研削砥石の切れ味に関する研究 (第1報)*

——切れ味の定量的表現——

中 島 利 勝**

Study of Grindactivity of Wheels (1st Report)

——Definition of Grindactivity Coefficient——

Toshikatsu NAKAJIMA

Grindactivity of a wheel should be evaluated on a scale of the grinding outputs such as efficiency, economy, accuracy, quality and so on. From this point of view, the activity of a grinding wheel is analyzed, and grindactivity coefficient is defined to quantify the activity of a grinding wheel and the adaptability of a grinding wheel to various kinds of work materials. Effects of grinding conditions upon the grindactivity coefficient are discussed to point it out that the activity of a grinding wheel is not inherent in the wheel but dependent on operating conditions. With the grindactivity coefficient the activities of different grades of wheels are compared.

1. 緒 言

砥石の研削性能を表現するために現在までに導入された特性値としては、結合度、砥粒切れ刃の支持剛性、砥粒・結合剤・気孔の集合体としての弾性係数などがある。結合度は、結合剤による砥粒支持力の大きさ、すなわち砥粒および結合橋の破壊による砥石摩耗強度を表す尺度であると解釈されており、その測定法は数多く提案されている¹⁾²⁾。砥粒切れ刃の支持剛性は、研削点における切れ刃の変位を決定し³⁾⁴⁾、砥粒切れ刃の実切込み深さ、上すべり長さ、切残し量などに影響を及ぼすこと⁴⁾などから、研削現象と密接な関係を有する特性値であると考えられているが、その測定はかなり困難である⁵⁾⁶⁾。また、砥石構成要素の集合体としての弾性係数は、砥石と被削材との接触部における砥石の巨視的変形を決定する特性値であると考えられ、種々の測定法が提案されているが^{7)~9)}、研削現象との関係については、まだ十分に明らかにされていない。これらの研削砥石の特性値は、いずれも砥石が研削を行っている状態で測定されることは少なく、また被削材を削るという工具本来の目的との関連が薄いか非常に複雑かである。

本研究においては、研削過程が砥粒切れ刃による切りくず生成過程であり、本質的には表面および寸法の生成過程であるという観点から、工具としての砥石がもつ研削性能すなわち切れ味を定量的に表現するための特性値

を導入することによって、研削砥石の切れ味を明確にするとともに、砥粒材質、結合剤質、組成などの異なる砥石の切れ味を比較検討し、また種々の被削材料に対する種々の砥石の適応性を定量的に解明しようとするものである。本報告においては、まず研削砥石の切れ味を分析し、それを定量的に表すために、切れ味係数を定義する。また砥石のもつ研削性能を表す特性値は、砥石に固有の値ではなく、ドレッシング条件をも含めた研削加工条件によって変化するものであると考えられるから、切れ味係数が研削条件によってどのように影響されるかを検討する。また切れ味係数を用いて、結合度が異なる砥石の切れ味を比較する。

2. 切れ味の定義

砥石が良く切れるとか砥石の切れ味が良いとかいう言葉は、しばしば用いられるし、その意味も感じとしては理解されうる。しかしそれらの言葉は場合によって異なった物理量を意味している。例えば、切れ味が良いということは、ある時には研削量が大きいことを意味し、またある時には加工面あらさが小さいということの意味する。そこで、まず砥石の切れ味という抽象的な言葉を物理的に定義づけることを試みてみよう。

いま、研削加工においては、工具条件、被削材条件、相互干渉条件、相対運動条件、システム条件およびふん囲気条件の6つが入力条件であり、その下で研削現象すなわち砥粒切れ刃による切りくず生成現象が起こり、新しい表面が生成されることによって寸法が生成されていくが、その場合、切りくず生成現象に伴って研削力およ

* 原稿受付 昭和49年12月17日。昭和49年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和49年10月22日)にて発表。

** 正 会 員 岡山大学工学部(岡山市津島中3-1-1)

び研削熱が発生することになる。研削現象が起こった結果としてでてくるもの、すなわち研削出力は、一般に研削加工の評価関数としてとりあげられるもので、それには、能率・コスト、精度、品質などがある。これらの研削出力は、入力条件によってはもちろん研削力、研削熱といった研削現象に付随したものによっても影響されるが、研削力および研削熱もまた入力条件によって決定されるものである。このように考えると、砥石の切れ味を定義する場合、研削出力によるのが最も妥当であると考えられる。すなわち、砥石の切れ味とは、能率・コスト、精度、品質などに影響する砥石の特性値であって、それは砥石に固有の値ではなく、ドレッシング条件を含む研削条件によって変化する値であると考えることができよう。さらに具体的に述べれば、砥石の切れ味が良いということとは次のようになる。

- (1) 研削時間を一定にした場合の研削量が多い、あるいは一定量を研削する場合の研削時間が短い (能率・コスト)
- (2) 砥石摩耗が少ない (能率・コスト、精度)
- (3) 切残し量が小さい (精度)
- (4) 研削抵抗が小さい (精度、品質)
- (5) 研削熱の発生が少ない (精度、品質)
- (6) 加工面あらさが小さい (精度、品質)
- (7) 加工表面特性が良い (品質)

従来、砥石の研削能力を表す一つの尺度として用いられてきた研削比は、上に述べた (1) および (2) によって決定される値であり、砥石と被削材との適性、研削条件の良否を判定する一応の目安となるものである。

3. 切れ味係数

研削砥石の切れ味を定量的に表現しようとする場合、上に述べた 7 項目のすべてを含んだ特性値を見いださなければならない。そこで、ここでは、研削におけるかつぎ現象の定量化にあたって導入した研削特性値の一つである寸法生成加速度 $g^{(10)}$ が、研削砥石の切れ味を定量的に表現するための特性値になりうるかどうかを検討する。寸法生成加速度 g は、プランジ研削において、砥石を一定のプランジ速度 v_p で切込む場合に、かつぎ現象¹¹⁾に起因して存在する過渡研削状態での寸法生成速度 $\dot{R}(t)$ を決定する研削特性値であり、それは次式によって定義される¹⁰⁾。

$$g = \frac{v_p'}{t_s - t_e} \quad (1)$$

ここに、 v_p' はプランジ速度 v_p と平均砥石摩耗速度 C_0 との差で与えられる有効プランジ速度、 t_s は過渡研削時

図1 研削量と寸法生成加速度との関係

間、また t_e は砥石と被削材との接触始点から寸法生成開始点までのブランク研削時間¹²⁾。

この寸法生成加速度 g が、研削砥石の切れ味を定量的に表現するための特性値となりうるかどうかを知るために、上に述べた 7 項目と寸法生成加速度 g との関係を検討する。

3.1 研削量または研削時間と g との関係

一定プランジ速度 v_p で砥石を切込むプランジ研削において、研削時間 T を一定とした場合の研削量 R_T は、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$R_T = \frac{g}{2} (T - t_e)^2, \quad (T \leq t_s \text{ の場合}) \quad (2)$$

$$= \frac{v_p'^2}{2g} + v_p' (T - t_s), \quad (T \geq t_s \text{ の場合}) \quad (3)$$

ここに過渡研削時間 t_s は式 (1) より、

$$t_s = t_e + v_p' / g \quad (4)$$

研削時間 T が過渡研削時間 t_s より小さい場合には、研削は過渡状態でのみ進行し、式 (2) よりわかるように、研削量 R_T は g が大きいほど大きくなる。 T が t_s より大きい場合には、研削量は過渡状態での研削量 $R_{in} = v_p'^2 / 2g$ と定常状態での研削量 $R_y = v_p' (T - t_s)$ との和で与えられることになる。この場合、 g が大きいほど R_{in} は小さくなるが R_y が大きくなるために、 R_T は g が大きいほど大きくなる。 g が大きいほど R_y が大きくなるのは、式 (4) よりわかるように、 g の増加とともに t_s が小さくなり、したがって定常研削時間 $t_y = T - t_s$ が大きくなることに起因する。これらの関係を図示すると図1のようである。これらのことより、寸法生成加速度 g が大きいほど単位時間当たりの研削量は増加することがわかる。

一方、一定研削量 R_T を得るために必要な研削時間 T

図5 加工面あらさと研削背分力との関係

図6 残留応力の最大値および侵入深さ

熱量，そのうちから工作物へ流入する熱の割合，工作物表面からの放熱量などによって影響されるが，研削抵抗が小さいほど全発生熱量が小さくなること，研削抵抗が異なっても工作物への熱の流入割合はほぼ一定であることなど，トラバース研削実験より得られた結果¹³⁾より推定して，プランジ研削の場合も，研削抵抗が小さいほど，また研削時間が短いほど，工作物の平均温度上昇は小さくなると考えられる．すでに述べたように，寸法生成加速度が大きいほど研削抵抗は小さく，また単位量研削する場合の研削時間も短くなるから，工作物平均温度上昇は，寸法生成加速度 g が大きいほど，小さくなることが予測される．

3.6 加工面あらさと g との関係

一つのプランジ研削サイクルにおける加工面あらさの変化過程は，そこでの研削背分力の変化過程と酷似しており，過渡状態では研削時間とともにあらくなり，定常状態において一定となり，スパークアウト状態では研削時間とともに減少して一定値に収束する．図5は，定常研削状態における背分力と加工面あらさとの関係を示すものである．この図からわかるように，加工面あらさは研削背分力と密な関係を有し，背分力が大きいほど加工面あらさはあらくなる．このことと g が大きいほど背分力は小さくなることを考え合わせると，加工面あらさは寸法生成加速度 g が大きいほど小さくなることがわかる．

3.7 加工表面特性と g との関係

研削において切りくずを生成するために研削点に供給されるエネルギーは，加工表面部に内部素地とは種々の性質を異にする加工変質層を生成する．このような研削面の性質を表す値すなわち表面特性値としては種々の値が測定されているが，一般に最も重要であると考えられて

いるのは，研削残留応力である．いま，一つのプランジ研削サイクルにおける残留応力の変化過程についてみると，過渡状態においては，表面付近での最大引張残留応力値および残留応力侵入深さは研削時間とともに増加し，定常状態では一定となり，スパークアウト状態においては研削時間とともに減少してある値に収束する¹⁴⁾．一つの研削サイクルにおける残留応力のこのような変化は，そこでの研削背分力の変化と密な関係を有し，また残留応力分布形態も背分力によって変化することが明らかにされている¹⁴⁾．図6は，定常状態における接線方向残留応力の最大値 $(\sigma_l)_{\max}$ および残留応力侵入深さ y_s と研削背分力 P との関係を示すものである．図よりわかるように，残留応力は背分力と密な相関を有しており，背分力が大きいほど残留応力は大きくなる．このことと g が大きいほど背分力は小さくなることから，寸法生成加速度 g が大きいほど研削加工表面特性は良好になると考えられる．

以上に述べたように，寸法生成加速度が大きいことは砥石の切れ味が良いことを示す具体的な7項目のすべてを満足する．したがって，この寸法生成加速度 g でもって，砥石の切れ味を定量的に表現することができると考えられる．しかし，寸法生成加速度 g は，その定義式(1)からわかるように，その測定が比較的困難なプランク研削時間 t_e を含んでいる．このプランク研削時間 t_e は，一般に過渡研削時間 t_s に比べて小さいことを考慮し，また砥石の特性値をできるだけ簡単に測定することができるようにするために，砥石の切れ味を定量的に表現する値として，次式で定義され加速度の単位をもつ，切れ味係数 Ω を導入する．

$$\Omega = \frac{v_f}{t_s} (1 - \mu) \quad (9)$$

図7 切れ味係数と寸法生成加速度との比較

図8 切れ味係数に及ぼすブランジ速度の影響

ここに、砥石摩耗速度係数 $\mu = C_0/v_p$ 。

この研削砥石の切れ味係数 Q は、過渡研削時間 t_s および砥石の平均摩耗速度 C_0 を測定することによって決定することができる。この場合、過渡研削時間 t_s は研削抵抗の変化から容易に測定でき¹¹⁾、また平均摩耗速度 C_0 は、ある時間だけブランジ研削をした後の砥石摩耗量を測定しそれを研削時間で割ることによって決定される。図7は、式(1)によって決定した寸法生成加速度 g と式(9)によって決定した切れ味係数 Q とを比較したものであり、プランク研削時間 t_0 を除いた分だけ g の方が Q より大きくなるが、両者の定性的傾向は変わらず、したがって切れ味係数 Q が大きいほど砥石の切れ味が良いことを意味する。

4. 切れ味係数に及ぼす研削条件の影響

砥石のもつ研削性能は砥石が決まれば固定するものではなく、ドレッシング条件をも含めた研削条件によって変化するものであると考えられる。このことは、切れ味係数を用いて砥石の研削性能を定量的に表現する場合、研削条件を一定にして切れ味係数を決定しなければなら

図9 切れ味係数に及ぼす速度比の影響

図10 切れ味係数に及ぼす研削系剛性の影響

図11 切れ味係数に及ぼすドレッシング条件の影響

ないことを意味している。そこで、以下においては、砥石の切れ味係数 Q が研削条件によってどのように影響されるかを検討する。

図8は、切れ味係数 Q とブランジ速度 v_p との関係を示す。図よりわかるように、切れ味係数 Q は v_p の増加とともに大きくなる。これは、 v_p が大きくなると t_s が短くなること、および v_p が大きくなると C_0 もそれに比例して大きくなり¹⁰⁾、したがって砥石摩耗速度係数 μ は v_p に関して一定となることなどに起因する。

図9、10および11は、切れ味係数 Q に及ぼす速度比 K_v 、研削系の剛性 k_{sy} およびドレッシング条件の影響を

図12 結合度が異なる砥石の切れ味の比較

それぞれ表す。これらの図からわかるように、切れ味係数 Q は速度比が大きいくほど、研削系の剛性が高いほど、また粗いドレッシングを施すほど大きくなる。

切れ味係数 Q は、 t_s と μ との増減関係によって影響されるが、一般には t_s の影響の方が大きくいてくる。このことから判断すれば、切れ味係数は相対研削速度 V によっても影響され、 V が増加すると t_s は著しく減少するから¹¹⁾、切れ味係数は相対研削速度の増加とともに大きくなるものと考えられる。

以上のように、切れ味係数は研削加工条件によって影響されるから、切れ味係数を用いて砥石の研削性能を比較する場合には、切れ味係数を決定するにあたって研削条件を一定に設定する必要がある。

5. 結合度が異なる砥石の切れ味の比較

切れ味係数 Q は、すでに述べたように、砥石のもつ研削性能を定量的に表現するための尺度であり、これは、

(1) 砥粒材質、結合剤質、組成などの異なる砥石の切れ味の比較

(2) 同種の砥石を多量生産する場合の品質管理

(3) 種々の被削材料に対する砥石の適応性の定量化などに用いられうものと考えられる。そこで、(1)の一例として、結合度が異なる砥石の切れ味を比較する。図12は、結合度がH, L, Pと異なる3種の砥石について、切れ味係数 Q と砥石切れ味の良否を判定する値である研削量 R_r 、砥石摩耗速度係数 μ 、定常研削背分力 $P(t_s)$ および切残し量 D との関係を示したものである。この図より、砥石結合度が軟らかいほど切れ味係数 Q は大きく、

したがって、砥石の切れ味が良いということがわかる。

6. 結 論

研削砥石の性能は、その砥石を用いて研削する場合の出力すなわち能率・コスト、精度、品質などによって評価されるべきであり、またそれは、砥粒、結合剤、組成などの異なる砥石の研削性能の比較、砥石を製造する場合の品質管理、種々の被削材料に対する砥石の適応性の定量化などの尺度となるものでなければならない。

このような観点から、砥石の切れ味を分析し、工具としての研削砥石がもつ性能すなわち切れ味を定量的に表現する値として切れ味係数を導入した。また切れ味係数に及ぼす研削条件の影響を検討し、砥石の研削性能は砥石に固有な値ではなく、それは使用条件によって変化するものであることを示した。さらに切れ味係数を用いて結合度が異なる砥石の切れ味を比較した。

参 考 文 献

- 1) 砥粒加工研究会: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社 (1965) 939.
- 2) 海野邦昭, 篠崎 裏: 研削砥石の結合度測定に関する研究 (第2報), 精密機械, **36**, 9 (1970) 608.
- 3) R.S. Hahn: The Effect of Wheel-work Conformity in Precision Grinding, Trans. ASME, **77**, 8, (1955) 1325.
- 4) 岡村健二郎, 中島利勝: 過渡的切削現象の解析を基にした研削理論 (第1報), 精密機械, **36**, 2 (1970) 141.
- 5) J. Peklenik: Neue statische und dynamische Prüfmethode der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Schleifkörpern, Ind. Anz., **28**, 5, (1960) 425 (笠原英志訳, 機械と工具, **6**, 5 (1962) 112).
- 6) K. Okamura and T. Nakajima: Elastic Properties of Grinding Wheel, Mem. Fac. Engg., Kyoto Univ., **XXXI**, Part 4, (1969) 490.
- 7) H. Krug u. G. Honica: Die elastische Verformung bei Schleifwerkzeugen, Werkstattstechnik, **54**, 2, (1964) 53.
- 8) J. Peters, R. Snoeys and A. Decneut: Classifying Grinding Wheels, Univ. Leuven, Heverlee, Belgium, (1968).
- 9) 田中行雄, 矢野章成, 樋口誠宏: 研削砥石の機械的性質に関する研究 (第1報), 精密機械, **37**, 10 (1971) 754.
- 10) 中島利勝: ブランジ研削過程の研究 (第1報), 精密機械, **41**, 11 (1975) 1066.
- 11) 岡村健二郎, 中島利勝: 研削の過渡特性 (第1報), 精密機械, **38**, 7 (1972) 580.
- 12) 中島利勝, 岡村健二郎, 木下輝一: 研削の過渡特性 (第3報), 精密機械, **40**, 3 (1974) 256.
- 13) 小野浩二: 研削仕上, 積書店 (1964) 37.
- 14) 岡村健二郎, 中島利勝, 井上陽一, 宇野義幸: 過渡的切削過程における表面特性の研究 (第2報), 精密機械, **39**, 8 (1973) 794.