調査・報告

次世代切削加工に関する調査研究

田村　信*　石川　淳**　菅野　明宏**　大川原　真***　福田　拓哉****

Report of Market and Technology Trend of Next-generation Cutting Technology

TAMURA Makoto*, ISHIKAWA Atsushi**, KANNO Akihiro**,
OKAWARA Makoto*** and FUKUDA Takuya****

1. 緒　　言

当所では，1995 年に戦略技術研究「超高速切削加工技術」に着手し，これまで金属難削材である高硬度金型鋼，チタン合金，ニッケル基耐熱合金などを対象として，高速ミーリング加工の適用を進めてきた。

近年，材料面において，異なる材料を組み合わせて優れた性質を創出する「複合材料」の活用が進展している。航空機産業を例にすれば，機体の軽量化のために従来のアルミニウム合金から炭素繊維強化プラスチック複合材(CFRP)への変換が拡大し，新規機体開発においては必須材料となっている。また，金属基複合材料(MMC)，セラミックス基複合材料(CMC)についても，強度，軽量，耐熱性などのさらなる高機能化が求められる分野への適用が進みつつある。

一方，これらの複合材料は部材としての形状創製が困難なことが多く，切削加工についても高い難削性を示し，普及に向けた課題のひとつとなっている。そこで，本調査研究では，CMC を対象として，市場および技術動向を調査するとともに簡易な切削加工試験を実施し，加工技術開発の可能性について検討した。

2. CMC の動向調査

2.1 CMC の概要

CMC は母材（マトリックス）にセラミックスを用い，短繊維や長繊維セラミックスなどの強化材料を複合させた材料である。繊維やマトリックスの微小な破壊領域では脆性的な挙動を示すものの，含有した繊維によりクラックの進展が抑制されるため，材料全体としてはセラミックス材料で問題となる脆性的な破壊を防止できることが特徴である。この材料は 1000℃以上の耐熱性を持ち，耐熱合金の代表であるニッケル基耐熱合金に比べて比重が 1/4 と軽量であり，さらに釘が刺さるほどの破壊靭性を持っており，その特徴から航空機をはじめ発電，自動車，エネルギー関連などの幅広い産業で利用拡大が期待され，一部では実用化が始まっている。

2.2 CMC の市場動向

SiC/SiC（A/B の記述は A が繊維の種類を示し，B がマトリックスの種類を示す）は，1990 年代より軍用機部品として使用されてきてきたが，2014 年には民間航空機エンジン部品に初めて採用された。この材料は次世代耐熱材料として CMC の中で最も注目を集めており，今後，航空機分野において，適用範囲の拡大が計画されているほか，さらなる高温への対応に向けた材料開発が各国で活発に進められている。

C/SiC は，航空機用や自動車用ブレーキディスクなどの耐摩耗材料やロケット部品などに使用されている。自動車用ブレーキディスクは，ヨーロッパでは適用事例が増加しており，使用量の増加によりコストが低減し，適用範囲が拡大すると期待されている。

このほかにも熱処理炉部材や産業装置部材に使用されるなど，使用実績が豊富な C/C などが

*　中越技術支援センター
**　研究開発センター
***　下越技術支援センター
**** 上越技術支援センター

ある。

このような背景から CMC の市場は拡大を続けており，市場規模は 2021 年の 88 億ドルから，2031 年には約 3 倍の 250 億ドルに達すると予測されている[1)]。

2.3 CMC に対する加工

多くの CMC 製部材は表面の 1～2mm 程度の余肉を除去して製品面とする必要がある。

CMC は材料を構成している繊維およびマトリックスが高硬度であること，また，不均一な構造であることから，切削や研削による除去加工が難しく，加工能率や工具寿命などの点で課題を有していることが指摘されている[2)]。現状，CMC の加工では，ダイヤモンド電着工具などのダイヤモンド砥粒を用いた工具が使われているが，加工能率の向上が課題となっている。また，曲面を有している部材も多くあり，三次元形状に対応した加工技術が求められている。

2.4 ダイヤモンドコーティングの動向

CMC の加工にダイヤモンドコーティングエンドミルが適用できれば加工能率の大幅な向上が期待できる。

ダイヤモンドコーティングは国内の複数の企業が開発を進めており，ダイヤモンド粒径，多層構造，切れ刃形状などを特徴としたコーティングが提案されている。また，ダイヤモンドは 600℃程度で，質量の減少を伴い酸化することが知られており[3)]，耐熱性の改善のために特殊な製法により酸化開始温度を 700℃まで高めたコーティングなども提案されている。

3. CMC の切削加工試験

ダイヤモンドコーティングラジアスエンドミルを用いた切削加工試験を行った。被削材には（株）超高温材料研究センターが製造するチラノヘックス（SiC/SiO_2）を用いた。この材料は SiO_2 を被覆した SiC 織物を重ねてホットプレス成形した複合材料で，高温強度に優れ，高い破壊靭性を有するなど、SiC/SiC と同程度の機械特性を有している。

加工試験方法を図 1，加工条件を表 1 に示す。試験では図 2 に示した垂直方向繊維と水平方向繊維が混在している面に対して 1 方向切削にて 5 面の加工を行い，工具の損傷状況について観察した。

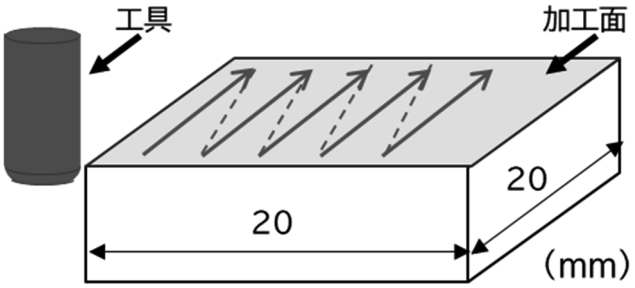


図 1　加工試験方法

表 1　加工条件

工具	ダイヤモンドコーティング ラジアスエンドミル 直径4mm, コーナーR1mm, 2枚刃
回転速度 min^{-1}	20000
送り速度 mm/min	3200（一刃送り0.08mm/刃）
軸方向切り込み mm	0.5
径方向切込み mm	0.2
使用機械	静岡鐵工所製NCフライス盤SMV-520
クーラント	水溶性潤滑剤10倍希釈

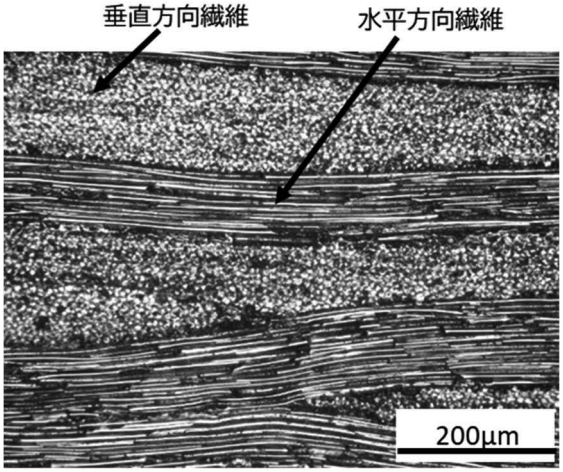
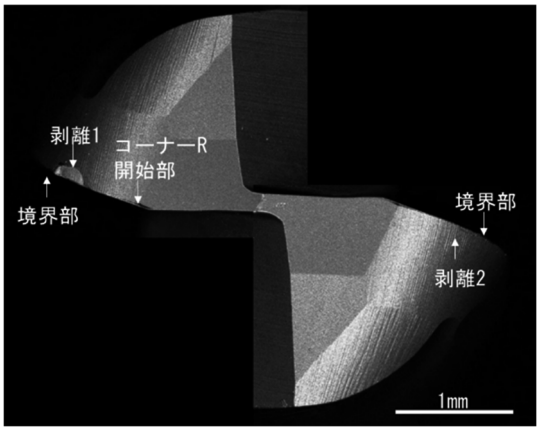
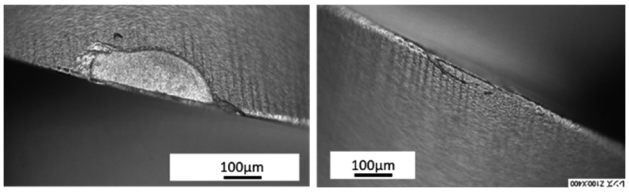


図 2　加工面の組織



(a) 工具全体

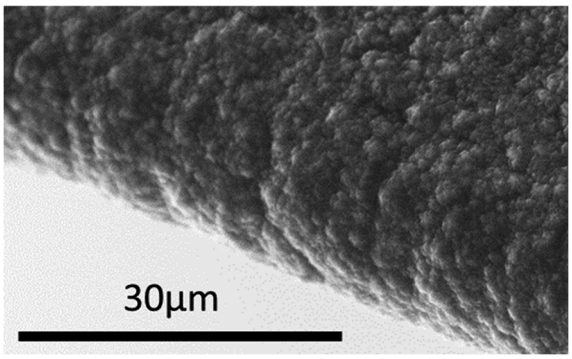


(b) 剥離 1　　(c) 剥離 2

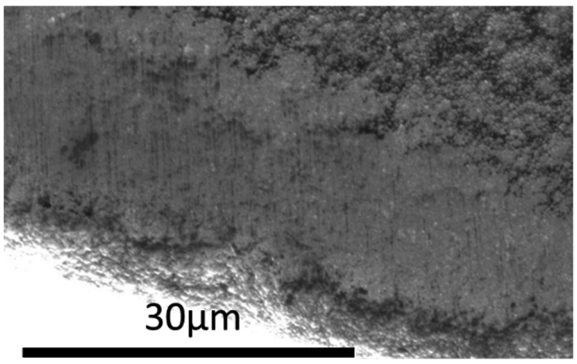
図 3　工具観察結果（マイクロスコープ）

図 3 にマイクロスコープによる工具観察結果を示す。切れ刃の切り込み境界部近傍にはコーティングの剥離が観察された。図 4 に示した電子顕微鏡による観察では，コーナーR 開始部の切れ刃の摩耗は，擦過による摩耗と考えられるが，境界部の切れ刃には凹凸および穴が観察され，擦過摩耗とは明らかに異なる損傷を受けていることがわかる。本試験条件ではコーナーR 開始部の切削速度は 100m/min であるのに対して，境界部では 2 倍以上の 230m/min となっており，境界部の加工点温度はコーナーR 開始部に比べて高いため，切れ刃は酸化により損傷したものと考えられる。

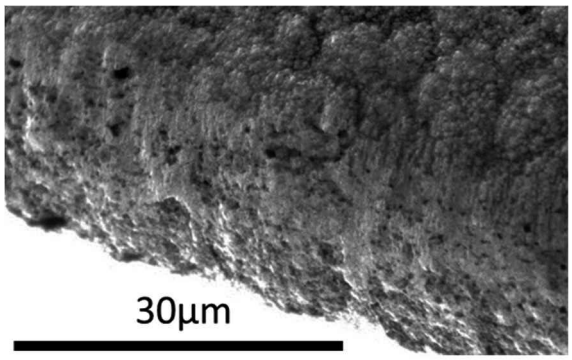
以上より，ダイヤモンドコーティングエンドミルを用いて加工できる可能性があるものの，コーティングの剥離や酸化による切れ刃の損傷が懸念されるため，コーティングについては耐剥離性と耐摩耗性の改善が望まれる。また、加工点の温度に留意した適切な加工条件設定が必要である。



(a) 未使用時の切れ刃



(b) コーナーR 開始部



(c) 境界部

図 4　工具観察結果（電子顕微鏡）

4. 結　　言

(1) CMC は耐熱材料として期待され，市場拡大が続いている。一方，CMC に対する加工では，加工能率向上が課題となっており，三次元形状の加工に対応した加工技術が求められている。

(2) ダイヤモンドコーティングラジアスエンドミルによるチラノヘックスの切削加工試験を実施し，工具摩耗特性について把握した。

参考文献

1) https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000295.000071640.html

2) 古本　達明ほか，”軸付砥石によるセラミックス基複合材料の研削加工”，砥粒加工学会誌，Vol.58，No.6，2014，pp．24-29．

3) 飯島　昇ほか，”焼結ダイヤモンド工具の切削性能と摩耗機構（第 2 報）”，精密機械，50 巻，9 号，1984，pp．125-130．