SiC ホイスカ強化セラミック工具の切削特性*

新谷一博** 藤村善雄** 生地智則*** 植木正憲†

Cutting Performance of SiC-whisker Reinforced Ceramic Tools

Kazuhiro SHINTANI, Yoshio FUJIMURA, Tomonori OIJI and Masanori UEKI

Cutting performance of SiC-whisker (SiC_w) reinforced ceramic tools on the machining of gray cast iron was investigated. In continuous dry cutting, the toughened $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ tool exhibited a stable and prolonged tool life compared to the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ tool. The life of the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ tool was about twice as long as the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ tool at the optimum cutting condition. Since groove wear was inhibited by the whiskers incorporation, the surface roughness of the workpiece after cutting was improved, resulting in the possibility of using the tool for finishing operation. Nevertheless, SiC_w reinforced ceramic tool can not be applicable for cutting of the cast iron containing a large amount of ferrite phase. In the interrupted cutting, a significant improvement of the tool life due to whisker reinforcement was observed in the alumina based tools compared to silicon nitride based tools. However, the SiC-whisker incorporation was effective for inhibiting the groove wear for both alumina and silicon nitride based tools.

Key words: ceramic cutting tool, silicon carbide whisker, cutting performance, flank wear, groove wear, continuous cutting, interrupted cutting

1. 緒 言

従来よりセラミック工具はその優れた耐摩耗性と高温強度に注目¹⁾されつつも、その需要が十分に伸びていない。これは上述した長所がある反面、強さとじん性が低く切削時に欠損しやすいため、信頼性という点で自動化や仕上加工への適用困難性を示しているためである。そのため、種々の炭化物粒子などを複合化²⁾することにより、じん性向上を図るなど種々の強化法が試みられてはいるがまだ十分とは言えず、さらなる信頼性の向上が要求されている。そのため近年においてはこの欠点を補う目的で開発された繊維 (SiC ホイスカ (以後、 SiC_w と記す)) 強化セラミック工具が注目³⁾を集めている。

そこで本研究では、断続切削条件下においてホイスカの配向性が工具欠損に及ぼす影響を調べ、その適正

配向のものと粒子分散強化セラミック工具との性能比較を、乾・湿両条件で行い、ホイスカ添加の有効性を調査した。また、同じような検討を連続切削条件下においても行った。

2. 実験方法

被削材はねずみ鋳鉄 (FC 30) を用い、連続切削の条件下においてのみ比較材として連続鋳造品 (FC 25-CC) を使用した。その化学成分、機械的性質、そして組織写真を表 1 に示す。ここで両被削材はフェライト相の割合に差があり、それぞれ面積比で 0.5%、34% を占めている。形状は $\phi 100 \times 450$ mm の丸棒で

Table 1 Chemical composition and micro-structure of workpiece materials

Workpiece materials	Chemical composition (wt %)							Brinell hardness
	C	Si	Mn	S	Cr	Mg	Fe	
FC 25-CC	3.40	2.73	0.35	0.014	0.019	0.005	Bal.	176
FC 30	3.07	1.81	0.87	0.14	0.058	0.005	Bal.	206
Micro-structures
	FC 25-CC FC 30							

* 原稿受付 平成元年 7 月 21 日。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) 及び 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会 (平成元年 3 月 23 日) にて発表

** 正会員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7 番 1 号)

*** 学生会員 金沢工業大学大学院

† 新日本鐵鉄(株)第一技術研究所 (川崎市中原区井田 1618 番地)

Table 2 Mechanical properties of tool materials

	Fracture toughness $K_{IC}(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	Vickers hardness HV	Bending strength σ_t MPa
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$	6.4 †	2060 †	686 †
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$	5.1	2200	784
$\text{Si}_3\text{N}_4+\text{SiC}_w$	9.9 †	1839 †	983 †
$\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiN}$	7.9	1706	808

† This value shows H type in Fig. 1.

ある。工具材は $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ 系と $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{SiC}_w$ 系のホイスカ添加材種 2 種、そしてこれの比較材として粒子分散強化セラミックス（ホイスカ無添加材）の $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ 系と $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiN}$ 系の計 4 種を使用した。表 2 は使用工具の機械的性質を示し、アルミナ系より窒化けい素系の方が、またホイスカ無添加材よりホイスカ添加材の方が高いじん性値を示している。またこれら工具の刃先形状は $(-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)$ とし、ホイスカの配向の効果を調べる実験を除いてはコーナ部に $0.2\text{ mm}\times 25^\circ$ のチャンファを施している。切削条件は丸棒の外周旋削で、切込み及び送り、それぞれ 2.0 mm , 0.2 mm/rev とし、切削速度は $2.50\sim 8.33\text{ m/s}$ ($150\sim 500\text{ m/min}$) を採用した。工具寿命は断続切削条件においては工具欠損を生じた時を、また連続切削条件においては境界摩耗部を除いた逃げ面摩耗幅 V_B が、 $V_B=0.2\text{ mm}$ に達した時を寿命限界とした。

3. 断続切削条件下におけるホイスカ添加工具の切削性能

3.1 ホイスカ配向方向の相違による切削特性比較

$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ 系工具を代表例にとり断続乾式切削条件下におけるホイスカ配向方向の相違による耐久損性の比較を行った。ここで本来セラミック工具はじん性が低いため工具切れ刃にランドを設けることが多いが、本項で使用した工具においては単にホイスカ配向方向と切削性能の関係を調べるため、使用した工具にはランドを施さず、切れ刃部には $2/100\sim 3/100\text{ mm}$ 程度の丸ホーニングを施すにとどめた。被削材は、軸と平行に幅 12 mm の溝を 4 本設けたものを使用した。また、切削速度は予備実験より能率性、実加工における汎用性を考慮して、 $V=6.67\text{ m/s}$ (400 m/min) の条件を選択した。図 1 は工具すくい面におけるホイスカの配向分布を示したものである。図中写真で黒色部分が SiC ホイスカであり、これらの周囲を Al_2O_3 (白色部) が取り巻いている。ホイスカの多くがすくい面にはほぼ垂直に配向した状態のものを V 工具、すくい面にはほぼ平行に配向しているものを H 工具と定

Fig. 1 Distribution of whiskers with directions perpendicular and parallel to the tool rake face

Fig. 2 Weibull plot of the number of impact to flaking

めた。すくい面と垂直に予き裂を導入した場合のそれぞれの材料の SEPB 法⁴⁾により求めた破壊じん性値は $6.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $6.4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であり、後者 (H 工具) の方が高い値を示している。図 2 は両工具の欠損に至るまでの衝撃回数をワイブル分布により示す。図より V 工具では屈曲部を有する直線で示され、初期欠損時の破損率 m は 8.57 で、衝撃回数 $n=600$ より $m=0.69$ と低下する。これに比し H 工具では V 工具の 3 倍強の寿命値を示し、破損率 $m=3.36$ と安定している。図 3 及び図 4 に V・H 両工具の代表的な欠損寿命時の SEM 像を示す。V 工具の破損はすくい面上のクラックに始まり、続いて図 3 に見られるような大きな破損へと進展する。H 工具においては前者同様すくい面に生じたクラックより破損が進展するが、図 4 a) のようにクラックの周囲に欠けを生じ、クラックがかなり進展しないと破損は生じず、破損に至るまでに時間を要する。そして、同図 b) に見られる破面写真より矢印で示すようにクラックの安定成長

Fig. 3 SEM micrographs of $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ V tool after cutting at the speed of 6.67 m/s (400 m/min)

領域が破面の大半を占めている。ここで、急速破壊破面では比較的角張った破面を示すのに比し（図4c）参照），クラックが安定成長した領域（矢印にて示す）においては高温でクラックが進展したため滑らかな破面となっており，これら破面においてはいたる所にホイスカとこれの抜け跡が観察された。このことは，強じん化機構としてホイスカブルアウト効果にクラックの橋渡し効果が付加されることとクラックディフレクション効果⁵⁾⁶⁾の双方が作用しているものと考えられる。このようにホイスカの強化機構が働くクラック安定成長領域ではホイスカを分断するためホイスカ自身の強度も強化のための重要な因子である。以上のことよりクラックは工具すくい面より導入されるためホイスカを数多く分断させ，ホイスカをクラックの進行方向と垂直に配した方がこの進行を抑制できることが明らかとなる。

3.2 ホイスカ添加材と粒子強化材との比較

本項では，前項よりホイスカ強化機構が有効に作用することが明らかとなったホイスカをすくい面に平行に配向した工具と粒子強化セラミック工具をそれぞれアルミナ系，窒化けい素系の両工具材についての比較を行い，あわせて湿式条件下における断続切削特性の調査を試みた。図5はアルミナ系工具における欠損時

Fig. 4 SEM micrographs of $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ H tool after cutting at the speed of 6.67 m/s (400 m/min); a) crack on the tool face, b) fracture surface, c) rapid growth fracture surface

の代表的な刃先の SEM 像を示す。ホイスカ無添加の $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ 系工具では衝撃回数 $n=14\,390$ 回でクラックの発生とともに大きな破損を起こし寿命となる（図5a）参照）。しかしホイスカを添加した $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ 系工具においては同図b）に見られるように衝撃回数 $n=15\,100$ 回で切れ刃と平行なクラックがすくい面上に数本発生するが欠けには至らず，この後クラックが安定成長し，衝撃回数 $n=31\,270$ 回で小さな欠けを生じるのみであった。このクラックの観察よりク

Fig. 5 SEM micrographs of alumina based tools after cutting at the speed of 6.67 m/s (400 m/min)
a) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, b) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ and c) crack appeared in the tool face of $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w$ tool

Fig. 6 Weibull plot of the number of impact to flaking

Fig. 7 SEM micrographs of fracture surface of $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ tool

ラックは蛇行し、多くのホイスカを分断して進行しており、前項で述べたホイスカ分断によるエネルギーの吸収とクラックディフレクション効果が十分作用している（図5c）参照）。図6は工具が破損するまでの衝撃回数をワイブル確率紙にプロットし各種工具の寿命を比較している。アルミナ系ホイスカ添加工具は同無添加工具に比し、破損が起こるまでの衝撃回数が大幅に増大していることがわかり、前述した強化機構が十分働いていることが立証される。一方、窒化けい素系工具においては母材自身のじん性が高いことから、アルミナ系工具よりさらに長寿命（3倍程度）を示す。しかし、アルミナ系工具ほど顕著なホイスカ添加効果はなく、約1.7倍程度の寿命改善となるにとどまった。この一つの原因としては、図7に示すように $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ 系工具には多数の Si_3N_4 の針状粒が確認され、これによりホイスカ添加時に生じたクラックディフレクション機構のみが作用するためと推測される。

一方、断続切削による機械的応力に加え、熱的応力が付加される湿式条件下での各種工具の切削性能比較を試みた結果を同図に付記した。 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具では湿式切削において破損するまでの衝撃回数は大きく減少したが、 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具においてはほぼ乾式切削におけるものと同等の寿命を示している。これは SiC ホイスカ添加により、熱伝導率が改善され、熱衝撃が緩和されたためと考えられる。また、窒化け

い素系工具においてホイスカ無添加材は差を生じないものの、ホイスカの添加により湿式切削時の寿命は飛躍的に改善される。これもホイスカ添加による強化機構のためと考えられる。また、湿式切削時には前逃げ面境界摩耗が大きく発達した。

4. 連続切削性能試験

最後に、連続切削におけるホイスカ添加の効果を調査した。ここで耐摩耗性に劣る窒化けい素系工具においてはいずれの条件においても切削距離 $L = 1.5 \text{ km}$ 未満で V_B 寿命により限界に達したため対象工具より除き、アルミナ系工具のみについて検討を行った。図8は、FC 30 材切削時において $V_B = 0.2 \text{ mm}$ に達したときの切削距離（工具寿命 L_1 ）を一つの指標として、この工具寿命 L_1 の切削速度依存性を調べたものである。図に示すように $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具は工具寿命 L_1 のばらつきが大きい、最適切削速度は 6.67 m/s (400 m/min) で、 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具よりも高速域に位置する。これに比し、 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具はいずれの条件においても L_1 のばらつきは小さく安定した寿命値を示している。また、最適切削速度の 5.00 m/s (300 m/min) 付近においては前者の約2倍程度の長寿命を示した。図9は、代表値として $V = 6.67 \text{ m/s}$ の条件で切削したときの表面粗さ R_a と切削距離の関係を示している。 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具は切削距離の増加とともに表面粗さが増加し、 $5.0 \mu\text{m}$ を越えた時点で横ばい状態となる。 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具は切削初期からほぼ $1.6 \mu\text{m}$ を保持し、安定した粗さを示している。これより $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具は切削初期

Fig. 8 Relation between tool life L_1 and cutting speed

Fig. 9 Comparison of R_a - L curves for two tools

Fig. 10 Relation between average roughness height and cutting speed

から末期まで切れ刃の状態の変化が少ないことが考えられる。図 10 は工具寿命すなわち $V_b=0.2$ mm に達したときの表面粗さの切削速度依存性を示している。これより、両工具とも切削速度の増加とともに表面粗さが改善される傾向にあり $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具は $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具に比し 1/3 程度の粗さを示しており、仕上用工具としての活用も十分期待される。図 11

は、FC 30 材を $V=6.67$ m/s (400 m/min) の条件で切削したときの工具磨耗全体像を示している。図より $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具は境界磨耗が大きく発達している。これに比し $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具は前逃げ面境界上のランド部に多数のホイスカの存在 (図 12 参照) が確認され、このホイスカによって境界磨耗が抑制され表面粗さが改善されたものと考えられ、この傾向は

Fig. 11 SEM micrographs of alumina based tools after cutting at the speed of 6.67 m/s (400 m/min)

他の条件においても観察された。一方 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 系工具においては図 13 に見られるような切れ刃稜線上への付着、剝離や切れ刃のチャIPPINGにより切れ刃が鈍化し、このため図 8 で示したような工具寿命 L_1 のばらつきが生ずるものと考えられる。ただし、長寿命であった $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 系工具において FC 25-CC 材

Fig. 12 SEM micrographs of wear notch in minor cutting edge of worn $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ tool at $V=6.67$ m/s (400 m/min) and $L=16$ km Fig. 13 SEM micrographs of chipping on major cutting edge of worn $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ tool at $V=8.33$ m/s (500 m/min) and $L=8$ km

Fig. 14 Comparison of V_B - L curves for $Al_2O_3+SiC_w$ tool

切削時に図 14 に示すように摩耗が急増し、これは、

に示すような反応⁷⁾が工具摩耗を助長し、極めて短寿命に終わったと考えられる。このため、SiC ホイスカ添加工具はフェライト相の多い鋳鉄材の切削には不向きであると考えられ、この工具を効果的に使用する場合に注意を要する。

5. 結 言

鋳鉄を被削材として SiC ホイスカ添加工具の ① ホイスカ配向方向による耐欠損性、② 粒子分散強化材とホイスカ添加材の比較、③ 湿、乾式切削条件下でのホイスカ添加工具の環境依存性、④ 連続切削におけるホイスカ添加の効果等について調べた結果、次のような結論を得た。

連続切削条件下においては、

- (1) ホイスカ添加工具 (Al_2O_3 系) はホイスカ配向方向により切削性能が異なり、ホイスカを工具すくい面と平行に配した方が、ホイスカ添加によ

る強じん化が強く作用する。

- (2) じん性値の低いアルミナ系工具の方が、窒化けい素系工具よりホイスカ添加の効果が大きい。
 - (3) 窒化けい素系工具による湿式切削において、前逃げ面境界摩耗の抑制にホイスカの添加が有効である。
- 連続切削の条件においては、
- (4) ホイスカ添加アルミナ系工具は粒子分散強化アルミナ工具に比し、さらにじん性が向上し、チップングも抑制されることから、切れ刃の保持性に優れる。
 - (5) ホイスカの添加により、耐前逃げ面境界摩耗特性が向上し、表面粗さの点で有利に作用する。
 - (6) フェライト相の多い鋳鉄材の加工に際して、SiC ホイスカ添加工具は不向きである。

参 考 文 献

- 1) D. K. Aspinwall and W. Chen: Machining of Gray Cast Iron Using Advanced Ceramic Tool Materials, Proc. Int. Matador Conf., 27, (1988) 225.
- 2) 例えば、宮田 昇: 粒子分散形セラミック複合体の強度と靱性, 材料, 37 (1988) 361.
- 3) K. Shintani, T. Oiji, Y. Fujimura and M. Ueki: Cutting Performance of Toughened Ceramic Tools, Proc. Int. Conf. on Evolution of Advanced Materials, (1989) 267.
- 4) T. Nose and T. Fujii: Evaluation of Fracture Toughness for Ceramic Materials by a Single-Edge-Pre-cracked-Beam Method, J. Amer. Ceram. Soc., 71, 5, (1988) 328.
- 5) R. W. Rice: Mechanisms of Toughening in Ceramic Matrix Composites, Ceram. Engg. Sci. Proc., 2, (1981) 661.
- 6) K. T. Faber and A. G. Evans: Crack Deflection Processes - 1. Theory, Acta Metall., 31, (1983) 565.
- 7) A. J. Aller: New Cutting Tool Materials and their Properties, Interceram, (1985) 5.

編集後記

「日本の基礎研究は貧弱だ。日本の現在の工業のベースになっている知識や手法などはすべてアメリカやヨーロッパで産み出されたものではないか」と、外国から非難を浴びています。そのような新しい知識や手法の生産を担うのは数多くの大学であり、様々な研究所です。その人たちが、実際に使ってもらえるもたえはないは別に、新しい知識をどんどん頑張って産み出して行けばいい。そして、それらの成果を発表するための公の場が学会であり、それを印刷物という具体的な形に表したものが学会誌だと思います。

最先端の本当に新しい知識を非常に正確な形でまとめた

研究論文(毎号約 110 ページ)、最先端ではないけれども新しい知識をある程度まとめた形で、読みやすく理解しやすい形でまとめた特集記事(毎号約 40 ページ)、このような形で毎月会員に配布される新しい知識のデータベース、新しい知識の情報誌、これが理想の学会誌ではなからうか、と考えて毎号の編集を進めている次第です。

そして、学校関係者は、研究論文を投稿するという積極的な形で学会誌を利用できるが、学会を構成しているもう一方の企業関係者の大多数にとっては、そのような形では利用しにくいこと、また多忙な業務との関係から常に知識をフレッシュアップして行くことが困難であることを考えて、特集記事は、企業関係者にメリットがあるように、アップデートしてゆける知識を提供できる、魅力あるものにしていきたいと思っています。(林 巖)