研究

砥粒による工作物の除去機構*

長谷川 嘉雄** 奥山 繁樹** 河村 末久***

Mechanism of Workpiece Removal by
Abrasive GrainYoshio HASEGAWA, Sigeki OKUYAMA
and Suehisa KAWAMURA

In order to explain the mechanism of grinding, it is necessary to clarify the mechanism of workpiece removal by the grain. Therefore this report treats experimentally the sliding depth (the critical interference depth between cutting edges and workpiece under elastic rubbing), the metal removal ratio and a profile of cutting edges corresponding to the wear of grinding wheel. The main results obtained are as follows: (1) In grinding the hardened steel with vitrified bonded alumina wheel in the steady grinding state, the workpiece

removal is almost due to cutting, and the sliding depth is about $0.2\ \mu\text{m}$. (2) Right after dressing, the sliding depth reaches to $0.4\text{--}0.7\ \mu\text{m}$. When the grinding burn occurs, the sliding depth is about the same value. (3) The dispersion of cutting edges in the direction of the wheel axis increases with the wear of the wheel, but the heights of successive cutting edges approach to the same level gradually. (4) The time when the grinding burn occurs coincides with the time when all the successive cutting edges become almost the same level of height over the wheel circumference.

Key words: grinding mechanism, sliding depth, elastic rubbing, metal removal ratio, grinding burn, successive cutting edges.

1. 緒 論

砥粒切れ刃による工作物の除去機構を明らかにすることは研削機構を解明するうえで極めて重要である。そこで本研究では大きな負のすくい角と摩耗平坦面を持つ砥粒切れ刃による切削の可能性、弾性限界点における切れ刃の切込み深さ¹⁾ (以下弾性上すべり深さと呼ぶ) および砥石の摩耗に応ずる除去機構の変化に着目し、これらを実験的に解明しようとするものである。

まず砥粒切れ刃による切削の可能性については中山ら²⁾によって模型切削実験が行われ、大きな負のすくい角を持つバイトや単粒による高速切削では、焼入れ鋼はほとんど両側に盛り上がることなく切削されることが明らかにされている。しかし通常の研削作業における砥粒の平均除去深さは $0.1\text{--}1\ \mu\text{m}$ のオーダーであるのに対し、切れ刃先端が必ずしも鋭利だとは考えられないことから、工作物の一部はバニシ作用を受けて工作物内部に押し込まれることも考えられる。そこで本研究では各種摩耗状態の砥石を用いて研削実験を行い、工作物除去の様子を調べることにする。次に弾性上すべり深さ t_e については岡村ら¹⁾によって単粒による模型切削実験が行わ

れ、通常の研削条件に対応する実験条件で t_e は $5\ \mu\text{m}$ 程度となり、切れ刃の切込み角によらないと報告されている。このように t_e が通常の研削条件における除去深さと同程度の値とすると、寸法の創成過程、砥石と工作物の干渉状態などに重大な影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では実際の研削時における砥石の局所的な弾性変位に伴う上すべり深さを測定する。また砥石の摩耗に応じた除去機構の変化については砥石作業面のプロフィールの変化を実際に研削に関係する領域に注目して追究する。

2. 実験の方法と条件

外周に幅約 $2\ \text{mm}$ 、深さ約 $0.2\ \text{mm}$ のみぞを半周ずつ交互につけた研削砥石を用いて、あらかじめ鏡面にラップ加工した工作物をワンパス研削すると、工作物上には図1のような千鳥模様の切残しが形成される。この仕面上を触針式粗さ計で直線Aに沿って走査することにより、切れ刃と工作物の干渉開始点付近 (以下切り始めと呼ぶ) のスクラッチ形状が測定され、直線Bに沿って走査すれば切れ刃と工作物との干渉終了点付近 (以下切り終わりと呼ぶ) のスクラッチ形状が測定される。また得られたプロフィールから除去深さ t を求めることができる。

こうして得られたスクラッチの断面形状から、切れ刃が工作物を切削しているのか、掘り起こしているのかを

* 原稿受付 昭和54年8月13日。精機学会昭和54年度関西地方定期学術講演会 (昭和54年7月13日) にて発表。

** 正会員 大阪大学工学部 (吹田市字山田上)

*** 正会員 防衛大学校 (横須賀市走水1-10-20)

図1 制限作業面砥石による切残し形状

図2 スクラッチのプロファイル

判定するために、次のような切除比の概念を導入する。森ら⁽⁹⁾によれば切除比 η_s とは、砥粒によって実際に切除された面積の理想切除面積に対する比で定義され、 $\eta_s=1$ が完全な切削、 $\eta_s=0$ が除去を全く伴わない掘り起こし（塑性上すべり）を示している。しかし測定されたプロファイル（図2）は触針の先端半径やスクラッチ両側に生ずるバリなどによる誤差を含んでいるために、 η_s を正確に決定することは困難である。そこで図2(a)の場合には切除部分と盛上がり部分の高さと幅の比を一定と仮定し、次式によって η_s を求める。

$$\eta_s = 1 - \frac{h_{s1}^2 + h_{s2}^2}{h_g^2} \quad (1)$$

図2(c)のようなプロファイルも一部に見られたが、これは触針先端半径（5 μm ）がスクラッチの曲率半径より大きい結果生じたものと考えられ、式(1)によれば $\eta_s < 0$ となるため、このような場合には $\eta_s=0$ とみなすとともに、図2(b)の場合には盛上がり部分と切除部分の面積を各々求めて η_s の値を決定した。

次に、砥粒の局所的な弾性変位に伴う上すべり深さ t_e は鏡面仕上した工作物表面に、あらかじめ炭素を約 300 $\text{\AA}$ の厚さに蒸着して、これを前述の砥石でワンパス研削し、仕上面に生じた切残しと炭素被膜の破壊形状をもとに測定する。

図3(a)は設定切込み $f \neq 0$ でワンパス研削したときのスクラッチを示したもので、スクラッチはA点まで続いているように見えるが、蒸着被膜をふき取ると図3(b)となり、スクラッチはB点までで、距離ABは砥粒

図3 弾性上すべり深さの測定方法

表1 実験条件

項目	条件
砥石	WA 36~80 KmV WA 46 H~PmV
工作物	S 45 C (850°C 水焼入れ) S 45 C (900°C 焼きなまし) 工業用純鉄
砥石周速度	1 800~1 860 m/min
テーブル速度	14 m/min
除去深さ	10 μm
研削方式	乾式・上向き・ワンパス
ドレッシング	切込み 5 $\mu\text{m} \times 2$ 回 縦送り 100 mm/min

の見掛けの弾性上すべり長さ x_e' (図3(c)) に相当する。

図3(c)は砥粒の弾性上すべり状態をモデル化したもので、図の幾何学的関係から t_e は次式で表される。

$$t_e \doteq x_e' \sqrt{\frac{2t}{R_g}} - t_0 \quad (2)$$

本実験では局部的に断続研削を行うが、研削中の砥石作業面積が変化しないために、砥石軸のレベルは工作物に対し一定で、砥粒と工作物の局所的な弾性変位に基づく弾性上すべり深さを求めることができる。

実験条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 切除比

図4は切り始め付近の仕上面プロファイルを示したもので、a~cは微小移動装置で走査位置を 50 μm または 100 μm 研削方向に移動して得られたものである。図4(a)は定常研削状態（ドレッシング直後における砥石の初期摩耗終了後から研削焼けが発生する前までの研削状態。

図4 切り始めにおけるスクラッチのプロフィール

図の場合摩耗平坦面積率 $\eta \approx 1\%$)でのプロフィールで、一般にスクラッチ両側への盛上がりが少ない。ところが同一条件で研削しても純鉄を研削した場合(図4(b))には盛上がりが多くなる。図4(c)はドレッシング直後の切れ刃で研削したもので、一般にドレッシング直後の切れ刃は鋭利と考えられているが、図からは盛上がりが多く見られ、工作物除去の能率が良いとは思われない。

ところで切れ刃先端に丸み半径 r を有するバイトで黄銅を2次元切削した津枝ら⁴⁾の報告によると、切れ刃先端から深さ t_0 ($t_0 = 2r/3$) まではバニシ作用によって切りくずを排出しないとされている。ところが図4(a)によれば、深さ $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度のスクラッチでもほとんど盛上りを伴っていないことから、定常研削状態における切れ刃は極めて鋭利であることが予想される。以上は研削による工作物除去の機構を2次元切削として考察したものであるが、実際の研削は3次元切削のあらゆる場合を含んでいる。ここで問題となるのはすくい面の傾斜面⁵⁾で、その値は有効すくい角に影響するとともに、 i が大きい場合には工作物にくさびを押込む形となり、切りくずを排出しない。これはドレッシング直後における除去能率の悪さ(図4(c))の原因と考えられる。しかし切れ刃の摩耗に伴い、切れ刃形状は多角すい台の集合体とみなせるようになるため、くさび形の切れ刃が減少し、切りくずがすくい面前方に排出されやすくなるものと思われる。

図5は全研削幅で焼けが発生した状態($\eta = 5.4\%$)における切り始め、切り終わり付近の多重干渉写真(リファレンスミラー反射率40%, 干渉フィルタ($\lambda = 5460 \text{ \AA}$))を示したもので、平行な干渉しまより上方に突出した部分が盛上りを示している。切り始め付近では盛上がり

図5 研削焼け発生時のスクラッチ形状

があまり見られないのに対し、切り終わり付近では多量の盛上がりが見られ、工作物表層の塑性流動が著しいことがわかる。

図6(a)は測定された個々のスクラッチについて、それが初めて現れた付近($h_g < 1.5 \mu\text{m}$)で、かつ切れ刃相互の干渉がないと思われるものを選んで η_s を計算し、砥石の摩耗平坦面積率 η との関係調べたものである。なおドレッシング直後の切れ刃については $\eta = 0$ として表示した。図からドレッシング直後には切り終わり特に η_s が小さいことがわかる。これは焼け発生時と同様、切れ刃前方に向かって工作物の塑性流動が生じている⁶⁾ため、ドレッシング直後の切れ刃は意外に除去能率が悪いことを示している。次に η の増大に伴って切れ刃先端

図6 η , 砥石結合度および工作物熱処理の影響

図7 切り始めにおける弾性上すべり

は次第に摩耗し、定常研削状態では η_s の値はますます減少していくものと考えられるが、実際には切り始め、切り終わりとも、 η_s は80%前後となる。そのうえ塑性上すべり砥粒($\eta_s \approx 0$ のスクラッチ)の割合を調べると10%程度に過ぎないことから、定常研削状態における工作物除去の主体は切削と言える。なお焼け発生時、切り始め付近で η_s が大きい理由については後述する。

図6(b)は η_s と砥石結合度の関係を示したもので、 η_s に対する結合度の影響は少ないと言える。

図6(c)は η_s と工作物熱処理との関係を示したもので、横軸にはビッカース硬度を採った。図から焼きなまし材と冷間圧延材とは、特に切り始めの η_s に大きな差が生じていることがわかる。

上向き研削の場合、切れ刃が切込まれる領域は熱応力が最も大きく、かつ加工硬化が最も著しいことから、実際の研削における切り始めの η_s は図6の値よりさらに大きいと思われる。

3.2 弾性上すべり深さ

図7はドレッシング直後と定常研削状態($\eta \approx 1\%$)における切り始め付近のスクラッチで、上段が研削直後、下段が蒸着した炭素被膜をふき取った後のものである。上段の写真で、スクラッチの先端に白く見える部分が弾性上すべり領域に該当している。

図8は切り始めにおける弾性上すべり深さ t_e を100個のスクラッチについて測定した結果で、ドレッシング直後の t_e はばらつきが大きく、その平均値 $\bar{t}_e$ も比較的大きいのに対し、定常研削状態($\eta \approx 1\%$)ではばらつきが少なく、 $\bar{t}_e$ は約 $0.2\mu\text{m}$ に過ぎないことがわかる。したがって t_e の値は寸法精度や寸法の創成機構に重大な影響を及ぼすとは考えられないが、砥石と工作物の接触長さや接触変位あるいは連続切れ刃間隔を考察する場合には無視できない値である。研削焼け発生時には $\bar{t}_e$ は再び増大して約 $0.6\mu\text{m}$ に達する。これは研削焼けを発生する状態まで摩耗した切れ刃がいかに工作物に切込まれにくいを示すものである。なお切り終わりにおける t_e を測定した結果、図8と同様の傾向が見られた。

ところで熱電インパルス法⁸⁾によって $t \approx 6\mu\text{m}$ 、砥石

図8 切り始めにおける弾性上すべり深さ

図9 弾性上すべり深さと砥石結合度、粒度の関係

周速度 $V=3060$ cm/s, テーブル速度 $v=23$ cm/s, $\eta \approx 6\%$ における連続切れ刃間隔 μ を測定したところ、その値は約 2 mm であった。したがって図3(c)のモデルで工作物がB点からA点まで移動する間にB点上を通過する切れ刃数 m はほぼ4個 ($m = Vt_{cl}/R\phi/2t/\mu v = 30600 \times 0.00063/95/2 \times 0.006/2 \times 230$) となる。このように研削焼け発生時には多数の切れ刃が工作物表面をこすり取ることによってB点の除去が行われているため、切り始めでは η が大きくなり、逆に切り終わりでは工作物表層の塑性流動によって η が小さくなる(図6(a))ものと考えられる。

図9は t_e と砥石結合度および砥石粒度との関係を示したもので、結合度や粒度の増大に応じて t_e がやや減少しているのが認められる。

以上の結果、S45Cの焼入れ材を研削した場合、切除比や弾性上すべり深さは砥石の摩耗状態に影響されることが明らかになった。そこで次に砥石の摩耗に応じて切れ刃の形状がどのように変化するかについて調べることにする。

図10 砥石切れ刃形状の転写方法

にする。

3.3 砥石の摩耗による切れ刃形状の変化

通常の研削作業における砥粒切れ刃の平均除去深さは $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ のオーダーであるため、砥粒切れ刃の形状を調べる場合にも、その領域に着目することが必要である。そこで切れ刃先端の形状を転写し、砥石の摩耗に伴う変化を調べることにする。

図10は切れ刃形状の転写方法を示したもので、停止した砥石を焼結グラファイトに押付け、A点を中心に外周 ± 5 mm の範囲で砥石を微小回転させ、計 10 mm の範囲の切れ刃形状を転写すると、グラファイト上には砥石円周 10 mm 内の最外周切れ刃投影形状が転写されることになる。同様にA点と 15 mm 離れたB点についても転写するとともに、テーブルを停止した状態でプランジ研削を行って極限粗さ⁹⁾を転写し、転写面の砥石軸方向の粗さを触針式粗さ計(触針半径約 $40 \mu\text{m}$, 測定力約 0.2 g)で測定した。図11はその一例を示したもので、プロフィールから上の部分が砥石側である。まず砥石の摩耗に応じた転写形状Aの変化に注目すると、ドレッシング直後の切れ刃先端は比較的よくそろっているのに対し、定常研削状態では急に不ぞろいとなることから切れ刃先端は急激に破碎、脱落していることがわかる。次に

図11 切れ刃の転写形状

図12 切れ刃転写形状の粗さ

研削焼けが発生し始めると、転写形状の粗さはますます増大するが、研削焼けが発生した領域から局部的になめらかなうねりとなり、その領域だけ摩耗の著しくなることがわかる。次に転写形状 A と B の関係に注目すると、ドレッシング直後にはほとんど無関係に見える転写形状が、定常研削状態になると明らかに類似した形状になるのがわかる。これは砥石円周方向の切れ刃先端が砥石の摩耗に応じて急速に同一レベルにそろおうとしていることを示すもので、連続切れ刃間隔の予測や粗さの生成機構を考えるうえで見逃せない事実である。次に焼けが発生し始めると(c)のように転写形状 A と B がほとんど等しくなるとともに、研削焼けが発生した領域については、極限粗さの転写形状とも等しくなる。このことは研削焼けが発生した領域では、円周方向の切れ刃先端が全周にわたって同一レベルに並んでいることを示していると言える。

図12は転写形状の粗さ $R_{\max}$ と砥石半径減耗量 ΔR との関係を示したもので、図からドレッシング直後、不安定な切れ刃の破碎によって一時的に $R_{\max}$ は小さくなるが、その後急激に増大することがわかる。しかし全域で焼けが発生するようになると極限粗さの転写形状と部分転写形状の $R_{\max}$ が等しくなる。またこのとき摩耗平坦面には極限粗さの転写形状と同一形状のうねりが生じていると言えるが、 $R_{\max}$ は $5 \sim 6 \mu\text{m}$ にも達することがわかる。

4. 結 論

本研究の結果を要約すると次のようになる。

- (1) ドレッシング直後の切れ刃先端レベルは比較的小さくそろっているが、切れ刃が不安定なために弾性上すべり深さは比較的大きい。切れ刃が工作物に食込んだ後も大部分の砥粒は掘り起こしを行うのみで、工作物表層は切れ刃前方に向かって著しく塑性流動する。
- (2) ドレッシング直後の不安定な切れ刃は研削によって破碎、脱落し、一時的に切れ刃先端レベルのばらつきが小さくなるが、その後急激に大きくなる。ただし先行切れ刃と後続切れ刃は次第に同一レベルに近づく。
- (3) 定常研削状態における切れ刃の弾性上すべり深さは $0.2 \mu\text{m}$ 程度で、掘り起こしも少なく、工作物除去の主体は切削と言える。
- (4) 砥石の摩耗によって研削焼けが発生し始める時期と切れ刃先端が砥石全周にわたってほぼ同一レベルになる時期は一致する。
- (5) 研削焼け発生後における切れ刃の弾性上すべり深さは切り始めて約 $0.6 \mu\text{m}$ と比較的大きく、工作物除去の主体は多数の切れ刃と工作物の摩擦に伴う工作物表層の塑性流動によるものと考えられる。
- (6) 鋼を研削した場合の切除比は材料が加工硬化しているほど大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 岡村健二郎ほか: 砥粒切れ刃による切削現象の研究(第4報), 精密機械, **33**, 3 (1967) 161.
- 2) 中山一雄, 高木純一郎, 中野 隆: 焼入鋼の研削特性, 精密機械, **41**, 8 (1975) 838.
- 3) 森 昌幹, 岡本輝雄: 単粒研削における切削溝の形状(第1報), 精密機械, **36**, 10 (1970) 669.
- 4) 津枝正介, 長谷川嘉雄, 中野哲夫: 刃先の微小丸味が切削現象に及ぼす影響(第1報), 日本機械学会論文集, **26**, 166 (1960) 803.
- 5) 白井英治: 切削・研削加工学(下), 共立出版(1971) 19.
- 6) 岡村健二郎, 中島利勝, 山本紀一郎: 砥粒切れ刃による切削現象の研究(第5報), 精密機械, **33**, 4 (1967) 237.
- 7) R. J. Mercier, S. Malkin & J. C. Mollendorf: Thermal Stresses from a Moving Band Source of Heat on the Surface of a Semi-infinite Solid, Trans. ASME, Ser. B, **100**, 2, (1978) 43.
- 8) 奥山繁樹, 河村末久: 研削における干渉領域内の温度分布と局部的熱変形, 精密機械, **45**, 5 (1979) 536.
- 9) 小野浩二: 研削仕上, 横書店(1972) 82.