超砥粒砥石による薄板の研削変形（第1報）*

[JSPE-54-05
'88-05-947]

——炭素鋼研削の場合——

柴原 秀樹** 松尾 哲夫***

Curvature of Thin Workpiece in Surface Grinding with Superabrasive Wheels(1st Report)
- In Case of Grinding Carbon Steel -

Hideki Shibahara and Tetsuo Matsuo

The curvature of steel thin workpiece in one-pass surface grinding has been studied, using WA, CBN, and diamond wheels. The grinding experiments were conducted about annealed and hardened S50C steels, whose size was 1.5 mm thickness and 100 mm length, at depths of cut to 30 μm . Grinding force, as well as residual stress, was measured to interpret the results of curvature. A SEM micrographic study of grinding affected zone was performed. Thus, the difference in curvature or affected layer for the WA, CBN, and diamond wheels was evident. The superabrasive wheels especially diamond wheel, tend to cause a convex curvature, and a major reason for the inclination to convex curvature is considered a plastically deformed layer.

Key words: surface grinding, superabrasive wheels, steel thin plate, curvature, grinding force, residual stress, affected layer

1. 結 言

薄い板状の工作物の研削加工においては、研削熱や表面層の塑性変形等の影響により、工作物に反りが発生し、その抑制が加工現場における重要な問題となっている。一般に、薄鋼板をアルミナ系や炭化けい素系の普通砥石で研削すると、表面には引張残留応力が発生し、板は凹状にすることが多くの研究から知られている¹⁾²⁾。しかし、最近普及の目ざましいCBN砥石やダイヤモンド砥石等の超砥粒砥石により薄板を研削した時の反りについてはほとんど研究が行われていない。ただし、研削後の残留応力に関する Brinksmeier³⁾⁴⁾やMalkin⁵⁾らの最近の研究によると、超砥粒砥石で鋼片を研削した場合引張残留応力はWA砥石に比較して小さいか、あるいは圧縮応力になることが明らかにされている。一方、筆者ら⁶⁾もWA砥石よりCBN砥石の方が反りが小さくなるような傾向を確認したが、他の条件での結果や、反りの原因などについてはいまだ明らかではなかった。そこで本研究ではWAおよび超砥粒砥石によってS50Cの薄板（焼きなまし材、焼入れ材）を研削し砥石による反りの違いを実験的に

明かにするとともに、反りと研削抵抗との関係、また研削面近傍の加工変質層の状態や残留応力等との関連につき検討した

2. 実験方法

実験に使用した平面研削盤は福岡本工作機械製（PS G52A型、2.2kW）のものである。研削はすべてワンパス研削とし、その実験条件を表1に示す。反りの測定には図1に示す形状測定装置を使った。測定力はスタイラスの変位1 μm につき29.4 μN と小さく、測定形状に対する影響は無視できる。なお、研削面は研削熱

Table 1 Grinding conditions

Wheel type size	WA100N8V, CBN100N75B, SDC100N75B WA wheel(205 mm dia., 19 mm width)
Workpiece type size	S50C(Annealed, HV=148) S50C(Hardened, HV=643) 1.5 mm thickness, 10 mm width, 100 mm length
Wheel speed	Vs=30 m/s
Work speed	Vw=0.08 and 0.16 m/s
Wheel depth of cut	a=3 to 30 μm
Grinding fluid	Dry Wet(JIS W1-1 (Yushiroken GC) $\times 25$)
Trueing Dressing	CBN, SDC wheels:Braking controlled trueing WA wheel:Single point diamond dresser CBN, SDC wheels:White alumina stone

* 原稿受付 昭和62年 7月 1日。昭和61年度精密工学会
秋季大会学術講演会（昭和61年10月10日）にて発表

** 正会員 西日本工業大学（京都郡刈田町1633）

*** 正会員 熊本大学工学部（熊本市黒髪町2-39-1）

Fig.1 Method for measuring curvature

による影響が含まれてくることが考えられるため、形状測定は工作物裏面に対して行った。予備実験の結果、研削前後の形状の差は、研削前の工作物形状にかかわらずば円弧状となることが分かったので⁷⁾、板の中央での変位量 δ (Depth of curvature)をもって反り量と定義した。研削面が $\cap$ 状となる方向への変形量を $(+)$ とする。

また、2方向の研削抵抗をキスラー社の 9257A 型圧電式測定器で測定するとともに、残留応力を溶去法 (deflection method)によって求めた。すなわち、電解研磨によって表面層を除去し、曲率の変化から式(1)により深さ a での残留応力 $\sigma(a)$ を算出した⁸⁾。

$$\sigma(a) = \frac{E}{6} \left\{ (h-a)^2 \frac{d\phi}{da} - 4(h-a)\phi + 2 \int_0^a \phi(x) dx \right\} \quad (1)$$

ここで h : 電解研磨前の板厚, $\phi(x)$: 深さ x 除去したときの曲率の変化, E : 縦弾性係数である。更に研削面下の金属組織変化を調べるためにSEM観察を行った。ここでは(後述の図11参照)2枚の工作物を密着した状態で研削し、研削後に再び分割して側面から観察を行った。なお、分割面内側には塑性流動の様子を観察しやすくするために、あらかじめ研削方向に対して直角方向に研削条痕がつけられている。

3. 実験結果および考察

3.1 工作物の反り

図2, 3に工作物速度, 研削液, および砥石を変えて炭素鋼の焼きなまし材および焼入れ材を研削した場合の砥石切込みと反りの関係を示す。一般に切込みの増大につれて $(+)$ 方向の反り($\cap$ 状の変形)が大きくなることが分かる。また、砥石による相違を比べてみると、 $(+)$ 方向への最大の反りがWA砥石による研削で生じ、次にCBN砥石、そしてダイヤモンド砥石で最小の反りが生じる傾向が見られる。このような反りにおける砥石間の相対的な序列は研削液の有無、工作物速度、熱処理の相違に影響されない。次に、研削液の効果はWA砥石では $(+)$ 方向の反りを小さくするように作

Fig.2 Relationship between wheel depth of cut and curvature

Fig.3 Relationship between wheel depth of cut and curvature

用し、一方、CBN砥石やダイヤモンド砥石では $(-)$ 方向の反りがいっそう大きくなる。研削液により、全体

的に(-)方向に反りが移るのは研削液の冷却効果によって工作物表面の温度が低くなるためと考えられる。この点については3.4節にて議論する。また、工作物速度が速くなると(+)方向に変形しやすくなって行くことが分かる。次に、焼入れ材の場合は、砥石の相違、研削液の有無、工作物速度等の影響に関しては焼きなまし材の場合（図2 (a),(b)）と同じような傾向が得られており、材料の焼入れの有無による違いはなかった。しかし焼入れ材では(+)方向の反りは小さく、反りの方向が全体的に(-)方向に生じやすい傾向がある。これは焼きなまし材と焼入れ材の熱処理の相違が影響しているためと考えられる。そこで、研削前の焼きなまし材と焼入れ材の片面を電解研磨により除去して反りを調べた。その結果、焼きなまし材では残留応力が除去されているのでほとんど変形しないのに対し、焼入れ材では焼入れの過程で表面に引張り、内部に圧縮の残留応力が発生しているため、片面除去に伴う応力解放により(-)方向への変形が生じやすいことが分かった。

3.2 研削抵抗

図4、5に焼きなまし材および焼入れ材を研削した時の接線および法線研削抵抗の測定結果を示す。接線研削抵抗は研削点での全発生熱量と関連があるので、その値の大小は(+)方向の反りと直接的な関係があると思われるが、本実験の範囲内では必ずしもそのようにはならなかった。つまり、焼きなまし材の研削では、ダイヤモンド砥石による研削で接線研削抵抗も小さく、反りも小さくなったが、CBN砥石の場合はWA砥石に比較して接線研削抵抗が高いにもかかわらず、反りは小さくなっている。また、焼入れ材の場合はWA砥石の接線研削抵抗が最小であるが(+)方向の変形は最も大きい。これらの事実は反りの原因である残留応力が熱的な影響と機械的な影響を受けることを示唆している。

次に、砥石による相違を見ると、湿式研削では、CBN砥石、ダイヤモンド砥石がWA砥石より高い傾向がある。また、乾式研削では、焼入れ材の研削において上記と同じ序列であったが、焼きなまし材の場合はダイヤモンド砥石で最小の値となった。次に、工作物の硬さと研削抵抗の関係を見る。接線研削抵抗に関しては、WA砥石とCBN砥石では、焼入れ材を研削した時に抵抗が低くなり、また、ダイヤモンド砥石では逆に幾分高くなる傾向がある。法線研削抵抗に関しては、普通砥石と超砥粒砥石によって異なった傾向が見られた。すなわち、WA砥石では工作物の硬さの影響がほとんど見られなかったのに対し、超砥粒砥石においては焼入れ材の研削時に高い法線研削抵抗が作用し

Fig.4 Relationship between wheel depth of cut and grinding force

Fig.5 Relationship between wheel depth of cut and grinding force

ている。そして、この傾向は湿式研削時に顕著である。この理由は、超砥粒砥石では砥粒の硬度がアルミナ砥粒より高いために破碎を生じにくく、さらに研削液の

Fig.6 Relationship between wheel depth of cut and force ratio

冷却効果により工作物の軟化が抑制され、砥粒が工作物に食い込むのに大きな力が必要になるためと考えられる。法線研削抵抗は工作物の硬さが硬いほど高くなるという報告は多く⁹⁾¹⁰⁾、本実験の結果と一致する。しかし、接線研削抵抗に関しては、工作物の硬さの増加につれて高くなるという報告⁹⁾や、逆に低くなるという報告¹⁰⁾、また工作物硬さによる影響を受けないという報告¹¹⁾もあり、加工条件により異なるようである。

図6に砥石切込みと研削抵抗比 (F_n'/F_t') との関係を示す。乾式研削では、ダイヤモンド砥石の場合、他の砥石に比べ高い値となっている。また湿式研削では砥石種類に関係なく、乾式研削の場合より高くなっている。さらに、砥石による違いを見るとWA砥石に比べCBN砥石やダイヤモンド砥石において高い。これらのことから、湿式研削では研削抵抗の合力の方向が研削面を押し付ける方向であること、また、その傾向は普通砥石より超砥粒砥石の方が強くなることが分かる。このことが工作物表面層の形成に影響し、その結果、反りの性質が異なってくると思われる。

3.3 研削抵抗と反りの関係

紙面の都合で図は省略するが、研削抵抗と反りの関係は、砥石切込みと反りの関係 (図2, 3) と同様になった。すなわち、研削抵抗の増加とともに(+)方向の反りが発生し、同一の研削抵抗に対してはWA砥石が最も(+)方向に反りやすく、CBN砥石、ダイヤモンド砥石の順に反りが小さくなる。

次に、図7に研削抵抗比と反りの関係を示す。図より砥石種類、研削液、工作物速度にかかわらず、両者の関係はほぼ1本の曲線で示されることがわかる。また、図は省略したが、工作物が焼入れ材の場合や、工作物速度が0.16m/sの時にも同様の結果が得られた。すなわち研削抵抗比が2~3の値を境にして、それ以

Fig.7 Relationship between force ratio and curvature

下では(+)方向の反りが発生し、それ以上のところでは(-)方向の反りが生じている。江田ら¹²⁾は有限要素法により研削加工層の残留応力と研削抵抗の関係をシミュレーション解析しているが、その中で、研削抵抗比が高くなるにつれて圧縮残留応力が生じやすく、この比の値が約2.4より小さくなると引張残留応力が発生しやすくなる結果を得ている。この値は本実験で得られた値(2~3)とよく一致している。また、研削抵抗比と残留応力に関連して実験的に求めた研究もあるたとえば、岡村ら¹³⁾によると、研削抵抗比は研削時の上すべりや掘り起こしと関係があり、すべり領域において研削抵抗比の値は大きくなると報告している。さらに、横川ら¹⁴⁾によると、すべり領域で圧縮残留応力が高くなる結果を得ている。これら二つの実験的報告より研削抵抗比が大きいとすべり領域となり研削面には圧縮残留応力が発生しやすくなると解釈され、このことは本実験で得られた傾向とよく一致する。

3.4 研削による発生熱量と反り

工作物の(+)方向の反り(凹状の反り)は研削熱が多い程大きいことが知られている¹⁵⁾¹⁶⁾。そこで、単位時間、単位接触弧面積当たりの全発熱量 q (式(2)) と反りとの関係を調べた。

$$q = \frac{F_t \cdot V_s}{\ell} \quad (2)$$

ここで、 F_t : 単位幅当たり接線研削抵抗、 V_s : 砥石周速度、 ℓ : 接触弧長さである。

図8にその結果を示す。予想されるとおり、 q の増加とともに(+)方向の反りが増大している。しかし、同一の q の値に対してはWA砥石が最大の反りを生じ、CBN砥石がこれに次ぎ、そしてダイヤモンド砥石で最小となっている。反りの値がこのように砥石により異なるのは、同一の q の値でも、砥石の種類により工作物表面の温度や塑性流動の様子が異なっているため

Fig.8 Relationship between energy flux and curvature

Fig.9 Relationship between energy flux and flatness

と考えられる。さて、斉藤ら¹⁷⁾によると工作物の中凹量 (Flatness) は工作物表面温度に強く影響されることが知られている。そこで、板厚4.0mmの工作物を研削し q と中凹量の関係を求めた。測定結果を図9に示す。図よりWA砥石より超砥粒砥石の方が中凹量が小さいことが分かる。これは超砥粒砥石による研削の方が工作物表面温度が低いためと考えられ、この傾向は研究結果¹⁸⁾¹⁹⁾とも一致している。なお、後述するように超砥粒砥石では研削加工層に塑性流動が生じ、(-)方向に反りを発生しやすいことが分かっている。従って図8におけるWA砥石と超砥粒砥石との δ の差はこの効果が重畳された結果と思われる。

3.5 残留応力

図10は焼きなまし材を研削した場合の残留応力測定結果である。砥石種類により残留応力分布が著しく異なっていることが分かる。すなわち、WA砥石では表面に引張残留応力を生じているのに対してCBN砥石とダイヤモンド砥石では圧縮残留応力が生じている。なお、これらの結果は、Brinksmeierら³⁾やJohnsonら

Fig.10 Residual stress resulting from three wheel types

の¹⁸⁾の研究とよく一致する。上述のように、WA砥石では(+)方向の反りが生じやすく、超砥粒砥石においては(-)方向の反りが発生する傾向が強い一つの原因はこのような残留応力分布によるものと考えられる。

3.6 研削加工層の観察

砥石種類により工作物の反りの性質や絶対値が異なる一つの理由は、研削加工変質層が砥石により異なるためと考えられる。そこで、研削面直下の材料の変形状態を側面からSEM走査電顕により観察した結果を図11に示す。図より明らかなように、CBN砥石やダイヤモンド砥石による研削の場合には研削面直下に大きな塑性流動領域の存在が認められる。これに対し、WA砥石の場合には、そのような塑性流動の形跡はほとんど観察されず、むしろ研削熱により局部的に熱損傷を受けていることがうかがわれる。CBN砥石やダイヤモンド砥石の場合に現れるこのような独特な塑性変形は砥粒による一種のバニシ作用によると理解される。なお、この塑性流動領域の深さはCBN砥石に比べダイヤモンド砥石においてより深いことが明らかである。以上のことがCBN砥石やダイヤモンド砥石における大きな圧縮残留応力に関係し、結局(-)方向の反りが発生しやすい結果になったことが確かである。一方、WA砥石では研削熱による影響を強く受けていることから表面に引張残留応力が生じ、(+)方向の反りになりやすいことが分かる。

4. 結 言

S50Cの薄板を普通砥石および超砥粒砥石によりワンパス研削し、反りに対する加工条件の影響を調べるとともに、研削抵抗の測定や研削加工変質層の観察を行った。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 焼きなまし材の研削における工作物の反りはW

S50C (Annealed), $V_s=30\text{m/s}$, $V_w=0.08\text{m/s}$, $a=30\mu\text{m}$, Wet
Fig.11 SEM-observation of grinding affected layer

A砥石の場合最も凹状になりやすく、反対にダイヤモンド砥石の場合は凸状になりやすい。CBN砥石ではその中間的な反りが発生する。焼入れ材の場合も各砥石による反りの相対的な序列は変わらないが、反りの方向は全体的に凸状になりやすい。

- (2) 砥石の種類に関係なく、砥石切込み、工作物速度の増加により凹の方向に反りやすく、また、湿式研削にすると全体的に凸方向に反りやすい。
- (3) 一般に、単位時間、単位接触弧面積当たりの発生熱量の増加につれて、大きな凹状の反りが発生しやすくなり、同一の発生熱量に対してはWA砥石に比べCBN砥石やダイヤモンド砥石で著しく反りが小さい。この理由として、超砥粒砥石においては工作物表面温度が低いことと塑性変形層の効果が重畳されることが考えられる。
- (4) 砥石や研削条件に関係なく、研削抵抗比と反りの間には一定の関係があり、同比の値が小さいと凹状に反り、大きくなると凸状の反りが発生する。
- (5) WA砥石は引張残留応力を、また、CBN砥石とダイヤモンド砥石は圧縮残留応力を誘起しやすい。これはWA砥石では研削面近傍に熱の影響が主として現れるのに対して、超砥粒砥石では塑性変形層の効果が大きく影響するためである。

本研究の遂行にあたり、砥石を御提供頂きましたノリタケダイヤ輪河端則次部長および工作物の熱処理で御協力頂きました日立金属輪末永充氏に感謝いたします。また、実験の一部で御協力頂いた熊本大学工学部大淵慶史氏に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) G.W.I., USA: Grinding Stress-Collected Papers, (1960) 1
- 2) H.R. Letner: Residual Grinding Stresses in Hardened Steel, Trans. ASME, 77, (1955) 1089.
- 3) E. Brinksmeier et al.: Residual Stress Measurement and Causes in Machining Processes, Ann. CIRP, 31, (1982) 491.
- 4) E. Brinksmeier: X-Ray Stress Measurement A Tool for the Study and Layout of Machining Process, Ann. CIRP, 34, (1985) 485.
- 5) S. Malkin: Current Trends in CBN Grinding Technology, Ann. CIRP, 34, (1985) 557.
- 6) T. Matsuo and H. Shibahara: Effect of Grinding Parameters on Distortion of Surface Ground Steel Strips, SME Tech. Paper, MR84-536, (1984).
- 7) 柴原秀樹, 松尾哲夫: 超砥粒砥石による薄板の研削変形, 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 第1分冊(1986) 13.
- 8) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1979) 165.
- 9) D.P. Saini and J.G. Wager: Local Contact Deflections and Forces in Grinding, Ann. CIRP, 34, 1, (1985) 281.
- 10) K. Nakayama, J. Takagi and T. Nakano: Peculiarity in the Grinding of Hardened Steel, Ann. CIRP, 23, 1, (1974) 89.
- 11) E.R. Marshall and M.C. Shaw: Forces in Dry Surface Grinding, Trans. ASME, 74, (1952) 51.
- 12) 江田 弘, 實志浩三, 大久保昌典: 有限要素法による研削加工層の残留応力のシミュレーション解析, 精密機械, 45, 11 (1979) 1347.
- 13) 岡村健二郎, 中島利勝, 平 邦昭, 藤原煌三: 砥粒切れ刃による切削現象の研究, 精密機械, 33, 3 (1967) 161.
- 14) 横川宗彦, 横川和彦: 研削表面特性から解明した BORAZON CBNホイールの最適研削条件, 精密機械, 1, 8 (1985) 1575.
- 15) G.A. Johnson: Beneficial Compressive Residual Stress Resulting from CBN Grinding, SME 2nd Int. Grinding Conf., (1986).
- 16) R. Snoeys et al.: Thermally Induced Damages in Grinding, Ann. CIRP, 27, (1978) 571.
- 17) 斉藤義夫ほか: 平面研削加工の精度に及ぼす熱変形の影響, 精密機械, 50, 4 (1984) 679.
- 18) T. Matsuo et al.: Surface Quality in Grinding of Carbon and Stainless Steels with Superabrasive Wheels, Proc. 6th ICPE, Osaka, (1987).
- 19) 江田 弘, 實志浩三: ダイヤモンドとCBN砥石の研削加工原論, 機械と工具, 10 (1982) 21.