

繊維強化複合材料の研削加工に関する基礎研究

田 戸 保*・瀬 戸 雅 文**・森 重 修 一**

Study on Grinding Operation at Fiber Reinforced Composite Materials

Tamotsu TADO, Masafumi SETO, Shuichi MORISHIGE

Abstract

At several kinds of FRM (Fiber Reinforced Metals), machined surface quality was studied by a fundamental grinding experiment with a single fly tool method. It was found that the machined surface was affected with the directions of fiber, cutting speeds and the tool materials under observation of SEM (Scanning Electric Microscope). As the highspeed cutting with diamond tool, the fine machined surface was obtained with the cutting of vertical direction for fiber. The distribution and cross sectional formation of fiber in FRM were compared with theoretical results and experimental values. The distribution is determined by percentage of fiber content and the formation was changed by fiber materials.

1. 緒言

繊維強化複合材料 (Fiber-reinforced Composite materials) は、異種材料の複合体である。それぞれの材料の特徴を有効に採用し、単一材料では出し得ない特異な性質を持つ材料として注目されている。しかし、機械加工においては、異種材料の複合材であるために材料の機械的・物理的性質等が大きく異なることから、一般の鉄鋼材料とは異なった現象を生じることが報告^{1)~4)}されている。加工精度、商品価値に直接影響する加工面性状について多くの検討すべき課題を抱えている。とくに最終仕上げである研削加工においては、複合材料の繊維構造、分布状態、形状等が加工面性状、切削抵抗、砥石寿命、砥粒摩耗等に与える影響について検討する必要がある。

そこで本研究では、FRM (Fiber Reinforced Metals Composite Materials) 材における研削加工表面状態について、基礎的に調べるため単一切れ刃工具研削法を採用し、繊維の種類(材質、含有率、形状等)、砥粒(工具)

切れ刃形状、砥石(工具)材種等の影響について検討を行った。また繊維組織および形状、繊維の分布状態、平均繊維間隔、繊維断面形状等についても考察を行った。

2. 繊維強化複合材料表面組織の観察

繊維強化複合材料の表面組織は繊維の種類、製造方法、含有率等により組織形態を異にするが、一般の金属材料にみられる組織とは異なって複合材料では繊維の方向性が存在する。この方向性は機械的強度にも大きな影響を与え、機械加工においても十分な注意を必要とするところである。

図1、2はFRM材(SiC / Al, CF / AC4C)の垂直断面での電子顕微鏡写真であるが、図1の繊維断面形状は一本一本が、ほぼ真円形であるのに対し、図2の繊維では変形した楕円で、それぞれの形状が異なっている。また、図1、図2とも一本一本の繊維の大きさには、バラツキがみられ一定したものではない。さらに製造方法の違いにより、繊維の分布状態により差異がみられる。とくに図2の場合は繊維を一つの束にしてまとめて製造する(プリフォーム法)ため繊維束と繊維束の間に母材(本実験ではアルミニウム)の含有による境界部が観察され

*宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

**宇部工業高等専門学校 機械工学科

る。また含有率の割合により、繊維の分布状態に変化がみられる。図3、図4は図1、図2の繊維方向の写真である。繊維の種類による大きさの違いはみられるが、繊維一本の各部分における大きさの差異は見られない。しかし、繊維表面の形状は大きく異なっており、図3 (SiC / Al) では繊維表面に小さな凹凸が無数に観察されるのに対し、図4 (CF / AC4C) では繊維方向に滑らかな筋模様みられる。これは繊維材質の差異によるもので、繊維表面形状は母材との界面部での新和性、機械的強度に大きく影響を与える。

図5は短繊維 (ウイスカ) の組織状態図であるが、繊維方向は長繊維のように一定したものではなくランダムである。繊維直径は非常に小さく、約 $0.5 \mu\text{m}$ 程度である。短繊維 (ウイスカ) では微細な繊維がランダムに存在していることから、長繊維のように方向性による機械的強度の影響は少ないことが推察できる。とくに安定性を大とする部分には長繊維材よりも有効であると思われる。

3. 繊維の分布状態

3. 1 理論式の誘導

繊維複合材料を切削加工する場合、材料の加工方向により全く異なった切削現象を起こすことは予想し得ることであるが、同一方向であっても繊維の形状・配列、含有率、製造方法等によって変化することが考えられる。

繊維の断面形状を理想的な円形とみなし、配列も等間隔であると仮定して、繊維の平均直径と含有率から単位面積当りの繊維本数、平均繊維間隔を求め実測値との比較を行った。

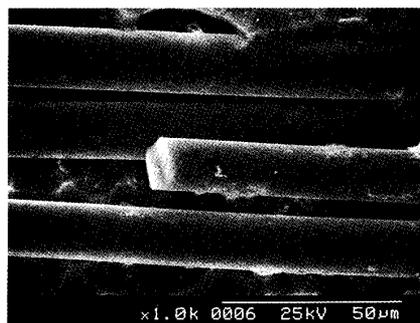


図3 .SiC/Al 材の繊維形状

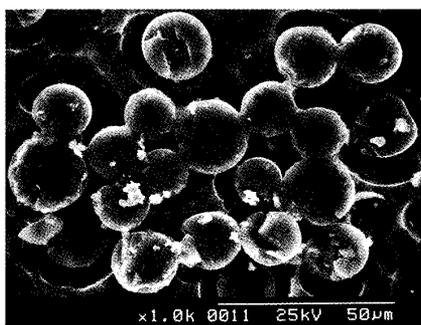


図1 .SiC/Al 材の断面形状

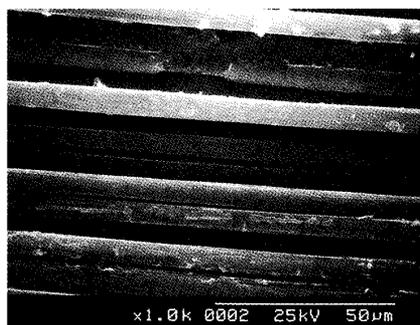


図4 .CF/AC4C 材の繊維形状

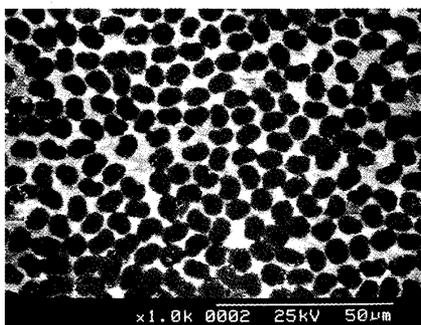


図2 .CF/AC4C 材の断面形状

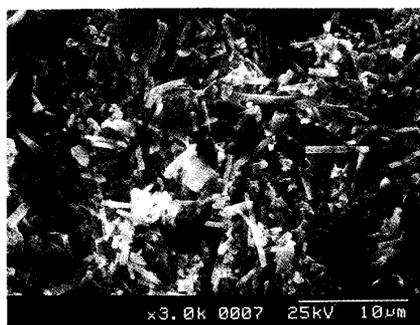


図5 .ウイスカ (SiC) 材の繊維組織

繊維が母材中に均一に分布しているものとして、図6に示すように繊維直径： D_f 、繊維の中心間距離： L_f 、含有率： V_f として、次のような関係式が求められる。

繊維の垂直断面面積： A は

$$A = \pi \cdot D_f^2 / 4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。

つぎに、単位体積中に含まれる繊維の本数は繊維の形状によって異なるが、いま長繊維の場合を仮定すると繊維数： N_f は、次式で与えられる。

$$N_f = V_f / A$$

$$= 4 \cdot V_f / \pi D_f^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、長繊維の場合は垂直断面方向での単位面積当りの繊維数も同じように N_f で与えられるため、単位面積当りに占める繊維面積は

$$A_f = \pi \cdot D_f^2 \cdot N_f / 4$$

$$= V_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

従って、垂直断面方向における 繊維の平均間隔： L_f は (4) 式で与えられる。

$$L_f = (1 / N)^{1/2}$$

$$= (\pi \cdot D_f^2 / 4 \cdot V_f)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図6に示すように繊維間隔の最小(L_{min})最大(L_{max})は、(4)式より、

$$L_{min} = L_f - D_f \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$L_{max} = L_f + D_f \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

3. 2 平均繊維間隔

前述したように、繊維複合材料での繊維は形状、分布状態および大きさは一定でなく、繊維材質、製造方法等により大きく変化する。

図7は、SiC / Al、CF / AC4C における繊維直径と (1)(2)式からの理論値との比較を示したものである。

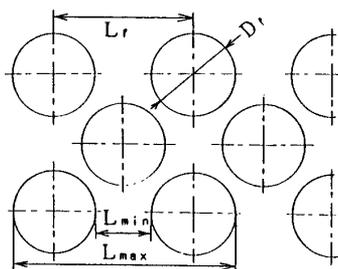


図6. 繊維の分布状態

両材質とも設定基準値の1%以内の誤差範囲であり、繊維直径は一定(平均値)した形状であることがわかる。CF / AC4C材では、約6 μ m直径で、 $\pm 1 \mu$ m以内のバラツキを示している。また、SiC / Al材においても同じ傾向を示している。図8は繊維と繊維の間隔を測定した値であるが、材料により大きな差異を生じている。とくに、SiC / Al材では非常に大きな変化見られる。10 μ mから30 μ m程度バラツキとなっている。CF/AC4C材では、5 μ mから8 μ m程度と比較的変化が小さい。しかし、平均値と理論値の差については、CF / AC4C材で約2%、SiC / Alで約4.7%と比較的小差である。これら材料による差異は繊維の含有率、製造方法等により影響されることがわかる。とくに含有率が少ない場合は均一な分布とならず、部分的な集中現象を生じる。また製造方法においても、プリフォーム式では、その部分はほぼ一定した間隔であるが、プリフォームとプリフォームの間では母材を充填した境界部が生じ、その部分では

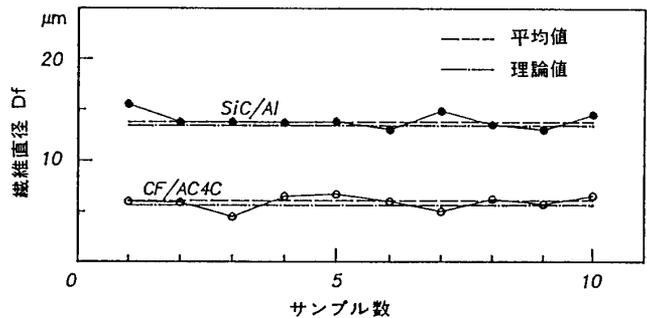


図7. SiC/Al、CF/AC4C材における繊維直径の分布

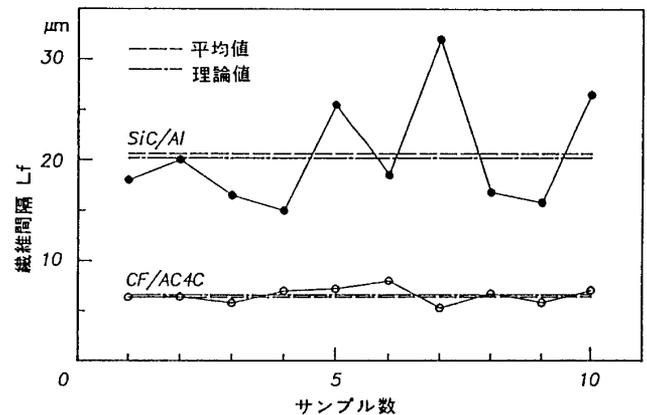


図8. SiC/Al、CF/AC4C材における繊維間隔の変化

繊維がみられない。

ウスカ材の場合は、一般的に繊維方向がランダムであるため、一定方向からの測定は不可能であるが、この場合も製造方法により、2次元と3次元ランダムになることがある。ウスカ材では3次元ランダムが有効であると言われているが、詳細な検討は今後の研究によるところである。以上のように、繊維の分布状態は繊維の含有率、製造方法に大きく影響されることがわかる。

4. 単一切れ刃工具による研削加工⁵⁾

研削砥石は無数の砥粒で構成されており、一個一個の砥粒形状も多種複雑である。さらに一個の砥粒においても被削材に直接作用する切れ刃形状は非常に不規則であり、結晶構造も複雑で種々の微小破砕を生じることから、砥粒切れ刃による切削機構や被削材への影響を詳細に調べることは非常に困難である。

そこで本研究では、切れ刃部形状を一定にしたモデル工具による単一切れ刃工具による研削実験を行った。研削加工表面性状に主視点を置き、被削材の加工表面状態および繊維材質、含有率との関係等について調べた。また、研削加工における砥粒形状の種類を仮定して、工具切れ刃の先端角(スクイ角)および工具材質(セラミックス、ダイヤモンド)を変化させた実験を行い被削材への影響を調べた。

4. 1 実験方法

単一切れ刃工具による研削加工方法には、種々の方式(引っかけ、旋削、舞ツール等)⁶⁾があり、それぞれに特徴を有している。本実験では、舞ツール方式を採用し、切削中のテーブル移動は縦方向で行った。図9は、本実験で行った単一切れ刃研削実験装置の概略を示したものである。平面研削盤の砥石軸に回転円板(アルミニウム製、直径:200mm、厚さ:20mm)を取り付け、その円板の円周上に単一切れ刃工具(図9)を固定し、オーバカット方式で実験を行った。研削砥石における砥粒切れ刃はさまざまであるが、本実験では図10に示すように、セラミックスおよびダイヤモンドの各工具とも切れ刃先端角(スクイ角)を 0° と -60° に設定した。切削速度(周速度)は、1000、2000m/minの低速、高速を採用した。切削方向に対しては、被削材の繊維を基準として、図11に示すように①直角、②垂直、③平行の3方向に対して加工実験を行った。

4. 2 実験結果

単一切れ刃工具による舞ツール方式の研削実験では、図12に示すように1サイクルの切削過程で、初期(入口)、中期(中央)、末期(出口)において変化することから本実験では、主として3ヶ所に分けて走査電子顕微鏡(日立製作所、S-2300)により観察を行った。

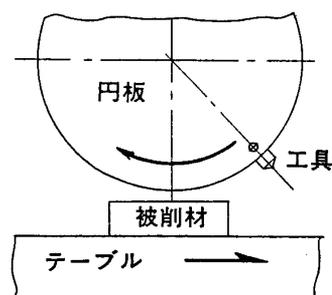


図9. 単一工具研削実験装置

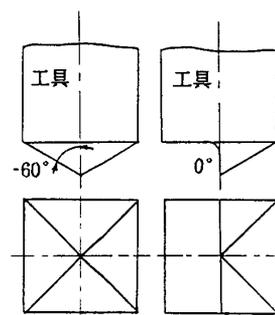


図10. 工具形状

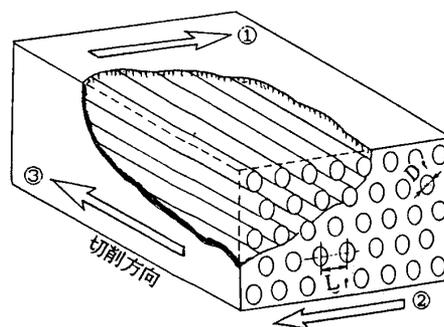


図11. 切削方向(①直角、②垂直、③平行)

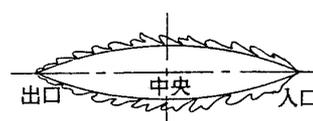


図12. 1サイクルでの切削痕形状

4. 2. 1 セラミック工具による場合

4. 2. 1. 1 長繊維 (SiC / Al) の場合

繊維方向に対して、切削面（加工溝）の形状は異なるが、切削過程（入口、中央、出口）においては、大差は認められない。図13は①方向（繊維に対して直角）の切削面の中央部を示したものであるが、繊維は数個に分離（破断）して、元の繊維配列の状態から、ほぼ平行に押し流された形となっている。また、繊維一本に注目すると切削により繊維は回転を起こしている。繊維の出口側において隙間（谷間）を生じることが確認できた。このことから直接にセラミックチップにより繊維 (SiC) を切削することには無理があり、切込みの小さい切り始め（入口）や切削終り（出口）では、その傾向が強く現れており、繊維と母材面に段差が生じている。すなわち繊維は切削されず、刃物は繊維の部分を乗り越えた状態となる。とくに、 -60° のスキイ角工具では、この傾向が強くみられ、 0° においても繊維を母材に埋め込んでいる。図14は、②方向（繊維に対して垂直）の切削面であるが、刃物による切削痕は観察されず、繊維は破断（折断）され、全体的に切削面は粗である。切削面の入口、出口すなわち切込みが小さい時は繊維の粉砕が見られ、繊維

をすりつぶした現象を生じる。この傾向はスキイ角が -60° から 0° に変化してもほとんど影響されない。図15は③方向（繊維に対して平行）の場合であるが、図13、図14とは傾向が異なり、切削面に繊維の原型が残り、一部に繊維の抜け落ちが観察される。切込み深さが小さい場合には前述したように切削ではなく、小さく粉砕されている。繊維の抜け落ちは少なく、繊維の上を切れ刃が滑り、繊維を母材に押し込んだ状態となる。

4. 2. 1. 2 長繊維 (CF / AC4C) の場合

図16は、①方向についての切削面であるが、図から観察されるように、繊維は切削されず、むしり取り現象を生じている。とくに切削溝側面にその現象が観察され、繊維一本一本が引きむしられた状態である。この傾向は、切削速度を1000、2000 (m / min) と変化しても差異はみられず、スキイ角 (-60° 、 0°) においても同じであった。切削面は非常に粗く、繊維の抜け落ちが見られる。②方向では、図17に示すように繊維の切断状態が観察される。図18は、図17の拡大図であるが、一本一本の繊維が切断されていることがわかる。繊維の切断面は切削方向に少し流れており、母材面に対して、やや傾斜している。とくにスキイ角 (-60°) の場合に生じやすく、



図13. SiC/Al (①方向)の切削面

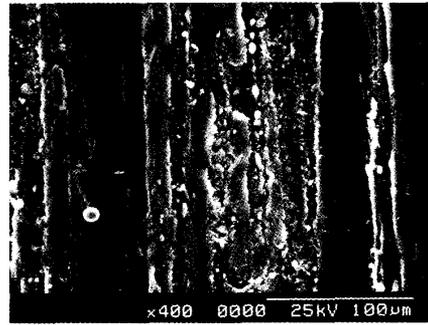


図15. SiC/Al (③方向)の切削面

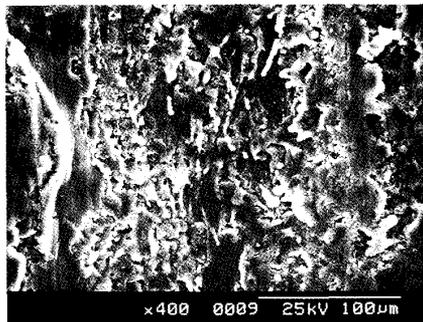


図14. SiC/Al (②方向)の切削面

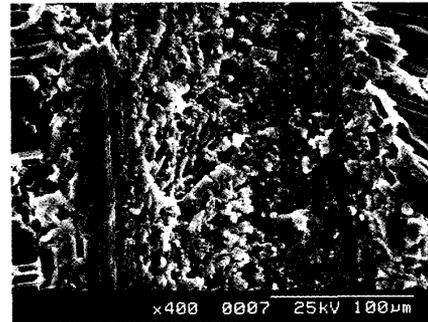


図16. CF/AC4C (①方向)の切削面

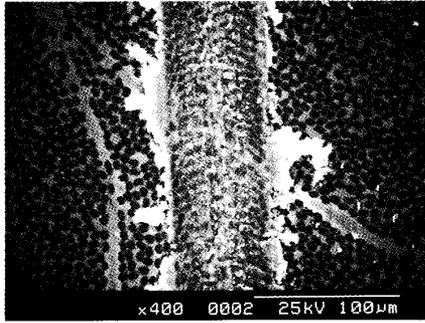


図17. CF/AC4C(②方向)の切削面

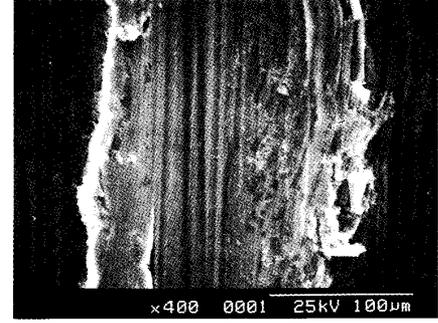


図19. CF/AC4C(③方向)の切削面

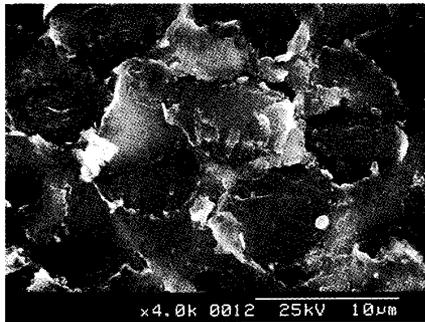


図18. 図17の拡大

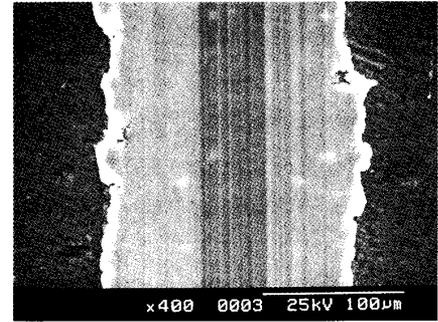


図20. ウィスカ(SiC)材の切削面

0°では繊維を引っかけながら滑り、破断現象を起こしている。図19は、③方向の切削面であるが、繊維はほとんど切削されず、切れ刃が繊維上部を滑り、繊維を母材に押し込んでいる。従って、溝側面の盛り上がり⁷⁾が大きく、側面に繊維の突出状態が観察される。とくに負スキヤ角において顕著に見られる。スキヤ角 0°でも同じような傾向であるが、入口付近で繊維の堀起こしが観察される。全体的には、繊維の抜け落ち(欠落痕)が多数発生している。

4. 2. 1. 3 短繊維(ウィスカ)、純アルミニウムの場合

図20は、短繊維(ウィスカ)をランダム状態で充填した複合材料の切削面であるが、加工面状態は前実験で行った長繊維材料の場合と比較すると非常に美しいことがわかる。また切削面は切削方向、スキヤ角、周速度等の影響をほとんど受けないことが観察される。切削溝には切れ刃部のプロフィールが転写されており、切削性の良いことが伺える。

純アルミニウムは、短繊維(ウィスカ)と同じように、切削性が良好であり、スキヤ角や周速度による差は認められなかった。(図略)

4. 2. 2 ダイヤモンド工具による場合

4. 2. 2. 1 長繊維(SiC / Al)の場合

図21は、スキヤ角が -60° のダイヤモンド工具により被削材を①方向において切削した場合の切削面の中央部を示したものである。繊維はダイヤモンドの切れ刃により粉碎されている。セラミックス工具でみられた繊維の母材への押し込み現象は無く繊維を破碎している。図22は、スキヤ角 0° での切削面を示しているが、切れ刃は繊維上を滑ることなく繊維を切削している。繊維は鋭利な形で割れており、ダイヤモンド工具による繊維の切削状態を見ることができる。

図23に示す②方向では、切削面全体が美しく滑らかである。スキヤ角が -60° では繊維の各部に割れの発生がみられる。このようにダイヤモンド切れ刃では、SiC繊維を切削(微小破碎)することが可能であるが、金属材料の切削のように流れ形切り屑は発生せず、亀裂形で微小破碎となる。

4. 2. 2. 2 長繊維(CF/AC4C)の場合

カーボン繊維入り材(CF / AC4C)を①方向について、ダイヤモンド切れ刃で切削した時の切削面を図25に示

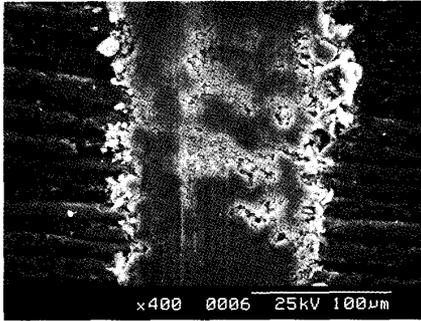


図21. SiC/Al (①方向、-60°C)の切削面

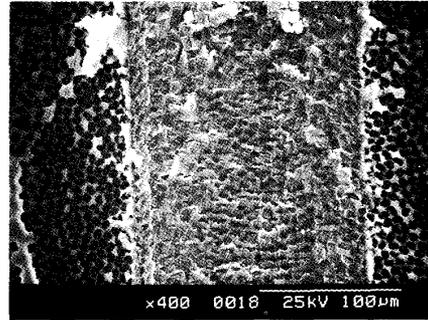


図25. CF/AC4C(②方向、0°C)の切削面

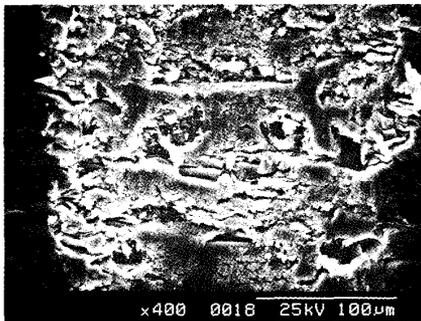


図22. SiC/Al (①方向、0°C)の切削面

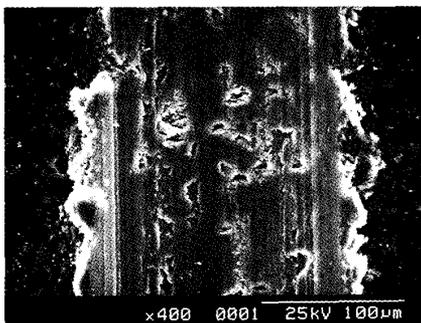


図23. SiC/Al ②方向、-60°C)の切削面

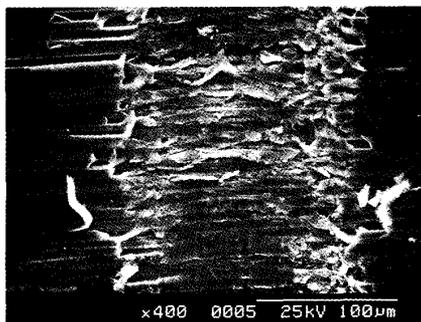


図24. CF/AC4C(①方向、0°C)の切削面

す。図24はスクイ角 0° の場合であるが、繊維は切削されセラミックス工具で見られた繊維の突出は観察されなかった。しかしスクイ角 -60° では繊維を母材に埋め込む現象がみられた(図略)。加工面はセラミックス切れ刃で切削を行った場合とは比較にならないほど整った状態である。良好な切削面の生成は繊維の含有率が70%と非常に多いことに関係あると考えられるが、工具材質により差異がみられることから工具材質による影響が大であると思われる。

図25は②方向で、スクイ角 0° の場合の切削面を示したものである。繊維は刃物により切削されており、セラミックス工具のように滑り、引っかき等の現象は認められない。しかし、スクイ角 -60° では、繊維の断面が切削方向にわずかに傾斜していた(図略)。これはスクイ角による影響で法線方向の抵抗が大きいためと考える。実際の研削加工においては、ドレッシングによる砥粒切れ刃の調整が重要であることがわかる。

6. 結 言

次世代材料として、注目されている繊維強化複合材料(FRM:繊維強化金属)についての研削加工に関する基礎実験を単一研削加工法により行った。本研究では加工表面性状への影響について繊維の材質・種類、切削方向、砥粒の種類等との関係を調べた。また繊維の分布状態、断面形状及び繊維間隔等についての解析を理論式を誘導し比較検討した。そのおもな結果は次のようである。

- 1) 繊維強化複合材料の繊維構造について、理論値と実験値の比較から含有率との関係は非常によく合うことが認められた。繊維断面形状については繊維材質により大きく異なり、繊維分布は製造方法からの影響を受けることがわかった。

2) 単一工具研削による基礎実験より、繊維の方向性、切削速度、工具材質による影響のあることを見いだした。セラミクス系工具よりダイヤモンド工具での高速切削が良好な加工表面となることがわかった。繊維方向については切削方向に対して垂直の場合がよく、短繊維（ウイスカ）では純金属（母材）に近い良好な仕上げ面であった。

繊維強化複合材料は多種であり、繊維材質、繊維と母材、母材材質等それぞれに特徴、干渉等が考えられることから、今後のより詳細な研究が必要である。

7. 謝 辞

本研究にあたって、実験にご協力下さいました本校卒業生 宮崎孝、伊藤幹人、林則哉、宮野寿、高橋成太の諸氏に深く感謝します。

なお、本研究の一部に特定研究費を充当しました。

8. 参考文献

- 1) 次世代金属・複合材料研究開発協会：金属基複合材料、複合材料次世代技術動向調査研究、P 206-216 (1986)
- 2) 石川、寺西、今井：ニカロン強化アルミ複合材料、A1・ある、3号、P1-10 (1986)
- 3) 不破、道岡：繊維強化金属材料（FRM）の摩擦・摩耗、潤滑、30巻5号、P67-72 (1985)
- 4) 福永：繊維強化複合材料FRMの加工の実験例と今後の課題、ツールエンジニア、No.10、P80-85(1987)
- 5) 佐久間、田戸：鋼の研削特性に対する熱処理の影響、機論、44巻388号、P4369-4382 (1978)
- 6) G.K.Lal, M.C.Shaw: Wear of Single Abrasive Grain in Fine Grinding, Proc. Int. Grinding Conf. Pittsburgh, Pa., P107 (1972)
- 7) 佐久間、田戸：砥粒切れ刃の切削作用に関する研究、精密機械、45巻8号、P945-950 (1979)

(平成元年9月22日受理)