研削比の理論解析*

—無気孔ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石による検証—

田中武司** 井川直哉*** 上野信幸† 岡田昭次郎†

Theory of Grinding Ratio verified with Poreless Vitrified
Bonded Diamond Wheel

Takeshi TANAKA, Naoya IKAWA, Nobuyuki UENO and Syojiro OKADA

Grinding efficiency, wheel wear and grinding ratio are evaluated in plunge grinding under the concept which abrasive grains cut the workpiece, as well as tips on the ground surface scratch the bond of grinding wheel. Grinding ratio is related with Young's modulus, the elastic failure energy and the visco-elastic properties of bond. The estimated values which may present the grindability of wheel are verified in the grinding tests with poreless vitrified bonded diamond wheel in regard to the contents of frit, kinds of grains, grain sizes and concentrations. High grinding efficiencies, much wear of wheel and low grinding ratios result in low contents of frit, brittle grains and large grain sizes. Large elastic failure energies of bond predict little wear of wheel and high values of grinding ratio which are verified in the tests.

Key words : grinding efficiency, wheel wear, grinding ratio, plunge grinding, poreless vitrified bonded diamond wheel

1. 緒言

ダイヤモンド砥石の研削性能は通常研削比で評価されている¹⁾。それは研削量と砥石損耗量の比である。被削材の被研削性も研削比で評価され、砥石の種類、被削材の性質との関連において検討されている²⁾。著者の1人³⁾は塑性降伏圧力の概念に基づき研削量(研削能率)を砥石組成、研削条件と関連づけて解析したが、研削比の定量的解析までには至っていない。研削比の実験値は多くの報告で見られるものの、その理論解析は少ない⁴⁾。

ところで、新しく開発した砥石がいかなる性能を有するかを知ることは砥石の適用を図るうえで重要である。研削条件などの影響について実験により検討する

ことは大切であるが、その範囲は限られる。研削性能の理論を確立し、性能を支配する因子は何かということをもっと知ることができれば、砥石の性能について有益な示唆が得られると思われる。

そこで、本論文では圧力切込み方式における研削量、砥石損耗量、研削比を理論解析し、それらと被削材の性質、砥石の構成要素、結合剤の特性とどのような関係にあるかを提示する。そして、無気孔ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石において、決められた被削材に対して、粒度、集中度などの砥石組成との関連性、フリット含有量による結合剤の特性との関連性について実験から検討し、研削比の理論解析の妥当性を定性的、定量的に検証しようとする。

2. 研削性能の解析

研削は個々の砥粒により行われる引っかきの集成されたものと考えられる。したがって、各砥粒の引っかき深さ、形状、研削距離、作用砥粒数が分かれば、研削量についてある程度の理論的取り扱いが可能である⁵⁾。

* 原稿受付 平成元年1月27日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月29日)および昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月4日)にて発表

** 正会員 立命館大学理工学部(京都市北区等持院北町56-1)

*** 正会員 大阪大学工学部(吹田市山田丘2-1)

† 正会員 日本グリーン研究所(株)(香川県綾歌郡綾南町陶1025-3)

Fig.1 Estimated model of grinding

同様に砥石損耗量も研削面の微小突起、切りくず粒子（以下単に突起と書く）による結合剤の引っかきの集積⁵⁾とするならば、研削量と同様な取り扱いが可能であろう。これより研削比は研削量と砥石損耗量の比として理論的に表されられると思われる。

2.1 研削量（研削能率）の解析

図1に示す研削加工の概念図において、砥粒と被削材の接触状態に関して次の仮定を置く。

(1)被削材は完全塑性体とし、砥粒-被削材の接触圧力は被削材の塑性降伏圧力に等しい。(2)結合剤は弾性体か粘弾性体とし、砥粒は研削方向に垂直に相対変位する。(3)砥粒の先端は球形(曲率半径は r)とする。(4)引っかかり溝の両側への盛り上がりはない。(5)砥粒の突き出し高さは最大で砥粒の半径 $d_a/2$ で、平均して Δ' 毎に1個存在する。

砥粒の変位が無いとき、 i 番砥粒の引っかかり深さを y_i 、負荷により後退する量を x_i とする。 i 番砥粒の接触面積を a_{ni}' 、負荷を p_{ni}' とする。

$$\frac{p_{ni}'}{a_{ni}'} = \frac{2 p_{ni}'}{\pi \{r^2 - (r - y_i + x_i)^2\}} = p_w = 1.08(HV)_w \quad (1)$$

p_w , $(HV)_w$ は被削材の塑性降伏圧力と微小ビッカース硬度である。溝の断面積は $r \gg y_i - x_i$ のとき、近似的に $1.88r^{1/2}(y_i - x_i)^{3/2}$ で表されるから、 i 番砥粒による研削長さ L のときの研削量 dV は次式となる。

$$dV = 1.88 L r^{1/2} (y_i - x_i)^{3/2} \quad (2)$$

式(1)より近似的に式(3)が成立する。

$$p_{ni}' = \pi r p_w (y_i - x_i) = p_{ni} - \pi r p_w x_i \quad (3)$$

ここで、 p_{ni} は砥粒の変位が無いときの i 番砥粒の負荷である。 Q を変数として、 p_{ni} を $p_{ni}' \cdot Q$ で表す。

A を見かけの接触面積、単位面積当りの押し付け力を P とすれば垂直方向の力の釣合から、

$$F_n = PA = \sum_{i=1}^{n_a} p_{ni} + \sum_{j=1}^{m_a} q_{nj} = Q \sum_{i=1}^{n_a'} p_{ni}' + \sum_{j=1}^{m_a} q_{nj} \quad (4)$$

q_{nj} は j 番の突起にかかる負荷で、 $\pi s p_b u$ (2.2で仮定を検討)である。 p_b, s, u は結合剤の塑性降伏圧力、突起の曲率半径、結合剤を引っかく深さである。 n_a, n_a' は変位前後の砥粒数、 m_a は突起の数である。

仮定の(5)と式(3)より、

$$y_i - x_i = \Delta' (i' - 1)$$

$$p_{ni}' = \pi r p_w \Delta' (i' - 1)$$

$$u_j = \nabla (j - 1)$$

$$\begin{aligned} PA &= Q \pi r p_w \Delta' \sum_{i'=1}^{n_a'} (i' - 1) + \pi s p_b \nabla \sum_{j=1}^{m_a} (j - 1) \\ &= Q \pi r p_w \Delta' n_a'^2 / 2 + \pi s p_b \nabla m_a^2 / 2 \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、研削力の垂直成分 F_n の内、砥粒が被削材を、突起が結合剤を引っかく割合を ϕ （研削負担率）、 $(1 - \phi)$ とする。

$$\phi PA = Q \sum_{i'=1}^{n_a'} p_{ni}' = Q \pi r p_w \Delta' n_a'^2 / 2$$

$$(1 - \phi) PA = \sum_{j=1}^{m_a} q_{nj} = \pi s p_b \nabla m_a^2 / 2$$

ゆえに、

$$n_a' = \left(\frac{2 \phi PA}{Q \pi r p_w \Delta'} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$m_a = \left\{ \frac{2(1 - \phi) PA}{\pi s p_b \nabla} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

研削量 V は式(2)より次式となる。

$$\begin{aligned} V &= 1.88 L r^{1/2} \sum_{i'=1}^{n_a'} (y_i - x_i)^{3/2} \\ &= 0.752 L r^{1/2} \Delta'^{3/2} n_a'^{5/2} \end{aligned}$$

上式に式(6)を代入する。

$$V = 0.428 \phi^{5/4} L (PA)^{5/4} \Delta'^{1/4} r^{-3/4} p_w^{-5/4} Q^{-5/4} \quad (8)$$

いま仮定の(5)より、

$$\Delta' = \frac{d_a}{n_a' A} = \frac{\eta d_a^3}{0.109(1 + \alpha d_a \beta) CA} \quad (9)$$

C は集中度(S, I では認められていないが、慣用的に用いられている cts/cm^3 をとる)、 η は体積効率、 α, β は砥粒の状態で決まる定数である。また、加工硬化した金属のせん断降伏強さ τ_s は $(HV)_w/6$ に等しい³⁾。

$$p_w = 1.08(HV)_w = 4.58 \{E_w \cdot (E_{er})_w\}^{1/2} \quad (10)$$

$E_w, (E_{er})_w$ は被削材のヤング率と弾性破壊エネルギーである。式(9)と(10)を式(8)に代入する。

$$V = 0.113 \phi^{5/4} L \eta^{1/4} A P^{5/4} \left(\frac{d_0}{r} \right)^{3/4}$$

$$\left\{ \frac{1}{C(1+\alpha d_0 \beta)} \right\}^{1/4} Q^{-5/4} (E_b)^{-5/8} (E_{ef})_b^{-5/8} \quad (11)$$

Vは研削能率 δ (cm³/min)に換算できる。

2.2 砥石損耗量の解析

突起が結合剤を引っかくとした場合、式(4)の q_n は結合剤の塑性降伏応力 p_n に関係する。ぜい性材料の破壊挙動を決定する式の1つとして、 $T = 4\sigma_t / \tau_v$ が提唱されている⁷⁾。 σ_t は引張り強さ、 τ_v はせん断強さである。 $T > 1$ でせん断破壊、 $T < 1$ で引張りぜい性破壊になるとしている。結合剤の曲げ強さは約40 MPa、せん断強さはHVの1/6として推測すれば、通常の板ガラスで540 MPa⁸⁾である。 T は約0.3となり、マクロ的にはぜい性破壊する。しかし、ダイヤモンド砥石の場合、低融点フリットを使用し、 τ_v は小さく思われること、ミクロ的には塑性流動により流れ形切りくずの生成や割れの無いヌープ圧痕の生成も報告されている⁹⁾。突起で結合剤を引っかく程度の破壊を問題にする場合、第1近似として結合剤はせん断変形により破壊するとして良いのではなからうか。

式(10)の関係が結合剤についても成立するとし、突起は最大高さ粗さ R_{max} の間に平均的に考えて、 ∇ の高さの差毎に1個存在すると仮定し、砥石損耗量 U を次式で与える。

$$U = 0.113 (1-\phi)^{5/4} B \Omega^{1/4} A P^{5/4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^{3/4} \left\{ \frac{1}{D(1+\gamma d_c \varepsilon)} \right\}^{1/4} (E_b)^{-5/8} (E_{ef})_b^{-5/8} \quad (12)$$

ここで、 B は j 番突起による引っかかり長さ、 d_c は突起の高さ、 D は突起の集中度、 Ω は突起の体積効率、 γ 、 ε は突起の状態で決まる定数である。 E_b と $(E_{ef})_b$ は結合剤のヤング率と弾性破壊エネルギーである。

2.3 研削比の表示

研削比 G は V と U の比で得られる。

$$G = \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^{5/4} \frac{L}{B} \left(\frac{\eta}{\Omega} \right)^{1/4} \left\{ \frac{s}{r} \right\}^{3/4} \left\{ \frac{d_0}{d_c} \right\}^{3/4} \left\{ \frac{D(1+\gamma d_c \varepsilon)}{C(1+\alpha d_0 \beta)} \right\}^{1/4} Q^{-5/4} \left\{ \frac{E_b}{E_w} \right\}^{5/8} \left\{ \frac{(E_{ef})_b}{(E_{ef})_w} \right\}^{5/8} \quad (13)$$

2.4 Qの式

結合剤を粘弾性体とする場合、 i 番砥粒に $d\tau$ のステップ関数 ($F(\tau) = p_{ni}$, $t > 0$) 状の力がかかると

き、時間 t が0以後の砥粒の応答はドハメルの積分より次式で与えられる。

$$x_i = \frac{p_{ni}}{k_i} \{ 1 - e^{-\xi_i \omega_n t} (\cos \omega_d t + \frac{\xi_i \omega_n}{\omega_d} \sin \omega_d t) \}$$

ここで、 k_i 、 ξ_i 、 ω_n ($\equiv \omega_d$) は結合剤のばね定数、粘性減衰比、固有角振動数である。 x_i を式(3)に代入する。

$$p_{ni} = p_{ni} \left\{ 1 + \frac{\pi r p_w}{k_i} [1 - e^{-\xi_i \omega_n t} (\cos \omega_d t + \xi_i \sin \omega_d t)] \right\} \quad (14)$$

右辺の $[\]$ 内が Q_{wi} である。

結合剤を弾性体とする場合、内圧を受ける円筒の弾性変形として砥粒の変位量を求めると次式になる。

$$x_i = \frac{p_{ni}}{\pi d_0} \frac{1+\nu}{E_b}$$

ここで、 ν は結合剤のポアソン比である。式(3)に代入すると、

$$p_{ni} = p_{ni} \left\{ 1 + \frac{r}{d_0} \frac{1+\nu}{E_b} p_w \right\} \quad (15)$$

右辺の $\{ \}$ 内が Q_{ei} である。

2.5 解析よりの推察

フリットを主とした焼結体によるビトリファイドボンドダイヤモンド砥石(以下V.B.D.W.と書く)の研削性能はほとんど検討されておらず、不明な点も多い。そこで、2.で求めた研削比の理論を適用し、V.B.D.W.の性能と諸因子の関係を検討しつつ、また、研削比の理論の適用性を追究しようとする。そのため、解析より得られた諸因子との関係について次の推察を得る。

(1) 被削材のHVが大きいほど、 δ は少なく、 G は小さい。 R_{max} が大きいほど、 U は多く、 G は小さい。

(2) 結合剤の k_i が大きいほど、 Q は小さくなるはずだが、 ξ_i 、 ω_n との関連で Q は決まる。 ξ_i が大きいほど、 Q は大きく、 δ は少なくなると思われる。 E_b 、 $(E_{ef})_b$ が大きいほど、 U は少なく、 G は大きくなる。

(3) 砥粒がもろいほど、小さい r のため δ は大きくなるが、 U も多くなる。 G は小さくなる。

(4) 粒度は ϕ に無関係であるので d_0 が大きいほど、 δ は多く、 $R_{max}(d_c)$ は大きくなるゆえ U も多くなる。 G は $(E_{ef})_b$ に依存する。

(5) 集中度が大きくなると、 ϕ が大きくなり、 δ は多く、 U は少ない。結果として G は大きくなる。

以後、実測値は δ_{exp} で、推定値は δ_{theo} で表す。

3. 試料と実験方法

3.1 砥石の作製と研削実験の方法

V.B.D.W.の作製に用いた砥粒, セラミックス粉末と焼結条件などを表1に示す. ダイヤモンド砥粒は昭和電工製SDD-M300と-M100で, 前者は粘く, 後者は脆い. 砥粒と粉末を詰め, 砥石を圧縮成形する. $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で加熱し, 規定温度で一定時間保持する.

Table 1 Specification of grinding wheel

Size of wheel	$\phi 40 \times 10 \times \phi 10$ (1A1 type) $\phi 100 \times 5 \times \phi 80$ (6A2 type)
Grain	a: SDD-M100 b: SDD-M300
Size of grain	#100/120, #140/170, #230/270 #325/400, #1000
Concentration	50, 75, 100, 150, 200
Ceramic powder for bond	Kaolinite, Frit Alkali carbonates
Sintering temperature	850 $^{\circ}\text{C}$
Sintering hour	180 min

二種類の研削実験を行った. 研削性能とフリット含有量の関連性を追究する実験で, 内面研削盤を用い, 砥石は $\phi 40 \times 10 \times \phi 10$ の1A1型(ダイヤ層2mm)とした. 34.9m/s で回転する砥石に0.98Nの負荷で超硬合金P10を外周面に押し付けた. このときの研削条件に関する各定数は以下のである.

$L=20.94 \times 10^4 \text{cm}/\text{min}$, $B=10^3 \text{cm}/\text{min}$, $\eta=\Omega=0.3$, $A=0.18 \text{cm}^2$, $P=54.5 \text{kPa}$, $r=0.018 \text{mm}$, $s=10^{-3} \text{mm}$, $\alpha=\gamma=140$, $\beta=\varepsilon=2.12$, $E_s=451 \text{GPa}$, $(E_{\text{eff}})_0=1.63 \times 10^{-3} \text{J}/\text{mm}^3$.

他は研削性能と粒度, 集中度の関連性を追究する実験で, 工具研削盤を用いた. 砥石は $\phi 100 \times 5 \times \phi 80$ (ダイヤ層1mm)の6A2型である. 12.8m/s で回転する砥石に2.79Nの負荷でP10を側面に押し付けた. このときの研削条件に関する定数は以下のである.

$L=7.68 \times 10^4 \text{cm}/\text{min}$, $B=815 \text{cm}/\text{min}$, $P=0.155 \text{MPa}$ で, 他は前記と同じ値とした. いずれも研削面積は $3\text{mm} \times 6\text{mm}$ であり, 研削油剤は用いていない. ツルーイング, ドレッシングはGC砥石により行う. 一定時間後の研削量や砥石損耗量を測り, 研削比を計算する.

3.2 結合剤の特性

結合剤(砥粒を含む焼結体)の機械的性質を知るため島津オートグラフDSS-5000を用い, 四点曲げ試験を行った. 曲げ荷重と変形量を測定し, 曲げ応力 σ_b , 単位体積の破壊に要するエネルギーを表す弾性破壊エネルギー $(E_{\text{eff}})_b$, 弾性係数 E_b , ばね定数 k_b などを計算する. なお, 曲げ試験片の2本はダイヤモンド砥粒を, 18本はGC砥粒を用いた. 前者を用いた結合剤の機械的性質は後者のそれよりもやや大きかったが, ばらつきの範囲内であった. 曲げ試験片を片持ちはりとし, 先端に小型加速度計を取り付ける. 自由落下するハン

マの衝突後, 粘性減衰曲線をデジタルメモリーに記録する. これより結合剤の粘性減衰比 δ_b を実験的推定法⁽¹⁾より計算する. 測定した物性値は研削性能と諸因子の関連性を追究する各項目で提示する.

4. 実験結果と考察

4.1 性能と結合剤のQ値の関連性

ここでは研削状態における結合剤は粘弾性体か弾性体のどちらに近いかを検討する. いま, フリットの含有量の多少より k_b , δ_b , E_b を変え, Q_{vis} , Q_{el} を計算した. 表2に示すように, フリットの多いとき, k_b , E_b も大きくなるが, 同時に δ_b も大きくなった. 式(14)から Q_{vis} は大きく, 式(15)から Q_{el} は小さくなった. 結果として式(11)の V_{theo} すなわち δ_{theo} は結合剤を粘弾性体とするとき減少し, 弾性体とするとき増加する. 図2に示す実測結果の δ_{exp} はフリット含有量が多くなるとき減少した. 粘弾性体の仮定がより実状に近いと思われる. したがって, 以後の理論計算は Q_{vis} を用いた結果を示す.

Table 2 Measured parameters of bonds influenced by contents of frit

Symbol Frit wt%	$(E_{\text{eff}})_b \cdot 10^{-6}$ J/mm ³	$E_b \cdot 10^2$ xMPa	k_b N/mm	$\delta_b \cdot 10^{-2}$	$\omega_b \cdot 10^4$ xrad/s	Q_{vis}	Q_{el}
0	27.0	9.3	1086	2.65	2.14	1.40	1.60
2	29.5	12.7	1485	4.07	2.07	1.72	1.44
5	30.7	13.7	1573	4.43	2.04	1.83	1.41
10	31.1	14.1	1549	4.80	1.86	1.86	1.39

4.2 性能とフリット含有量の関連性

図2に示すように, フリット含有量を増したところ, δ_{exp} , U_{exp} は減り, G_{exp} は増した. フリットを含有させることにより, 砥粒と結合剤成分の親和性を高めることができる⁽¹¹⁾. 結合剤の焼結に際し, 微小な気孔をなくす. 粘弾性に富む砥石になる. 式(11)で Q_{vis} は大きくなり, δ_{theo} は減少する. しかし, $(E_{\text{eff}})_b$ は大きく, 式(12)の U_{theo} は減少することより, 式(13)の G_{theo} は大きくなる. 実測値は(2)の推察に一致する.

なお, U の推定値は実測値の約20倍になっている. 理論ではすべての突起が結合剤を引っかくとしており, 実際の研削状態と掛けはなれていることによると思われる. G の推定値と実測値の差は U のそれによる.

4.3 性能と砥粒種類の関連性

一定量の砥粒を鋼球と共にカプセルに入れ, 一定時間揺動したのち, ふるいに残った量の多少で砥粒のじんを測定したSDD-M300のタフネス特性値はSDD-M100のその約2倍となった. 研削性能の理論で砥粒の強度, 破砕性を示す因子は入らなかった. しかし, 式(11)

Fig.2 Influence of content of frit

Fig.3 Influence of size of abrasive grain

Fig.4 Dependence of δ , U and G on $(E_{ef})_b$

の δ_{theo} は砥粒の体積効率 η に比例、砥粒先端の鋭さ r に反比例し、破砕性に富む砥粒ほど δ_{theo} は多くはなすである。式(12)の U_{theo} は砥粒の摩耗を考慮していないが、砥粒が破砕しやすいほど U_{theo} は多いと思われる。したがって、式(13)の G_{theo} は小さくなると思われる。なお、砥粒の違いにより E_{ef} 、 $(E_{ef})_b$ に差は無かった。図2の実測値は(3)の推察と一致した。SDD-M100は破砕しやすいゆえ δ_{theo} は大きく、 U_{theo} は多く、結果として G_{theo} は小さくなった。

4.4 性能と粒度の関連性

式(11)、(12)、(13)に d_g の影響が直接、間接に入る。表3より計算した δ_{theo} は d_g の、 U_{theo} は d_g と共に大きくなる $R_{theo}(d_g)$ の3/4乗に比例する。

Table 3 Measured parameters of bonds influenced by sizes of grain

Symbol Mesh	d_g mm	$(E_{ef})_b \cdot 10^{-6}$ xJ/mm ³	$E_{ef} \cdot 10^3$ xMPa	k N/mm	$\xi \cdot 10^{-2}$	$\omega_n \cdot 10^4$ xrad/s	Q_{ef}
#100	0.15	24.5	8.16	1053	2.40	1.61	1.57
#140	0.10	25.2	10.09	1305	3.51	1.78	1.53
#230	0.065	30.9	10.78	1549	4.80	2.00	1.62
#325	0.050	31.7	11.77	1668	5.29	1.95	1.87
#1000	0.020	48.5	10.07	1490	2.34	1.79	1.57

図3に示すように、 d_g が大きくなるほど、 δ_{theo} は多く、 d_g も大きくなるので U_{theo} は多く、 G_{theo} は減少した。理論解析による(4)の推察に一致した。しかし、#1000の砥粒では逆に δ_{exp} は増加した。一定の集中度の下で d_g の小さくなるほど焼結体と砥粒の反応は著しく、 $(E_{ef})_b$ は増加した¹¹⁾。しかし、 d_g が極端に小さい場合砥粒を焼結する層が薄くなり、強さが減る。逆に、 d_g が大きい場合破壊のクラックは焼結体の中を伝わり、砥粒により阻害されない。強さが減る。それ故、

このような結合剤の強度特性が研削性能に影響を及ぼしたといえる。そこで、結合剤の $(E_{ef})_b$ で実測値と推定値を整理した結果を図4に示す。 d_g が小さくなるほど $(E_{ef})_b$ が大きくなり、 δ_{exp} は小さく、フリットの影響と同じ傾向となった。実測値は推定値と同じ傾向を示すが、砥粒径が $20 \mu m$ (#1000)になると $(E_{ef})_b$ は大きく、結合剤は剛体に近づく。したがって、式(11)の Q_{ef} は1に近づき、砥粒の引き込みがなく、研削性能率は逆に増加したと思われる。

図3で d_g が大きくなるほど U_{theo} は多くなった。(4)の推察に一致した。図4に示すように、 $(E_{ef})_b$ が小さくなるゆえ、 U_{exp} も多い。 U の実測値は推定値の10倍となっているが、傾向は一致している。実測値の小さい理由はダイヤモンド砥粒が結合剤の引っかきを阻害するように働くからで、理論式の中に定量的に入れることができなかったのも1つの理由と思われる。したがって、 G の実測値は推定値より大きい。 $(E_{ef})_b$ が増すことより U_{exp} が減り、 G_{exp} が増したといえる。

4.5 性能と集中度の関連性

式(11)において次の関係が考えられる。1つには C が増すと δ_{theo} は減る。2つには砥粒切れ刃数は増しても1個当りの切込み深さが減り、 δ_{theo} は減る。3つには砥粒切れ刃数が増すと ϕ が増加する。 ϕ の指数は1.25で δ_{theo} は増す。表4に示すように、3つの要因の内 C の変化により ϕ のそれは大きく、図5に示すように、 δ_{exp} 、 δ_{theo} とも増加した。 C の増加と共に砥粒と結合剤の反応が増し、 $(E_{ef})_b$ は増加した¹¹⁾が、 C が8.8で逆に減少した。砥粒間隔が短く、焼結体の層が薄く、強さが減少したことによる。したがって、 C

Table 4 Measured parameters of bonds influenced by concentrations

Symbol C	ϕ	$(E_{ef})_b \cdot 10^{-6}$ xJ/mm ³	$E_b \cdot 10^3$ xMPa	k _i N/mm	$\xi_i \cdot 10^{-2}$	$\omega_n \cdot 10^4$ xrad/s	Q _{ef}
2.2	0.188	28.0	8.86	1381	5.82	0.94	1.55
3.3	0.281	30.0	8.97	1460	5.31	1.60	1.52
4.4	0.375	30.9	10.78	1549	4.80	2.00	1.62
6.6	0.562	45.0	11.86	1979	3.10	2.01	1.77
8.8	0.750	35.3	12.70	2040	1.58	2.06	1.55

が増すと、6.6までUの実測値は減少し、8.8で再び増加した。式(12)の U_{theo} において集中度との関連性はないが、 $(1-\phi)$ が小さくなること、 $(E_{ef})_b$ が大きくなることより、Cが増すと、Uの推定値は減少する。Cの8.8で実測値の傾向と異なるのは ϕ の影響が大きき、6.6の U_{exp} よりも小さくなった。Cが増すことより δ_{exp} は増し、 U_{exp} は減った。図5に示すように、Gの推定値、実測値は増し、よく似た傾向を示した。(5)の推察と一致している。

4.6 弾性破壊エネルギーによる性能の検証

研削性能に及ぼすフリットの影響を $(E_{ef})_b$ で整理した結果を図6に示す。 $(E_{ef})_b$ の増加と共に δ_{exp} 、 U_{exp} の実測値は減少し、 G_{exp} は増加した。式(11)で δ_{theo} と $(E_{ef})_b$ の直接関係はないが、フリットが多くなると、 $(E_{ef})_b$ は大きくなる。Q_{ef}も大きくなり、式(11)より δ_{theo} は減少する。1つは砥粒の保持能力が大きき、砥粒が平坦化しやすいのか、他は粘性に富むことより負荷により砥粒の引き込みが大きくなったものかもしれない。 $(E_{ef})_b$ の増加により式(12)から U_{theo} は減少し、式(13)から G_{theo} は増加する。(2)の推察と実測値は一致した。同様の結果は図4においても見られた。 $(E_{ef})_b$ は研削性能を評価する1つの因子と考えられる。

5. 結 論

圧力切込み方式における研削量を砥粒の引っかかり作用、砥石損耗量を仕上面突起、切りくず粒子の同様な引っかかり作用として理論解析し、得られる推察を無気孔ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石を用いて実験から検証した結果、次の結論を得ることができる。

研削比の理論に関して：

- (1) 研削比の理論に被削材と結合剤の縦弾性係数、弾性破壊エネルギー、結合剤の粘弾性に関する物性値、砥粒の粒度、集中度の因子が含まれる。
- (2) 理論による推定値は実験値とほぼ同じ傾向を示すが、一部適用の限界が見られた。

Fig.5 Influence of concentration

Fig.6 Dependence of δ , U and G on $(E_{ef})_b$

無気孔ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石に関して：

- (3) フリット含有の多いほど、砥粒径が小さいほど、集中度が小さいほど研削能率は低い。
- (4) フリット含有の多いほど、砥粒径が小さいほど、集中度が大きいほど結合剤の弾性破壊エネルギーは大きく、砥石損耗量が少なく、研削比は大きい。

参 考 文 献

- 1) L.D.Marinescu, B.Dimitov, Z.Gheorghin and Al. Grigorescu: Some Aspects Concerning Wear and Tool Life of Diamond Wheels, Ann. CIRP, 32,1,(1983)251.
- 2) P.J.Gielisse, W.F.Mathewson, J.A.Martis and E.Rattern: Ceramic Finishing with Diamond (part1), Ceramic Industry, February(1968).
- 3) 井川直哉: ダイヤモンド砥石の研削性能に関する研究, 大阪大学博士論文 (1964)86.
- 4) 精密工学会編: ファインセラミックス-硬ぜい材料の精密機械加工, マシニスト出版(1984)276.
- 5) 精密工学会 硬ぜい材料の精密加工に関する調査研究分科会編: 研削工学, オーム社 (1987)159.
- 6) F.P.Bowden and D.Tabor: The Friction and Lubrication of Solids, Vol.1, The Clarendon Press, Oxford (1950)324.
- 7) 吉川弘之: 砥粒の機械的性質と切れ刃形成, 精密機械, 31,11(1965)907.
- 8) 泉谷徹郎: 光学材料, 光学技術, 10(1977)63.
- 9) 吉川昌範編: ダイヤモンドツール, 日経技術図書(1987)359.
- 10) 竹内洋一郎, 柳沢 猛, 沖津昭慶: 機械力学, 朝倉書店 (1984)69.
- 11) 田中武司, 井川直哉, 上野信幸, 岡田昭次郎: 結合剤の強さについての一考察, 無気孔ビトリファイドダイヤモンド砥石の場合, 砥粒加工学会会報, 30,234(1986)25.