研 究

研削砥石の切れ味に関する研究 (第2報)*

—砥石組成と切れ味—

中島利勝** 三好弘二*** 鈴木秀雄† 秋沢英男† 小林博人†

Study of Grindactivity of Wheels (2nd Report)

—Relations between Composition and Grindactivity of Grinding Wheels—

Toshikatsu NAKAJIMA, Kohji MIYOSHI, Hideo SUZUKI, Hideo AKIZAWA, Hiroto KOBAYASHI

The performance of grinding wheel has a direct effect on grinding results and therefore a proper grinding wheel should be selected for better grinding results, based on a clear standard with which the performance of grinding wheel can quantitatively be evaluated. In this paper, the grindactivity coefficient of grinding wheel is introduced as a scientific standard for proper selection of grinding wheels in plunge grinding operation. The grindactivity coefficients are determined for some work materials with various kinds of grinding wheels, in which abrasive material, grain size and shape, structure, bonding material and grade are systematically changed. Then discussed are the relations between the grindactivity coefficient and grinding results such as wheel wear, stock removal, force and so on. It is proved that better grinding results can be obtained with higher grindactivity coefficient of grinding wheel and that the grindactivity coefficient can be a standard for proper selection of grinding wheels in plunge grinding operation.

1. 緒 言

研削工具としての砥石がもつ性能は、能率、コスト、精度、表面特性などの研削結果を直接的に支配する。従って、より良い研削結果を得るためには適正な研削砥石を用いることが不可欠であり、そのためには研削砥石の選択基準が明確でなければならない。研削砥石の選択基準を設定するためには研削砥石のもつ性能を定量的に評価する尺度が必要であり、それは研削過程を詳細に検討することによって得られうるであろう。

このような観点から、まずブランジ研削過程をかつぎ現象¹⁾を考慮に入れて検討し、ブランジ研削過程は砥石摩耗速度、寸法生成加速度、システム剛性、接触剛性および切削剛性の5つの研削特性値によって支配されることを明らかにした²⁾。また前報³⁾においては、研削特性値の一つである寸法生成加速度が研削結果と密接な関係を有することを検討した後、寸法生成加速度より切れ味係数を誘導し、それによって工具としての砥石のもつ研削性能すなわち切れ味は定量的に評価されうることを示した。本報告においては、砥石組成の変化がブランジ研

削過程を支配する研削特性値にどのような影響を及ぼすかを検討し、また切れ味係数を用いて切れ味を比較することによって、砥石組成と研削砥石のもつ性能との間の関係を明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

研削実験は組成が異なる研削砥石を用い、他のすべての研削条件を一定にして円筒ブランジ研削方式で行い、砥石台移動量、工作物半径減少量、砥石摩耗量および研削抵抗を測定することによって研削特性値および切れ味係数を決定し、砥石の研削性能と砥石組成との関係を検討した。研削砥石の組成を変化させるにあたっては、砥粒の材質、粒度、形状(かさ比重)、組織、結合剤質、結合度を表1に示すように変化させた。また表1には同じ組成をもつ試験片(20×30×110 mm)を用いて曲げ試験により決定した曲げ強さ σ_B および弾性係数 E が併示されている。研削抵抗は工作物軸支持センタにはり付けたストレングージによって、砥石台移動量は微小変位計で、また工作物半径減少量は容量型微小変位計でそれぞれ測定した。また砥石摩耗量はプラスチック板に砥石作用面を転写し、それを触針式表面検査機で測定することによって決定した。研削条件は次のようである。

研削方式: 円筒ブランジ研削

工作物: SCM 3 ($H_V=500\pm 20$ kg/mm², 120 ϕ ×30

* 原稿受付 昭和52年12月5日。昭和51年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和51年10月12日)にて発表。

** 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

† 正会員 日本陶器(株)(名古屋市西区則武新町1-1)

表1 実験に供した研削砥石の種類

研 削 砥 石		砥 粒 の 曲 げ 強 さ σ_B かさ比重 (kg/mm ²)	弾性係数 E (kg/mm ²)	
砥粒の種類	A	1.69	4.524	4764
	WA	1.73	4.813	4542
	MA	1.86	4.326	4648
	RA 80 L 9 V	1.75	4.560	4641
	C	1.45	3.623	4454
	GC	1.49	3.558	4677
粒 度	36	1.76	3.076	3582
	WA 80 L 9 V	1.73	4.813	4542
	150	1.61	6.094	5099
形 状 (かさ比重)	LBD	1.53		
	WA 80 L 9 V MBD	1.73		
	HBD	1.88		
組 織	11	1.73		
	9	1.73	4.813	4542
	WA 80 L 7 V	1.73	4.504	4701
	5	1.73	3.952	4241
結 合 剤	V	1.73	4.813	4542
	WA 80 L 9 B	1.73	5.023	1857
結 合 度	H	1.73	3.696	2910
	L	1.73	4.813	4542
	WA 80 P 9 V	1.73	5.308	5417
	T	1.73	5.789	5698

mm) および SUS 304 ($H_V=225 \pm 10$
 kg/mm^2 , $120^\circ \times 30 \text{ mm}$)

砥石周速度: $V_s=2650 \text{ m/min}$

速度比: $K_V=V_w/V_s=0.0133$

半径比: $K_R=R_w/R_s=0.296$

研削系剛性: $k_{sy}=1.080 \text{ kg}/\mu\text{m}$

プランジ速度: $v_p=1.0 \mu\text{m/s}$

研削幅: $B=30 \text{ mm}$

研削液: ソリュブル型研削油

ドレッシング条件: 切込み $20 \mu\text{m} \times$ 送り 0.2
 mm/rev of G. W.

3. 砥石組成と研削特性値

研削砥石の性能がプランジ研削過程に及ぼす影響を明らかにするために、ここではプランジ研削過程を支配する特性値と砥石組成との関係を検討する。図1はプランジ研削過程を模式的に示すものである。図において、点Oは砥石が工作物と接触しはじめる点を、点O_sは工作物半径が減少しはじめる点(寸法生成開始点)を表し、折線ON'G'は砥石台移動量を、折線ONGは砥石台有効移動量を、曲線O_sSF₀F(寸法生成曲線)は工作物半径減少量を、それぞれ表す。時間 t_e , t_s , t_f および τ_i は、ブランク研削時間、過渡研削時間、スパークアウト研削時間および砥石一定速度切込み時間をそれぞれ表す。また、 $d_0(t)$, $d_1(t)$, $d_r(t)$, $d_g(t)$ および $R(t)$ は、砥石摩耗量、研削系の弾性変位量、切残し量、研削系かつぎ量および工作物半径減少量(寸法生成量)をそれぞれ表す。いま、砥石と工作物との接触の初期段階においては実砥石干渉量が小さく切れ刃は工作物と弾性的に接触するのみであるから⁴⁾ 工作物半径は減少しない。しかし砥石は一定速度で進行してくるために累積効果によって実砥石干渉量が研削時間と共に増加し、工作物表面には塑性変形によってみぞが生成されるようになる⁴⁾。この領域においても切削作用は存在しないが、盛上がり部分の破壊などによる二次切りくず生成現象によって工作物半径は非常に小さい速度で減少する。研削時間と共に実砥石干渉量がさらに増加すると、個々の切れ刃が切削作用によって切りくずを生成するようになる⁴⁾、寸法生成速度 $\dot{R}(t)$ は急激に増加しはじめるが、その初期段階においては寸法生成速度がプランジ速度よりも小さいために、ここでも実砥石干渉量は研削時間と共に増加する。実砥石干渉量が工作物1

図1 プランジ研削過程

表2 砥石組成と研削特性値 (被削材 SCM 3)

研 削 砥 石		μ ($\times 10^{-4}$)	g ($10^{-9} \mu\text{m/s}^2$)	k_c ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}/\text{mm}$)	k_r ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}/\text{mm}$)	t_s (s)	t_e (s)
砥粒の種類	A	32	93	2.60	12.1	12.0	1.25
	WA	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	MA	35	102	3.07	12.2	10.9	1.18
	RA 80 L 9 V	34	99	2.72	12.1	11.2	1.11
	C	109	50	3.29	32.6	21.7	1.95
	GC	62	54	3.20	37.3	20.0	1.58
粒 度	36	72	95	2.05	12.9	12.1	1.69
	WA 80 L 9 V	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	150	22	119	2.80	12.2	9.2	0.79
形 状 (かさ比重)	LBD	40	109	2.84	10.4	10.2	1.01
	WA 80 L 9 V MBD	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	HBD	31	99	2.60	12.7	11.2	1.12
組 織	11	44	95	2.54	13.0	11.6	1.08
	9	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	WA 80 L 7 V	31	116	3.77	11.6	9.6	0.98
	5	25	121	4.80	10.0	9.1	0.89
結 合 剤	V	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	WA 80 L 9 B	134	64	2.52	11.8	19.3	3.76
結 合 度	H	56	124	1.41	9.7	9.4	1.39
	L	40	105	2.70	11.8	10.6	1.06
	WA 80 P 9 V	39	78	4.13	7.7	13.7	0.92
	T	44	75	5.20	8.8	14.1	0.85

表3 砥石組成と研削特性値 (被削材 SUS 304)

研 削 砥 石		μ ($\times 10^{-4}$)	g ($10^{-9} \mu\text{m/s}^2$)	k_c ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}/\text{mm}$)	k_r ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}/\text{mm}$)	t_s (s)	t_e (s)
砥粒の種類	A	425	79	1.45	13.6	13.5	1.39
	WA	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
	MA	342	72	1.49	15.5	14.7	1.39
	RA 80 L 9 V	447	94	1.37	13.7	11.5	1.35
	C	76	52	2.05	19.7	20.5	1.50
	GC	37	54	2.05	18.2	19.7	1.43
粒 度	36	1070	65	3.50	13.8	15.1	1.32
	WA 80 L 9 V	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
	150	347	101	1.00	14.4	11.1	1.55
形 状 (かさ比重)	LBD	354	91	1.31	12.3	11.9	1.25
	WA 80 L 9 V MBD	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
	HBD	390	69	1.53	13.5	15.4	1.40
組 織	11	487	93	1.52	14.1	11.6	1.37
	9	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
	WA 80 L 7 V	291	79	1.59	12.1	13.5	1.23
	5	255	73	2.23	11.2	14.6	1.20
結 合 剤	WA 80 L 9 V B	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
結 合 度	H	450	104	1.16	12.6	10.7	1.51
	L	445	85	1.36	14.4	12.6	1.37
	WA 80 P 9 V	426	80	1.53	15.3	13.3	1.36
	T	428	71	1.84	15.4	14.7	1.34

回転当たりの設定砥石切込み量に比べてかなり大きくなって、寸法生成速度がプランジ速度（実際には砥石摩耗が存在するために、プランジ速度と砥石摩耗速度との差すなわち有効プランジ速度）に等しくなると、定常状態となり寸法生成速度は一定となる。この定常状態において砥石の切込みを停止すると、研削系のかつき量によって研削現象が進行するスパークアウト状態となり、工作物半径は減少するが、工作物半径の減少量だけ研削系のかつき量が少なくなるために、工作物半径の減少速度は徐々に小さくなり、それがゼロとなったとき有効スパークアウト研削が完了する。しかしこの時点でも研削系のかつき量はゼロとはならない¹⁾。このようにある量だけ工作物を除去するためには実砥石干渉量がその数倍でなければならぬことに起因して研削系のかつき量が累積されたり解放されたりする過程を研削におけるかつき現象といい、それは研削抵抗とも密接な関係を有する²⁾。すなわち、研削系のかつき量が研削時間と共に累積される過渡状態においては研削抵抗も増加し、定常状態においては研削系のかつき量が一定となるために研削抵抗も一定となる。またスパークアウト状態においては研削系のかつき量が研削時間と共に解放されるために研削抵抗は減少していくが、限界かつき量が存在するために長時間スパークアウトを行っても研削抵抗はゼロとはならない。

このようなプランジ研削過程は、5つの研削特性値すなわち砥石摩耗速度 C_0 、寸法生成加速度 g 、研削システム剛性 k_{sy} 、接触剛性 k_c および切削剛性 k_r によって定量的に表現されうることを、すなわちこれら5つの研削特性値がわかれば、研削抵抗、研削量などは予測されることが明らかになっている²⁾。表2および表3は、被削材 SCM3 および SUS 304 に対する組成が異なる砥石の研削特性値を示す。表において、 μ は砥石摩耗速度とプランジ速度との比で与えられる砥石摩耗速度係数を表す。これらの表よりわかるように、砥石組成または被削材質が異なれば研削特性値は異なり、従ってプランジ研削過程は砥石組成および被削材質によって影響されることになる。

4. 砥石組成と切れ味

4.1 切れ味係数と研削出力との関係

ある被削材材料を研削加工する場合にどのような組成の砥石を用いるかは、その研削過程を最適化するうえで極めて重要である。しかし、最適な研削砥石を選定するためにはその選定基準が明確でなければならない。そこで前報³⁾においては、研削砥石の切れ味の意味を吟味し、プランジ研削過程を定量的に表現するために導入した研

図2 切れ味係数と研削量

削特性値のうちの一つである寸法生成加速度 g が、研削砥石の切れ味を定量的に評価する一つの尺度となりうることを示した。また、 g はその決定が比較的困難であることから、 g と同じ物理的意味を有し、より決定の容易な切れ味係数 Q を導入した。すなわち、

$$Q = \frac{v_p}{t_s} (1 - \mu)$$

ここに t_s は過渡研削時間であり、プランジ速度 v_p の関数である。

切れ味係数 Q が研削砥石の切れ味を定量的に評価する尺度となりうることを検討するために、以下において Q と研削出力との関係を考察する。図2は、組成の異なる砥石を用い被削材 SCM3 および SUS 304 を、砥石台をある時間 $T=30$ s 切込むことによって研削した場合の総研削量 R_r および過渡状態での研削量 R_{in} と Q との関係を示す。図よりわかるように、 Q の大きい砥石を用いる程、ある一定時間研削を行う場合の総研削量は大きくなる。また R_r と Q との関係は、異なる被削材に対して一つの曲線で与えられる。このことは、ある組成の砥石を用いて異なる被削材を削る場合 Q は被削材によって異なるが、 Q の等しい砥石を用いればどのような被削材を研削しても、ある一定研削時間における研削量は等しくなることを意味しているのではないかと考えられる。図3は、砥石台を一定速度で切込むことによってある一定量 $R_r=10 \mu\text{m}$ を研削するに要する時間 T および過渡研削時間 t_s と Q との関係を示す。図よりわかるように、 Q の大きい砥石を用いる程 T は短くなる。また T と Q との関係は異なる被削材に対して一つの曲線で与えられ、従って T は Q によって支配される。図4は、定常状態における研削背分力 $P(t_s)$ 、主分力 $Q(t_s)$ および研削抵抗

図3 切れ味係数と研削時間

図5 切れ味係数と研削系かつぎ量

図4 切れ味係数と研削抵抗

比 $\rho = Q(t_s)/P(t_s)$ と Ω との関係を示す。図よりわかるように、研削抵抗と Ω との関係は異なる被削材に対して一つの曲線と与えられ、 Ω の大きい砥石を用いる程、研削抵抗は小さくなる。このことと、研削抵抗が小さい程研削による発生熱量は小さくなると考えられること、研削背分力と密接な関係を有する加工面粗さは背分力が小さい程小さくなること³⁾ および研削残留応力の最大値、侵入深さなどは背分力と密接な相関を有し背分力が小さい程それらは小さくなる⁶⁾ ことを考えあわせると、 Ω の大きい砥石を用いる程、研削熱の発生は減少し、加工面粗さは小さくなり、研削加工面の特性は良好になると考えられる。図5は、定常状態における研削系かつぎ量 $d_g(t_s)$ と Ω との関係を示す。研削系かつぎ量 d_g は、図

図6 切れ味係数と砥石摩耗

1に示すように、切残し量 d_r と砥石軸および工作物支持系の変位量 d_1 との和で与えられ、砥石台有効移動量 d' と寸法生成量 R との差に相当するから、研削系における総切残し量と考えることができる。図よりわかるように、 $d_g(t_s)$ と Ω との関係は、異なる被削材に対して一つの曲線と与えられ、 Ω の大きい砥石を用いる程研削系かつぎ量は小さくなる。図6は、被削材 SCM3 に対する砥石摩耗速度係数 μ と Ω との関係を示す。図よりわかるように、 Ω の大きい砥石ほど砥石摩耗は小さい。

以上に述べたように、切れ味係数 Ω は能率、精度、表面特性などの研削出力と密接な関係を有し、切れ味係数 Ω の大きい砥石を用いる程良好な研削結果が得られる。従って切れ味係数 Ω は、工具としての研削砥石のもつ性能を定量的に評価するための一つの尺度であり、適正な研削砥石を選択するための基準として利用されうるもの

図7 切れ味係数に及ぼすプランジ速度の影響

図8 切れ味係数に及ぼす研削速度の影響

図9 切れ味係数に及ぼすドレッシング条件の影響

図10 砥石組成と切れ味

であると考えられる。

4.2 研削条件による切れ味係数の変化

研削砥石の有する性能は、その砥石に固有のものでなく、研削条件によって変化するものであると考えられるから、切れ味係数によって砥石の研削性能を定量的に表し、また研削砥石の選択基準となす場合には、一定の研削条件下において切れ味係数を決定しなければならない。図7～図9は、切れ味係数 Q に及ぼすプランジ速度 v_p 、研削速度 V_s およびドレッシング条件の影響を示す。これらの図よりわかるように、プランジ速度、研削速度が大きい程、切れ味係数は大きくなる。ドレッシング条件の影響についてみれば、粗いドレッシングを施す程切れ味係数は大きくなるが、ある程度以上になればドレッシング条件は切れ味係数に影響を及ぼさなくなる。また、速度比 K_v が大きい程、研削システム剛性が高くなる程切れ味係数は大きくなることも明らかになっている³⁾。

4.3 組成が異なる砥石の切れ味の比較

一定の研削条件下で決定された切れ味係数は、すでに述べたように、研削結果と密接な関係を有する値であり、研削砥石の性能を定量的に表現するための尺度として、またプランジ研削における研削砥石の選択基準として利用される。図10は、被削材 SCM3 および SUS304 に対して決定された切れ味係数 Q と砥石組成との関係を示す。図において、それぞれの砥石の切れ味は、基準砥石 WA 80 L 9 V(MBD) の被削材 SCM3 に対する切れ味係数 $Q_0 = 0.0944 \mu\text{m/s}^2$ を1として無次元化して示してある。図よりわかるように、被削材 SUS304 に対する各種砥石の切れ味係数は、一般に被削材 SCM3 に対するそれらよりも小さく、従って、SUS304 の方が SCM3

よりも難研削材であるといえる。砥粒材質と切れ味との関係についてみると、被削材 SCM3 および SUS304 のいずれに対しても、A 系砥粒の方が C 系砥粒よりも切れ味が良く、A 系砥粒のうちでは、被削材 SCM3 に対しては WA 砥粒が、被削材 SUS304 に対しては RA 砥粒が最も切れ味が良いことがわかる。粒度の変化に対しては、いずれの被削材についても、切れ味係数 Q は、36, 80, 150 番の順に大きくなり、従って細粒砥粒の方が切れ味は良いことになる。砥粒形状に関しては、砥粒のかさ比重が小さい程、いずれの被削材に対しても切れ味係数は大きくなり、角ばった形状の砥粒の方が丸い形状の砥粒よりも切れ味が良いことがわかる。砥石組織の変化に関しては、被削材 SCM3 と SUS304 で逆の傾向があり、SCM3 に対しては組織が密な砥石の方が、また SUS304 に対しては組織が粗な砥石の方が切れ味は良いといえるが、その理由を明確にするためにはさらに詳細な研究が必要である。結合剤についてみると、被削材 SCM3 に対して、ビトリファイドボンド砥石の方がレジノイドボンド砥石よりも良く切れる。結合度の変化に対する切れ味係数は、いずれの被削材についても、H, L, P, T の順に小さくなり、従って結合度の軟らかい砥石ほど切れ味が良いと言える。以上の結果を総合すれば、被削材 SCM3 に対しては WA 150 H 5 V (LBD) が、また被削材 SUS304 に対しては RA 150 H 11 V (LBD) が最適な研削砥石であるといえる。

5. 結 論

研削砥石の性能は、研削結果と密接な関係を有する尺度によって評価されるべきである。このような観点から、まずブランジ研削過程を支配する研削特性値の一つである寸法生成加速度から誘導された切れ味係数を定義し、それと研削結果との関係を検討することによって、切れ味係数が研削結果と密接な関係を有し、その値が大きい程砥石の切れ味は良く、良い研削結果が得られることを明らかにすることによって、切れ味係数がブランジ研削における砥石選択の一つの基準となりうることを示した。また組成を変化させた種々の研削砥石の切れ味係数を決定し、研削砥石の切れ味が砥石組成によってどのように影響されるかを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 中島利勝: 研削砥石の切れ味に関する研究 (第1報), 精密機械, **42**, 8 (1976) 784.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 岡村健二郎, 中島利勝ほか: 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.