砥石結合剤の組成が研削性能に及ぼす影響 (第4報)*

—砥石作業面性状と砥石寿命—

小 川 昌 平** 岡 本 隆**

Effect of Vitrified Bonding Material Composition on Grinding Characteristics (4th Report)
—Relation between Properties of Wheel Surface and Grinding Wheel Life—

Shohei OGAWA and Takashi OKAMOTO

From the result of previous paper, it has confirmed that the bending strength has a better correlation for the wheel life than the grade and the modulus of elasticity of grinding wheel when the vitrified bond consists of different compositions. In this paper, the properties of the wheel surface, that is, the scratching force which is capable of holding the grains and the successive cutting point spacing are experimentally and simulatively investigated. The results are as followed. (1) The distribution of the scratching force fits to the Weibull distribution. (2) The distribution of the successive cutting point spacing fits to the Weibull distribution, too. And the same result is obtained by means of the simulation which the co-ordinate of the active grains are given through uniform numbers generated by the computer. (3) On the distribution of the ratios of scratching force to successive cutting point spacing, which are computed by the Monte Carlo method, a certain relation is observed between the mode and the relative frequency and the wheel life type (i. e. shedding, chattering and burning). (4) The scratching force has stronger correlation with the bending strength than the other properties of grinding wheel.

Key words : scratching force, successive cutting point spacing, Weibull distribution

1. 結 言

前報までの研究結果^{1)~3)} からビトリファイド結合剤の組成が異なると、結合剤単味の強さおよび砥粒との接着性などが変わるため、同一結合剤率、同一砥粒率の砥石でもその抗折力、大越値および弾性係数が異なることがわかり、さらに大越値などよりも抗折力が砥石寿命とより良い対応を示すことが認められた。

本論文では従来の研究に引きつづき、砥石の抗折力が砥石寿命との対応が良い理由を以下に述べる手順で検討した。研削加工は高速回転する砥石の表面上にある砥粒が工作物と相互干渉して切りくずを排除し、工作物を削り取る加工法である。そこで、研削性能に大きな影響を与える砥石の表面性状の1つとして、大越式結合度試験よりも研削状況に近いと考えられるPeklenik式⁴⁾の砥粒引っかかり試験による砥粒の引っかかり力 p 、次いで、研削試験を行って砥石寿命時の連

続切れ刃間隔 μ を測定し、それぞれ統計的性質を検討した。

さらに、各砥石の p/μ の分布をモンテカルロ法により求め、研削実験による砥石寿命形態と比較してその分布型の特性値と寿命形態の関係を調べ、次いで、引っかかり力と砥石の抗折力、大越値および弾性係数のマクロな性質の相関について検討した結果を述べ、砥粒保持力を示す引っかかり力が抗折力とよい相関を示し、抗折力が砥石寿命とよく対応することを明らかにした。

2. 実 験 方 法

2.1 砥粒引っかかり試験

日本工業規格に採用されている大越式結合度試験機によって測定される砥石結合度は、砥石に一定荷重をかけながらビットを120°回転させた時のビット食込み深さ、すなわち大越値で決められる。しかし、ある幅をもつビットが回転して砥粒を破碎する大越式では、実際に研削中の砥粒に作用する力学的状態とはほど遠く、また、破碎された砥粒などがそのまま測定面に残り、誤差を生じやすいと考えられる。その点では、

* 原稿受付 昭和59年7月27日。精機学会昭和58年度関西地方定期学術講演会(昭和58年7月12日)にて発表

** 正 会 員 京都工芸繊維大学工芸学部(京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

Fig. 1 Shape of scratching tool

Table 1 Scratching condition

Infeed mm	Scratching speed mm/s
0.1	1.4

Table 2 Grinding and dressing condition

Grinding			Dressing	
Peripheral wheel speed m/min	Work speed m/min	Depth of cut μm	Depth of cut μm	Feed mm/rev
2 200	12.5	10	10	0.2

同じ引っかかり破砕法であっても J. Peklenik の行った引っかかり抵抗法が現実の研削状況に近いので、砥粒保持力とより良い対応を示すと考え、次の要領で砥粒引っかかり試験を行った。

切削動力計に取り付けられた図 1 に示す形状の引っかかりビットを用い、一定の切込み深さで試験片表面の砥粒を引っかかり、砥粒が除去される際の接線分力（以後、引っかかり力という）を電磁オシログラフに記録した。表 1 はこのときの引っかかり条件を示す。なお、後で引っかかり力と砥石抗折力の関連を考察する関係上、引っかかり試験には、表面状態を同一条件にするため抗折試験に使用した試験片を再度用いた。

2.2 連続切れ刃間隔の測定

表 2 に示す研削条件で乾式平面研削加工した砥石の寿命時の作業面に、電子顕微鏡用のアセチルセルロースフィルム（溶剤：酢酸メチル）を貼り付けてレプリカを作る。これを万能投影機のスクリーンで拡大した写真を研削方向に継ぎ合わせ、印画紙上に研削方向と平行な直線を任意の間隔に引き、直線と交わる摩耗条痕のある砥粒、すなわち実際に研削に関与した砥粒の間隔を連続切れ刃間隔として測定した。図 2 はレプリカの拡大写真の一例である。円内が摩耗条痕を有する砥粒切れ刃、 μ_i が連続切れ刃間隔である。

Fig. 2 Photograph of wheel surface

○; cutting edge, μ ; successive cutting point spacing

3. 実験結果および考察

3.1 引っかかり力の測定結果

砥石表面にある砥粒は、隣接する砥粒の相対的な位置関係およびビトリファイド結合剤の組成により結合剤単味の強度や砥粒との接着性が変わるので砥粒保持力が異なり、その分布は統計的性質を持っていることが推察できる。実験により求められる引っかかり力の分布を母集団のそれに限りなく近づけるには、標本数は多いほどよいが、時間と労力の上からおのずと限界がある。そこで、信頼性がある、かつ、できるだけ少ない標本数 n を順序統計量の考えに従って求める⁵⁾。

いま、母集団の分布型が未知の場合、標本 $x_1, \dots, x_n$ において、最小値 x_1' 、最大値 x_n' の間に、母集団に含まれる標本 x が少なくとも $100 \cdot \beta\%$ 含んでいる確率を P とすれば、

$$\beta^n + n \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{n-1} = 1 - P \quad (1)$$

が成り立つ。いま、 $\beta = 0.95$ 、 $P = 0.95$ であるための必要な標本の大きさは式 (1) より $n = 93$ となる。そこで、本研究では引っかかり力測定値の標本数を 100 とした。

図 3 (a), (b) は砥石 H 12* について標本数が 100 および 300 の場合の引っかかり力のヒストグラムである。両者の平均引っかかり力 $\bar{p}$ および標準偏差 s の差異が少ないことから標本数は 100 でも十分信頼できると考えられる。さらに、引っかかり力のヒストグラムが左右対称型から左に片寄っている“ゆがみが正”の分布型であるので、引っかかり力の累積相対度数をワイブル確率紙にプロットしたものを図 4 に示す。標本数が 100 と 300 の場合のプロット点は同一直線上にのり、この点からも同じワイブル分布関数をもつということができる。

一般に、ワイブル分布の確率密度関数は次式で表さ

* 砥石の表示記号は第 3 報に記載。

Fig. 3 Histogram of scratching forces

Fig. 4 Plotting of scratching force on Weibull probability paper

れる⁶⁾。

$$y = \frac{m(t' - \gamma)^{m-1}}{t_0} \exp\left[-\frac{(t' - \gamma)^m}{t_0}\right] \quad (2)$$

ここに、 m は形状母数、 t_0 は尺度母数、 γ は位置母数である。この式は一部の最弱箇所の破壊がとりもなおさず全体的機能の破壊となる場合を確率的に表現している。

砥粒引っかかり試験において、ビット先端部が砥粒を引っかく場合、砥粒自身、結合橋あるいは結合橋と砥粒の接着力部の中で最も弱い箇所から破壊が始まると考えられるので、引っかかり力がワイブル分布に適合することは当然といえる。

t_0 および γ は確率密度分布の横軸の目盛に関するだけの母数で、本論の場合は $\gamma=0$ である。ワイブル分布は、 $m=1$ では指数分布となり、 $m=3.6$ で正規分布に近い分布になる。表3は各砥石の引っかかり力に関するワイブル分布の形状および尺度母数を示す。結合剤

組成、結合剤率および砥粒率が異なっても $m < 3$ である。このため、引っかかり力のヒストグラムが左右対称形から左に片寄っている“ゆがみが正”の分布型をもつことがわかる。

3.2 連続切れ刃間隔の測定結果

図5は連続切れ刃間隔のヒストグラムの一例で、砥粒の引っかかり力の場合と同様に、ゆがみが正の分布型をしている。そこで、連続切れ刃間隔の累積相対度数をワイブル確率紙にプロットしたものが図6で、各点は直線上にのり、ワイブル分布に適合していることがわかる。表4は結合剤組成、結合剤率および砥粒率の異なる砥石に関する連続切れ刃間隔のワイブル分布関数の形状、尺度母数を示したもので、形状母数が1に近く、指数分布とみなすことができる。

3.3 シミュレーションによる連続切れ刃間隔の分布

砥石作業面上の砥粒切れ刃の分布に関する研究はこれまでにも多くなされてきている。本研究では、図2に示す摩耗条痕を有する砥粒はすべて研削に参与している砥粒切れ刃とみなした。そして、砥粒切れ刃は同一平面上にランダム分布をしていると考え、以下の手法を用いてコンピュータにより連続切れ刃間隔を求め、その分布型について検討した。

まず、砥石表面積 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ に対応する2系列の一樣乱数、 $X=2(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $Y=20(y_1, y_2, \dots, y_n)$ を発生させて組み合わせた $(2 \cdot x_i, 20 \cdot y_i)$ を砥粒切れ刃の座標値とする。一方、研削加工が進行するに従って砥粒切れ刃の先端は次第に摩耗する。この摩耗面積の分布について調べた結果、やはり、ワイブル分布に適合することがわかり、その平均面積は約 0.004 mm^2

Table 3 Shape and scale parameters of Weibull distribution for scratching forces (p)

Grinding wheel	Mean scratching force N	Weibull distribution		Grinding wheel	Mean scratching force N	Weibull distribution	
		Shape parameter	Scale parameter			Shape parameter	Scale parameter
A 23	11.4	1.8	70	E 23	13.5	2.0	135
A 32	12.7	2.0	150	E 31	9.6	1.2	10
A 41	11.4	1.5	35	F 11	15.2	1.8	105
A 42	17.4	1.8	150	F 12	20.7	1.5	75
B 43	23.5	2.2	715	F 13	23.8	1.4	75
C 33	13.7	1.5	50	F 21	13.0	1.4	30
C 43	14.5	1.6	615	F 31	18.4	1.4	160
D 12	12.2	2.0	130	F 41	20.9	2.0	425
D 13	12.2	2.1	200	F 42	30.8	2.3	970
D 22	9.8	2.1	95	F 43	27.8	1.9	455
D 23	16.0	1.7	75	G 12	14.4	1.5	45
D 31	9.8	1.9	70	H 11	11.8	1.6	30
D 33	14.4	1.6	75	H 12	15.6	1.5	60
D 41	14.4	2.0	165	H 13	18.7	1.8	190
D 42	15.7	2.1	260	H 21	13.8	1.6	50
D 43	19.0	1.5	65	H 31	14.5	1.7	80
E 22	14.6	1.9	120	H 41	22.9	1.9	380

Fig. 5 Histogram of successive-cutting point spacings **Fig. 6** Plotting of successive cutting point spacings on Weibull probability paper**Table 4** Shape and scale parameters of Weibull distribution for successive cutting point spacings (μ)

Grinding wheel	Mean successive cutting point spacing mm	Weibull distribution	
		Shape parameter	Scale parameter
A 32	1.9	1.0	1.7
A 41	1.7	1.1	1.8
A 42	1.4	1.0	1.2
B 41	1.5	1.1	1.0
C 33	2.2	0.8	1.6
C 43	1.3	1.0	1.0
D 33	1.4	1.0	1.1
D 42	1.2	0.8	0.6
E 23	1.5	0.9	1.3
F 13	1.4	1.0	1.2
F 21	1.9	0.9	1.5
F 31	1.7	1.3	2.1
F 41	1.6	1.1	1.3
G 12	1.8	1.0	1.5
H 12	1.5	1.0	1.2
H 21	1.8	0.8	1.1

であった。そこで、摩耗面の形状を円形と仮定して求めた直径 d_i を x_i に与えて、砥粒切れ刃の x 方向の大きさとする。次に、 $X' = x_1', x_2', \dots, x_j'$ の直線を任意に設定し、この直線と交差する砥粒切れ刃間の距離を連続切れ刃間隔として求める。発生させる砥粒切れ刃数を 500~2 000, y 軸に平行な直線数を 10 本、平均摩耗面積の 4 倍 (0.016 mm^2) までの範囲でワイブル分布の形状母数を 1.0~3.5 (すなわち、指数分布から正規分布まで) に変えて得られた連続切れ刃間隔の累積相

Table 5 Shape parameters of the Weibull distribution for successive cutting point spacings which are obtained by the simulation

a) For various numbers of generated grains when wear flat areas fit to the Weibull distribution which have 1.0 shape and 0.002 scale parameters

No. of generated grain	Successive cutting point spacing	
	No. of obtained grain	Weibull distribution shape para.
500	396	1.00
1 000	752	0.95
1 500	1 138	1.00
2 000	1 539	1.00

b) For various shape parameters of wear flat areas when number of generated grain is 2 000 and max. wear flat area is 0.016 mm²

Wear flat area		Successive cutting point spacing
Weibull distribution		Weibull distribution shape para.
Shape para.	Scale para.	
1.0	$2.4 \cdot 10^{-3}$	1.04
1.5	$2.6 \cdot 10^{-4}$	1.03
2.0	$3.4 \cdot 10^{-5}$	0.98
2.5	$4.6 \cdot 10^{-6}$	0.91
3.0	$5.8 \cdot 10^{-7}$	1.01
3.5	$6.8 \cdot 10^{-8}$	1.03

対度数をワイブル確率紙にプロットした各点は、いずれもほぼ直線上にのり、ワイブル分布に適合することがわかった。

表5 a), b) は上記のシミュレーションにより求めた連続切れ刃間隔のワイブル分布・形状母数を示す。これより砥粒切れ刃の座標値を一樣乱数で与えれば、砥粒発生数および摩耗面積の分布型を種々変えても、連続切れ刃間隔はワイブル分布に適合し、その形状母数が1、すなわち指数分布しており、実験結果とよく一致することがわかった。

3.4 引っかかり力と連続切れ刃間隔の関係

前述のように研削加工により寿命に達した砥石作業面のレプリカから測定した連続切れ刃間隔と、コンピュータにより一樣乱数を発生させて2次元分布の砥粒から得たそれが、共に形状母数が1に近いワイブル分布をしていることがわかった。

それ故、砥石作業面上の砥粒切れ刃の高さが同一平面上にあるとみなすと、連続切れ刃間隔の大きい砥粒切れ刃の最大切込み深さは大きくなる。したがって、連続切れ刃間隔が大きくて砥粒保持力の小さい砥粒切れ刃は、研削中に破碎、脱落を生じやすく、その逆の砥粒切れ刃は破碎、脱落をせず摩耗面積が増加すると

考えられる。

平面研削における砥粒の最大切込み深さ g は一般に次式で与えられる。

$$g = 2 \cdot \mu \cdot \frac{v}{V} \sqrt{t/D} \quad (3)$$

ここに、 V は砥石周速度、 v は工作物速度、 D は砥石直径、 t は切込み深さ、 μ は連続切れ刃間隔である、

V, v, D および t が一定、すなわち、同一研削条件の場合、式 (3) は

$$g = c_0 \cdot \mu \quad (4)$$

と表すことができる。ただし、 c_0 は定数である。

引っかかり力は砥粒保持力をよく表すと考えられるので、引っかかり力 p と最大切込み深さ g の比は、式 (4) より

$$p/g = p/c_0 \cdot \mu = c_0' \cdot p/\mu \quad (5)$$

すなわち、一定研削条件では引っかかり力 p と連続切れ刃間隔 μ の比 p/μ の小さいものが多い砥石は、脱落しやすい砥粒切れ刃が多く存在し、逆に、 p/μ の大きいものが多い砥石は、脱落し難い砥粒切れ刃が多いと考えられる。

既に述べたように、引っかかり力 p および連続切れ刃間隔 μ は、共にワイブル分布をしていると見なしうるので、累積分布関数は式 (2) を積分して

$$Y = 1 - \exp[-t'^m/t_0] \quad (6)$$

で与えられるから、その逆関数は

$$t'_i = \{-t_0 \cdot \ln(1 - Y)\}^{1/m} \quad (7)$$

Y が $U(0, 1)$ の一樣乱数のとき、 $(1 - Y)$ も $U(0, 1)$ の乱数になるから実際には式 (7) の代わりに

$$t'_i = (-t_0 \cdot \ln Y)^{1/m} \quad (8)$$

としてもよい。このとき、 $0 \leq Y \leq 1$ である。式 (8) の t'_i は式 (2) に示されるワイブル確率密度関数に従う乱数となる。この手法、すなわち、モンテカルロ法を用い図7に示すフローチャートに従って計算した p/μ の分布型を図8に示す。図のように p/μ の分布型はいかなる砥石でも1つのピークを持った山型になる。しかも、表2の研削条件では、最頻値が10 N/mm以下、その相対度数が7%以上の砥石では、研削試験の結果はびり型（目こぼれ型も含む）寿命となり、最頻値が30 N/mm以上、その相対度数が5%以下の砥石は焼け型寿命になった。 p/μ の最大相対度数が5~7%の間にある砥石では、最頻値が10~20 N/mmであればびり型になる可能性が大きく、20~30 N/mmでは焼け型になる可能性が大きいといえることがわかった。

このように、砥石の引っかかり力および連続切れ刃間隔の分布は砥石の寿命形態とかかわりが大きいことが

Fig. 7 Flowchart for distribution of p/μ by Monte Carlo method

Fig. 8 Distribution of p/μ by means of Monte Carlo method

認められた。

3.5 引っかかり力と抗折力、大越値および弾性係数の関係

セラミックスのようなぜい性材料の引張強度は圧縮強度の約 1/10 程度であることが知られている⁷⁾⁸⁾。したがって、ビトリファイド砥石の抗折力を求める曲げ

Fig. 9 Relation between scratching force and bending strength

Fig. 10 Relation between scratching force and Ohkoshi value

試験では、引張側の最弱部から破壊が発生すると考えられるので引っかかり力と共通の基盤に立っているといえる。図 9, 10, 11 は引っかかり力と抗折力、大越値および弾性係数の関係を示す。抗折力との相関係数 ($|r|$) が最大であるのは上記の理由によると考えられる。

したがって、ビトリファイド砥石の結合剤組成が異なれば、結合剤単味の強さの影響を受ける抗折力が大越値や弾性係数よりも砥粒保持力との相関が大きいのので、砥石寿命と良い対応を示すことは当然と考えられる。

Fig. 11 Relation between scratching force and modulus of elasticity

4. 結 言

前報までの研究により、ビトリファイド結合剤の組成が異なると、大越値に基づく砥石結合度よりも3点曲げ試験による砥石抗折力が砥石寿命とより良い対応を示すことが明らかになった。

そこで、研削作用に関与する砥石作業面上の砥粒切れ刃の保持力を表す引っかかり力および表面性状の1つである連続切れ刃間隔について調べ、モンテカルロ法により両者の比の分布型を求めて砥石寿命との関係につき考察し、さらに、砥石のマクロな性質としての抗

折力、大越値および弾性係数と引っかかり力の関係を検討した結果、次のことが認められた。

- (1) 砥粒保持力を表す引っかかり力はワイブル分布に適合し、その形状母数は1.0~2.5の間にある“ゆがみが正”の分布型をしている。
- (2) 研削試験後の砥石面をレプリカ法により測定した連続切れ刃間隔もワイブル分布に適合し、形状母数は1に近く指数分布とみなしうる。砥粒の座標値を一様乱数で与え、砥粒摩耗面積の分布型を種々変えたシミュレーションでも同様の結果が得られた。
- (3) 引っかかり力 p および連続切れ刃間隔 μ がワイブル分布に適合することからモンテカルロ法による p/μ の分布型の最頻値およびその相対度数と研削試験による砥石寿命形態は良く対応する。
- (4) 引っかかり力は砥石の抗折力との相関が大越値や弾性係数より強く、抗折力が砥石寿命と良い対応を示すことを裏付けている。

文 献

- 1) 小川昌平, 岡本 隆: 砥石結合剤の組成が研削性能に及ぼす影響 (第1報), 精密機械, 45, 7 (1979) 826.
- 2) 小川昌平, 岡本 隆: 砥石結合剤の組成が研削性能に及ぼす影響 (第2報), 精密機械, 47, 9 (1981) 1128.
- 3) 小川昌平, 岡本 隆: 砥石結合剤の組成が研削性能に及ぼす影響 (第3報), 精密機械, 49, 9 (1983) 1215.
- 4) J. Peklenik: Beitrag zur Härteprüfung von Schleifkörpern, Microtecnic, 14, 5, (1960) 261.
- 5) 三上 操: 統計的推測, 築摩書房 (1969) 127.
- 6) 日科技連編: 信頼性データの解析, 日科技連出版社 (1967) 12.
- 7) R. W. Dairidge (鈴木弘茂訳): セラミックスの強度と破壊, 共立出版 (1982) 17.
- 8) 窯業協会編集委員会講座小委員会編: セラミックスの機械的性質, 窯業協会 (1982) 26.

(p. 534 より続く)

〔技術交流〕 輸出は5426件, 2775億円で, 順調に増加, 輸入は7316件, 2814億円の横ばい傾向だが, ほぼ輸出入は均衡状態である。輸出入とも電気機械工業が中心で, 対アジア・アフリカ諸国は輸出超過, 対欧米諸国は輸入超過である。

〔研究者数〕 44万7700人(同2.8%)と前年よりも1万2400人増加である。このうち女子は2万8600人で, ここ数年女子の増加が目立つ。

なお, エネルギーとライフサイエンスについて掲げる。エネルギー研究費は7120億円で, 前年より4.5%増と

なった。内訳は原子力が3074億円, 省エネルギーが2504億円, 化石エネルギーが813億円, 自然エネルギーが372億円, その他エネルギーが258億円となっている。

研究者は, 3万9200人で前年より1.2%減である。

次にライフサイエンスについては, 研究費7840億円, 5.6%増である。研究の目的別では保健・医療が5562億円, 生命現象・生物機能680億円, 食糧資源の確保517億円などである。

研究者は10万8800人で, 伸び率は1.1%増, 会社が1万5000人, 研究所が5600人である。

(服部 敏夫)