方向をそろえた炭化けい素ウィスカ 砥石の開発*

——レジンイド砥石の製作と仕上面粗さ——

山 口 勝 美** 洞 口 巖***

Development of Directionally Aligned SiC Whisker Grinding Wheel
—Manufacturing Process of Resinoid Grinding Wheel and Ground Surface Roughness—

Katsumi YAMAGUCHI and Iwao HORAGUCHI

This paper deals with the development of a grinding wheel of resinoid segments with a very fine SiC whiskers as an abrasive. The whiskers (diameter of about $1\ \mu\text{m}$, length of $40\text{--}50\ \mu\text{m}$) are directionally aligned and normal to the grinding surface. The alignment of the SiC whiskers and the surface roughness of the ground surfaces are examined. The results show that a smooth surface with a roughness value of $R_{\text{max}}=0.04\ \mu\text{m}$ ($R_a=0.004\ \mu\text{m}$) is obtained for ground hardened die steel.

Key words : SiC whisker, directional alignment, grinding wheel, resinoid wheel, surface finish, face grinding, surface roughness, precision grinding

1. は じ め に

研削砥石は、砥粒と結合剤で構成されており、その砥粒は通常アルミナ (Al_2O_3)、炭化けい素 (SiC)、ダイヤモンドなど粒状のものが使用される。

一方、近年ウィスカと呼ばれる完全結晶に近い極めて優れた性能をもった微小短繊維が開発され、FRMやFRCなどの複合材料強化材として使用され始めている。

本研究は、研削砥石中の砥粒の代わりにこの微小のSiC ウィスカを使用することを考え、ウィスカを研削面に垂直にそろえた砥石の開発を試みたものである。もともとSiCはGC砥粒として知られている上に、ウィスカはその機械的強度特性が極めて優れているとされているので、研磨材として使用した場合優れた研磨特性を持つことが期待される。ごく最近、SiCウィスカの硬さ測定が試みられ、ビッカース硬さ $\text{HV}=80\ \text{GPa}$ あるとの結果が報告され¹⁾、ダイヤモンドに近い硬さをもっているものと考えられる。また、ウィスカの直径は約 $1\ \mu\text{m}$ (砥粒で#8000相当)と極めて微細であるが、長さが $40\text{--}50\ \mu\text{m}$ と長いので、

もし方向をそろえた砥石を作れば研磨材としてのウィスカの保持面積が極めて大きいので、研磨中研磨材が脱落しにくく、長寿命の砥石になる可能性がある。

このような砥石はいまだ世に出ていないので、ウィスカ砥石の研究は見あたらないが、これに関連する研究としては、砥石を強化するために繊維を加えた砥石に関する研究^{2)~4)}などがある。また、一方向に束ねたアルミナ長繊維を切断用砥石の研磨材として使用した研究⁵⁾および、この繊維を板ばね状にし砥石として用いた研究⁶⁾⁷⁾がある。しかし、いずれも本研究で試作したような砥石についての報告はなく、その研削特性も全く不明である。

本報告は、結合剤としてフェノール樹脂を用いたレジンイドタイプの砥石について、SiC ウィスカの方向制御方法と、そのセグメント砥石による正面研削によってどの程度の表面仕上げが可能かなどについて、第一段階の成果を得たので報告するものである。

2. ウィスカの方向のそろえ方

図1は、砥石のモデルを示したもので、図(b)のようにウィスカの方向を一方向にそろえ、これを加工面に対して垂直な状態にした砥石では、図(a)のような通常の砥粒による砥石に比べ研磨材が脱落しにくだけでなく、ウィスカが摩耗しても常に微細な砥粒

* 原稿受付 平成4年5月29日

** 正 会 員 名古屋大学工学部 (名古屋市千種区不老町)

*** 正 会 員 豊田工業高等専門学校 (豊田市栄生町2-1)

Fig. 1 Model of the grinding wheel

Fig. 2 Procedure of directional alignment

Fig. 3 Variation of inclination angle under the process of directional alignment

に相当する断面を現しながら加工が行われる可能性がある。そのため、この砥石を用いて研削することにより、高精度にしかも加工効率においても向上を図ることができるものと考えられる。しかし、普通の状態で砥石を作るとウィスカの方向はランダムになってしまい、切れ刃として有効に作用し得るウィスカの数はわずかである上、面に平行方向に存在するウィスカは研削の妨げになるものと思われる。そこで、ウィスカの方向をそろえるための基本的な考え方について以下に述べる。

図2に示すように、炭化けい素ウィスカと液状フェノール樹脂とを混ぜ合わせ粘土状にしたものを転がしながら円柱状にし、軸方向に延ばしていく。そして、それを2つに切って重ね、また延ばすということを何度も繰り返すことによりウィスカの方向をそろえることができる。図3において、円柱を体積一定のもとで外周方向から一様に圧縮し、円柱を細長く延ばしていくものとする。このときウィスカ自身は延ばされることなく、周りの結合剤の流れによる変形に伴って延ば

Fig. 4 Relationship between the rate of elongation and angle of inclination

される方向に傾いていくことになる。このようにして円柱を n 倍に延ばすことにより、その直径は $n^{-1/2}$ 倍になる。そして1つのウィスカについて、最初延ばす方向に対し θ の角をなしていたものが、試料が延ばされて ϕ になったと仮定すれば、 ϕ は次式のように表される。ここで θ, ϕ は、二次元平面に投影した角とし、また対称性より 0° から 90° の範囲内で考える。すなわち、最初1つのウィスカを含む試料内微小要素 dx, dy が dx', dy' になったとすると

$$dx' = n dx, \quad dy' = n^{-1/2} dy$$

で表されるので

$$\tan \phi = \frac{dy'}{dx'} = \frac{n^{-1/2} dy}{n dx} = n^{-3/2} \tan \theta \quad (1)$$

という関係が得られる。

この関係を図示すると図4のようになる。すなわち、ある傾き角 θ で存在していたものが、 n 倍に延ばされることにより図のように ϕ の値が変化する。例えば最初 θ が 30° であったものは、10倍すなわち2倍に延ばし2つに切って重ね、また延ばすという作業を3~4回行えば ϕ は数度以内となる。また極端な場合、例えば $\theta = 89^\circ$ のものでも100倍すなわち、前述した作業を7回程度行えば計算上は延ばす方向に対してほぼ平行になることがわかる。

次に、初期状態 ($n=1$) においてウィスカがすべての方向に一様に分布しているものと仮定し、これが一方方向に延ばされることにより、ウィスカの分布状態がどのように変化していくかということを、確率密度関数を使って導いてみることにする (図5)。

最初、確率密度関数 $p(\theta)$ で分布していたものが式(1)により $p(\phi)$ に変化したものとする、変換される微小区間の量は不変であるから、

$$p(\theta) d\theta = p(\phi) d\phi$$

Fig. 5 Variation of probability density on inclination angle under the process of elongation

$$\therefore p(\phi) = \frac{p(\theta) d\theta}{d\phi} \quad (2)$$

ここで式 (1) より

$$\frac{d\theta}{d\phi} = \frac{1}{n^{3/2} \sin^2 \phi + n^{-3/2} \cos^2 \phi} \quad (3)$$

式 (2), (3) より

$$p(\phi) = \frac{p(\theta)}{n^{3/2} \sin^2 \phi + n^{-3/2} \cos^2 \phi} \quad (4)$$

となる。

そして、また一方向に延ばす前の段階（初期状態）においては、図 5 (a) のようにウスカは、 θ が 0° から 90° まで一様に分布しているものと仮定したので、 $p(\theta)$ は一定である。この確率密度関数を全区間において積分すると 1 となることより、式 (4) の $p(\theta)$ は次のようにして求められる。

$$\int_0^{\pi/2} p(\theta) d\theta = p(\theta) \cdot \frac{\pi}{2} = 1$$

$$\therefore p(\theta) = \frac{2}{\pi}$$

これより、式 (4) は

$$p(\phi) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n^{3/2} \sin^2 \phi + n^{-3/2} \cos^2 \phi} \quad (5)$$

となる。

この式 (5) より描いたものが図 6 である。

この図からわかるように、ウスカと結合剤とを混ぜ合わせた初期状態から一方向に延ばしていくことにより、ウスカの傾きの分布状態は ϕ が小さくなる方向へ急速に偏っていき、100 倍程度延ばせば、ほとんどのウスカが一方向にほぼ数度以内にそろってしまうことになる。

3. ウスカ砥石の製作

砥石の製作方法は、まず炭化けい素ウスカ（図

Fig. 6 Azimuth distribution of whiskers

Fig. 7 SEM micrograph of SiC whiskers

7) とほぼ等重量の熱硬化性液状フェノール樹脂とを混ぜ合わせ粘土状にする。これを円柱状に転がしながら一方向に 2 倍に延ばし、2 つに切って重ね、また延ばすということを何度も繰り返すことにより繊維の方向をそろえることができる。前述したように、計算上はこの作業を 7 回程度繰り返せば $n=2^7=128$ となってウスカの方向は図 6 の $n=100$ で示される曲線以上にそろはずであるが、ウスカと結合剤とを均一に混ぜ合わせる必要もあって、実作業では繰返しを 20 回程度行っている。この後、このようにして棒状に延ばしたものを型に入れ所望の形状に成形し、焼結した後砥石素材を作成した。

図 8 は、ウスカの方向をそろえた砥石の断面 (a) とそろえてないもの (b) とを走査型電子顕微鏡 (SEM) により撮影したもので、(a) ではウスカが一方向にそろっていることが観察される。

実験では、炭化けい素ウスカと結合剤は、重量比

Fig. 8 SEM micrographs of cross-sections of SiC whisker grinding wheel

Table 1 Characteristics of SiC whisker

Crystal structure	β type
Diameter	1.2 μm
Length	40-50 μm
Density	3.20 g/cm ³
Thermal expansion ratio	$5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Heat resistant temperature	1600 $^{\circ}\text{C}$ (In air)
Tensile strength	3-14 GPa
Modulus of elasticity	400-700 GPa
Composition	SiC 99 wt%
	SiO ₂ 0.1 wt%
	Fe 130 ppm
	Co 930 ppm
	Ca 10 ppm

Fig. 9 SiC whisker grinding wheel

ではば1対1の割合に混合した。また焼結は、170 $^{\circ}\text{C}$ で30 min間行った。

表1に、ウィスカの特性を示す。

4. 実験装置および実験方法

本研究では、表面仕上げがどの程度可能か見当をつけるため以下のような実験を行った。砥石は、先に述べたようにして焼成した砥石をセグメントに切断し、これを図9に示すように繊維の方向を研削面に垂直にしてボンドで固定したものを使用した。

研削装置として、NC 立てフライス盤を用い、作成した砥石を砥石ホルダにねじで固定し、主軸に取り付ける。また加工物は、テーブル上に取り付けたマグ

Fig. 10 Experimental apparatus

Table 2 Experimental conditions

Grinding wheel	Abrasive : SiC whisker (TOKAwhisker) Bond : Phenol resin (Plyophen) Setting temperature : 170 $^{\circ}\text{C}$
Workpiece	Die steel SKD 11 (HRC 60)
Wheel speed	$v=40-250$ m/min
Table speed	$f=2.4-7.2$ cm/min
Grinding fluid	Soluble type (JIS W 2)

ネットチャックにより固定し、液槽中において低速の正面研削を行った(図10)。研削液は、水溶性ソリュブル形(JIS W 2種1号)を使用し、これをポンプで循環させながら研削部に吹き付けて研削した。加工材料は、主にSKD 11材(試片寸法25 $\times$ 25 $\times$ 50)をHRC 60に焼入れしたものを用い、平坦度と初期表面粗さ(3 $\sim$ 5 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$)をそろえるためWA #60砥石により前加工したものをを用いて実験した。

表2に、実験条件を示す。

5. 加工面性状

図11は、上記のようにウィスカを加工面に垂直にそろえた砥石を用いて、初期前加工粗さの違う表面について一定回数研削した後得られた仕上面粗さを最大高さ R_{max} で示したものである。なお、比較のためにウィスカの方向をランダムにした砥石と研削方向にはば平行にそろえた砥石とを作り、その場合得られた仕上面粗さも同時に示した。

加工条件は、研削速度 $V=50$ m/minで切込み量を最初に公称0.01 mm与えて(実際の切込みは、実験装置などの弾性により逃げが生じるため明確ではない)3往復トラバース研削(送り速度 f は、1,2回目は4.8 cm/min, 3回目は2.4 cm/min)したものである。

図中、軸に対して45 $^{\circ}$ の斜線は、前加工粗さと仕上

Fig. 11 Effect of the direction of SiC whisker on surface roughness

Fig. 12 Ground surface

面粗さが同じ状態、すなわち加工されていないことを示している。図からわかるように、研削面に対して繊維の方向を垂直にそろえた砥石においては、かなり良い面が得られている。例えば、前加工粗さ $4.8 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ では仕上面粗さは約 $0.7 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ に、また同様に $0.8 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ では約 $0.2 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ となっている。これは、初期表面の凸部は研削されているが、まだ一部の谷が研削されずに残っていることを示している。繊維の方向を研削面に対して平行にそろえた砥石では、 45° の斜線とあまり変わらない状態を示し、研削がほとんど進んでいないことがわかる。そして、実際の研削面には研削焼けが生じていることが観察された。また、繊維の方向をそろえてないランダム状態の砥石では、上記の中間的な状態となっている。これは前述したように、方向をそろえなくても一部のウィスカは、研削面に対して切れ刃となる角度で存在するため、ある程度の研削が行われるものと考えられる。

図12は、本砥石により前加工面粗さが除去されるまで加工した場合の表面の外観を示したものであるが、非常に良い鏡面となっていることがわかる。

図13は、触針式表面粗さ計により測定した仕上面の粗さ曲線例を示したものである。(a)は、SKD 11

Fig. 13 Roughness curves of various ground surfaces

Fig. 14 Measurement of surface roughness by Phase Measuring Interferometer

焼入れ材 (HRC 60) のもので、その値は $0.04 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ ($0.004 \mu\text{m} R_a$) となっている。また参考のため、シリコンウエハおよびガラス材についても加工し、その粗さ曲線を (b), (c) に示した。ガラス材はやや粗いが、シリコンウエハは良好な面が得られた。

図14は、SKD 11 試料において、位相測定干渉計により非接触状態で平面粗さを測定したものを示したものである。測定平面の寸法は、 $0.719 \text{ mm} \times 0.644 \text{ mm}$ とかなり広い範囲の表面状態を示している。この曲線から R_{max} は、約 $0.05 \mu\text{m}$ であることが読み取られる。なお、この場合の R_a の値は計器の指示値から約 5 nm であった。

また図15は、使用後の砥石の表面をSEMにより観察したもので、(a)は真上から、また(b)は、一部を拡大した斜め上方からのものである。写真の倍率から判断して、直径にほぼ等しい $1 \mu\text{m}$ ほどのウィスカの先端が砥石表面から突き出ていることがわかる。

図16は、研削仕上面をSEMにより観察したもので、ウィスカの直径に相当する $1 \mu\text{m}$ 程度の研削跡が筋状に走っており、はっきりと研削条痕が認められる。

以上により、本ウィスカ砥石で表面研削することにより、かなり良い仕上面が得られることを示すことが

Fig. 15 SEM photographs of the grinding wheel surface

Fig. 16 SEM photograph of the ground surface

できた。しかし、本砥石を実用に供するためには、砥石の製作条件（ウイスカの混合率、結合剤の種類、添加剤の種類、添加率など）、研削方法および適正な用途（被研削材の種類など）について極めて広範な研究を行わねばならない。本報告は、その第一段階として、本砥石による研削の可能性を示すことができたものと考えられる。

6. ま と め

開発した SiC ウィスカレジノイド砥石による低速

研削において実験、観察することにより以下のような結果が得られた。

- (1) SiC ウィスカと液状フェノール樹脂とを混ぜ合わせ粘土状にしたものを、一方向に 100 倍程度延ばすことにより、ほとんどのウィスカを一方向にそろえることができることを理論的、実験的に示すことができた。
- (2) SiC ウィスカの方向を研削面に対して垂直にそろえたもの、平行にしたもの、そして方向をそろえないものの 3 種類の砥石について研削仕上面を比較したところ、垂直にそろえた砥石の場合が一番良い結果が得られることがわかった。
- (3) 本砥石で SKD 11 (HRC 60) を研削したときの仕上面粗さにおいて、 $0.04 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ ($0.004 \mu\text{mR}_a$) を得ることができた。

以上より、検討を要する課題は多く残されているが SiC ウィスカ砥石の有効性を示すことができた。

参 考 文 献

- 1) 清野 豊, 永井 聰: SiC 単繊維及びウイスカーの力学的性質, 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 195.
- 2) J. Jendryschik: Einsatz von Faserverbundwerkstoff für Trennschleifscheiben, Ind. Anz., 108, 46, (1986) 87.
- 3) 新東工業研: 鋳鉄ファイバーボンドダイヤモンド砥石の開発, 素形材, 29, 1 (1988) 25.
- 4) 大森 整, 中川威雄: 電解インプロセスドレッシングを利用したメタルボンド超砥粒砥石による鏡面研削法, 砥粒加工学会誌, 34, 3 (1990) 14.
- 5) 鈴木 清ほか: 繊維強化プラスチック材料の切断加工 (セラミックス長繊維を切削とする砥石に関する研究: 第 1 報), 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 63.
- 6) 鈴木 清ほか: 板ばね状砥石によるみがき加工の研究 (第 1 報: MC による自由曲面のみがき加工の試み), 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 639.
- 7) 鈴木 清ほか: 板ばね状砥石によるみがき加工の研究 (第 2 報: 繰り返し曲げ変形に伴う横滑りを利用したみがき加工), 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 641.