仕上げ加工に用いられる弾性砥石である¹⁾。この砥石を用いた円筒プランジ研削では、研削開始直後に表面あらさが一旦極小となる現象が顕著に現れ、その発生機構を前報²⁾において、砥石作用面トポグラフィと干渉形態の観点から明らかにした。

つづいて本報では、極軟質レジノイド砥石が本来有する仕上面あらさ改善性能を十分に発揮させるプランジ研削方法を、この砥石による研削過程で認められる表面あらさ極小化現象を考慮し検討している。その結果、前報²⁾で解明した砥粒切れ刃密度が急激に減少する直前、すなわち表面あらさが極小となる時点においてスパークアウト研削に移行することで仕上面あらさを最も小さくできることが明らかになった。さらに、この研削方法による仕上面あらさの到達限界、それに及ぼす前加工面あらさの影響および仕上面あらさ改善性能の持続効果などを明らかにしたので報告する。

2. 実験方法および条件

実験は、極軟質レジノイド砥石で円筒プランジ研削することで行い、研削過程の所期の時点において砥石台を急速パッ

クあるいは切込みを停止させて、スパークアウト研削を行った。主な研削条件は以下のとおりである。

研 削 砥 石 : GC320N5M13B($\phi 405 \times 50\text{mm}$)
工 作 物 : SUS304($\phi 100 \times 10\text{mm}$)
研 削 速 度 : $V=32.4\text{m/s}$
速 度 比 : $K_v=0.02$
プランジ速度 : $v_p=2\mu\text{m/s}$
システム剛性 : $k_{sy}=11.14\text{N}/\mu\text{m}$
研 削 液 : ソリュブリユ型 80 倍希釈液
ドレッシング : インプリドレッサ

切込み $5\mu\text{m} \times 3\text{pass}$ 後, $0\mu\text{m} \times 2\text{pass}$

工作物の前加工面あらさは、研削条件を変えることにより、 $1.0 \sim 5.2\mu\text{m}R_y$ の範囲内で各実験の度にあらかじめ所定の値に調整した。また、使用した砥石は、水分を吸収することにより弾性が若干増大する³⁾ため、その使用にあたっては研削液に十分浸し実験を行った。

研削過程の各時点における研削面プロファイルならびに表面あらさを触針式表面あらさ計で測定した。また、砥石作用面を光学顕微鏡で観察するとともに、そのトポグラフィを前報²⁾と同様に非接触式砥石作用面トポグラフィ測定システムにより測定した。なお、測定システムの主な仕様および測定条件は前報²⁾と同様である。

3. 表面あらさ極小化現象を利用した仕上加工法

3.1 最適スパークアウト研削開始時点の検討

図1は、極軟質レジノイド砥石で表面あらさ $1.84\mu\text{m}R_y$ の工作物を円筒プランジ研削する場合の表面あらさ $R_y(t)$ の変化過程を示すものである。なお、ここでは $t=13\text{s}$ まで砥石に切込みを与え、その後切込みを停止してスパークアウト研削して

* 原稿受付 平成 16 年 2 月 25 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 (岡山市津島中 3-1-1)

† 学生会員 岡山大学大学院 (現, 東京エレクトロン AT(株); 荏崎市藤井北下条 2381-1)

†† 正 会 員 岡山大学工学部 (現, 正会員 岡山大学名誉教授; 岡山市佐山 2317-4)

Fig.1 Variation of surface roughness in cylindrical plunge grinding process with super-soft grade resinoid bond wheel

Fig.2 Effect of starting time of spark-out grinding on surface finish

おり、 t_s 、 t_y 、 t_f はそれぞれ過渡、定常、スパークアウト研削時間を示す。表面あらさは、研削開始から徐々に小さくなり、 $t=4.3s$ まで減少を続けた後に一転して急増し、やがて一定となる。これが表面あらさの極小化現象で、極軟質レジノイド砥石による研削過程で顕著に現れる砥石作用面における砥粒切れ刃密度の急激な減少などに起因することを前報²⁾において明らかにしている。表面あらさが一定の状態スパークアウト研削を行うと、最終的に仕上面あらさは約 $1.5\mu m R_y$ まで改善されるが、研削過程の初期に到達する表面あらさの極小値までは改善されない。これは、表面あらさの極小時点を過ぎて切れ刃密度の低下した砥石作用面でスパークアウト研削するため、ドレッシング後の高い切れ刃密度が維持された砥石作用面でスパークアウト研削すれば、表面あらさの更に小さい仕上面の得られることが期待される。

そこで、研削開始から $t=13s$ までの各時点において砥石の切込みを停止させ、スパークアウト研削する場合の仕上面あらさ $(R_y)_{tf}$ の変化を図2に示す。表面あらさが一定となる $t=6.5s$ 以降では、どの時点からスパークアウト研削を開始しても仕上面あらさは約 $1.5\mu m R_y$ で変化しない。これは、砥石のプランジ切込みを継続すると $t=6.5s$ 以降は定常研削状態となり、砥石作用面トポグラフィ、砥石のかつき量ならびに研削抵抗などが一定となり^{2,4)}、スパークアウト研削が同じ過程で進行するためである。一方、 $t=6.5s$ 以前の表面あらさが複雑に変動する過渡研削状態では、いずれの時点でスパークアウト研削しても仕上面あらさは定常研削状態以降にスパークアウト研削する場合を下回り、とりわけ極小表面あらさ $(R_y)_{min}$ に達した時点でスパークアウト研削に移行することで、最も仕上面あらさを改善することができる。すなわち、仕上面あらさ改善の観点からは、表面あらさが極小となる時点からスパークアウト研削することで、その効果を最大限に発揮させ、さ

Fig.3 Effect of starting time of spark-out grinding on distribution of abrasive grain on wheel surface

Fig.4 Variation of remaining rate of abrasive grain after spark-out grinding

らに研削サイクルの短縮にも効果が期待できる。

次に、この効果を砥石作用面性状から検討する。図3は、砥石表面の最外郭砥粒先端からの深さ z とその深さまでに存在する単位面積あたりの累積砥粒数 N_g との関係を示す。研削前、極小表面あらさ到達時点 ($t=4.3s$)、そこからスパークアウト研削を行った場合および定常研削状態からスパークアウト研削を行った場合についてそれぞれ示すものである。前報²⁾でも確認されているように、極小表面あらさとなる時点では、砥粒分布が研削前に比べてわずかに疎になるものの、それほど大きな変化はなくドレッシングにより生成された砥石作用面性状がほぼ維持されている。また、この時点からスパークアウト研削した後の砥粒分布は、スパークアウト研削開始前と比較して、ほとんど変化せず、比較的高い砥粒密度が保たれることがわかる。一方、定常研削状態からスパークアウト研削を行った後の砥粒分布は、図中の他の砥粒分布に比べて大きく変化し、砥粒密度が低下していることが認められる。

図4は、プランジ研削過程の各時点からスパークアウト研削した後の砥粒数をスパークアウト研削開始前を基準に表した砥石作用面における砥粒の残留率 $(N_g)_{tf} / N_g$ の変化を示すものである。図に示すように、研削開始直後におけるスパークアウト研削によってもわずかに砥粒数の減少が認められるが、表面あらさ $R_y(t)$ が極小となる $t=4.3s$ でスパークアウト研削する場合でも砥粒の残留率はおよそ91%に及ぶ。ところが、この時点を超えてスパークアウト研削を行う場合の砥粒残留率は急激に減少し、 $t=6.5s$ 以降の定常研削状態からスパークアウト研削する場合では、約20%の砥粒が失われる。なお、これらの砥粒損失は脱落によるものである⁴⁾。以上のことから、表面あらさが極小となる時点を超えてスパークアウト研削する場合は、砥石作用面の損失が大きくなる傾向にある。した

Fig.5 Effect of initial surface roughness on improving process of surface roughness

Fig.6 Effect of initial surface roughness on distribution of abrasive grain on wheel surface

がって研削による砥石作用面性状の変化ならびにスパークアウト研削後の仕上面あらさから判断すると、表面あらさが極小となる時点でスパークアウト研削に移行することが最も効果的であることがわかる。

3.2 前加工面あらさの影響

次に、前節で仕上面あらさの低減効果を明らかにした研削法の礎である表面あらさ極小化現象に前加工面あらさが及ぼす影響を検討し、さらに極小表面あらさの時点からスパークアウト研削することによる仕上面あらさの改善効果に及ぼす影響を明らかにする。

図5は、前加工面あらさ $(R_y)_i$ の異なる工作物を極軟質レジノイド砥石で円筒プランジ研削する場合の、表面あらさ $R_y(t)$ の変化過程をそれぞれ示すものである。前加工面あらさが異なっても、研削開始から表面あらさは徐々に減少した後、増大して一定となる図1と同様な表面あらさの極小化現象が現れる。ところが、 $(R_y)_i=1.05\mu\text{m}$ の場合は、表面あらさの極小化現象は認められず、研削の進行に伴って表面あらさは増大する。これは、この前加工面あらさが本報で使用した極軟質レジノイド砥石で改善可能な表面あらさを下回っているためである。また、前加工面あらさが大きいほど研削開始から極小表面あらさに達するまでのあらさの改善量は大きい、到達する極小表面あらさは前加工面あらさが小さいほど小さくなる。

図6は、前加工面あらさ $(R_y)_i$ が異なる工作物を円筒プランジ研削する場合の極小表面あらさ到達時点における砥石作用面の最外郭砥粒先端からの深さ z と単位面積あたりの累積砥粒数 N_g との関係を示すものである。図からわかるように、前加工面あらさが小さいほど、極小表面あらさに達するまでに減少する砥粒数が少なくなり、 $(R_y)_i=1.45\mu\text{m}$ の場合は、研削

Fig.7 Effect of initial surface roughness on number of simultaneously acting cutting edge and wheel wear at the time of minimum surface roughness

Fig.8 Effect of initial surface roughness on mean grinding force acting cutting edge at the time of minimum surface roughness

前の砥粒分布とそれほど大きな変化はなく、研削前の砥石作用面性状がほぼ維持される。ところが、特に $(R_y)_i=2.42\mu\text{m}$ 以上の場合では、表面あらさが極小となるまでに砥石作用面の砥粒が比較的多く失われることがわかる。

図7は、前加工面あらさ $(R_y)_i$ に対する極小表面あらさ到達時の砥石摩耗量 d_0 および同時作用切れ刃数 N_{ga} の変化を示すものである。なお、同時作用切れ刃数は前報²⁾と同様に砥石作用面トポグラフィ、研削面プロファイル、砥石と工作物の実接触長さ⁵⁾などから決定している。図からわかるように、前加工面あらさが小さい場合でも極小表面あらさになるまでに砥石摩耗がわずかに進行し、前加工面あらさが大きいほど砥石損傷の程度が大きくなる。この傾向は、前加工面あらさが大きいほど砥石表面と工作物との実接触面積が増大し、より大きな局部圧力が作用するためと考えられる。なお、砥石の損傷は主に砥粒の脱落によるものである。したがって、極小表面あらさ到達時の同時作用切れ刃は、前加工面あらさが大きいほど少なくなる。これらのことは、極軟質レジノイド砥石で研削する場合の前加工面あらさが大きいほど、表面あらさが極小になるまでに仕上面あらさの改善性能が著しく失われることを示唆している。

また、図8に極小表面あらさに達した時点の1個の切れ刃に作用する平均背分力 $\bar{p}_g$ および平均主分力 $\bar{q}_g$ への前加工面あらさ $(R_y)_i$ の影響を示す。なお、 $\bar{p}_g$ 、 $\bar{q}_g$ とともに図7に示した同時作用切れ刃数と研削抵抗から求めている。前加工面あらさが大きいほど同時作用切れ刃数が減少するため、 $\bar{p}_g$ および $\bar{q}_g$ はともに増大し、砥粒切れ刃に作用する負荷が大きくなる。このことは図7に示した前加工面あらさに対する極小表面あらさ到達までの砥石摩耗量の変化を裏付けている。また、前加工面あらさが $2\mu\text{m}R_y$ 以下の場合には、1つの

Fig.9 Effect of initial surface roughness on the minimum surface or surface finish by the proposed grinding method

Fig.10 Relationship between initial surface roughness and remaining rate of abrasive grain at before or after spark-out grinding

砥粒に作用する抵抗が比較的小さく、このことから図6に示した $(Ry)_i=1.45\mu\text{m}$ および $1.84\mu\text{m}$ では研削面の砥粒分布が研削前とあまり相異なることが理解できる。

次に、研削開始後の極小表面あらさ $(Ry)_{\min}$ および極小表面あらさに達した時点でスパークアウト研削を行った後の仕上面あらさ $(Ry)_{\min f}$ に及ぼす前加工面あらさ $(Ry)_i$ の影響を図9に示す。なお、図中に併せて示す $(Ry)_f$ は、研削開始から砥石に十分なブランジ切込みを与えて定常になった後にスパークアウト研削する場合の仕上面あらさで、前加工面あらさに関係なく一定となる。図に示すように、前加工面あらさが約 $2.7\mu\text{m}$ 以下の場合、 $(Ry)_{\min}$ が $(Ry)_f$ を下回り、図1のように研削開始後に達する極小表面あらさが一連の研削過程において最も小さい。一方、 $(Ry)_i$ がおよそ $2.7\mu\text{m}$ より大きくなると $(Ry)_{\min}$ が $(Ry)_f$ を上回り、表面あらさの極小化現象が仕上面あらさの改善に寄与しないと見受けられる。ところが、この場合でも極小表面あらさに達した時点でスパークアウト研削すれば、仕上面あらさ $(Ry)_{\min f}$ が $(Ry)_f$ を下回り、本砥石の使用にあたっては、 $(Ry)_i=5.0\mu\text{m}$ 程度まで仕上面あらさの改善に効果のあることがわかる。また、 $(Ry)_i$ が $2.7\mu\text{m}$ 以下でも同様に仕上面あらさ $(Ry)_{\min f}$ はより小さくなる。

また、図10に、異なる前加工面あらさの工作物を研削する場合の極小表面あらさに到達時およびそこからスパークアウト研削した後の表面あらさ $(Ry)_{\min}$ 、 $(Ry)_{\min f}$ と各時点における砥石表面の砥粒残留率 $N_g/N_g(t=0)$ との関係を示す。なお、ここでの砥粒残留率は、それぞれの時点で砥石表面に存在する砥粒数と研削前の砥石表面における砥粒数の比である。前加

Fig.11 Variation of surface finish in repetitive grinding process

Fig.12 Photographs of wheel surface in repetitive grinding process

工面あらさが大きいほど表面あらさが極小になる時点の砥粒数が減少する。しかし、極小表面あらさに到達時点からスパークアウト研削することによる砥粒は、いずれの前加工面あらさの場合もスパークアウト研削開始前の90%以上が残留しており、表面あらさが極小となる時点でスパークアウト研削に移行する本仕上法の有効性が認められる。

4. 仕上面あらさ改善効果の持続性能

前章で明らかになったように、本報で提案する極小表面あらさに到達時点からスパークアウト研削に移行する仕上法では、仕上面あらさの改善はもとより、そのための砥石作用面性状の劣化が必要最小限に抑えられる。そこで、極小表面あらさに到達時点からスパークアウト研削へ移行する仕上サイクルを、ドレッシングすることなく連続して行う仕上法を提案し、本仕上法の仕上面あらさ改善効果の持続性能を検討する。

図11は、極軟質レジノイド砥石で前加工面あらさ $1.84\mu\text{m}$ の工作物を連続仕上げる場合の仕上サイクル数 n_{gs} に対する極小仕上面あらさの変化を示すものである。なお図中に示す $(Ry)_f$ は、十分なブランジ切込みの後スパークアウト研削することで得られる仕上面あらさである。1回目の仕上サイクルでは、 $(Ry)_{\min f}$ は約 $0.9\mu\text{m}$ となり、 $(Ry)_f$ を大きく下回る。次に2回目の仕上サイクルでは、1回目ほどの仕上面あらさ改善効果は認められないが、依然 $(Ry)_f$ よりも小さいあらさに仕上げることができる。それ以降、7回目の仕上サイクルまで $(Ry)_{\min f}$ は緩やかに上昇するものの、 $(Ry)_f$ を下回り、ほぼ安定して良好な仕上面を得られることがわかる。

Fig.13 Effect of number of grinding cycle on distribution of abrasive grain on wheel surface

Fig.14 Variation of number of simultaneously acting cutting edge and surface finish in repetitive grinding process

図12にドレッシング後、仕上げサイクル1回目2回目および仕上面あらさ改善効果が低下する8回目における砥石表面の観察結果を示す。ドレッシング後の砥石表面に示した切れ刃と思われる砥粒に着目すると、仕上げサイクル数が増加するに従ってわずかな砥粒の脱落が認められるが、そのほとんどは砥石作用面に残留していることが確認できる。しかし、8回目ではドレッシング後に存在したほとんどの砥粒を見ることはできない。

また、図13は、砥石表面の最外郭砥粒先端からの深さ z とその深さまでに存在する単位面積あたりの累積砥粒数 N_g との関係を仕上げサイクルについて示すものである。図から、仕上げサイクル数が増加するにつれて砥粒密度は徐々に減少し、砥石作用面の劣化がゆるやかに進行することがわかる。そして、仕上面あらさの改善性能が低下する8回目の仕上げサイクルでは、砥石作用面における砥粒密度が一般のプランジ研削サイクルを行った場合と等しくなる。これらの砥粒分布に基づいて、図14に同時作用切れ刃数 N_{ga} と極小表面あらさ $(Ry)_{min}$ およびスパークアウト研削後の仕上面あらさ $(Rymin)f$ との関係を示す。なお、プロット点中の数字は、仕上げサイクル回数を示す。図からわかるように、仕上げサイクル回数の増加によって同時作用切れ刃数は減少し、それに伴って得られる仕上面あらさは大きくなる。また、図15に各仕上げサイクルにおけるスパークアウト研削開始時の1個の砥粒切れ刃に作用する平均背分力 $\bar{p}_g$ および平均主分力 $\bar{q}_g$ を示す。仕上げサイクル回数の増加に従って $\bar{p}_g$ ならびに $\bar{q}_g$ ともに大きくなる傾向にある。しかし、仕上げサイクル数が比較的少ない場合の増大はわずかで、仕上面あらさの改善効果が低下する8回目の仕上げサイクルでは砥粒切れ刃に作用す

Fig.15 Variation of mean grinding force acting cutting edge in repetitive grinding process

る研削抵抗が著しく増大し、砥石作用面の劣化が速やかに進行することがわかる。

以上のことから、本報で提案する極軟質レジノイド砥石による仕上法は、砥石作用面性状を必要以上に劣化させることなく、仕上面あらさの改善に効果を発揮し、ドレッシング間隔を延長することにも有効である。

5. 結 言

本報では、極軟質レジノイド砥石による円筒プランジ研削過程の初期において顕著に発生する表面あらさ極小化現象を利用した仕上法を提案し、その有効性を検討した。本報で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 研削開始後の、表面あらさが極小となる時点でスパークアウト研削に移行することで、仕上面あらさは最も改善され、さらに砥石作用面性状の変化を必要最小限に抑えられる。
- (2) 表面あらさが極小となる時点から開始するスパークアウト研削過程において、前加工面あらさが小さいほど表面あらさの改善量は減少するが、スパークアウト研削後の仕上面あらさは良好となる。
- (3) 前加工面あらさが大きいほど表面あらさが極小になるまでに脱落する砥粒切れ刃は多くなるが、その後のスパークアウト研削過程では、前加工面あらさに関係なく、砥粒の脱落による砥石作用面の劣化はほとんど進行しない。
- (4) 本仕上法をドレッシングすることなく連続して行う場合の仕上面あらさは、研削回数の増加とともに徐々に大きくなるが、複数回の研削においても十分なプランジ切込みの後スパークアウト研削する通常の研削法の場合を下回り、本仕上法はドレッシング間隔の延長にある程度の効果を有する。

参 考 文 献

- 1) 日本特殊研砥(株): FBB 砥石 精密仕上砥石 技術資料。
- 2) 大橋一仁, 多田憲倫, 中澤和彦, 大川憲毅, 塚本真也, 中島利勝: 極軟質レジノイド砥石による表面あらさ改善過程の研究(第1報)ー研削開始後の表面あらさ最小化現象ー, 精密工学会誌, 69, 6 (2003) 803。
- 3) 中島利勝, 大橋一仁, 大川憲毅, 中澤和彦, 多田憲倫: 極軟質レジノイド砥石による仕上面生成特性に関する研究, 砥粒加工学会誌, 45, 4 (2001) 169。
- 4) 中島利勝, 岡村健二郎, 木下輝一: 研削の過渡特性(第3報)ー寸法生成過程ー, 精密機械, 40, 3 (1974) 256。
- 5) 中島利勝, 塚本真也, 増田義隆, 佐藤一伸: 曲率半径が変化する工作物のプランジ研削過程の研究, 精密工学会誌, 53, 5 (1987) 820。