研究

振動砥石の相当結合度特性*

隈部 淳一郎** 坂口 克己**

Equivalent Grade Characteristics of the Vibrating Grinding Wheel

Jun-ichiro KUMABE, Katsumi SAKAGUCHI

This report describes some experiments with the grade of the grinding wheel which vibrates in the frequency $f=20$ kHz and the amplitude $a=0\sim30\mu$. The grade is measured in the diamond dressing method. From the result of the experiments, it is found that the dressing force, that is, the grade of the grinding wheel decreases as the amplitude increases. This phenomenon means that the decreased grade of grinding wheel corresponds to the original grade of another grinding wheel, and is named "Equivalent Grade Characteristics." The equivalent grade $(G)_{eq}$ is approximately expressed in the function $(G)_{eq}=(G)_0\cdot e^{-\alpha a}$ ($(G)_0$; original grade, α ; constant), and varies reversibly when the amplitude decreases. The grade can be controlled by the amplitude of the vibrating wheel. Therefore, one vibrating grinding wheel can adapt its grade to every work material and every grinding condition, and can perform grinding efficiently and accurately.

1. ま え が き

筆者の一人は、超音波振動砥石による内面研削に関する研究¹⁾、および「最近の研究と技術から」²⁾で、砥石を超音波域の振動数で振動させることによって、結合度が変わると考えられる現象があることを指摘していた。その後、10年を経過した今日においてやっと振幅を自由に变えうるビトリファイド砥石の試作に成功した。

そして、ドライバ法で押し込み試験をしてみた結果振幅を大きくするに従って、深い凹みができていくことを発見した。異論もあるが、現時点ではこの現象を JIS の結合度試験³⁾と照し合わせると、結合度が振幅の増加に比例して変化するとしてよいと考えられる。

振幅によってどの程度変化するかは、その凹みを測定すればわかるが、本研究ではダイヤモンドドレッシング法⁴⁾によって振動砥石表面を削り、その平均抵抗によって結合度の変化を求めることにした。すなわち、各砥石の振幅零のときの抵抗を測定し、これをそれぞれの結合度を定める標準抵抗としておき、振幅の変化でその抵抗に等しくなったときにその結合度に相当したと判断することにした。

この方法で実験した結果、高い結合度の砥石の抵抗が振幅を大きくしていくと、しだいに低い結合度の砥石の抵抗に等しくなっていく傾向をはじめて定量的に求めることができた。すなわち結合度の変化を定量的に明らか

にすることができた。

新しく発見したこの現象を簡明にあらわすために振動砥石相当結合度特性と名付け、第1⁵⁾、第2⁶⁾、第3⁷⁾報で発表した研究結果を総括して報告する。

2. 振動内部応力による考察

軸方向振動砥石の端面から任意の点 x の変位 U は、

$$U = a \cos \frac{2\pi f}{C} x \sin 2\pi f t$$

したがって、ひずみ ε は

$$\varepsilon = a \frac{2\pi f}{C} \sin \frac{2\pi f}{C} x \sin 2\pi f t$$

ここで、 a ；砥石先端の振幅 (mm), f ；振動数 (1/sec)

C ；音速, $C = \sqrt{E/\rho}$ (mm/sec), E ；砥石の弾性係数 (kg/mm²), ρ ；密度 (kg·sec²/mm⁴)

ビトリファイド砥石の弾性係数 $E \approx 5 \times 10^3$ kg/mm²⁸⁾, 密度 $\rho \approx 2.05 \times 10^{-10}$ kg·sec²/mm⁴ とすれば、

$$C \approx 5 \times 10^6 \text{ mm/sec}$$

したがって、実験に使用した $f=20$ kHz の砥石幅 $x=10$ mm については、

$$\sin \frac{2\pi f}{C} x \approx \frac{2\pi f}{C} x$$

ゆえに、

$$\varepsilon \approx a \frac{\rho}{E} (2\pi f)^2 x \sin 2\pi f t$$

したがって応力 σ は、

$$\sigma \approx a \rho (2\pi f)^2 x \sin 2\pi f t$$

砥石幅中央の $x=5$ mm の点の最大振動応力 σ_0 について考えると、

*原稿受付 昭和46年2月1日。精機学会関西地方講演会、昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会、名古屋地方講演会 (昭和45年7月24日, 10月6日, 11月24日) にて発表。

**正会員 理化学研究所 (埼玉県和光市広沢 2-1)

$$\sigma_p \div 5 a \rho (2\pi f)^2 \quad (1)$$

振動応力は振幅 a に比例し、振動数 f の 2 乗に比例し、 ρ に比例する。この ρ は砥石のかさ比重として考えられる。かさ比重は砥石各結合度で異なり、ビトリファイド砥石では結合度 $R=1.95$ から結合度 $R=2.37$ まで変化することがすでに明らかにされている⁹⁾。各結合度の砥石についての振動応力の差は、かさ比重による差として表われてくる。

いま、結合度 M として $\rho=2.2 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}^4$, $f=20 \text{ kHz}$, $a=20 \mu$ とすると、

$$\sigma_p \div 0.30 \text{ kg/mm}^2$$

この応力を砥石の静的引張り破壊応力¹⁰⁾,

$$\sigma_B \div 1 \text{ kg/mm}^2$$

と比較すると約 30% になり、無視できない大きさとなって作用することがわかる。

同じ振動砥石でも、振動数 $f=20 \text{ Hz}$, 先端振幅 $a=2 \text{ mm}$ とした超仕上げ砥石の端面から 5 mm の点での応力は

$$\sigma_p \div 3 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^2$$

となって、 $\sigma_B=1 \text{ kg/mm}^2$ に対してまったく無視してよい小さい値を示す。実際に、20~100 Hz 程度の振動砥石にドライバ法で砥石表面に凹みをつけてみても無振動時となんらの差異も生じない。

式(1)で示されているように、振幅 a に比例し、振動数 f の 2 乗に比例して応力が大きくなり、金属に比べるといちじるしく小さい砥石破壊強さに影響を与える。すなわち、超音波域のきわめて高い振動数により砥石内に振動内部応力が発生し、この内部応力を差引いた残りの抵抗力がドレッシング抵抗となるものと考えられる。

先端振幅 10μ で振動する幅 10 mm の砥石両端に生ずるわずかな 0.3μ 程度の振幅差でも、振動数 20 kHz となると、砥石の場合には破壊応力が小さいためそのひずみは無視できない重要な意味を持つてくる。

すなわち、超音波域の高い振動数で振動する振動砥石の振動状態における単位長さあたりの振幅差によるひずみが初期応力として作用することが要因となると考えられる。

以上は砥石が軸方向にのみ振動するものとして考察をした

が、実験に使用した砥石の振動には、砥石両端の振幅差 0.2μ の半径方向振動も実存していることから、振動応力がさらに付加され、砥石の小さい破壊強さに対してますます大きな影響を与えていることが考えられる。

このようにして砥粒と結合剤本来の抵抗力が減少し振動を与えないときに比べて砥粒の脱落あるいは破碎の抵抗がより小さくなることが考えられる。このことは、結合度の高い砥石を振動させることによって結合度の低い砥石と同じ性質となったことを意味する。

そこで、ドレッシング法によって振動砥石表面をダイヤモンドドレッサで切削し、本当に抵抗が変化するかどうか、またどの程度変化するかを求めることにする。

3. 実験装置および実験方法

図 1 (a), (b) に示した振動子による軸方向砥石振動系と、(c) のねじり振動子によって駆動される円周方向砥石振動系によって、図 2 の各場合について実験した。図 1 (a) は片振幅 12μ 程度まで砥石軸方向に振動し、(b) は最大振幅 30μ 程度まで振動する。

この振動砥石を振動内面研削装置¹⁾と本報で新たに準備した旋盤の主軸に取りつけて実験した。ドレッシング方向としてこの振動しながら回転する砥石の円筒面および先端面に対して図 2 (a), (b), (c) が考えられる。

- すなわち、
- (a) 振動方向がドレッシング抵抗背分力の方向の場合
 - (b) 振動方向がドレッシング抵抗送り分力の方向の場合
 - (c) 振動方向がドレッシング抵抗主分力の方向の場合

図 2 ダイヤモンドドレッシング法による振動砥石の結合度測定方法

図3 実験装置全景

この三つの場合について砥石振動数を一定にして、振幅を変えて平均ドレッシング抵抗を測定した。実験は、まず JIS で定められた各結合度の砥石を振幅零でドレッシングして、その抵抗を結合度を表わす標準抵抗とし、つぎにそれらの各砥石を振動させ、振幅以外のドレッシング条件は変えないでドレッシングを行ない、各振幅における抵抗を測定し、それらの抵抗を標準抵抗と比較する。そして、ある振幅でその標準抵抗と一致したときその振動砥石の結合度をその標準抵抗をもつ砥石の結合度として求めた。実験装置を図3に示す。

本実験で行なった実験条件をつぎに示す。

砥石：A・(80, 180)・(S, O, M)・m・V, 23×10
×13

振動方向：砥石軸方向および円周方向

振動数：20 kHz (軸方向) および 29 kHz (円周方向)

振幅：0~30 μ (片振幅)

砥石周速：40 m/min

ドレッサ：単粒ダイヤモンド

ドレッサ，先端形状は先端丸み半径1 mm 頂角70°の四角すい状

切込み：0.04 mm (軸方向振動砥石端面)，および 0.04 mm または 0.025 mm (軸方向振動砥石円筒面)，および 0.05 mm (円周方向振動砥石円筒面)

送り：0.1 mm/rev

冷却液：ノリタケール30

倍液，1.3 l/min

4. 実験結果および考察

4.1 軸方向振動砥石端面のドレッシング

実験条件：砥石の結合度：S, O, M

振動数： $f=20$ kHz, 振幅： $a=0\sim12\mu$

ドレッサ切込み： $t=0.04$ mm,

送り： $s=0.1$ mm/rev

上記条件で図1(a)の軸方向振動砥石端面を図2(a)のようにしてドレッシングした結果図4に示すような主分力 P_c および背分力 P_t と振幅 a との関係が求められた。

実験値は切込み，送りおよび振幅の読取誤差，砥石のばらつきとダイヤモンド切れ刃先端の摩耗による形状変化などによって影響されることが考えられる。実験値のばらつきは図の程度になっている。この程度のばらつきであるため前後の結合度の砥石に対する実験値とは明らかに区別しうる。

結合度 S, O, M の砥石の主分力を P_{cs} , P_{co} , P_{cm} , 背分力を P_{ts} , P_{to} , P_{tm} として，各実験値からつぎの指数関数で表わされる実験式を求めた。

$$\left. \begin{array}{l} \text{S 結合度砥石} \quad P_{cs}=216 e^{-0.11a}, \quad P_{ts}=430 e^{-0.11a} \\ \text{O 結合度砥石} \quad P_{co}=131 e^{-0.11a}, \quad P_{to}=265 e^{-0.11a} \\ \text{M 結合度砥石} \quad P_{cm}=68 e^{-0.11a}, \quad P_{tm}=135 e^{-0.11a} \end{array} \right\} \quad 0 \leq a \leq 12 \mu \quad (2)$$

ここで，抵抗の単位は g，振幅の単位は μ である。

図において， P_{cs} の曲線を見ると S 結合度の砥石の主分力は 5μ で， $a=0$ での O 結合度の砥石の主分力と同じ値を示し，さらに振幅が大きくなって， $a=11\mu$ のとき M 結合度の砥石の $a=0$ での主分力と等しくなるよう

図4 軸方向振動砥石端面のドレッシング抵抗

に変化している。背分力の場合も同様にS結合度の砥石の背分力は $a=5\mu$ のときO結合度の砥石に等しくなり、さらに振幅が大きくなると $a=11\mu$ でM結合度の砥石の背分力に等しくなるような傾向で変化している。

4.2 軸方向振動砥石円筒面のドレッシング

実験条件：砥石の結合度：S, O, M, K

振動数： $f=20\text{ kHz}$ ，振幅： $a=0\sim 9\mu$

ドレッサ切込み： $t=0.04\text{ mm}$ ，

送り： $s=0.1\text{ mm/rev}$

図1(a)の軸方向振動砥石円筒面のドレッシングを、図2(b)のようにして上記条件で行なった結果を図5に示す。振幅の増加にともなうドレッシング抵抗の減少割合は端面の場合に比べて小さいが各砥石とも抵抗は振幅の増加とともにいちように減少し、結合度の低い砥石の抵抗値と等しい値を示しながら変化する。この抵抗と振幅との関係は式(2)と同様に式(3)に示す指数関数で表わされる。

図5 軸方向振動砥石円筒面のドレッシング抵抗

図6 軸方向振動砥石円筒面のドレッシング抵抗

$$\left. \begin{array}{l} \text{S結合度砥石} \quad P_{cs}=240e^{-0.04a}, \quad P_{ts}=490e^{-0.04a} \\ \text{O結合度砥石} \quad P_{co}=170e^{-0.04a}, \quad P_{to}=370e^{-0.04a} \\ \text{M結合度砥石} \quad P_{cm}=120e^{-0.04a}, \quad P_{tm}=250e^{-0.04a} \\ \text{K結合度砥石} \quad P_{ck}=93e^{-0.04a}, \quad P_{tk}=190e^{-0.04a} \end{array} \right\}$$

$$0 \leq a \leq 9\mu \quad (3)$$

つぎに、振幅をもっと大きくした場合に抵抗がどう変化するかを求めるために、図1(b)の軸方向振動砥石を最大片振幅 30μ まで変化させて、つぎの実験条件で実験した。

実験条件：砥石の結合度：S, O, K

振動数： $f=20\text{ kHz}$ ，振幅： $a=0\sim 30\mu$

ドレッサ切込み： $t=0.025\text{ mm}$ ，

送り： $s=0.1\text{ mm/rev}$

測定された抵抗と振幅との関係を図6に示す。抵抗は振幅零から振幅 30μ まで主分力、背分力ともに式(4)の指数関数で示される関係に従って連続して減少することがわかった。

$$\left. \begin{array}{l} \text{S結合度砥石} \\ P_{cs}=124e^{-0.04a}, \quad P_{ts}=380e^{-0.04a} \\ \text{O結合度砥石} \\ P_{co}=83e^{-0.04a}, \quad P_{to}=295e^{-0.04a} \end{array} \right\} \quad 0 \leq a \leq 30\mu \quad (4)$$

大振幅のときの抵抗は、そのたびに振幅の大きいところまで実験して確かめなくても、振幅の小さい範囲での実験式を延長して求められることがわかる。

4.3 円周方向振動砥石円筒面のドレッシング

実験条件：砥石の結合度 S, K

振動数： $f=29\text{ kHz}$ ，振幅：

$a=0\sim 4\mu$ ，ドレッサ切込み：

$t=0.05\text{ mm}$ ，送り： $s=0.1\text{ mm/rev}$

図1(c)の円周方向振動砥石円筒面のドレッシングを図2(c)のようにして実験した結果、図7に示すような抵抗と振幅との関係がえられた。この円周方向振動砥石の場合でも、振動によって抵抗は式(2)~(4)と同様に式(5)の指数関数で表わされる関係で変化する。

図7 円周方向振動砥石円筒面のドレッシング抵抗

$$\left. \begin{array}{l} \text{S結合度砥石} \quad P_{cs} = 195 e^{-0.14a}, \quad P_{ts} = 540 e^{-0.14a} \\ \text{K結合度砥石} \quad P_{cK} = 82 e^{-0.14a}, \quad P_{tK} = 203 e^{-0.14a} \end{array} \right\} \quad 0 \leq a \leq 4 \mu \quad (5)$$

実験した振幅の範囲は最大 4μ までであるが、 4μ 以上の場合の抵抗の変化も4.2の実験結果から、この式(5)の延長線上にのるものと考えられる。

以上の実験で、いずれの振動方向の場合でも、ドレッシング抵抗は振幅の変化によって、 $P = P_0 e^{-\alpha a}$ の形の指数関数で表わされる関係に従って変化することが明らかになった。

この抵抗が減少する原因については、考察したように、本質的なものとして、振動にともなう振動内部応力による影響が主な要因として考えられるが、このほかにドレッシング抵抗の作用状態、砥石内部摩擦による熱応力、振動によるドレッシング刃先の摩擦抵抗の減少なども加味されているものとする。これらの吟味、検討は別報において行なう。

5. 振動砥石の相当結合度特性

ダイヤモンドドレッシング法による砥石結合度試験法ではドレッシング抵抗は結合度を表現するものと考えられている。図4~7によって各結合度の砥石の $a=0$ における標準抵抗と、振幅によって変化した抵抗とを対比させてみると、一つの砥石の結合度が振幅の増加とともに減少し、別の砥石の結合度にかわっていくことにな

る。この超音波振動砥石の結合度が変化する現象を相当結合度特性と名づける。

抵抗と振幅との関係の一般式 $P = P_0 e^{-\alpha a}$ において、抵抗を結合度に対比させ、変化した結合度を相当結合度 $(G)_{eq}$ とすれば、振幅 a との関係はつぎの一般式で表わされることになる。

$$(G)_{eq} = (G)_0 \cdot e^{-\alpha a} \quad (6)$$

ここに、 $(G)_0$ は各砥石の振幅零のときの結合度、 α は定数である。

振動数を変えた場合には、振動内部応力が振動数の2乗に比例するとして式(1)の解析結果から、高い振動数ほど結合度の減少割合は大きいものと考えられる。

6. 振動砥石の相当結合度特性の研削実験による確認

以上の実験では、砥石よりはるかにたいダイヤモンド先端切れ刃で砥石表面を切削し、ダイヤモンドの摩耗は、砥石の削られた量に比べれば無視できる程度でほとんど砥石のみを損耗させる方法で求めた抵抗によって結合度の変化を考察した。

つぎに、ダイヤモンドを工作物でおきかえ、砥石と工作物とを面接触させ、砥石も工作物もともに損耗させる研削実験の場合に、ドレッシング法で求めた相当結合度特性がなりたつかどうかを確かめる。

すなわち、振幅とドレッシング抵抗との関係図から、結合度の高い砥石のある振幅に対比するたて軸の結合度 $(G)_{eq}$ を求め、その結合度に対応する砥石を別に準備してこれを振動させないで研削する現象と、結合度 $(G)_{eq}$ の振動砥石の研削現象とが一致するかどうかを確かめてみる。この両者の現象が同じであれば相当結合度特性の考え方は正しいものと考えられる。

図5での抵抗の比較によって、M結合度砥石の結合度は $a=6 \mu$ でK結合度に相当していることが明らかにされている。そこで、 $a=6 \mu$ のM結合度砥石と $a=0$ のK結合度砥石とで研削実験を行ない、それらの損耗量を比較してみることにした。

実験装置は、図8に示す損耗実験装置によって、工作物を砥石円筒面に一定圧力で加圧して研削し、所定時間

ごとに、砥石 3 カ所の砥石直径を感度 0.001 mm のマイクロメータで測定し、その平均値の減少量で比較した。

実験条件：砥石：A・80・(M, K)・m・V

振動方向：軸方向振動

振動数： $f=20\text{ kHz}$

振幅： $a=6\text{ }\mu\text{ (M砥石)}$, $a=0\text{ (K砥石)}$

周速： 90 m/min , 工作物：S50C

加圧力： 2.9 kg , 研削液：ノリタケール

実験の結果図 9 に示すように、M 結合度の砥石の $a=6\text{ }\mu$ ときの損耗量が K 砥石の $a=0$ での損耗量と一致す

図 8 損耗量比較実験装置

図 9 K 砥石に相当する $a=6\text{ }\mu$ の M 砥石と K 砥石の砥石損耗量の比較

使用砥石：A・80・O・m・A・V, ドレッシング条件——ドレッシング面：砥石端面, 切込み： $t=0.04\text{ mm}$ 送り： $s=0.1\text{ mm/rev}$, 振動条件——振動方向：砥石軸方向, 振動数： $f=20\text{ kHz}$, 振幅： $a=8\text{ }\mu$

図 10 所定回数振動後の普通ドレッシング抵抗

ることを確かめることができた。すなわち、砥石損耗量の比較によって式(6)の関係を確かめることができた。

以上のようにして確かめた振動砥石の相当結合度特性によって、振動研削における砥石の損耗量が振幅の増加とともに大きくなること¹¹⁾を検討すれば、砥石の結合度が本質的に減少しているのであるから、振幅零での損耗量と比較すれば、損耗量が多くなるのは当然のことといえる。 $(G)_{eq}$ に対応する結合度の低い砥石で普通研削して、その損耗量と比較して検討しなければならないことなどが考えられる。

つぎに、この相当結合度特性が可逆的な特性であるか否かを確認した。処女砥石を振幅 $8\text{ }\mu$ で所定回数振動させたあとで振動をとめて普通ドレッシングし、再び振動させた後普通ドレッシングする実験をくり返したところ、図 10 に示すような結果がえられた。図に示されるように、結合度は振動中のみ変化し、振動を止めればもとの結合度に復帰することがわかった。このことから、振動砥石は弾性振動状態を示し、砥石内部には疲労破壊現象は生じていないといえる。

また、振幅の変化による結合度の応答の時定数がほとんど零であること、および振幅を増減しても特性曲線は履歴曲線を描かないことが確かめられた。

以上の研究で明らかにされたこの相当結合度特性は、実際の研削作業に有効に使用しうると考えられる。たとえば、工作物材質の異なる複合材の加工でも、1 個の砥石を用いて、その振幅を制御することによって、つねに最適条件で研削加工しうることや、荒研削あるいは仕上研削などの研削作業に適した結合度を、砥石は砥石軸に取付けたままで交換せずに、迅速に容易に選択できることが考えられる。

7. む す び

以上の結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) いわゆる超音波域のきわめて高い振動数で振動するビトリファイド砥石のダイヤモンドドレッシング抵抗と振幅との関係は $P=P_0 \cdot e^{-\alpha a}$ で表わされる。
- (2) 振動砥石の振幅 a のときの結合度を $(G)_{eq}$ とし、振幅零でのその砥石の結合度を $(G)_0$ とすると、

$$(G)_{eq} = (G)_0 \cdot e^{-\alpha a}$$

の関係がある。この $(G)_{eq}$ を相当結合度と名づける。振動砥石において結合度が変化する現象を相当結合度特性と名づける。

(3) 相当結合度特性は可逆的である。

(4) この特性は、非常に高い振動数で振動する砥石内には、砥石の破壊強さと比較して無視できない単位長さあたりの振幅差すなわちひずみによる $\rho a f^2$ に比例する振動内部応力が生ずるためであると考ええる。商用サイクルで振動する砥石のひずみは振動数が低いために無視でき、振動内部応力を考慮する必要がなく、この砥石の結合度が変化するなどの現象は現われない。

今後は、この特性の詳細な解析と、この特性を利用した研削加工実験を進める予定である。

本研究を遂行するにあたって、終始貴重なご教示を賜わった理化学研究所谷口修主任研究員および実験に協力していただいた当所工作部および研究補助員有賀昇氏に深く感謝の意を表してむすびとする。

文 献

- 1) 隈部淳一郎：超音波縦振動といしによる内面研削に関する研究（第1報）および（第2報），日本機械学会論文集，**27**，181（1961）1404 および 1412.
- 2) 隈部淳一郎：超音波振動研削，精密機械，**27**，6（1961）369.
- 3) JIS R 6240.
- 4) 海老原敬吉，塩崎 進：研削砥石の硬さの新しい表わし方，マシンリー，**11**（1951）612.
- 5) 隈部淳一郎，坂口克己：振動といしの相当結合度特性（第1報），精機学会関西地方定期講演会前刷集，（1970）.
- 6) 同上（第2報），精機学会秋季大会前刷集，（1970）.
- 7) 同上（第3報），精機学会名古屋地方講演会前刷集，（1970）.
- 8) R.S. Hahn: The Effect of Wheel-Work Conformity in Precision Grinding, Trans. ASME, **77**, 8 (1955) 1325.
- 9) 精密工作便覧，コロナ社，（1970）546.
- 10) 切削加工技術便覧，日刊工業新聞社，（1962）623.
- 11) たとえば，田中義信，矢野章成：超音波振動砥石による精密仕上げの研究（第1報），精密機械，**29**，3（1963）232.