cBN ホイールによる超高速鏡面研削* (ドレッシング条件および工作物周速度が表面品位に及ぼす影響)

高嶋 和彦^{*1}, 渡辺 秀徳^{*1}, 太田 稔^{*2}

Ultra-High Speed Grinding Using a cBN Wheel for a Mirror-Like Surface Finish (Influence of Dressing Conditions and Work Speed on Surface Integrity)

Kazuhiko TAKASHIMA, Hidenori WATANABE and Minoru OTA^{*3}

^{*3} Kyoto Institute of Technology,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8585 Japan

There are strong demands for a machining process capable of reducing the surface roughness of sliding parts, such as auto parts and other components, with high efficiency. In this work, we attempted to grind hardened steel to a mirror-like surface finish with high efficiency using an ultra-high speed grinding process with a coarse-grained cBN wheel. In the present study, we examined the effects of the rotary diamond dresser grain size, the dressing conditions and the work speed in an effort to optimize the grinding conditions for accomplishing mirror-like surface grinding with high efficiency. The results showed that the thickness of work affected layer reduces when the work speed was increased while the grinding efficiency was kept constant. Furthermore, under a finer dressing condition, increasing the work speed was effective upon reducing the deterioration of surface roughness due to grinding heat. However, grinding chatter is likely to occur with higher work speed.

Key Words: Cylindrical Grinding, Grinding Wheel, Dressing, Surface Roughness, Mirror-Like Surface, Surface Integrity

1. 緒言

環境問題への対応や省エネルギー化の推進のため、自動車パワートレインの効率化が求められている。このニーズに対応するために、部品摺動部の摩擦を低減することが有効とされている。そのために工作物の表面粗さを低減する効率的な加工法が望まれている。超仕上やラッピング工程を追加することで表面粗さは小さくできるが、形状精度の悪化や加工工程の増加等の問題が懸念される。このため、研削砥石を用いた鏡面研削への期待が大きい。ここでは以下で述べる「鏡面」の定義を、おおよそ表面粗さ Ra0.1 μm 以下の面とする。鏡面化を目的として、微細な砥粒を用いた和嶋ら⁽¹⁾の研究例がある。微粒砥粒を用いることで、高品位鏡面

を得ることが可能であるが、加工能率が低いため、自動車部品等の量産加工への適用が進んでいない。そのため、鏡面研削において加工能率の向上を目的に、粗粒砥粒の先端(逃げ面)を平坦化した研削砥石を用いた試みがなされている⁽²⁾⁽³⁾。砥粒先端の平坦化は、いわゆるトランケート・ドレッシングという名称で知られている⁽⁴⁾が、砥粒先端を平坦化すると、砥粒の切れ味が低下し研削抵抗が大きくなるため、従来では加工能率と鏡面化の両立が困難であった。筆者らは、トランケート・ドレッシングによる研削抵抗の増大を超高速研削で解決することを狙い研究に取り組んできた⁽²⁾。これまでに砥石粒度#80の粗粒砥粒を用いたビトリファイドボンド cBN ホイール(以下、単にホイールと呼ぶ)を用いて、工作物周速度を従来より大きくすることで、工作物表面に作用する研削熱の影響を小さくすることができると明らかにした。また、砥石粒度#200のホイール(以下、#200 ホイールと呼ぶ)を用いることで、研削抵抗を低減でき、高能率に鏡面が得られる可能性を明らかにした⁽⁵⁾。

* 原稿受付 2009年3月18日。

^{*1} 日産自動車(株) (〒237-8523 横須賀市夏島町1)。

^{*2} 正員、京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

E-mail: m-ota@mech.kit.ac.jp

本研究では、鏡面研削を行った工作物の表面品位および研削能率の向上を目的に#200 ホイールを用いた超高速研削においてドレッシング条件、研削条件が表面品位に及ぼす影響を検討したので報告する。

2. 実験方法および条件

実験には、砥石回転速度 $15,000 \text{ min}^{-1}$ 、工作物回転速度 $5,000 \text{ min}^{-1}$ までの高速化が可能な超高速円筒研削盤（オークマ（株）、GC-Super33 改）⁽²⁾を用いた。著者らの研究⁽⁵⁾で#200 ホイールと#40 のロータリダイヤモンドドレッサ（以下、ドレッサと呼ぶ）を用いて、ドレッシンググリードが表面粗さに及ぼす影響を検討したところ、#80 ホイールに比べて、#200 ホイールの工作物表面粗さが大きくなった。これは#200 ホイールに対して、使用したドレッサの粒度#40 では砥粒の平均粒径が大きすぎたために、#200 ホイールの砥粒がドレッシングにより大きく破砕されたことが原因と考えられた。そこで本研究では、ドレッサの粒度を#120、#200、#270 として、ドレッサ粒度の影響を検討した。実験には#200 ホイールを用い、ダウンカットドレッシングの後、図1に示すように、直径 40.2 mm 、研削幅 15 mm の高周波焼入れした炭素鋼（S45C）をアップカットによりプランジ研削した。ホイール周速度 V_s は、ドレッシング時・研削加工時とも 200 m/s とした。研削液の供給は、接線ノズル方式を用いた。ドレッシング条件および研削条件を表1に示す。研削加工中は研削動力をモニタリングし、研削動力から接線研削抵抗 F_t を求めた。加工後、工作物の表面粗さを触針式表面粗さ計(Mahr, Pertometer S3P)で測定した。その後、工作物表面および表面直下層の残留応力 σ を微小X線応力測定装置（株式会社、PSPC）を用いて測定した。さらに、工作物を研削方向に直角に切断し、切断面を研磨、ナイタル腐食を行い、光学顕微鏡（株式会社、TME-NR）で加工変質層を観察した。

Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Dressing and grinding conditions

Grinding wheel		BN200M200V($\phi 350 \text{ mm}$)
Dressing	Dresser	SD120N100M($\phi 100 \text{ mm}$) SD200N100M($\phi 100 \text{ mm}$) SD270N100M($\phi 100 \text{ mm}$)
	Wheel speed V_s	200 m/s
	Dressing lead f	0.01, 0.03, 0.05 mm/rev
	Dresser speed V_d	160 m/s
	Dressing speed ratio V_d / V_s	(0.8)
	Dressing depth of cut	$\phi 2 \text{ }\mu\text{m/pass}$
Grinding	Workpiece	Hardened Carbon Steel (S45C, HRC55)
	Wheel speed V_s	200 m/s
	Work speed V_w	200 m/min
	Stock removal rate Z	$0.63 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$
	Spark out time T	0 s
	Coolant	Soluble (2% dilution)

3. 実験結果および考察

3・1 ドレッサ粒度の影響

ドレッサ粒度およびドレッシンググリード f と触針式表面粗さ計で測定したプランジ切込み後の工作物表面の中心線平均粗さ Ra の関係を、図2に示す。全てのドレッサにおいて、ドレッシンググリード f を小さくするほど表面粗さが小さくなった。#120 ドレッサでは、ドレッシンググリード f の変化に対して表面粗さが顕著に変化しているが、#200、#270 ドレッサでは、ドレッシンググリード f の変化に対して表面粗さの変化量が小さくなった。今回使用したドレッサは全て幅 1.1 mm のメタルボンドダイヤモンドドレッサである。そのため、ドレッサ粒度番号が大きくなるほど、ドレッサ表面の砥粒数が多くなり、ドレッシンググリードの影響が小さくなったと考えられる。

Fig. 2 Influence of dressing lead on surface roughness

ドレッサ粒度およびドレッシンググリード f を変化させたときの接線研削抵抗 F_t を、図3に示す。全てのドレッサにおいて、ドレッシンググリード f が小さくなるほど接線研削抵抗 F_t は大きくなり、接線研削抵抗 F_t の大きさは #120 ドレッサ < #200 ドレッサ $\approx$ #270 ドレッサの順序となった。図2および図3より、#120

ドレッサと#270 ドレッサを用いた場合を比較すると、ドレッシングリード f が小さい領域では、#270 ドレッサの方が、#120 ドレッサに比べて工作物表面粗さは大きく、接線研削抵抗 F_t も大きくなった。ここで、#270 ドレッサを用いてドレッシングしたホイール表面の砥粒は#120 ドレッサでドレッシングした砥粒より平坦化されていると仮定すると、平坦化された砥粒により切れ味が悪化して、工作物を切削域まで切り込むことができず塑性的上すべりが多くなったために、接線研削抵抗 F_t 、表面粗さともに大きくなったと推測できる。

Fig. 3 Influence of dressing lead on grinding force

ここで、表面粗さが小さかった二つの条件について、工作物の表面品位の違いを調べた。#120 ドレッサ、ドレッシングリード $f=0.01$ mm/rev と#200 ドレッサ、ドレッシングリード $f=0.01$ mm/revにおける工作物表面層の内部残留応力分布を、図4に示す。#120 ドレッサの方が、引張残留応力が抑制され、引張残留応力のピークが表れる深さが表面側になっており、工作物表面への熱影響が小さくなったことがわかる。

以上の結果より、本実験条件の範囲内で、#200 ホイールに対しては#120 ドレッサが適していると判断し、以下の実験では#120 ドレッサを使用することとした。

Fig. 4 Residual stress distribution

3・2 ドレッシング条件の影響

前述の実験で選定した#120 ドレッサを用いて、ドレ

ッシング条件が研削後の表面品位に及ぼす影響を詳細に検討した。ドレッシング条件を表2に示す。実験方法および研削条件は前述と同様とした。

Table 2 Dressing conditions

Dressing	Dresser	SD120N100M(φ 100 mm)
	Wheel speed V_s	200 m/s
	Dressing lead f	0.01, 0.05, 0.10 mm/rev
	Dresser speed V_d	(40, 100, 160 m/s)
	Dressing speed ratio V_d/V_s	0.2, 0.5, 0.8
	Dressing depth of cut	φ 2 μm/pass

ドレッシングリード f およびドレッシング周速度比 V_d/V_s を変化させたときの工作物表面の中心線平均粗さ R_a を図5に示す。ドレッシングリード f を小さくすると表面粗さが小さくなり、表面粗さに及ぼすドレッシング周速度比 V_d/V_s の影響が小さくなる傾向がみられた。研削条件が異なるが#80 ホイールを用いた実験⁽²⁾において、ドレッシングリード $f=0.1$ mm/rev ではドレッシング周速度比 V_d/V_s を小さくするほど、表面粗さが小さくなった。本実験では、ドレッシングリード $f=0.1$ mm/rev、ドレッシング周速度比 $V_d/V_s=0.2$ で表面粗さがドレッシング周速度比 $V_d/V_s=0.5$ に対して大きくなった。ドレッシング周速度比 $V_d/V_s=0.2$ でドレッシングすることで平坦化された砥粒先端面で研削時に工作物と砥粒先端面の摩擦力が大きくなり、砥粒が脱落した結果、表面粗さが大きくなったものと思われる。#80 ホイールと同様の結果とならなかったのは、#80 ホイールの砥粒保持力が#200 ホイールに対して大きいことが原因と考えられる。

Fig. 5 Influence of surface roughness on dressing lead and dressing speed ratio

ドレッシングリード $f=0.05$ mm/rev の条件で研削したときの工作物の断面組織写真を図6に、工作物表面層の内部残留応力分布を図7に示す。内部残留応力は工作物回転軸方向の値である。いずれのドレッシング周速度比 V_d/V_s でも白層および焼きもどし層などからなる加工変質層が発生したが、ドレッシング周速

度比 V_d/V_s を大きくすると、加工変質層が小さくなった。内部残留応力については、ドレッシング周速度比 V_d/V_s を大きくすると引張残留応力のピークが小さくなり、ドレッシング周速度比 $V_d/V_s=0.8$ の条件では、引張残留応力が無くなり全ての領域で圧縮残留応力を示した。

これらの結果より、ドレッシング周速度比 V_d/V_s を大きくすると工作物表面に作用する研削熱が小さくなるものと推定できる。ドレッシング周速度比 V_d/V_s を大きくすることで、ホイールの切れ味が向上し、砥粒逃げ面と工作物表面の摩擦により発生する熱量が小さくなったと推測できる。

Fig. 6 Cross-section of workpieces ($f=0.05$ mm/rev)

Fig. 7 Residual stress distribution

3・3 工作物周速度の影響

実験方法は前述と同様にして、高能率研削を想定した研削能率 $Z'=6.3$ mm³/mm³・s でドレッシンググリードは $f=0.05, 0.2$ mm/rev の2条件とし、工作物周速度が表面品位に及ぼす影響を検討した。ドレッシング条件および研削条件を表3に示す。

工作物周速度 V_w と工作物表面の中心線平均粗さ Ra の関係を、図8に示す。工作物表面粗さはドレッシンググリード $f=0.2$ mm/rev の条件で、工作物周速度 V_w の増加にともなってわずかに大きくなったが、ドレッシンググリード $f=0.05$ mm/rev の条件では、工作物周速度 $V_w \leq 250$ mm/min の領域で工作物周速度の増加にともなって小さくなる傾向を示した。工作物表面粗さに関しては、幾何学的小および統計的解析による理論式が導かれており、代表的なものとして佐藤⁽⁶⁾、Yang ら⁽⁷⁾、

Table 3 Dressing and grinding conditions

Grinding wheel		BN200M200V(φ350 mm)
Dressing	Dresser	SD120N100M(φ100 mm)
	Wheel speed V_s	200 m/s
	Dressing lead f	0.05, 0.2 mm/rev
	Dresser speed V_d	120 m/s
	Dressing speed ratio V_d/V_s	(0.6)
	Dressing depth of cut	φ2 μm/pass
Grinding	Workpiece	Hardened Carbon Steel (S45C, HRC55)
	Wheel speed V_s	200 m/s
	Work speed V_w	24 - 400 m/min
	Stock removal rate Z'	6.3 mm ³ /mm ³ ・s
	Spark out time T	0 s
	Coolant	Soluble (2% dilution)

小野⁽⁸⁾、織岡⁽⁹⁾の式がある。これらを円筒外径研削にあてはめて簡略化すると、式(1)のようになる。ここで Ra_{th} は、工作物表面の中心線平均粗さの理論値を示しており、 C はホイールの仕様と工作物の材質によって決まる係数である。

$$Ra_{th} = C \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{0.67} \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{d_w} \right)^{0.33} \quad (1)$$

(d_s : ホイール直径, d_w : 工作物直径)

式(1)とドレッシンググリード $f=0.2$ mm/rev の結果と比較すると、工作物周速度 V_w が 24 m/min から 400 m/min に増加するときの中心線平均粗さ Ra の増加率は、理論式が 6.6 倍であるのに対し、実験結果は 1.2 倍程度であった。この結果は、中山ら⁽¹⁰⁾が確認した現象と同様と考えられる。すなわち、工作物周速度を従来の研削条件から大幅に高速化することで、砥粒が工作物表面を通過する際に生じる盛り上がり減少することなどによって、表面粗さの増加の割合が小さくなったと考えられる。

ドレッシンググリード $f=0.05$ mm/rev では、ドレッシンググリードを小さくしたことで砥粒先端が平坦化されるので、図8に示す破線のように、工作物周速度 V_w の減少にともない表面粗さが小さくなるものと推測できる。しかしながら、ドレッシンググリード $f=0.05$ mm/rev の条件では工作物周速度 V_w の小さい条件で推測より表面粗さが大幅に大きくなった。この原因として以下のように考察する。研削能率 Z' 一定で、工作物周速度 V_w が小さくなると、工作物1回転あたりの切込み深さが大きくなるため、接触弧長さが大きく、砥粒切込み深さが小さくなる。そのため、砥粒先端と工作物表面の摩擦により発生する研削熱が大きくなり、工作物表面が軟化された。ドレッシンググリード $f=0.05$ mm/rev では、砥粒先端が平坦化されて、砥粒の切れ味が悪化しているため、砥粒と工作物表面の塑性的上す

べりが多くなったことで表面粗さが大きくなったと考えられる。工作物周速度の増加により、塑性的上すべりが少なくなったこと、熱源となる研削点の移動速度の増加により工作物表面に作用する熱影響が小さくなったことで、先に述べた表面粗さの悪化要因が取り除かれたものと考えられる。さらにドレッシングリード $f=0.2\text{ mm/rev}$ の条件と同様に、工作物周速度の増加に対して表面粗さの増加も小さくなったものと思われる。そこで次に、工作物周速度 V_w が工作物表面層に及ぼす熱影響について検討した。

Fig.8 Influence of surface roughness on dressing lead and work speed

図9、10にドレッシングリード $f=0.05\text{ mm/rev}$ の条件で研削した工作物断面組織写真および工作物表面層の内部残留応力分布を示す。断面組織写真から、いずれの研削条件でも研削熱の影響により白層と焼きもどし層などで構成される加工変質層が形成されているが、工作物周速度 V_w を大きくすると、加工変質層は小さくなった。内部残留応力については、工作物周速度 $V_w=24\text{ m/min}$ の場合では、最大部が 1000 MPa 以上となる引張残留応力が生じているのに対し、工作物周速度 $V_w=400\text{ m/min}$ の場合では、引張残留応力のピークが表面側にシフトし、その値も小さくなり、 200 MPa 未満の引張残留応力が生じる結果となった。工作物周速度を大きくすることで、工作物に作用する研削熱が減少し、また研削熱の影響が及ぶ深さも浅くなったためと考えられる。このことより、工作物周速度 V_w を大きくすることで、研削時に工作物表面に作用する研削熱が抑制されることがわかった。

以上の結果より、砥粒先端の平坦化を狙ったトランケート・ドレッシングを施したホイールを用いた超高速鏡面研削では、工作物周速度 V_w を増大することが効果的であることが明らかになった。

しかしながら、研削能率一定で工作物周速度 V_w を大きくすると、工作物1回転あたりの切込み量 a が小さく

なり、研削時にびびりが発生しやすくなることが予想される。

Fig.9 Cross-section of workpieces

Fig.10 Residual stress distribution

図11に工作物周速度 V_w と工作物の真円度の関係を示す。真円度の測定には真円度測定器(Taylor Hobson, Talyrond262)を用いた。本実験では、スパークアウト $T=0\text{ s}$ で加工しているため、工作物の研削後の形状には、図12に示すような削り残し部が発生する。工作物周速度 $V_w=24\text{ m/min}$ の条件では、工作物1回転あたりの切込み量 a が 15.7 μm になるため、削り残し部の段差が大きくなって真円度が大きくなった。そのため、幾何学的形状から考えると工作物周速度 V_w を大きくすることで工作物1回転あたりの切込み量 a が小さくなり、真円度は小さくなると推測できる。しかしながら、ドレッシングリード $f=0.05\text{ mm/rev}$ 、工作物周速度 $V_w=400\text{ m/min}$ の条件では、図13の真円度プロフィールに示すように、工作物再生型びびりにより、真円度が大幅に悪化した。工作物周速度 $V_w=400\text{ m/min}$ では工作物1回転あたりの切込み量 a が 0.94 μm になる。杉原らの研究⁽¹¹⁾で工作物周速度 V_w が大きく、工作物1回転あたりの切込み量 a が小さくなると、安定限界を超えびびりが発生しやすくなることが明らかになっている。ドレッシングリード $f=0.20\text{ mm/rev}$ に対して、ドレッシングリード $f=0.05\text{ mm/rev}$ として砥粒先端を平坦化したことで、切れ味が悪化し、切り残し量が多

くなったものと推測できる。そのため、工作物1回転あたりの実切込み量が大幅に小さくなって、びびり振動が発生して真円度が大きくなったと考えられる。

Fig.11 Influence of roundness on dressing lead and work speed

Fig.12 Cross-sectional shape of workpiece during grinding

Fig.13 Roundness profile
($f = 0.05$ mm/rev, $V_w = 400$ m/min)

4. 結言

砥粒粒度#200 のビトリファイドボンド cBN ホイールを用いて、ホイール周速度 200 m/s による焼入れ鋼の超高速研削実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 砥粒粒度#120 のロータリーダイヤモンドドレッシングを用いた実験の結果、ドレッシングリード f が小さく、ドレッシング周速度比 V_d/V_s が大きい条件でドレッシングすることで、工作物の表面粗さが小さく、工作物の加工変質層が小さくなった
- (2) 超高速研削でドレッシングリード f を小さくして鏡面加工する場合、工作物周速度 V_w が小さい領域では、加工変質層が大きく、表面粗さも大きくなった。そのため、工作物周速度を大きくするこ

とで、工作物表面に作用する研削熱を減少させる効果が期待でき、加工変質層を小さく、表面粗さも小さい良好な工作物表面層が得られる。

- (3) ドレッシングリードが小さい条件で、研削能率 Z 一定で工作物周速度 V_w を大きくすると、びびりが発生した。今後さらにホイールの砥粒先端状態、回転あたりの切込み量 a 、ホイール周速度 V_s 、工作物周速度 V_w それぞれの影響を検討する必要がある。

文 献

- (1) Wajima, N., Syoji, K., Kuriyagawa, T., Mori, Y and Suzuki, H., Cylindrical Mirror Grinding of High Speed Tool Steel Rings with Ultra-Fine Grit Diamond Wheels, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol.43, No.7 (1999), pp. 327-332.
- (2) Wakuda, M., Nakayama, T., Takashima, K and Ota, M., Ultra High Speed and High Efficiency Grinding for Mirror-Like Surface Finish, *Proceeding of the International Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, Japan Society of Mechanical Engineers, (2003), pp. 285 – 290.
- (3) Ichida, Y., Ueno, H., Morimoto, Y., Sato, R. and Shimizu, K., Study on micro dressing of c BN grinding wheels, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol. 50, No.4(2006), pp. 211-216.
- (4) P.A. McKeown, K. Carlisle, P. Shore and R. F. J. Read: Ultra-precision, High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 5 (1990) 813.
- (5) Ota, M., Nakayama, T., Takashima, K., Watanabe, H., Ultra-high Speed Grinding Using a CBN Wheel for a Mirror-like Surface Finish, *Key Engineering Materials*, Vols. 291-292 (2005), pp. 67-72.
- (6) Sato, K., Theory of grinding (Part2), *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.16, No.187(1950) pp. 117-123.
- (7) C. T. Yang and M. C. Shaw: The Grinding of Titanium Alloys, *Transactions of the ASME*, 77, 5 (1955), pp.645-660.
- (8) Ono, K., *Kensaku Shiage (Grinding)*, (1962), pp.60, Maki Syoten.(in Japanese)
- (9) Orioka, T., Theory of Probability on Generating Process of Finished Surface in Grinding Operation, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.63, No.499(1960) pp. 1185-1193.
- (10) Nakayama, T., Takagi, J., Watanabe, H. and Ota, M., High-quality and high-efficiency machining by rapid rotation grinding-2nd report: Grinding performance at high work peripheral speed, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol.51, No.6 (2007) pp. 345-350.
- (11) Sugihara, K., Inasaki, I. and Yonetsu, S., Stability Limit of Regenerative Chatter in Cylindrical Plunge Grinding : A Proposal of the Practical Stability Limit Equation, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.46, No.2(1980) pp.201-206.