

# ファインセラミックスの砥粒加工における 切りくず生成エネルギー\*

上田 隆 司\*\* 杉田 忠 彰\*\*

Chip Formation Energy in Grinding, Honing and Superfinishing of Ceramics

Takashi UEDA and Tadaaki SUGITA

The chip formation energy, which is consumed only to make chips by brittle fracture in grinding, honing and superfinishing, is investigated theoretically and experimentally. The following model is assumed that the surface of the work material consists of grains in shape of a cube and the brittle fracture takes place at the grain boundary. Work materials used in experiments are  $Al_2O_3$ , SiC and  $Si_3N_4$  which are sintered under atmospheric pressure, and  $SiO_2$ . The scratching test is also carried out in order to obtain the chip formation energy of ceramic materials, and the strong relation is observed between the chip formation energy and the energy release rate of the ceramic. The chip formation energy obtained from experiments are compared with that from the scratching test.

**Key words**: chip formation energy, energy release rate, ceramic grinding, ceramic honing, ceramic superfinishing, scratching test

## 1. 緒 言

著者らはこれまでホーニング、超仕上などの精密加工法をとりあげ、セラミックスを能率よく加工するための砥石の選定、加工条件の設定などについて詳細に検討を加えてきた<sup>1)~3)</sup>。また、研削・ホーニング・超仕上におけるセラミックスの被削性についても統一的に評価する方法について検討してきた<sup>4)</sup>。それによれば、効率的な材料除去はぜい性破壊の集積によって行われるが、砥粒切れ刃の切込みが小さいなど加工条件が過酷でない場合は、塑性変形型の切りくずを生成することになり、良好な加工表面は得られるが、除去される切りくずの量は極端に減少してしまう。そして、一般の加工はこの両者の混合した状態で行われ、同じ加工材料でも加工法によってこの比率が異なるためその被削性に大きな差を生じることになる。

これらの切りくず除去形態の変化は、砥粒をモデル化した1個の球状圧子でセラミックス表面を引っかいた場合や、球状圧子をセラミックスに押し込んだ場合の材料の挙動を調べることにより定性的に検討されてきている。すなわち、変形が塑性内にとどまるか、またはき裂が発生して進展するかで評価することができ

る<sup>5)</sup>。ところが、実際の加工現象を扱う場合、セラミックスは一般に結晶粒子の焼結集合体で結晶粒界において性質が大きく異なっていること、種々の形状をした多数の砥粒が加工に関与すること、などからこのような単純化したモデルでは不十分であり、別の見方に立つ新たなモデルで検討する必要がある。

そこで本研究では、まず加工材料を結晶粒の集合体にモデル化して考え、その結晶粒が砥粒の切削作用によって確率的に粒界で破壊して切りくずを生成してゆくと考えることにより、比加工エネルギー  $k_s$  の中から切りくずを生成するために要する比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  を求めることにした。次に、引っかき試験により材料固有の物性値と考えられる切りくず生成エネルギーを求め、先の  $k_{sch}$  の値の妥当性について検討するとともに、 $k_s$  の中で  $k_{sch}$  の占める割合についても調べてみた。さらに、ダイヤモンド工具とセラミックスの間の摩擦係数についても検討した。

## 2. 切りくず生成エネルギー

一般に、砥粒が切りくずを除去するのに必要な加工エネルギーを  $u$  とすると、逃げ面での摩擦で消費される摩擦エネルギー  $u_s$ 、およびそれ以外の切削に消費されるエネルギー  $u_c$  を用いて、

$$u = u_c + u_s \quad (1)$$

\* 原稿受付 平成4年4月27日

\*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

と表すことができる<sup>6)</sup>。また、 $u_c$ は実際に切りくずを生成するためのエネルギー  $u_{ch}$  と掘り起こしに使われるエネルギー  $u_{pl}$  により

$$u_c = u_{ch} + u_{pl} \quad (2)$$

と表すことができる。セラミックス加工の場合、切りくずの大半はぜい性破壊によって生じると考えられることから、 $u_{ch}$  はぜい性破壊に必要なエネルギーとし、塑性変形型の切りくず生成で消費されるエネルギーは  $u_{pl}$  に含めることにすると、式 (1), (2) より

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_s \quad (3)$$

と表すことができるが、取扱いをさらに簡単にするため、切りくず生成に寄与しないエネルギー  $u_{pl}$  を  $u_s$  に含めて考えることにする。すると、 $u$  を生成された切りくず体積で除することにより、単位体積の切りくずを除去するために必要なエネルギーを表す比加工エネルギー  $k_s$  が求まり

$$k_s = k_{sch} + k_{ss} \quad (4)$$

となる。ここで、 $k_{sch}$  は単位体積の切りくずを生成するために必要なエネルギーを表す比切りくず生成エネルギーであり、 $k_s$  を比摩擦エネルギーと呼ぶことにする。

すなわち、セラミックスを破壊して単位体積の切りくずを生成するために必要な真のエネルギーは比加工エネルギー  $k_s$  のうちの  $k_{sch}$  であり、ここでは  $k_s$  から  $k_{sch}$  を分ける方法を考えてみる。

### 2.1 切りくず除去の確率的取扱い

切りくず除去過程を一種の確率的破壊現象とみなして、加工材料が切りくずとして除去される確率を求めることにする。ここでは、ホーニング加工の場合を扱うことにし、他の2つの加工法に対しては得られた結果を適用することにする。

いま、 $n$ 本の砥石の内1本の砥石が円筒面を加工している場合を考え、円筒面を軸方向に展開して砥石が加工する様子を示すものが図1である。

解析に先立ち次のような仮定を置くことにする。

- (1) 加工材料の加工表面は図1に示すように矩形状の粒子が集積して形成されているものとし、これらの粒子間の境界を粒界とみなす。
- (2) 切りくずは粒界での破壊で生じるとし、体積の少ない塑性変形型の切りくずは無視する。
- (3) 粒子は粒界で支持されており、砥粒切れ刃によって仕事(エネルギー)を受けたとき粒界で確率的に破壊して切りくずとなる。

図1において、微小時間  $\Delta T$  に砥石がはく加工物表面積は

$$l_e V \Delta T$$

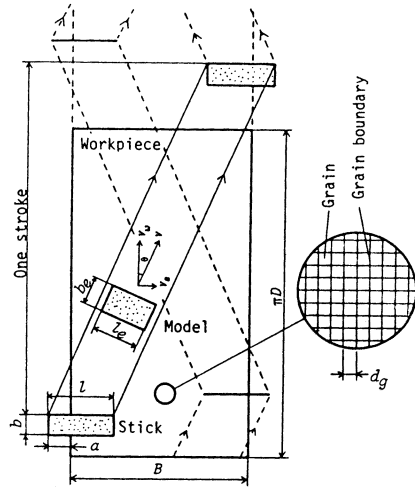


Fig. 1 Model of workpiece surface in honing

ただし、

$$l_e = \frac{1}{B-l+2a} \{ l(B-l+2a) - a^2 \} \cos \theta$$

その面積中にある1辺  $d_g$  の粒子の個数  $n_g$  は

$$n_g = \frac{l_e V \Delta T}{d_g^2} \quad (5)$$

このとき、砥石の切削抵抗を  $F_t$  とすると、砥石のなす仕事は

$$F_t V \Delta T$$

したがって、1個の粒子に加えられる仕事  $g'$  は

$$g' = \frac{F_t d_g^2}{l_e}$$

ここで、砥石作業面における切れ刃砥粒数、および加工表面の凹凸を考慮し、真に砥石切れ刃と接している粒子の割合を  $\gamma$  で表すと\*、切れ刃に接して仕事を受けている粒子数は  $\gamma n_g$  となる。したがって、実際に1個の粒子が受けている仕事  $g$  は

$$g = \frac{F_t d_g^2}{\gamma l_e} \quad (6)$$

となる。

一方、仕事  $g$  が加えられたとき、1個の粒子が粒界で破壊する確率がワイブル確率関数

$$F(g) = 1 - \exp\{- (g/g_0)^m \} \quad (7)$$

で与えられたとすると、砥石が時間  $\Delta T$  の間加工することによって粒界で破壊される粒子数は

\* 結晶粒が切りくずとして除去された跡など実際の加工表面には凹凸があるが、切りくず生成機構を考えるうえでは砥石作業面の切れ刃の分布状態との相対関係のみが重要である。そこで、このモデルでは加工表面は常に結晶粒が一樣に配列しているものとし、凹凸の影響は  $\gamma$  に含ませて考えることにする。

$$\gamma n_g F(g)$$

体積になおすと、切削量  $\Delta D$  が求まり、

$$\Delta D = \gamma n_g F(g) d_g^3 \quad (8)$$

一方、砥石切込み深さを  $\bar{d}$  とすると

$$\Delta D = l_e V \Delta T \bar{d} \quad (9)$$

式(8),(9)より、

$$F(g) = \frac{\bar{d}}{\gamma d_g} \quad (10)$$

が得られる。

ただし、

$$\bar{d} = \frac{\pi DB(B-l+2a)}{nV\{l(B-l+2a)-a^2\}\cos\theta} \frac{d(\delta R)}{d\tau}$$

砥石と加工物との接触面積の割合  $\gamma$ 、および粒子の大きさ  $d_g$  を仮定することにより、式(6)で与えられる  $g$  をワイブル確率紙の横軸、式(10)で与えられる  $F(g)$  を縦軸にプロットすることにより  $m$  と  $g_0$  を決定することができ、粒子が除去される確率を表す確率関数が求まる。

## 2.2 切りくず生成エネルギー、摩擦係数

切れ刃より粒子に仕事  $g$  を加えたとき、式(7)で表される割合の粒子が破壊して切りくずとなる。すなわち、破壊した粒子に加えられた仕事は切りくず生成に寄与し、他の仕事は切りくず生成に寄与できなかったとの見方もできる。したがって、全消費エネルギー  $U$  は切りくず生成に寄与したエネルギー  $U_c$  と寄与できなかったエネルギー  $U_s$  に分けることができ、

$$\begin{aligned} U &= U_c + U_s \\ &= UF(g) + U\{1-F(g)\} \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。このエネルギーを切削量で除すると、単位体積の切りくずを生成するために必要な比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$ 、および単位体積の切りくずを生成する際に消費される比摩擦エネルギー  $k_{ss}$  を求めることができ、

$$k_{sch} = k_s F(g) \quad (12)$$

$$k_{ss} = k_s \{1-F(g)\} \quad (13)$$

で表される\*。

ここで、砥石に作用する砥石押付け力を  $F_n$ 、砥石と加工物の間の摩擦係数を  $\mu$  とすると、近似的に

$$U_s = F_n \mu V \Delta T$$

一方、

\*  $F(g)$  が大きくなって破壊確率が大きくなればそれだけ大きな割合のエネルギーが切りくず生成に使われ、摩擦エネルギーの割合が減少することになる。このことは図5において、 $\bar{d}$  が大きくなると  $k_s$  が小さくなることから明らかである。

Table 1 Characteristics of ceramics

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>
Density g/cm <sup>3</sup>	3.70	3.12	3.26	2.21
Hardness HV	1580	2520	1870	700
Bending strength MPa	343	441	735	60
Fracture toughness $K_{Ic}$ MN/m <sup>3/2</sup>	3.86	4.81	6.02	0.7
Elastic modulus $E$ GPa	370	430	284	80
Poisson's ratio $\nu$	0.21	0.15	0.26	0.17
Modulus of resilience* MOR J/m <sup>3</sup>	150×10 <sup>3</sup>	226×10 <sup>3</sup>	951×10 <sup>3</sup>	23×10 <sup>3</sup>
Energy release rate $G_c$ J/m <sup>2</sup>	38.5	52.6	119	5.95

\* Bending strength is used.

Table 2 Experimental conditions

Grinding speed $V$ m/min	1530
Work speed $v$ m/min	10
Feed $f$ mm/rev	5
Over-run $a$ (= $b/3$ ) mm	8
Depth of cut $t$ $\mu$ m	2.5-20
Honing speed $V$ m/min	30
Crosshatch angle $2\theta$ deg	20
Stroke $S$ mm	70
Over-run $a$ mm	10
Finishing speed $V$ m/min	40
Frequency $N$ cpm	900
Amplitude $a$ mm	1.6

$$U_s = \Delta D k_{ss}$$

より、

$$\mu = \frac{l_e \bar{d}}{F_n} k_s \{1-F(g)\} \quad (14)$$

となり、摩擦係数  $\mu$  を求めることができる。

超仕上に対しても  $l_e = l$  と置くことによりホーニングの結果をそのまま適用することができる。一方、研削加工に対しては同様の考え方を適用することにより

$$g = \frac{F_t d_g^2}{\gamma b} \frac{V+v}{v} \quad (15)$$

$$F(g) = \frac{\bar{t}}{\gamma d_g} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{b \bar{t} v}{F_n (V+v)} k_s \{1-F(g)\} \quad (17)$$

となる。ただし、 $v$ :加工物回転速度、 $V$ :砥石回転速度、 $b$ :砥石幅、 $\bar{t}$ :静止砥石切込み深さで

$$\bar{t} = \frac{\pi B D t}{b(B-b/3)} \frac{f}{v}$$

## 2.3 実験結果への適用

表1に示すセラミックスを表2の加工条件のもとで加工した。砥石の特性値、および加工物の形状を表3,4に示す。得られた実験結果に対して式(6),(10),(15),(16)を用いて  $g$  および  $F(g)$  を求め、ワイブル

**Table 3** Characteristics of wheel, sticks and stones

	Grinding wheel	Honing stick	Superfinishing stone
Bond	Resin	Metal	Metal
Grain type	CSGII	MBG-660	Micron powder
Grain size	#60/80	# 140/170	# 1 000
Concentration	80	50, 100	100
Diameter $d$ mm	256	—	—
Length $l$ mm	—	50	20
Width $b$ mm	24	3	3

**Table 4** Size of workpiece

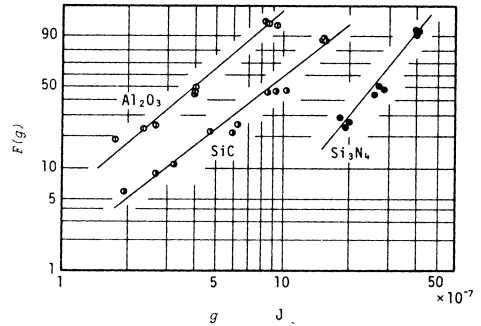
	Grinding	Honing	Superfinishing
Diameter $D$ mm	41-46	41-46	45
Length (Width) $B$ mm	100	100	20

確率紙にプロットした結果が図2である\*。いずれの材料に対しても、またいずれの加工法に対しても実験結果は直線に載っており、切りくず生成過程を式(7)の形で表すことができることがわかる。これらの結果より傾き  $m$ 、および  $g_0$  を求めた結果をまとめたものが表5である。一般に、 $m$  の値は研削で大きく、ホーニング、超仕上げと小さくなっている。また、図2(b)のホーニング加工の場合、アルミナで破壊確率  $F(g)$  が大きく、窒化けい素、炭化けい素の順に小さくなっており、炭化けい素では加工エネルギーの大部分が摩擦に消費されていることがわかる。一方、図2(a)の研削は多量の仕事を加工表面に加えることによって加工能率を向上させているといえる。

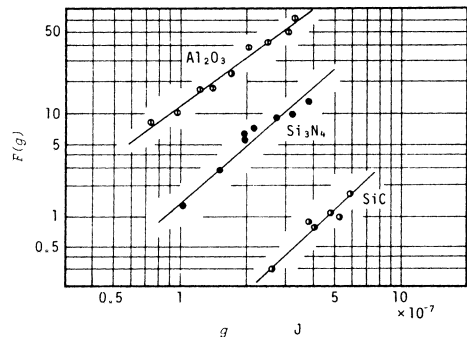
これら破壊確率を用いて式(12)より比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$ 、および式(14)、(17)より摩擦係数  $\mu$  を求めた結果が表6である。同じ材料でも加工法により多少の差はあるが、オーダ的には近い値といえる。これらの値の妥当性は、次の節の引っかかり試験で求まる切りくず生成エネルギーと比較することによって検討することにする。

**3. 引っかかりによる切りくず生成エネルギー**

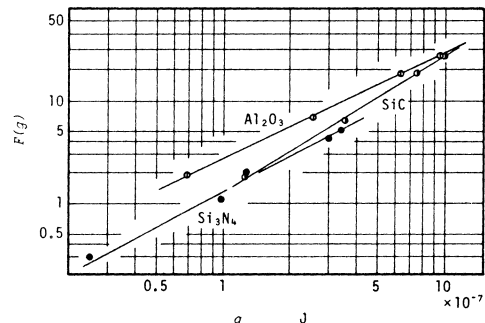
切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  は一種の材料固有の物性値とも考えられる。そこで、砥粒切れ刃による切りくず生成状態に近い状態での  $k_{sch}$  を求めるため、引っかかり試験を行った。これにより、ダイヤモンド工



(a) Grinding



(b) Honing



(c) Superfinishing

**Fig. 2** Weibull distribution function of  $g$

**Table 5** Values of Weibull's parameter

		Grinding	Honing	Superfinishing
$m$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.85	1.55	1.05
	SiC	1.70	2.05	1.35
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2.70	1.85	1.15
$g_0$ J	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.71 × 10 <sup>-7</sup>	3.7 × 10 <sup>-7</sup>	29.4 × 10 <sup>-7</sup>
	SiC	10.9 × 10 <sup>-7</sup>	43.1 × 10 <sup>-7</sup>	24.6 × 10 <sup>-7</sup>
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	29.3 × 10 <sup>-7</sup>	9.93 × 10 <sup>-7</sup>	42.5 × 10 <sup>-7</sup>

具との間の摩擦係数も同時に求めることができる。

**3.1 実験方法**

セラミックスは加工実験に供した材料と同一ロットで常圧焼結した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> および SiO<sub>2</sub> を用いている (表1)。実験装置、実験条件は文献1) と同

\*  $d_g, \gamma$  の値について：切りくずの大きさの測定結果や結晶粒の大きさなどから<sup>1)</sup>、いずれの材料に対しても  $d_g = 5 \mu\text{m}$  とした。経験に基づき、集中度50の砥石でホーニングした SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の場合を  $\gamma = 0.05$  とし、集中度100の砥石を用いた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で  $\gamma = 0.1$ 、超仕上げでは  $\gamma = 0.07$ 、研削では加工物回転速度に対して砥石回転速度が非常に大きいため  $\gamma = 1$  とした。

Table 6 Values of  $k_{sch}$  and  $\mu$

	Ceramic	Machining			Scratching
		Grinding	Honing	Superfinishing	
$k_{sch}$ J/mm <sup>3</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.58	1.52	3.96	1.89
	SiC	6.96	3.48	4.64	2.81
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	24.5	2.85	2.36	5.85
	SiO <sub>2</sub>	—	—	—	0.60
$\mu$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.10	0.27	0.33
	SiC	0.08	0.12	0.35	0.33
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.05	0.06	0.16	0.27
	SiO <sub>2</sub>	—	—	—	0.25

様であり、一定荷重を加えた円すい形ダイヤモンド工具（ロックウェル硬度計用圧子，先端角120°，ノーズ半径200 μm）で、引っかいたときの引っかけ抵抗接線分力  $f_t$ ，垂直分力  $f_n$  を測定した。引っかけ速度は1 mm/s である。

3.2  $k_{sch}$ ,  $\mu$  の導出

距離  $L_s$  引っかいたとき消費されるエネルギーを  $u$  とすると、

$$u = f_t L_s$$

で表される。このとき、引っかけによって除去された切りくずの体積は、引っかけ痕の平均断面積を  $A$  とすると  $AL_s$  と表されることから、比加工エネルギーに相当する比引っかけエネルギー  $k_s$  は

$$k_s = \frac{u}{AL_s} = \frac{f_t}{A}$$

で求めることができる。

一方、引っかけも一種の加工と考えると、 $u$  に関して2節と同様の考え方を適用することができる。そこで、 $u_{ch}$  を引っかけにおける切りくず生成エネルギーとし、このとき掘り起こしや塑性変形のために費やされるエネルギーを摩擦に費やされるエネルギーに含めて  $u_s$  と表すと

$$u = u_{ch} + u_s \tag{18}$$

と表すことができる。

ここで、摩擦抵抗が押付け力  $f_n$  に比例すると仮定すると

$$u_s = \mu f_n L_s \tag{19}$$

と表すことができる。ただし、 $\mu$  は摩擦係数。したがって、単位体積の切りくずを生成するために必要な比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  は

$$k_{sch} = \frac{u_{ch}}{AL_s} = \frac{u - u_s}{AL_s} = \frac{f_t - \mu f_n}{A} \tag{20}$$

で表されることになる。

一方、摩擦係数  $\mu$  は

$$\mu = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{f_t}{f_n} = \frac{f_{t0}}{f_{n0}} \tag{21}$$

で求めることができる。

3.3 測定結果

図3(a) は引っかけ抵抗  $f_t, f_n$  を引っかけ断面積  $A$  で整理した結果である。図において、断面積  $A$  を零に近づけたときの引っかけ抵抗  $f_{t0}, f_{n0}$  を求め、式(21) から  $\mu$  を求めた。その結果を表6に示す。

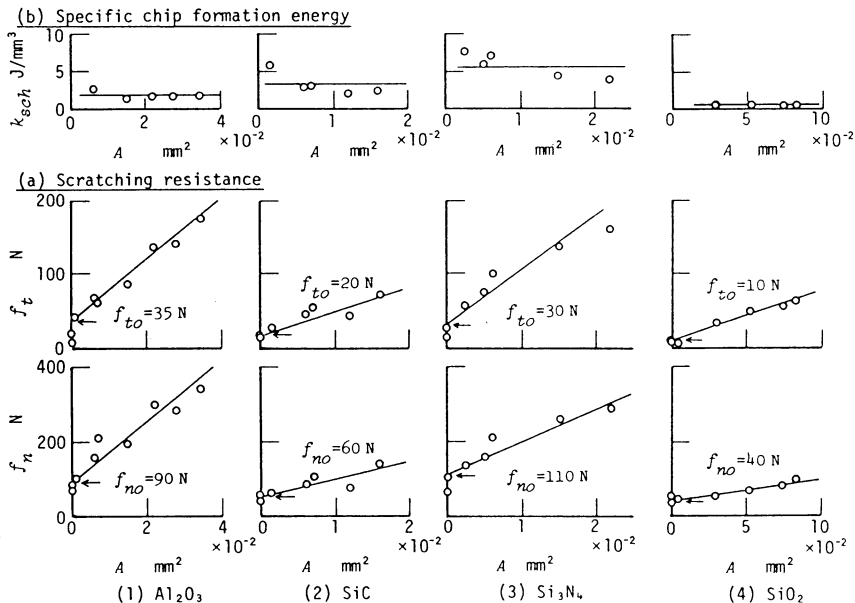


Fig. 3 Scratching test of ceramics with conical diamond

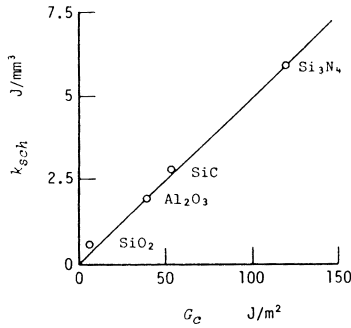


Fig. 4 Relation between  $k_{sch}$  of scratching test and  $G_c$

求めた  $\mu$ , 及び図 3 (a) の結果を式 (20) に代入して  $k_{sch}$  を求めた結果が図 3 (b) である. 図より,  $A$  が変化しても丸印で表す計算値はほぼ一定値となっており, この平均値を実線で表し, 比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  とし表 6 に示す.

#### 4. 検 討

##### 4.1 $k_{sch}$ の比較

表 6 において, 引っかきにより求めた比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  と材料のエネルギー解放率  $G_c$  との関係調べた結果が図 4 である. 両者の間には線形関係が成り立ち,  $G_c$  の大きな材料ほど  $k_{sch}$  が大きくなるのがわかる. また, この関係を使えば  $G_c$  から  $k_{sch}$  の値を推定することも可能と考えられる.

加工における  $k_{sch}$  の値は, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の研削の場合を除き, 引っかきに近い値が求まっている. 加工状態によって  $k_s$  の値は大きく変化するにもかかわらず引っかきの  $k_{sch}$  に近い値が導出できており, 2 節での確率的取扱いが妥当であったと考えることができる.

摩擦係数  $\mu$  は引っかきの場合, 材料間に大きな差はなく, 0.3 に近い値となっている. これに対し, 加工では全体に引っかきより小さくなっている.

##### 4.2 $k_s$ の中で $k_{sch}$ の占める割合

図 5 は一例としてホーニングにおける比加工エネルギー  $k_s$  および引っかきにおける比引っかきエネルギー  $k_s$  を  $\bar{d}$  および  $A$  で整理し\*, 比切りくず生成エネルギー  $k_{sch}$  と比較した結果である. 引っかきの結果は切りくず除去の状態で区別しており, ▲ はぜい性破壊により大量の切りくずが除去された場合を, △ は摩擦が主体となり塑性変形型の少量の切りくずしか除去されなかった場合を表している. 図 5 (a) の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合, 引っかきの ▲ よりも低いエネルギー

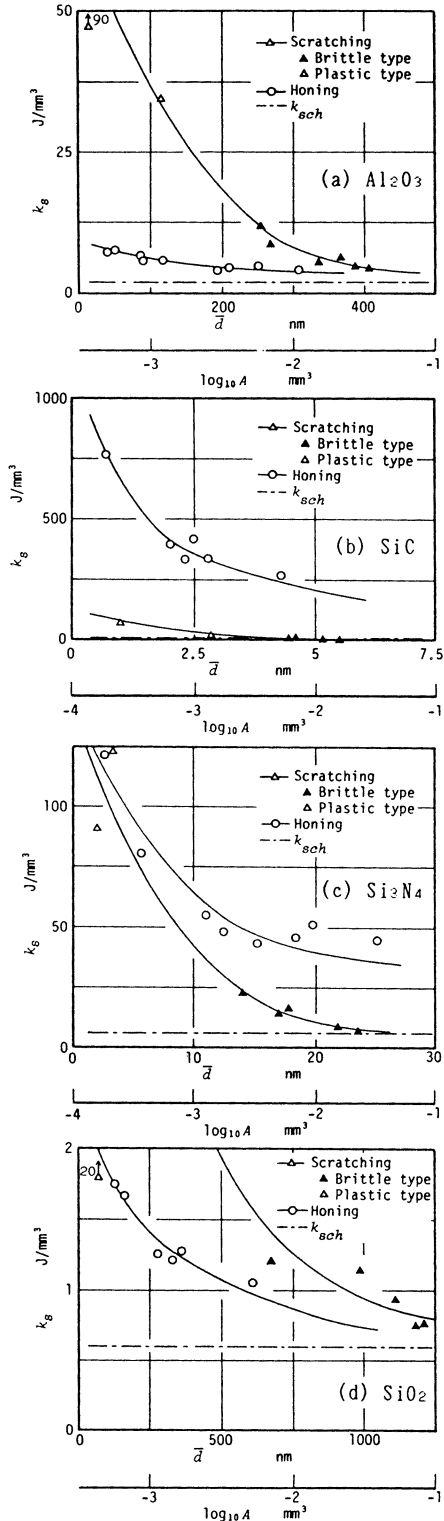


Fig. 5 Comparison of  $k_s$  which are obtained from scratching test and honing

\* 図 5 の横座標において,  $\bar{d}$  と  $A$  の間に関連はなく, 引っかきの  $k_s$  とホーニング加工の  $k_s$  の値を比較しやすいように整理している.

で切りくずが除去されており、ぜい性破壊型の切りくず領域で効率的な加工が行われていることがわかる。 $\bar{d}$ が大きくなると、 $k_{sch}$ の値に近づいていき、摩擦に使われるエネルギーがさらに小さくなってゆく。

図5(b)のSiCになると、 $Al_2O_3$ とは逆に、引っかけの $\Delta$ よりもはるかに大きなエネルギーを消費して加工が行われている。また、 $k_{sch}$ の値も極めて小さく、エネルギーの99%程度が摩擦に消費されている。 $k_{sch}$ の値だけでは加工における材料の被削性の判定がむずかしいといえる。

図5(c)の $Si_3N_4$ では $Al_2O_3$ とSiCの中間の状態にあるが、それでも $\blacktriangle$ よりも大きなエネルギーを消費している。また、 $\bar{d}$ が大きくなっても $k_{sch}$ の6~7倍程度のエネルギーが消費されており、 $Si_3N_4$ の加工でも摩擦に多量のエネルギーが使われている。

図5(d)の $SiO_2$ は $Al_2O_3$ と同様 $\blacktriangle$ とほぼ同程度のエネルギーで加工されており、被削性の良いことがわかる。 $\bar{d}$ が大きくなると $k_{sch}$ に近い値に収束しており、摩擦の占める割合が極めて小さくなっている。

## 5. 結 言

アルミナ、炭化けい素、窒化けい素といった構造用セラミックスの加工表面を結晶粒の集合体にモデル化して切りくず除去過程を確率的に取り扱うことにより、研削・ホーニング・超仕上で加工する場合に切りくずを生成するために必要なエネルギーを求めた。また、引っかけ試験により切りくず生成エネルギーを求め、先の結果と比較検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 各セラミックスの比切りくず生成エネルギーは $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、SiC、 $Si_3N_4$ の順で大きくなり、エネルギー解放率と線形関係にある。
- (2) 研削・ホーニング・超仕上における比切りくず

生成エネルギーは引っかけ試験による値とオーダ的に近い値となり、確率的取扱いが妥当であったと考えることができる。

- (3) 引っかけによるダイヤモンド工具とセラミックスの間の摩擦係数はいずれの材料でもほぼ0.3に近い値となり、加工における摩擦係数はこれよりも小さくなっている。
- (4) ホーニングの場合、被削性のよい $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ では比加工エネルギー $k_s$ のうち比切りくず生成エネルギー $k_{sch}$ の占める割合が大きいが、被削性の悪い $Si_3N_4$ 、SiCでは $k_{sch}$ の占める割合が小さく、特にSiCでは $k_s$ の99%程度が摩擦で消費されている。

終わりに、本研究に協力していただいた大阪大学基礎工学部・花見真司氏、三菱電機(株)・裏匡史氏、および実験材料の提供を受けた(株)ミズホ、日本特殊陶業(株)、日本グリース(株)に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 花見真司, 裏 匡史, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工——被削性と切りくず生成機構, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 1138.
- 2) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上の加工機構に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 57, 538 (1991) 2154.
- 3) 上田隆司, 金曾久佳, 松森 昇, 杉田忠彰: ファインセラミックスの超仕上加工——加工条件と被削性, 精密工学会誌, 57, 7 (1991) 1229.
- 4) 上田隆司, 杉田忠彰: ファインセラミックスの研削・ホーニング・超仕上における被削性の統一的評価, 精密工学会誌, 59, 4 (1993) 予定.
- 5) 田中芳雄: セラミックスの機械的性質と被加工性, ニューセラミックス, 5 (1988) 37.
- 6) S. Malkin and N. H. Cook: The Wear of Grinding Wheels, Part 1 - Attritious Wear, ASME, J. Eng. Ind., 11, (1971) 1120.