方向をそろえた SiC ウィスカー砥石の研磨特性* (アルミナ繊維砥石との比較)

山口 勝美*¹, 菊澤 賢二*², 魏 源 遷*³
洞口 巖*⁴, 中根 正 喜*⁵

Grinding Characteristics of Directionally Aligned SiC Whisker Wheel (Comparison with Al₂O₃ Fiber Wheel)

Katsumi YAMAGUCHI*⁶, Kenji KIKUZAWA, Yuan-Qian WEI,
Iwao HORAGUCHI and Masaki NAKANE

*⁶ Nagoya University, School of Engineering, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

One of the authors invented a unique SiC whisker wheel in which the whiskers were aligned normally to the grinding wheel surface. In this paper, grindabilities of the SiC whisker wheel are investigated and compared with those of other wheels of SiC grains, Al₂O₃ grains, as well as Al₂O₃ long and short fibers which were also aligned normally to the grinding wheel surface, respectively. The main research contents grinding characteristics of a directionally aligned SiC whisker wheel such as material-removal rates, wheel-wear rates, integrity of the ground surfaces, grinding ratios and grinding efficiency. Furthermore, grinding wheels of whiskers and fibers have a common disadvantage: they tend to load easily. The authors introduced a simple method of loading-free grinding to overcome this propensity and investigate some related grinding characteristics under loading-free grinding conditions.

Key Words: Grinding, Grinding Wheel, SiC Whisker, Al₂O₃ Fiber, Directional Alignment, Loose Grain, Loading-Free, Grinding Ratio, Surface Roughness

1. 緒 言

著者らは、過去、砥粒の代わりに非常に微細な炭化けい素(SiC)ウィスカーを研磨材として用い、その方向を加工面に垂直にそろえた砥石の開発を行ってきた^{(1)~(4)}。

ウィスカーは、硬さ、耐摩耗性などの機械的強度特性が極めて優れているとともに、直径が約1μm、長さが40~50μmとアスペクト比が非常に大きい。そのためウィスカーの方向を加工面に垂直になるようにそろえることにより、微小砥粒と同様の微細加工を可能ならしめるとともに、結合剤による保持面積が通常の砥粒と比べて非常に大きいため研磨材が脱落しにくく、研削比の大きい、高寿命の砥石となることが予想されてきた⁽⁵⁾。

しかし、ウィスカーが微細であり、脱落しにくい

ために、目づまりが生じやすいという問題が発生した。そこで、研磨液中にウィスカー径と同程度の砥粒を混入し、この遊離砥粒の働きにより目づまりを防止しながら研磨する方法で、この問題が容易に解決することを報告してきた⁽⁶⁾。

本研究では、このSiCウィスカー砥石が研磨比などにおいて、どのような研磨特性を持つかを他の通常用いられている砥石と、特に目づまり防止研磨を行った場合について比較・評価したものである。

2. 砥 石 の 概 要

2・1 ウィスカー砥石 通常の砥石は、砥粒を結合剤で固めたもの〔図1(a)〕が使用されている。微細加工を行うためには、微小砥粒を用いて研磨する必

Fig.1 Models of grinding wheel

* 原稿受付 1998年11月18日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)。

*² ジーベック (〒102-0074 東京都千代田区九段南3-2-2)。

*³ 中小企業事業団 (〒105-8453 東京都港区虎ノ門3-5-1)。

*⁴ 正員, 豊田工業高等専門学校 (〒471-8525 豊田市栄生町2-1)。

*⁵ 学生員, 名古屋大学大学院。

E-mail: yamaguchi@mech.nagoya-u.ac.jp

Table 1 Physical properties of SiC whisker and Al₂O₃ fibers

Material	SiC whisker	Al ₂ O ₃ short and long fibers
Crystal structure	β type	α type
Size (diameter, length)	1.2 x 40~50 μ m	5 x 200 μ m (short-fiber), 8 x L μ m (long-fiber)
Density	3.2 g/cm ³	3.9 g/cm ³
Thermal expansion ratio	$5.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$7.8 \sim 8.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Heat-resistant temperature	1600 $^{\circ}\text{C}$ (in air)	1750 $^{\circ}\text{C}$ (in air)
Tensile strength	3~14 GPa	240~300 MPa
Modulus of elasticity	400~700 GPa	290~390 GPa
Composition:	SiC 99 wt%, SiO ₂ 0.1wt%	Al ₂ O ₃ 99.99 wt%, Si 6 ppm, Fe 7 ppm
	Fe 130 ppm, Co 930 ppm, Ca 10 ppm	Na 4 ppm, K 1 ppm, Ca 1 ppm, Mg 1 ppm

Fig. 2 SEM micrograph of SiC whisker wheel surface

(a) Construction (b) Photograph

Fig. 4 Fabrication of a grinding wheel

Fig. 3 Used types of grinding wheels

要があるが、砥粒が脱落しやすく、砥石の消耗が激しい。しかし、図 1 (b) に示すような、SiC ウィスカーを加工面に垂直にそろえた砥石で研磨すると、研磨材が摩耗しても常に同じ状態で磨くことができ、このような砥石では、結合材による保持面積が大きいため、研磨材が脱落しにくく、軟らかい結合材を使うことができる。しかも、長寿命の砥石となる可能性がある。

図 2 は、加工後のウィスカー砥石表面の SEM 写真を示したものである。白い突起が、SiC ウィスカーである。

2.2 比較用砥石 上述の SiC ウィスカー砥石と

他の類似砥石とを比較するため、図 3 に示すような 5 種類の砥石を準備した。まず最初に、SiC ウィスカー (SiCw と略記) と直径が等しい 1 μ m の炭化けい素砥粒、アルミナ砥粒で作った通常の砥石を準備した。これらを、それぞれ SiCg, Al₂O₃g と略記する。次に、アルミナ短繊維とアルミナ長繊維を方向が砥石面に垂直になるようにした砥石を作製した。この繊維砥石については、ウィスカーの直径と同程度の細い繊維は作られていないので、それぞれ 5 μ m, 8 μ m の市販のものを使用した。そして、これらをそれぞれ Al₂O₃sf, Al₂O₃lf と略記する。

表 1 に、ここで使用した SiC ウィスカーと Al₂O₃ ファイバーのおもな物理的性質を示す。

いずれの砥石も結合剤として熱硬化性樹脂を用い、電気炉により、180 $^{\circ}\text{C}$ で 30 時間かけて焼き固め、レジノイド・タイプの砥石を作った。この砥石をセグメントにカットし、図 4 (a) のように配置したカップ形砥石を作った。図 4 (b) にその写真を示す。

3. 実験方法

実験装置は、精密平フライス盤 (MG-743) を使用した。また、図 5 に実験の構成図を示す。実験は液槽中において、砥石の押し付け荷重 (400 N) を常に一定に保つために、ひずみゲージを使用した三次元動力計を介して、研磨力を測定しながら圧力研磨を行った。また加工材料は、ダイス鋼 SKD 11 (HRC 60) を使用し、

Fig. 5 Experimental set-up

Fig. 6 Principle of the loading-free method

初期粗さは 100 nmRy で行った。

今回の実験では、通常の研磨(目づまり防止法を適用しない場合)および、研磨液中に遊離砥粒を添加した目づまり防止による方法との2とおりの実験について行った。実験条件は、双方とも表2に示すとおりであるが、目づまり防止法による場合は、研磨液中に遊離砥粒 0.25 wt% 添加したものを使用した。

目づまり防止法は、図6に示すように研磨液中にウィスカー径と同程度の砥粒を微量添加することにより、この遊離砥粒が加工中に砥石表面と加工物表面との間に入り込んで転動し、砥石表面に付着した微細な切りくずを除去するとともに、結合剤を適度に削り取ってウィスカーの突き出し量を常に一定の状態に保ちながら研磨加工を行うものである。

目づまり防止のために使用した遊離砥粒は、粒径がウィスカー径とほぼ等しい大きさのもので、その硬さは、加工材料よりも硬い Al_2O_3 (WA) と軟らかい SiO_2 の2種類を用いて実験した。

4. 実験結果および考察

4・1 通常研磨 通常研磨における主な実験結果の比較を図7～10に示す。

Table 2 Experimental conditions

Experimental apparatus	CNC milling machine
Grinding conditions	Wheel speed: 40 m/min Table feed rate: 42 mm/min Traverse cycles: 200 passes Grinding load: 400 N
Specimens	Die steel SKD11(HRC60)
Grinding wheel	Abrasives(shapes, diameters, contents) ・ SiC grain or whisker: 1 μm , 14 vol% ・ Al_2O_3 grain: 1 μm , 14 vol% short-fiber: 5 μm , 14 vol% long-fiber: 8 μm , 50 vol%
Grinding fluid	Soluble type (JIS W2-1), 2% dilution
Loose grains	Grains(diameters): Al_2O_3 (1 μm), SiO_2 (1 μm) Concentration in the fluid: 0.25 wt%

Fig. 7 Correlations between material removal volume or wheel-wear volume and traverse cycles

Fig. 8 Comparison of material-removal volume and wheel-wear volume

図7は、トラバース回数に対するそれぞれ砥石の研磨量と砥石摩耗量を示したものである。研磨量は、初期の急激な増加の後、目づまり状態となり、その後ほぼ一定の割合で増加している。

トラバース 200 回後の、それぞれの研磨量と砥石摩耗量を測定した結果を図8に示す。研磨量は、 Al_2O_3 短繊維の場合が最も多く、次いで Al_2O_3 砥粒、SiC 砥粒、SiC ウィスカー、 Al_2O_3 長繊維の順となっている。

Fig. 9 Comparison of grinding ratios

Fig. 10 Comparison of surface roughness

が、大まかにいってほぼ同程度の研磨量を示している。一方砥石の摩耗量は、研磨量に比べて当然全体的に小さな値となっているが、特に SiC ウィスカー砥石の場合は、他の砥石に比べ砥石自身の摩耗量が極端に少なく、耐摩耗性が非常に大きいことがわかる。そして図 9 に示すように、SiC ウィスカー以外の砥石の研磨比は 5 程度であったが、SiC ウィスカー砥石では 2200 という大きな値となった。

一方、図 10 に示すように仕上げ面粗さにおいて、SiC ウィスカーの場合は、SiC 砥粒に比べてわずかによい値となっているが、 Al_2O_3 系のものに比べやや悪い。

4.2 目づまり防止法による研磨 目づまり防止法(研磨液中に遊離砥粒を混入した場合)により 200 回トラバース研磨した後における主な実験結果を図 11~17 に示す。図 11 は、研磨液中の遊離砥粒(Al_2O_3 , $1\mu m$)の濃度を変化した場合、SiC ウィスカー砥石による研磨量と砥石自身の摩耗量の違いを示している。研磨量については、遊離砥粒濃度が 0.05 wt% 程度までは急激に増加するが、それ以上になると濃度の上昇とともに、ゆるやかに増えていく傾向があることがわかる。一方砥石の摩耗量は小さな値であるが、砥粒濃度にほぼ比例して増加することがわかる。このよう

Fig. 11 Effects of loose grain concentrations on material-removal volume and wheel-wear volume (SiC whisker wheel)

Fig. 12 Effects of loose grain concentrations on surface roughness of the ground specimens (SiC whisker wheel)

Fig. 13 Comparison of material removal volume and wheel-wear volume (Loading-free grinding)

に、研磨液に対してわずかに遊離砥粒を混入するだけで、かなりの目づまり防止効果があり、過度に砥粒濃度を高くすると砥石の摩耗が増加することを示している。

また図 12 において、砥粒濃度 0.05 wt% までは、その増加とともに仕上げ面粗さが急激に上昇し、その後

Fig. 14 Comparison of grinding ratios (Loading-free grinding)

Fig. 15 Comparison of surface roughness (Loading-free grinding)

ゆるやかに減少していることがわかる。しかし、図の0%で示している目づまり防止をしない場合の仕上げ面粗さに比べ、遊離砥粒を添加した場合の仕上げ面粗さは悪くなっていることがわかる。これは、遊離砥粒が目づまり防止作用をすると同時に、研磨効果があり被削材を削り取ることによるものと考えられる。

図13～15は、遊離砥粒を使用しない場合と、使用した場合(Al₂O₃およびSiO₂)とにおいて、SiC ウィスカー砥石と Al₂O₃ 長繊維砥石とにおける違いを比較したものである。

図13において、両砥石ともにWA, SiO₂で示されるように遊離砥粒を使用した場合の方が使用しない場合に比べ、研磨量が増大していることがわかる。特に、SiC ウィスカー砥石を用い、遊離砥粒として Al₂O₃を使用した場合は、非常に大きな値となっている。一方砥石の摩耗量は、いずれの場合も SiC ウィスカー砥石の摩耗量に比べて、格段に大きな値となっている。特に Al₂O₃ 長繊維では、非常に大きな値となっている。なお、遊離砥粒にWAを使用した場合よ

Fig. 16 Effects of abrasive grain concentrations on loading

Fig. 17 Ground surface

り SiO₂を使った場合のほうが砥石の摩耗が大きくなっているが、遊離砥粒の被削材に対する研磨能力が低いものはかえって砥石を摩耗させる傾向があるようである。次に、図14の研磨比(研磨量/砥石摩耗量)をみると、Al₂O₃ 長繊維では4.5～36程度であるのに対して、SiC ウィスカー砥石では、遊離砥粒として Al₂O₃ 砥粒を使用した場合は、6000程度の大きな値が得られた。しかし仕上げ面粗さ(図15)に関しては、いずれの場合も図13の研磨量とほぼ同じ傾向を示し、研磨量が多いほど粗くなっている。そして、SiC ウィスカー砥石で Al₂O₃ 遊離砥粒を用いた組合わせの場合が最も粗く、70 nmRy 程度となっている。

遊離砥粒濃度の違いによる砥石の目づまり状態のSEM写真を図16に示す。図16(a)～(c)は、砥粒濃度がそれぞれ0, 0.15, 0.50 wt%で研磨した場合のものである。図16(a)では、研磨くずが砥石表面につまって、ウィスカーが見えない状態となっているが、図16(b)では、砥石表面よりウィスカーが適度に突き出していることがわかる。また図16(c)では、ウィスカーが出過ぎていることが観察される。

図 17 は, SiC ウィスカー砥石により研磨した場合の仕上げ面の外観写真である。

5. 結 論

以上のように, 方向をそろえた SiC ウィスカー砥石の評価実験において, 以下のような結果が得られた。

(1) 通常研磨において, 仕上げ面粗さに関しては Al_2O_3 系砥石に比べて多少劣ったが, 研磨比については砥粒砥石や Al_2O_3 繊維砥石では 5 程度であったのに対して, SiC ウィスカー砥石では 2 200 という高い値が得られた。

(2) さらに, 目づまり防止法での SiC ウィスカー砥石における研磨効率は, 通常研磨に比べて 10 倍程度高くなり, 研磨比は 6 000 という大きな値が得られた。また仕上げ面粗さについても, 通常研磨に比べて悪くなったものの, 70 nmRy 程度の面粗さが得られた。

このように, SiC ウィスカー砥石は高い耐摩耗性, 研磨比をもっていることがわかった。

以上のように, この新しい顕著な特性をもった砥石の, さらなる進展と実践的な応用への可能性を示すことができた。

文 献

- (1) 山口勝美・洞口徹, 方向をそろえた炭化けい素ウィスカー砥石の開発——レジノイド砥石の製作と仕上げ面粗さ, 精密工学会, **59**-5 (1993), 791.
- (2) 山口勝美・洞口徹, SiC ウィスカー砥石の研磨特性——砥石構成と仕上げ面粗さ, 精密工学会, **62**-11 (1996), 1627.
- (3) 山口勝美・洞口徹, SiC ウィスカー強化樹脂のアプレシブ特性と研削砥石への応用, 先端加工, **15**-1 (1996), 13.
- (4) 洞口徹・山口勝美, 炭化けい素ウィスカーラップ砥石による加工, 砥粒加工学会, **41**-11 (1997), 428.
- (5) 山口勝美・洞口徹・佐藤豊, SiC ウィスカー砥石の研磨特性——遊離砥粒による目づまり防止法, 精密工学会, **63**-2 (1997), 238.