



Title	繊維強化プラスチック(GFRP、CFRP)の研削加工に関する研究
Author(s)	田代, 徹也
Citation	大阪大学, 2005, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2574
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

纖維強化プラスチック（GFRP，CFRP）の研削加工
に関する研究

2004年12月

田代 徹也

目次

第 1 章 序 論	1
参考文献	6
第 2 章 一方向 G F R P 材の研削加工表面品位について	
一研削加工方法の影響一	12
2. 1 緒 論	12
2. 2 試料の作成方法	13
2. 3 実験方法	14
2. 4 実験結果および考察	15
2. 4. 1 試料初期表面の作製	15
2. 4. 2 スパークアウト回数の影響	18
2. 4. 3 平面プランジ研削回数の影響	22
2. 5 結 言	24
参考文献	25
第 3 章 G F R P の単粒切削	
一単粒形状がガラス繊維強化プラスチック	
(G F R P) の研削加工面に及ぼす影響一	27
3. 1 緒 言	27
3. 2 被削材	28
3. 3 ダイヤモンドホイールによる G F R P の研削加工	28
3. 3. 1 実験方法	28
3. 3. 2 G F R P 研削面の凹凸の測定	30
3. 3. 3 G F R P 研削面の S E M 観察	31
3. 4 単粒切削実験	34
3. 4. 1 実験方法	34
3. 4. 2 単粒切削実験結果	36
3. 4. 2. 1 単粒切削抵抗	36

3.4.2.2	単粒切削痕形状	38
3.5	GFRPの単粒切削急停止実験	41
3.5.1	実験装置	41
3.5.2	急停止実験後の切削痕観察	43
3.5.2.1	繊維角度が0/90°の場合	43
3.5.2.2	繊維角度が45/135°の場合	46
3.6	結言	49
	参考文献	50
第4章	各種砥石によるCFRPの乾式研削	51
4.1	緒言	51
4.2	被削材	52
4.3	研削実験装置および方法	53
4.4	研削実験結果および考察	56
4.4.1	研削速度および研削方向の影響	56
4.4.2	砥石の種類による影響	57
4.4.3	超砥粒ホイールによる研削表面の観察	62
4.4.4	SDホイールとcBNホイールの研削抵抗	63
4.5	SEM内二次元切削	65
4.6	結言	71
	参考文献	72
第5章	CFRPの研削面の生成機構	73
5.1	緒言	73
5.2	単粒切削実験	73
5.3	研削断面観察用のための被削材および実験方法	77
5.4	実験結果および考察	78
5.4.1	CFRPの研削断面の観察	78
5.4.2	単粒切削による切削痕断面の観察	82
5.5	切りくずの観察	85

5.5.1	45/135° クロスCFRPの研削切りくず	85
5.5.2	一方向CFRPの研削切りくず	87
5.6	研削熱の影響	89
5.7	結 言	96
参考文献		97
第6章 総 括		98
謝 辞		101

第 1 章

序 論

繊維強化プラスチック（FRP：Fiber Reinforced Plastics）は母材となるプラスチックを繊維で強化した複合材料で，組み合わせる母材と強化繊維によって様々な種類がある⁽¹⁾．その代表的なものであるガラス繊維強化プラスチック（GFRP：Glass Fiber Reinforced Plastics）を基礎に拡大してきたFRP産業において，近年では，強化繊維としてガラス繊維だけでなく，炭素繊維，アラミド繊維，アルミナ繊維など多種多様な繊維が使用されてきている．FRPは高機能性，多機能性を有する材料として，軽量かつ高強度が要求される部品に利用されてきたが，その応用分野も従来の構造材料としてだけでなく，高精度な機械部品にまで用途が拡大してきている．

FRPは，成形後そのまま部品として使用されることが望ましいが，製品の形状や寸法精度の要求が厳しくなるに伴って，二次加工として切削や研削などの機械加工が必要となることが多くなってきている．例えば，GFRPは電気製品のプリント基板に使用されているが，板厚の調整や表面処理の前加工として平面研削がなされる他，電子部品の装着のための穴加工が必要となる．また，パーソナルコンピュータ用のプリント基板では，増設ソケットへ挿入するために端子部分がソケットに合った形状に切断され，挿入しやすいように研削加工が行われている．GFRPのしゃ断器用操作棒では両端に接続金具を締結して使用されるが，端部のねじ加工が必要となる．ねじの精度が悪いとガタが大きくなり，設計強度も期待できなくなる．そのため，GFRPのおねじの加工精度が重要なポイントとなり，ダイヤモンドホイールによる研削加工が必要となる⁽²⁾．さらに，炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）は，例えば，自動車のプロペラシャフトに用いられているが，つなぎ手部分の穴あけ，端面の切削加工が行われる．輪転機のローラとしても用いられ，中空のCFRPパイプを円筒研

削し、鉄メッキが施されている。さらに自動搬送用システムの構成部品としても利用されているが、この部品の平面度に対する要求が厳しく、フライス加工の後、平面研削によって仕上げられている。このように、GFRP、CFRPを研削加工する必要性があるにもかかわらず、これまでに研削加工に関する系統的な研究はあまり見られず、研削方法も製造者が独自のノウハウで加工している場合が多く、また製造者の数も限られている。

ところで、一般にFRPは、硬い強化繊維が、これとは性質の異なるマトリクスと複合されているため、単一材とは異なり、不均質で強い異方性を示し、層間のせん断強度も小さく⁽³⁾、熱伝導率が小さいなど独特な性質を持つため難削材として知られている。機械加工時には工具摩耗が著しく激しく、切り屑、研磨粉が飛散しやすい⁽⁴⁾。また、切削や研削加工をしても、材料の繊維の配向方向によって面粗さが大きく異なっていて、繊維の横倒れや毛羽立ちなどが生じ⁽⁴⁾高精度の加工が困難となっている。このようにFRPは、きわめて被削性の悪い材料である。この難削材であるFRPの加工データは少なく、加工技術が未確立である。また、厳しい条件下で使用される部品に用いられることが多いため、加工に際しても仕上げ面粗さや表面品位など種々の要求を満足させながら、なおかつ、高能率に加工できる基礎技術を養っていくことが今後必要になると考えられる。

良好な表面品位を得るという点から考えれば、仕上げ加工には研削加工が必要となるが、FRPを研削する場合、金属と比べると材料が均一でなく異方性が強いため、従来数多く行われてきた金属の研削加工時における研削現象とは全く異なり、これまで養われてきた研削理論や経験⁽⁵⁾をそのまま適応することが難しい。FRPの母材であるプラスチック材の機械加工については、いくつかの報告⁽⁶⁾があるが、強化繊維が含まれていないため、加工機構が全く異なる。そこで、FRPの研削加工を行う上で、同じ材料を機械加工した報告が参考となる。ここで、FRPの切削加工や研削加工、穴あけ加工等について、これまでの研究報告をまとめると次のようになる。

FRPのうち、強化繊維としてガラス繊維を用いたGFRPの切削加工では、主に次のこと⁽⁷⁻³⁴⁾がわかっている。GFRPを切削する際、工具磨耗が著しく、磨耗の進行は切削条件に依存していて、切削速度が大きくなるほど

工具磨耗の進行は早い⁽⁷⁻¹⁶⁾。ただし、切れ刃のチップングなど切れ刃稜が欠落するような異常損傷は生じにくい⁽¹⁷⁾。さらに、すくい面磨耗は生じにくく、工具寿命は主に工具逃げ面の磨耗によるものであり、これは、繊維との摩擦によって工具磨耗が進行するためである^(16,18)。湿式切削では純水を用いた場合にのみ工具磨耗が軽減するが、通常切削油剤を用いた湿式切削では工具磨耗が増大し切削面も荒れる⁽¹⁹⁾。繊維含有率、繊維の配向方向も工具磨耗と表面品位に影響を及ぼす⁽²⁰⁻³⁴⁾等が述べられている。

GFRPの研削加工についての報告^(35,36)はわずかながらあり、それによれば次のことがわかっている。すなわち、砥石磨耗はGFRP切削時に生じる工具磨耗ほど急速に進行せず、仕上面の生成はガラス繊維のぜい性破壊および塑性変形とマトリクスの塑性変形により進行する⁽³⁵⁾。表面粗さはガラス繊維含有率、砥粒切れ刃と工作物との幾何学的干渉形状および研削速度の影響を受け、その場合の研削抵抗の変化と定性的に一致している⁽³⁵⁾。ガラス繊維の破壊様式は繊維の配向角によって、大破壊型、微細破壊型および破壊停止型の異なる3つのタイプの破壊形態に分類される^(35,36)ことなどが挙げられている。

GFRPの穴あけ加工についての報告^(37,38)も多少あり、次のことがわかっている。材料の光透過性を利用して内部損傷を評価した結果、仕上げ面粗さと内部損傷には密接な関係があり、画像処理を適用することにより穴部内部の損傷の評価が可能である⁽³⁷⁾。加工面品質を向上するには切削速度を変化させるよりも送り量を低減させる方が有効である^(37,38)。切削抵抗のスラスト力を静的成分と動的成分に分離した結果、動的成分が表面粗さに大きく影響する⁽³⁸⁾等が述べられている。

次に、強化繊維に炭素繊維を用いたCFRPの切削加工に関しては次のこと⁽³⁹⁻⁴⁹⁾がわかっている。GFRPと同様、工具磨耗が激しく生じる⁽³⁹⁻⁴⁹⁾が、切れ刃から逃げ面上を切削方向沿いに伸びる筋状の磨耗痕が見られ、これは切削仕上げ面に残った繊維端が工具逃げ面を擦過することにより生じ⁽³⁹⁾、工具磨耗の切削速度依存性は小さい^(39,40)。刃先丸みの増大は切削残留量ならびに加工変質深さの増加をもたらす⁽⁴¹⁾、そのうち切削残留量は金属に比べ大きく、繊維角やすくい角によって大きく変化し、その傾向は背分力の変化傾向

と定性的によく対応する⁽⁴²⁾。工具の熱伝導率は工具磨耗率との相関が極めて弱く、工具性能に及ぼす影響が極めて少ない⁽³⁹⁾。繊維角ならびにすくい角は切りくず生成を支配し、加工面、切削抵抗に多大な影響を及ぼす^(43,44)。切りくず生成の様式には、層間はく離形、繊維座屈形および繊維裁断形の3種類があり、それによって加工面は左右される⁽⁴³⁾等が報告されている。

しかし、CFRPの研削加工に関しては国内での報告^(50,51)はわずかで、国外での報告も含めて、次のこと⁽⁵⁰⁻⁵⁶⁾がわかっている。CFRPの二次加工のうち、研削加工によれば材料のばりやデラミネーションの発生を避けることができ、表面品位を改良できるので、加工面の品質やコストの点から研削加工が最も適した加工方法である⁽⁵²⁾。研削面粗さには研削方向依存性があり、90°方向（繊維軸に直角な方向）研削によって良好な研削面粗さが得られる^(50,53,54)。切りくずは塑性変形よりも微小破壊が主である⁽⁵²⁾。スパークアウトは、高速送り研削加工には有効だが、クリープフィード方式には効果が少ない⁽⁵⁴⁾。電解インプロセスドレッシング（ELID）研削法による鏡面研削が可能であり、微粒の砥石による研削加工が適用できる⁽⁵⁰⁾。カップ型砥石を用いた場合、インフィード研削よりもクリープフィード研削方式が推奨される⁽⁵⁰⁾等である。

また、CFRPの穴あけについて、ドリルでははく離が起こり⁽⁵⁵⁾、CO₂レーザ加工は適さない⁽⁵⁶⁾ことが報告されていて、小径砥石を用いたヘリカル切込み方式によって穴あけ⁽⁵¹⁾を行うことにより、高能率な加工が可能であると報告されている。

次に、繊維の種類は上記の2種類とは異なるが、アラミド繊維強化プラスチック（AFRP：Aramid Fiber Reinforced Plastics）の機械加工に関する研究がわずかにあり^(57,58)、タイミングベルトに用いられるアラミド繊維強化ゴムの研削加工については、中島ら⁽⁵⁹⁻⁶³⁾が機構も含めて詳しい報告を行っている。

以上のように、FRPの切削加工については多くの研究があり、工具磨耗や切削機構について実験的に詳しく述べられている。切削機構を解析した報告⁽⁶⁴⁻⁶⁶⁾もあり、これらによると実験結果とよく一致した部分もあるが、実際に切削加工した現象と合わない部分もある。しかし、FRPの研削加工につ

いての研究は、上述のようにわずかながらあるものの、適した研削条件の追求や研削機構にまで及んで追求された研究は少ない。

そこで、本研究では、代表的なFRPであり製品の分野も広いGFRPとCFRPの研削現象を明らかにし、研削機構について実験的に調べた。GFRP製品については、現在行われている研削加工において加工表面に傷が残ることが問題とされており、この原因を突き止めることが、今後プリント基板の薄板化やGFRP製品の品位の向上に役立つと考えられる。さらに、最近用途が拡大してきているCFRPについては、平面度の要求が厳しい部品として用いられていることから、良好な表面品位が得られる研削条件や研削機構について、詳しく調べることにした。

本論文は、以下の章より構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と意義・目的を述べている。第2章では、GFRPの研削現象を理解するためにガラス繊維を一方向等間隔に並べた材料を作成し、その研削加工事例を述べる。第3章では、GFRPの研削表面品位の向上を妨げる原因を追求するために単粒研削実験を行い、砥粒形状の影響について述べる。第4章では、CFRPの研削実験を通して、適した研削条件について述べる。第5章では、CFRPの研削機構を解明するための種々の研削実験を行い、特徴的な加工表面の生成機構について述べる。第6章は本論文の総括である。

参考文献

- (1) 日本機械学会編：先端複合材料，技報堂出版，(1990)
- (2) GFRP操作棒の研削ねじ加工，加工技術データファイル，(1985)4-40.
- (3) D・ハル著，宮入他共訳，複合材料入門，培風館，(1984)
- (4) 鈴木節男：難加工材の切削・研削・ドリル加工，海文堂，87.
- (5) 例えば，小野浩二，研削仕上げ，槇書店
- (6) 例えば，小林昭，プラスチックの研削切断法の研究（第10報），精密機械，23,11(1957)532.
- (7) 津枝正介，長谷川嘉雄，花崎伸作：強化プラスチックの断続切削における工具磨耗（第1報，乾式切削における磨耗特性），日本機械学会論文集（第3部）34,266(1968)1813.
- (8) 長谷川嘉雄，花崎伸作，強化プラスチックの断続切削における工具磨耗（第2報，強化プラスチック切削における強化材の挙動のレオロジ的考察），日本機械学会論文集（第3部）34,266(1968)1821.
- (9) 長谷川嘉雄，花崎伸作，鈴木康夫，里中忍：GFRP切削時の工具磨耗の機構，精密機械，41,5(1975)473.
- (10) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍：GFRP切削時の工具磨耗特性，精密機械，44,11(1978)1334.
- (11) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍：GFRP切削時の工具磨耗特性，精密機械，44,11(1978)1334.
- (12) 長谷川嘉雄，花崎伸作，錦美誠：GFRP切削における工具の磨耗機構，精密機械，50,11(1984)1747.
- (13) 長谷川嘉雄，花崎伸作，錦美誠：ガラスビーズ強化ポリエステル樹脂切削時の工具磨耗，精密機械，51,2(1985)415.
- (14) 長谷川嘉雄，花崎伸作，藤原順介：GFRPの切削加工における工具磨耗，日本複合材料学会誌，10,1(1984)29.
- (15) 井上久弘，井戸守，強化プラスチックの切削加工に関する研究，精密機械，39,3(1973)280.

- (16) 佐久間敬三，瀬戸雅文：強化プラスチック（GFRP）切削における工具磨耗（工具材種の影響），日本機械学会論文集（第3部），44,381(1978)1752.
- (17) 佐久間敬三，瀬戸雅文：強化プラスチック（GFRP）切削における工具磨耗（切削温度と工具磨耗との関係），日本機械学会論文集（C編），46,408(1980)990.
- (18) 狩野勝吉，難削材の切削加工技術，工業調査会(1989).
- (19) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍，難波江周一郎：GFRP切削時の工具磨耗特性に及ぼす切削材の影響，精密機械，47,5(1981)541.
- (20) 井上久弘，井戸守，強化プラスチックの切削加工に関する研究（第2報）－ガラス繊維強化硬質塩化ビニル樹脂の切削加工－，精密機械，40,12(1974)1035.
- (21) 佐久間敬三，瀬戸雅文：強化プラスチック（GFRP）切削における工具磨耗（繊維の配列方向と工具磨耗との関係），日本機械学会論文集（C編），48,436(1982)1938.
- (22) 竹山秀彦，飯島昇，野口祐成，加賀見由次：ガラス繊維複合材料（GFRP）の切削機構に関する研究，精密工学会誌，53,9(1987)1447.
- (23) 王 曉渡，中山一雄，新井実：繊維強化複合材料の切削加工に関する研究（第1報）－GFRPの仕上面品位について－，精密工学会誌，55,4(1989)709.
- (24) 王 曉渡，中山一雄，新井実：繊維強化複合材料の切削加工に関する研究（第2報）－FRPの切削仕上面創成機構－，精密工学会誌，57,8(1991)1437.
- (25) 井上久弘，餅田恭志，山口淳，弓削毅：一方向GFRP材の切削加工中に生じる掘り起こし現象の解析，日本複合材料学会誌，20,6(1994)231.
- (26) 青山栄一，廣垣俊樹，井上久弘，他：プリント基板用GFRPの小径ドリル加工に関する研究（加工穴壁面の表面粗さと切削抵抗の関係），日本機械学会論文集（C編），63,608(1997-4)1371.

- (27) TAKEHITO FUKUDA, ZENICHIRO MAEKAWA, TORU FUJII, ADVANCES IN FIBER COMPOSITE MATERIALS, ELSEVIER SCIENCE , (1994)261.
- (28) H. Inoue, I. Kawaguchi, Study on the grinding Mechanism of Glass Fiber Reinforced Plastics, Journal of Engineering Materials and Technology, 112(1990)341.
- (29) H. Inoue, T. Yuge, T. Hirogaki, E. Aoyama and T. Katayama : The Observation of Machined Surface Conditions of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Plastics Under Small Depth of Cut Conditions, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (2003)100.
- (30) 金枝敏明 : GFRPならびにCFRPの切削機構, 日本機械学会論文集, 914-1, 3(1991)199.
- (31) H. Takeyamam, N. Iijima : Machinability of Glassfiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining, Annals of the CIRP 37, 1(1988)93.
- (32) Gunter SPUR and Uwe LACHMUND : Application Properties of Diamond-coated Carbides, PROGRESS OF CUTTING AND GRINDING Vol. III (1996)108.
- (33) A-GFRP 材の傾斜切削時における繊維の破壊挙動に関する研究, 中西栄徳, 鈴木実平, 中川浩希, 五十君清司 第28回FRPシンポジウム, 京都(1999).
- (34) 朝比奈奎一, 鈴木節男 : エンドミルによるトリミング加工におけるGFRPの切削特性, 精密工学会誌, 57, 12(1991)2187.
- (35) 中島利勝, 大橋一仁, 塚本真也, 古川竜治 : ガラス繊維強化プラスチックの研削過程に関する研究, 精密工学会誌, 57, 7(1991)1253.
- (36) 片平和俊, 渡邊裕, 大森整, 加藤照子 : 先進繊維強化PEEKのELID研削特性とトライボロジー評価, 砥粒加工学会誌, 46, 4(2002)199.
- (37) 青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 郡嶋宗久, 野辺弘道, 北原洋爾, 片山傳生 : GFRPの小径穴あけ加工における加工面品質, 材料学会誌, 45, 5(1996)522.

- (38) 青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 郡嶋宗久, 野辺弘道, 北原洋爾, 片山傳生: プリント基板用 GFRP の小径穴あけ加工に関する研究 (加工穴壁面の表面粗さと切削抵抗の関係) 63, 608(1997)1371.
- (39) 佐久間敬三, 瀬戸雅文, 谷口正紀, 横尾嘉道: 炭素繊維強化プラスチックの切削における工具磨耗 (工具材種の影響), 日本機械学会論文集 (C編), 51, 463(1985)656.
- (40) 花崎伸作, 藤原順介, 野村昌孝, CFRP 切削における工具磨耗機構, 日本機械学会論文集 (C編), 60, 569(1994-1)297.
- (41) 金枝敏明: CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の切削機構に関する研究 (第3報) — 工具刃先丸味ならびに逃げ角の影響 —, 精密工学会誌, 57, 3 (1991) 491.
- (42) 金枝敏明, 高橋正行: CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の切削機構に関する研究 (第2報) — 切削残留量ならびに加工変質深さの解析 —, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1058.
- (43) 金枝敏明, 高橋正行: CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の切削機構に関する研究 (第1報) — 極低速切削速度下における加工面生成機構 — 精密工学会誌, 55, 8 (1989) 1456.
- (44) Xiangming Wang and Langchi Zhang: EFFECT OF CURING CONGITIONS ON THE MACHINABILITU OF UNIDIRECTIONAL FIBRE-REINFORCED PLASTICS, 5th International Conference on Progress of Machining Technology, (2000)13.
- (45) N. Bhatnagar, N.Ramakrishnan, N. K. Naik and R. Komanduri: On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates, Int. J. Mach. Tools Manufact. 35, 5(1995)701.
- (46) Zhang Houjiang, Chen Wuyi, Chen Dingchang and Zhang Langchi: THE EXIT DERECTS IN DRILLING CARBON FIBRE-REINFORCED PLASTICS, 5th International Conference on Progress of Machining Technology, (2000)18.

- (47) A. Koplev, Cutting of CFRP with Single Edge Tools, Vol. 2, Pergamon Press, (1980).
- (48) A. Koplev, A. Lystrup and T. Vorm : The Cutting Process, Chips, and Cutting Forces in Machining CFRP, Composites 14, 4(1983)374.
- (49) 鳴滝則彦：チタン合金・CFRPの切削加工，機械技術，30,13(1982)44.
- (50) 朴 圭烈，大森 整，中川威雄：電解インプロセスドレッシング研削法によるプラスチックおよびCFRPの鏡面研削加工，砥粒加工学会誌，38, 6 (1994) 327.
- (51) 朴 圭烈，大森 整，中川威雄：小径メタルボンド砥石によるプラスチックおよびCFRPの研削加工，砥粒加工学会誌，39, 1 (1995) 33.
- (52) Pei-Lum Tso and Jyh-Wen Chang : Study on the grinding of continuous carbon fiber reinforced plastics, Machining of Advanced Composites ASME 45, 66(1993)89.
- (53) L. C. ZHANG Mechanics and surface integrity of unidirectional fibre-reinforced plastics under orthogonal cutting and surface grinding, 6th International Conference on Progress of Machining Technology, (2002)128.
- (54) Kyu Yeol Park, Dai Gil Lee, Takeo Nakagawa : Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics, Journal of Materials Processing Technology, 52(1995)386.
- (55) W. Konig, Ch. Wulf, P. Gras, H. Willerscheid : Machining of Fibre Reinforced Plastics, Annals of the CIRP 34,2(1985)537.
- (56) Lau, W. S. & Lee, W. B. : Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Carbon Fiber Composite Materials", Annals of the CIRP 39,1(1990)179.
- (57) T. Yoshimoto, E. Nakanishi, Y. Sawaki and K. Isogimi : Drilling of AFRP with YAG laser, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (2003)843.
- (58) E. Nakanishi, Y. Sawaki and K. Isogimi : Machining Process of Aramid Fiber Reinforcing Plastics, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (2003)1007.

- (59) 中島利勝, 大橋一仁, 板井豊和: アラミド繊維強化ゴムの研削加工に関する研究(第1報) - マトリックスゴム材料の研削特性 -, 精密工学会, 58, 9(1992)1539.
- (60) 中島利勝, 大橋一仁, 山本哲: アラミド繊維強化ゴムの研削加工に関する研究(第2報) - 仕上げ面における繊維の切残し現象と摩擦特性 -, 精密工学会, 58, 9(1992)1539.
- (61) 中島利勝, 大橋一仁, 山本哲: アラミド繊維強化ゴムの研削加工に関する研究(第3報) - 仕上げ面の摩擦特性の解析 -, 精密工学会, 60, 11(1994)1637.
- (62) 中島利勝, 大橋一仁, 黒川純: アラミド繊維強化ゴムの研削加工に関する研究(第4報) - Vリブドベルトの成形研削機構と摩擦特性 -, 精密工学会, 63, 9(1997)1295.
- (63) 中島利勝, 大橋一仁, 黒川純, 大川憲毅: Vリブドベルトの摩擦係数調整成形研削加工 - アラミド繊維強化ゴムの研削加工に関する研究(第5報) -, 精密工学会, 63, 10(1997)1469.
- (64) 帯川利之, 白樫高洋, 白井英治: FRP切削の有限要素法シミュレーション, 精密工学会誌, 57, 6(1991)1029.
- (65) 古沢利明, 横堀寿光, 佐々木茂, 磯貝毅, 日野裕, 野呂瀬進, 中村示, 山田國男, 貴志浩三, 短繊維強化複合材料切削の弾塑性解析, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 第1分冊, 3(1993)11.
- (66) 花崎伸作, 野村昌孝, FEMによるCFRPの切削機構の解析(食い付き時の繊維破壊挙動), 日本機械学会論文集(C編), 61, 583(1995-3)1163.

第 2 章

一方向 G F R P 材の研削加工表面品位について —研削加工方法の影響—

2. 1 緒言

ガラス繊維強化プラスチック (G F R P) 材は、比強度、非弾性率が大きく、高い耐食性を有した優れた材料である。G F R P は成形加工のみで製品となることもあるが、多くの場合、切断、穴あけ、バリ取り等の機械的二次加工が行われる。しゃ断器用操作棒に用いられる場合⁽¹⁾はその典型で、切断、端面処理、ねじ研削等の機械加工が必要となる。しかし G F R P 材はその構成する材料の特異性からこれら二次加工が非常に困難な材料である。特に切削加工においては工具磨耗が激しいことが分かっている。これまでの研究で、G F R P 切削時の工具磨耗機構に関する報告⁽²⁻¹⁷⁾が数多くある。しかし、加工表面品位等、切削機構について⁽¹⁸⁻²¹⁾はわずかにあるもののあまり追求されていない。二次加工法のうち研削加工は、母材の性質によって研削できない場合もあり、基礎的研究がほとんど行われていない分野である。母材が熱硬化樹脂の場合、切込みが非常に小さい切削現象の集合である研削加工が G F R P の加工表面品位の向上に有効であると考え、これまで一方向ガラス繊維強化プラスチック材の研削加工について研究が行われてきた^(22,23)。これらの報告では試料中のガラス繊維の繊維角度の変化が加工表面品位に大きな影響を与えることがわかっている。このことより、試料中のガラス繊維の繊維角度の変化が、試料の初期表面にできるだけ影響を与えないような加工条件で試料表面の初期加工を行った。その後、上記の加工によって得られた試料を用いて種々の研削加工を行った。すなわち、試料中の繊維角度の変化が加工表面にどのような影響を与えるかを調べるために、スパークアウト研削回数、平面プランジ研削における研削回数を変化させて研削加工を行い、これらの加工条件の変化が加工表面品位にどのような影響を与えるかを調べた。

2. 2 試料の作製方法

試料は、幅の中央にガラス繊維束を 1mm 間隔に一系列に保持した型に不飽和ポリエステル樹脂を流し込んで成形し、その後、室温中で 24 時間以上放置し、樹脂を硬化させた。さらに 353K で 2 時間のアフターキュアを行って試料を作製した。図 2.1 にその成形方法を示す。その試料表面をサンドペーパーで研磨、バフ仕上げした後、35×35mm、厚さ 4mm の形状に切り出して試験片とした。その時、試料中の繊維角度 θ が研削方向に対して時計方向に 15° から 165° まで、15° ごとに変化させた。繊維角度の定義を図 2.2 に示す。

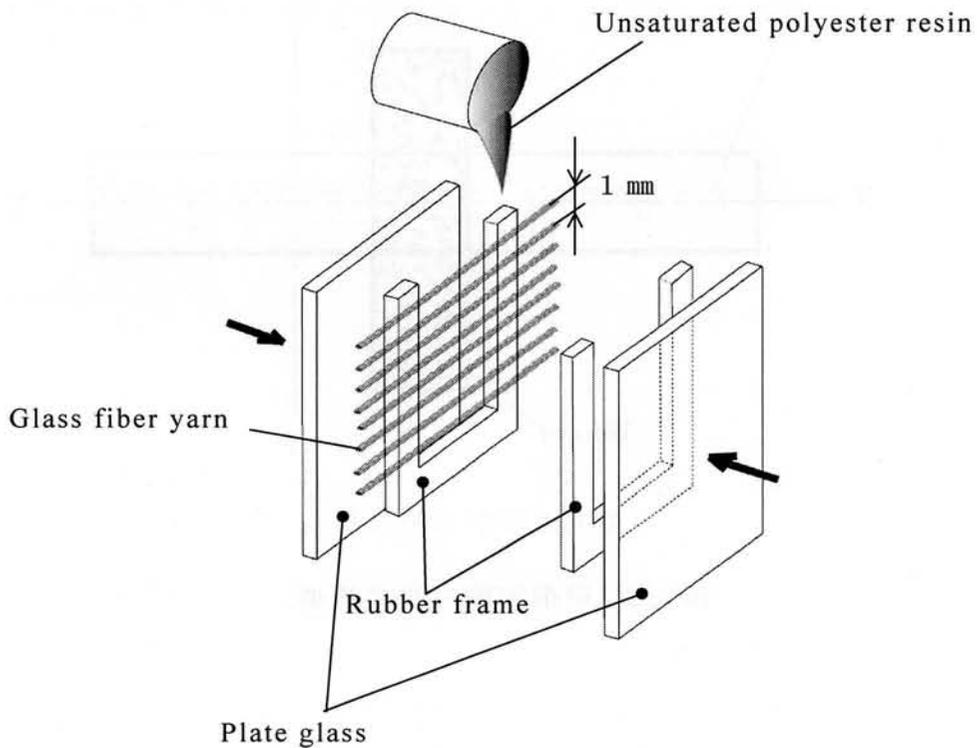


図 2.1 被削材の成形方法

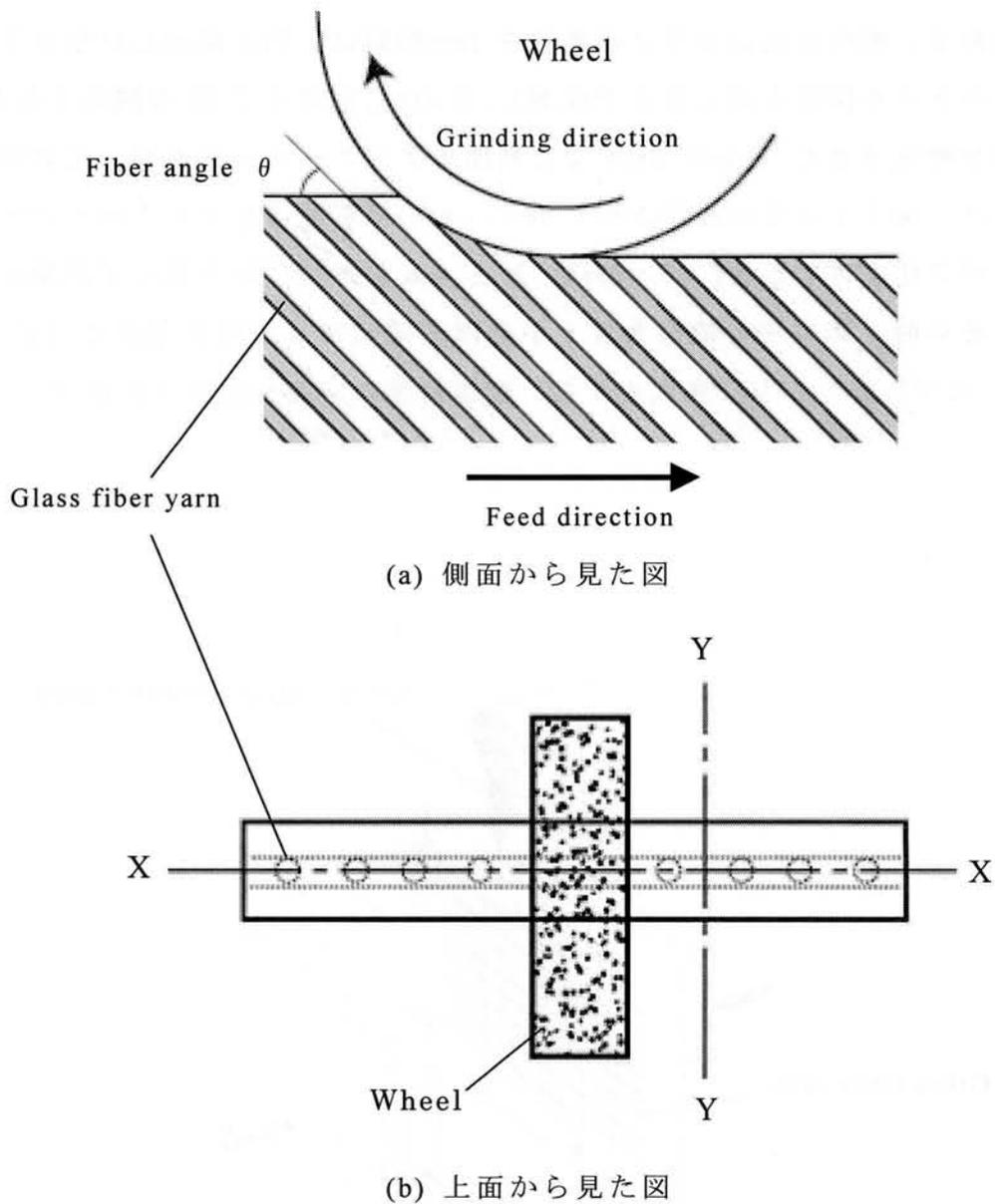


図 2.2 研削実験方法の概要

2. 3 実験方法

研削加工は日興成型平面研削盤（形式 N-SG）を用いて，乾式上向き研削で行った．試料の初期表面は図 2.2 に示す厚さ方向（Y-Y 方向）に微小切込みを与えて数回研削を行って作成した．実験は，初期加工を行った試料を水平に 90° 回転させた後，X-X 方向に所定の切込みを与えて研削加工を行

った。研削加工条件は表 1 に示すとおりである。研削後の試料の表面状態は、SE-3 型万能表面形状測定器（小坂製作所製）を用いて測定した。測定方法は、Y-Y 方向と、この方向に垂直な方向（X-X 方向）に、繊維束の部分を等間隔に測定した。加工表面の凹凸は、ガラス繊維束の両側に存在する樹脂のみの部分の表面粗さの中心線を基準線と定義し、この線より盛り上がっている部分（切り残し）を正、くぼんでいる部分を負として表示した。ここで、図 2.2 の樹脂のみの部分の加工表面の状態は、試料中の繊維束の方向が変化しても研削条件が同じであれば、同じ材質の樹脂を研削することになり、常に一定であると考えられる。

表 2.1 実験条件

Resin	Unsaturated polyester resin
Reinforcement	Glass fiber
Fiber angle	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 °
Grinding wheel	GC80HV
Grinding speed	32 m/s
Feed rate	0.075 m/s
Depth of cut	40 μm
Number of spark out	0, 1, 2, 4
Number of plunge cut grinding	1, 2, 3, 5

2. 4 実験結果および考察

2. 4. 1 試料初期表面の作製

これまでの研究で繊維方向と研削方向との相対的な関係の変化によって、加工表面状態が大きく変化することが分かっている^(22, 23)。そのため、たとえ

切込み量が小さくても、研削加工方向に繊維角度を変化させた試料に対して、同じ研削を行っても得られる加工表面状態は一定でない。このことより繊維角度の変化に付してほぼ同じ加工表面を得るために、すべての試料中の繊維方向と研削方向との相対的な角度が 90° となる研削条件、すなわち図 2.2 において砥石に付して 90° 回転させた Y-Y 方向に、微小切込みで研削加工を行った。研削加工後の得られた面の凹凸を図 2.3 に示す。図の + 側の变化は図中に示すように切り残し量の変化を示し、図の - 側の变化はくぼみ量の変化を示す。切り残し量は繊維角が 90° 付近で $5\mu\text{m}$ と最大値を示すが、全体としてはほぼ一定とみなせる。これに対してくぼみ量の方は、繊維角が水平に近い $\theta = 15^\circ$ および $\theta = 165^\circ$ 付近で $20\mu\text{m}$ とやや大きな値を示しているが、 $\theta = 90^\circ$ 付近では $3\mu\text{m}$ と小さくなっている。研削加工中ガラス繊維は砥粒によって研磨されるのではなくて折られている。このため繊維角が水平に

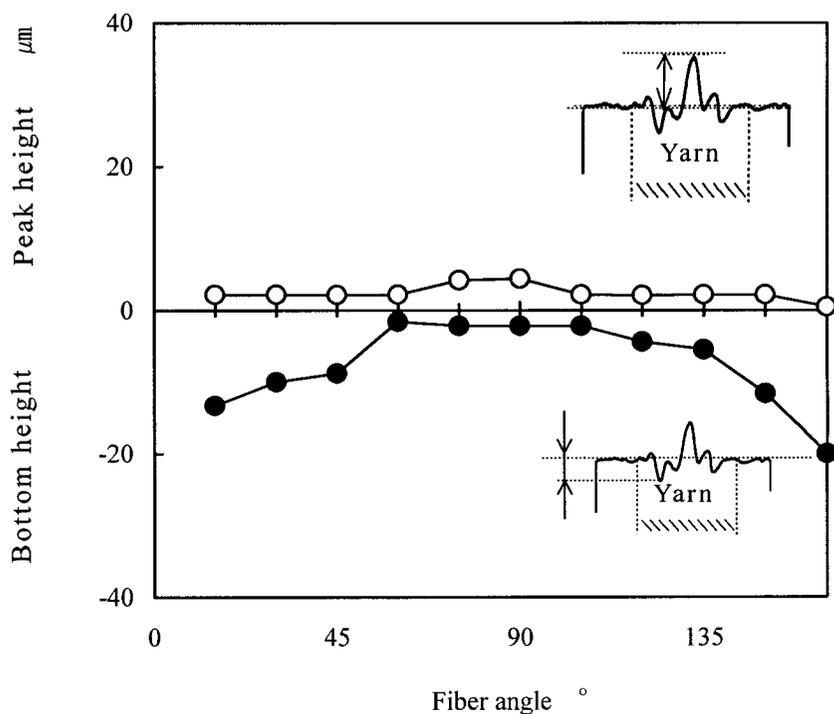


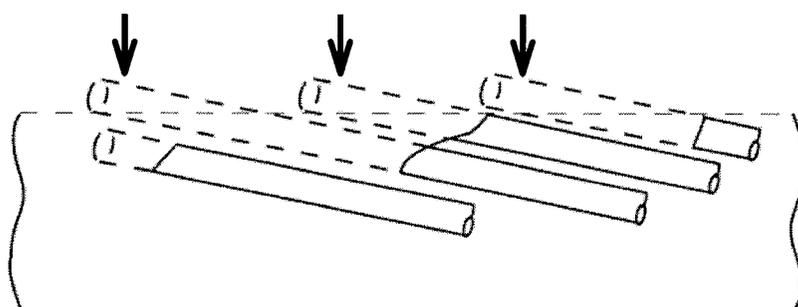
図 2.3 ガラス繊維束の切り残しおよびくぼみ量と繊維角度の関係

近い試料では，図 2.4 に示すように加工表面近くのガラス繊維が折られるため，繊維径の数倍のくぼみができることになる．このため測定されたくぼみ量は，試料表面に対してガラス繊維が垂直に近い状態で混入されている試料に比べて大きくなったと考えられる．

今回，繊維方向の影響を受けない加工表面を得るための加工方法として，繊維方向と研削方向との関係が，すべての試料において $\theta = 90^\circ$ となると考えられる図 2.2 の Y-Y 方向からの研削加工を行ったが，一様な加工表面が得られなかった．これは試料中のガラス繊維を研削砥粒が研磨することができなかったことによるものと考えられる．このことより，現在の機械的な加工方法では試料中の繊維を一本ずつ研磨することは不可能であることから，他の加工方法を検討しなければならない．しかし，以後の研削加工実験では切込み $40\ \mu\text{m}$ で行われるので，試料の初期表面品位としては満足すべき精度であると判断した．



(a) 上面から見た被削材表面の単繊維の様子

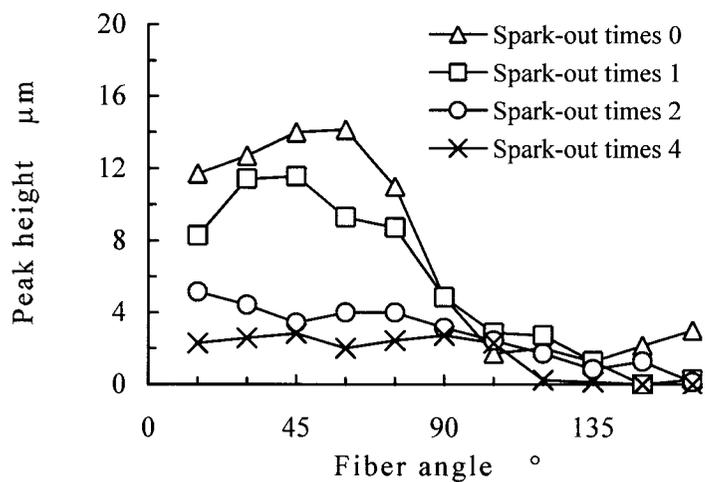


(b) 研削面近傍を側面から見た様子

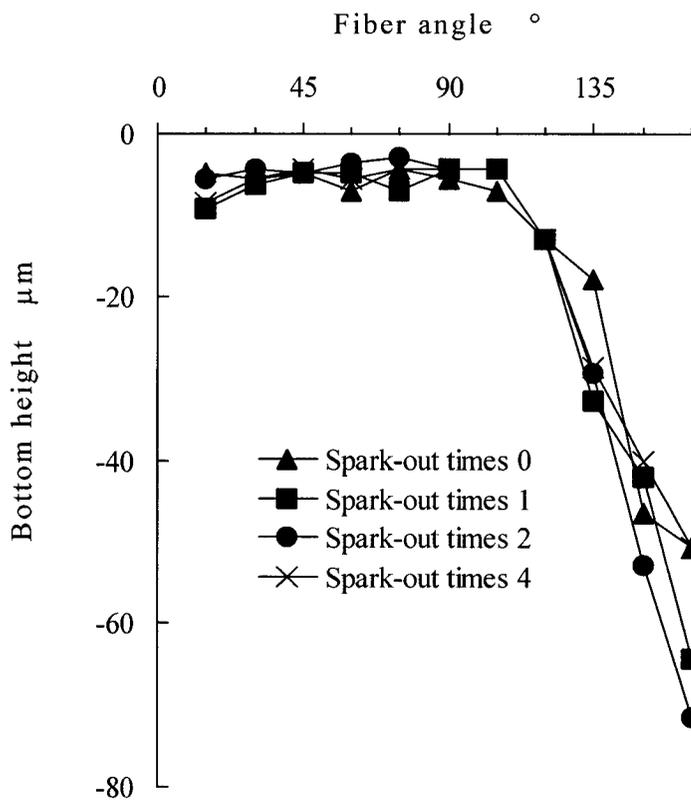
図 2.4 ガラス繊維の破壊の様子の概要

2. 4. 2 スパークアウト回数の影響

ここでは、金属材料などの研削加工において優れた表面品位を得るために行われているスパークアウト研削の概念を、FRP材の研削加工にも適用した。まず、2. 4. 1節で述べた方法で初期試料表面を作製したのち、切込み40 μm で図2.2のX-X方向に1回研削した後、切込みを与えずそのままの状態、スパークアウト回数を変化させて研削加工した後の加工表面状態を図2.5に示す。図2.5は、スパークアウト回数を変化させた場合の研削後の試料表面の凹凸と、繊維角度との関係を示している。図2.5(a)は、ガラス繊維の切り残し量と繊維角度、図2.5(b)はガラス繊維のくぼみ量と繊維角度との関係をそれぞれ示したものである。まず、最初の研削によって得られた表面は図中の \triangle - \triangle 印で示してある。この場合、試料中のガラス繊維の繊維角度が 90° よりも大きい試料では、どの試料でもガラス繊維の切り残し量は小さくほぼ一定である(2~3 μm)。しかし、繊維角度が 90° 以下になると切り残し量は急激に増加し、 60° 付近で最大となり、繊維角度の減少とともにわずかに減少する。一方、くぼみ量の方は、繊維角度が $\theta = 165^\circ$ で最大となり、繊維角が減少するにつれて $\theta = 90^\circ$ までは急激に減少し、その後ほぼ一定となっている。ここで、この時の研削面上ガラス繊維端面の代表的な様子を図2.6に示す。図2.6(a)は繊維角度が 0° の場合で、図2.6(b)は繊維角度が 45° 、図2.6(c)は繊維角度が 90° 、図2.6(d)は繊維角度が 150° の場合で、いずれも繊維端面をSEMで観察したときの写真である。 0° の場合、引張破壊の起点を示すHackleと曲げ破壊の圧縮側を示すCompression lip⁽¹⁹⁾が見られ、繊維が曲げられて引張破壊していることがわかった。砥粒の擦過痕がなく、ガラス繊維は砥粒によって削り取られず、研削予定面よりも下方で破壊していることがわかった。 45° の場合、樹脂面よりも繊維が上側に残っていて、砥粒の擦過痕があり、砥粒と繊維が干渉しているが切り残しがあることがわかった。 90° の場合、繊維端面は繊維軸に垂直に破断していて、砥粒の擦過痕も見られた。 135° の場合、 0° の場合と同様な繊維の破断面が観察され、その破断位置も研削予定面よりも下方であった。したがって、図2.5の結果はガラス繊維の破断の形式の違いによるものであることがわかった。



(a) ガラス繊維の切り残しと繊維角度の関係



(b) ガラス繊維のくぼみ量と繊維角度の関係

図 2.5 ガラス繊維の切り残しおよびくぼみ量と繊維角度の関係

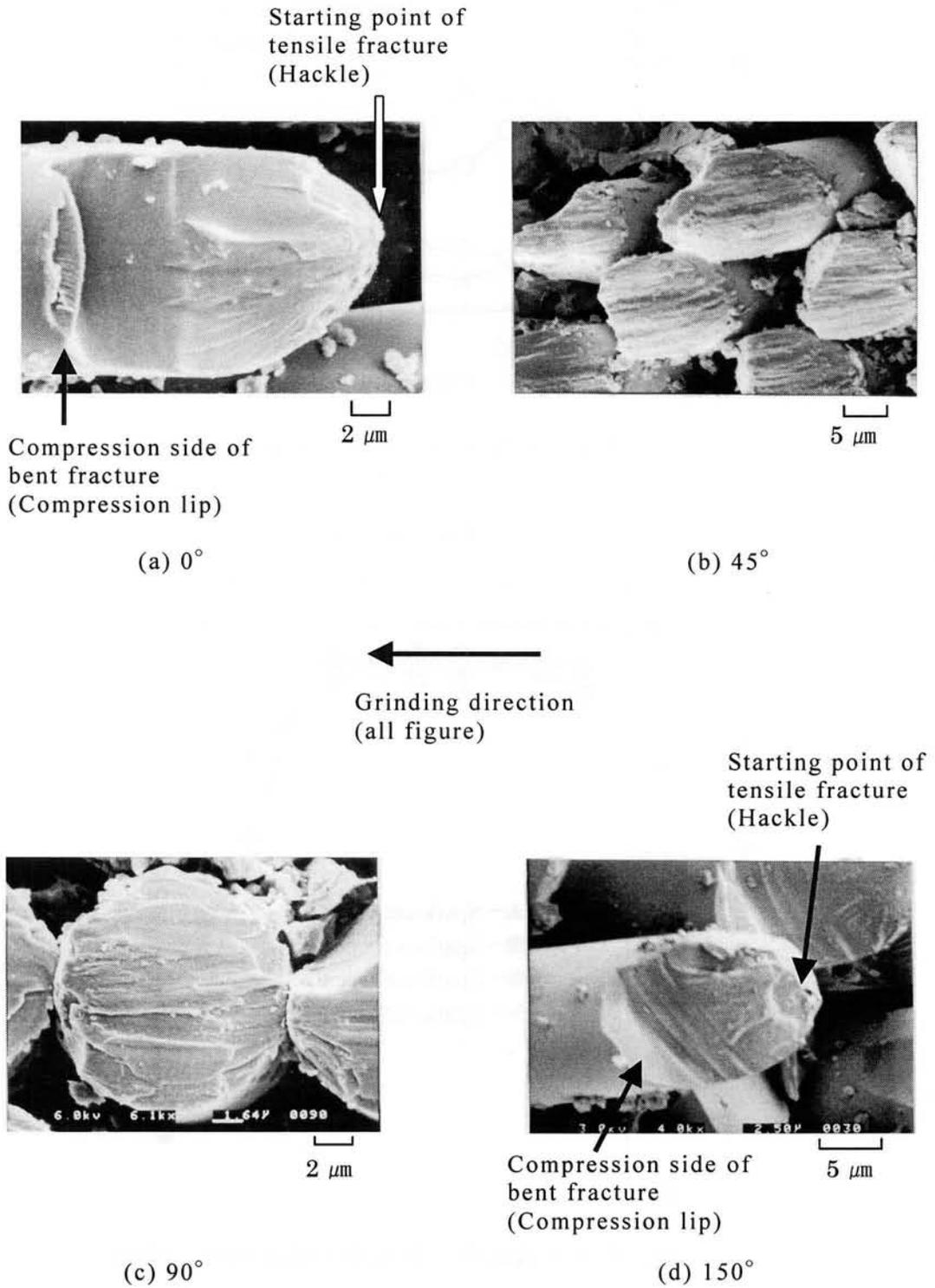


図 2.6 ガラス繊維の破壊の様子の SEM 写真

スパークアウト回数を変化させた場合、一般に切り残し量は減少する。その中でも繊維角が $\theta = 90^\circ$ 以下の試料の切り残し量の減少は大きい。しかしスパークアウト回数が 4 回ぐらいになると、 $\theta = 90^\circ$ 以下の試料の切り残し量はほぼ一定となり、繊維角度の相違による差はなくなる。一方くぼみ量の方はスパークアウト回数の影響がほとんどみられない。このことよりスパークアウト研削の効果は、切り残し量の減少に効果があることが分かった。

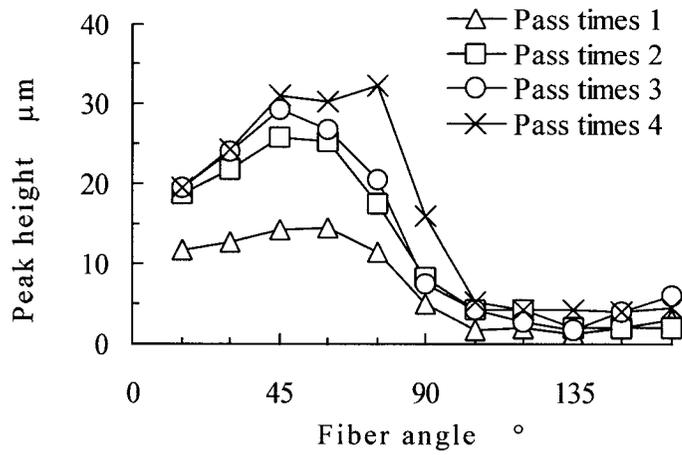
これらの現象は次のような要因によるものと考えられる。まず、FRP材の研削加工において砥石と被削材との関係は金属材料を研削加工する場合と逆の関係となる。すなわち、金属材料の研削加工の場合、砥石より被削材の剛性の方が高いため、加工時に砥石の方が弾性変形して実質切込み量が減少する。ところが今回使用したFRP材の研削加工の場合、砥石の剛性の方が高いため、一回目の研削で樹脂部はほぼ完全に研削されるが、繊維角の小さいガラス繊維の方は加工時に樹脂部に押し込まれる形となって切り残されることとなる。この切り残されたガラス繊維は、その後続くスパークアウト研削によって更に研削されるため、ガラス繊維の切り残し量が減少すると考えられる。一方、砥石の掘り起こし作用によって生じたと考えられるガラス繊維部のくぼみ部は、すでにオーバーカットの状態となっているため、スパークアウト研削の影響は受けない。

以上より、繊維角度が 90° より大きい試料ではスパークアウト回数を増やしても、表面の状態は良くなるが、それ以下の繊維角度を持つ試料では良くなっていくことがわかる。

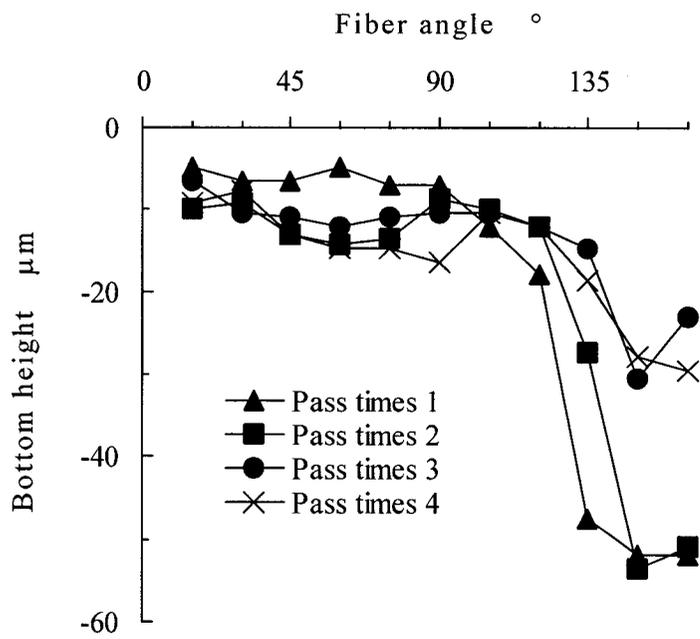
2. 4. 3 平面プランジ研削回数の影響

2. 4. 1 節に示した方法で試料の初期表面を研削した後、図 2.2 の X-X 方向に一定切込み量 $40\mu\text{m}$ で、研削を 1, 2, 3, 5 回と連続して平面プランジ研削を行って得られた、おのおのの試料の表面状態を図 2.7 に示す。図 2.7 は図 2.6 と同様に、ガラス繊維部の切り残し量と繊維角度との関係（図 2.7 (a)）と、ガラス繊維部のくぼみ量と繊維角度との関係（図 2.7 (b)）とを示す。図 2.7 (a) においてガラス繊維の切り残し量は、研削回数が増えるにつれて増加している。しかしその増加量は、繊維角が 90° よりも大きい範囲ではわずかであるのに対して、 90° 以下では大きい。この場合、切り残し量の最大値を示す繊維角度 ($\theta = 60^\circ$) は変化しない。これは、前の研削で生じた切り残し量が次の研削の切込みに付加されて、実質切込み量が増加するためと考えられる。しかし、 $\theta = 15^\circ$ の試料においては、連続研削回数が 2 回目以降の切り残し量の増加が零となっている。一方、図 2.7 (b) のくぼみ量は、繊維角の大きい $\theta = 165^\circ$ や $\theta = 120^\circ$ の試料において研削回数が 2 回をすぎると大きく減少し、それ以後研削回数が増えてもあまり減少しないのに対して、 $\theta = 90^\circ$ 以下の試料においては、逆にわずかであるが増加している。しかし 3 回目以降の研削後のくぼみ量はほぼ定常状態に落ち着く。

以上の結果、切り残されたガラス繊維は、続いて行われる研削での実質切込み量を増加させる作用をするため、研削回数が増加するにつれて一部の繊維角度においてはガラス繊維の切り残し量がますます増加する。これに村してくぼみ量の変化は、初期表面がくぼみのない様な面の場合、研削方向と繊維角との相対的な関係から、繊維角度の大きい試料においては大きなくぼみ量を生じる。一度くぼみが生じてしまうとそれ以後の研削において、実質切込み量の増加がなくなるため、研削回数の影響がなくなる。



(a) ガラス繊維の切り残し量と繊維角度の関係



(b) ガラス繊維のくぼみ量と繊維角度の関係

図 2.7 ガラス繊維の切り残しおよびくぼみ量と繊維角度の関係

2. 5 結 言

試料中のガラス繊維の加工表面となす繊維角度の変化が，加工後の表面品位に大きな影響を与えることから，この影響をあまり受けないような研削方法で初期試料表面を加工した後，種々な研削方法（スパークアウト研削や平面プランジ研削等）で加工を行い，これらの加工方法の違いが加工後の表面品位にどのような影響を与えるかを追求した結果，以下に示すようなことが分かった．

- (1) 繊維角度の異なった試料に対して，同じ加工条件で繊維角度の変化の影響の差がでない加工表面が得られる加工方法を見いだすことは今回できなかった．
- (2) スパークアウト研削は最初の研削加工によって生じたガラス繊維の切り残し量を減少させる作用をする．しかし，この加工方法は繊維方向と研削方向との相対的關係における繊維角度の大きい試料表面に生じるガラス繊維部のくぼみ量の減少には効果がなかった．
- (3) 平面プランジ研削では，研削回数の増加にともなってガラス繊維の切り残し量が増加する．ガラス繊維部に生じるくぼみ量に対して，この加工方法はあまり影響を与えない．

参考文献

- (1) GFRP操作棒の研削ねじ加工，加工技術データファイル，(1985)4-40.
- (2) 津枝正介，長谷川嘉雄，花崎伸作：強化プラスチックの断続切削における工具磨耗（第1報，乾式切削における磨耗特性），日本機械学会論文集（第3部）34,266(1968)1813.
- (3) 長谷川嘉雄，花崎伸作，強化プラスチックの断続切削における工具磨耗（第2報，強化プラスチック切削における強化材の挙動のレオロジ的考察）、日本機械学会論文集（第3部）34,266(1968)1821.
- (4) 長谷川嘉雄，花崎伸作，北英彦，北村嘉晟：強化プラスチックの断続切削における工具磨耗（第3報，工具磨耗に及ぼす切削剤の効果），日本機械学会論文集（第3部）34,266(1968)1826.
- (5) 長谷川嘉雄，花崎伸作，鈴木康夫，里中忍：GFRP切削時の工具磨耗の機構，精密機械，41,5(1975)473.
- (6) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍：GFRP切削時の工具磨耗特性，精密機械，44,11(1978)1334.
- (7) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍，難波江周一郎：GFRP切削時の工具磨耗特性に及ぼす切削材の影響，精密機械，47,5(1981)541.
- (8) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中忍，難波江周一郎：GFRP切削時の工具磨耗特性に及ぼす工具材種の影響，精密機械，47,6(1981)652.
- (9) 長谷川嘉雄，花崎伸作，錦美誠：GFRP切削における工具の磨耗機構，精密機械，50,11(1984)1747.
- (10) 長谷川嘉雄，花崎伸作，錦美誠：ガラスビーズ強化ポリエステル樹脂切削時の工具磨耗，精密機械，51,2(1985)415.
- (11) 長谷川嘉雄，花崎伸作，藤原順介：GFRPの切削加工における工具磨耗，日本複合材料学会誌，10,1(1984)29.
- (12) 長谷川嘉雄，花崎伸作，橋村雅之：GFRPの加熱切削，精密工学会誌，54,3(1988)594.
- (13) 井上久弘，井戸守，強化プラスチックの切削加工に関する研究，精密機械，39,3(1973)280.

- (14)井上久弘, 井戸守, 強化プラスチックの切削加工に関する研究 (第2報)
ーガラス繊維強化硬質塩化ビニル樹脂の切削加工ー, 精密機械,
40, 12(1974)1035.
- (15)佐久間敬三, 瀬戸雅文: 強化プラスチック (GFRP) 切削における工
具磨耗 (工具材種の影響), 日本機械学会論文集 (第3部),
44, 381(1978)1752.
- (16)佐久間敬三, 瀬戸雅文: 強化プラスチック (GFRP) 切削における工
具磨耗 (切削温度と工具磨耗との関係), 日本機械学会論文集 (C編),
46, 408(1980)990.
- (17)佐久間敬三, 瀬戸雅文: 強化プラスチック (GFRP) 切削における工
具磨耗 (繊維の配列方向と工具磨耗との関係), 日本機械学会論文集 (C
編), 48, 436(1982)1938.
- (18)竹山秀彦, 飯島昇, 野口祐成, 加賀見由次: ガラス繊維複合材料 (GF
RP) の切削機構に関する研究, 精密工学会誌, 53, 9(1987)1447.
- (19)王 曉渡, 中山一雄, 新井実: 繊維強化複合材料の切削加工に関する研
究 (第1報) ーGFRPの仕上面品位についてー, 精密工学会誌,
55, 4(1989)709.
- (20)王 曉渡, 中山一雄, 新井実: 繊維強化複合材料の切削加工に関する研
究 (第2報) ーFRPの切削仕上面創成機構ー, 精密工学会誌,
57, 8(1991)1437.
- (21)井上久弘, 餅田恭志, 山口淳, 弓削毅: 一方向GFRP材の切削加工中
に生じる掘り起こし現象の解析, 日本複合材料学会誌, 20, 6(1994)231.
- (22)H. Inoue and I. Kawaguchi: Journal of Eng. Materials & Tech., 112,
3, 341 (1990).
- (23)井上久弘, 田代徹也: GFRPの研削加工に関する研究, 第19回FRP
シンポジウム前刷, 日本材料学会(1990)137.

第 3 章

GFRP の単粒切削

—単粒形状がガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の研削加工面に及ぼす影響—

3. 1 緒言

ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) は多くの場合、成形加工後にバリ取り、穴あけ、切削などの二次加工が行われる。特に厚肉の成形品の端面を平滑にする場合には、研削によってなされるが、仕上げ面に毛羽立ちや材料の損傷といった問題が生じる。そのため、良好な研削面を得るためには、これら現象の発生原因を明らかにする必要がある。これまで GFRP の切削加工については多くの報告があるが、研削加工についての報告はわずかにあるものの⁽¹⁻³⁾、仕上げ面と砥粒形状の関係を研削機構にまで及んで詳しく述べたものはほとんどない。また、GFRP の厚肉の積層材では、ガラス繊維クロス繊維方向が 0° および 90° となるクロス ($0/90^\circ$) と 45° および 135° となるクロス ($45/135^\circ$) を交互に積層させて成形することが多く、その端面を仕上げ加工する必要が生じる場合がある。この GFRP をダイヤモンドホイールで研削すると、表面状態が粗く、いろいろな形状の研削痕が生じる。

そこで、端面に生じるこれらの研削痕の生成機構をより詳しく調べるために、 $0/90^\circ$ クロスの積層板と $45/135^\circ$ クロスの積層板の 2 種類の被削材を用いて実験を行った。すなわち、数種類の形状の異なるダイヤモンド単粒を工具として用いて GFRP の端面を切削し、その工具形状の違いおよび被削材のガラス繊維の方向が、切削抵抗や切削痕表面に与える影響を実験的に調べ、仕上げ面と研削機構の関係について考察した。

3. 2 被削材

実験に用いた材料の概要を図 3.1 に示す. この図のようにガラス繊維束(ヤーン)を平織りしたシートを積層したものにエポキシ樹脂を含浸, 固化させた, 厚さ 9mm の板材を用いた. 繊維含有率は 50% である. 研削面は被削材端面であるが, 被削材側面から見て繊維の方向が 0° および 90° となる $0/90^\circ$ と, 45° および 135° となる $45/135^\circ$ の 2 種類を作成した. 大きさは, 横 60 mm × 縦 12 mm の寸法に切り出した.

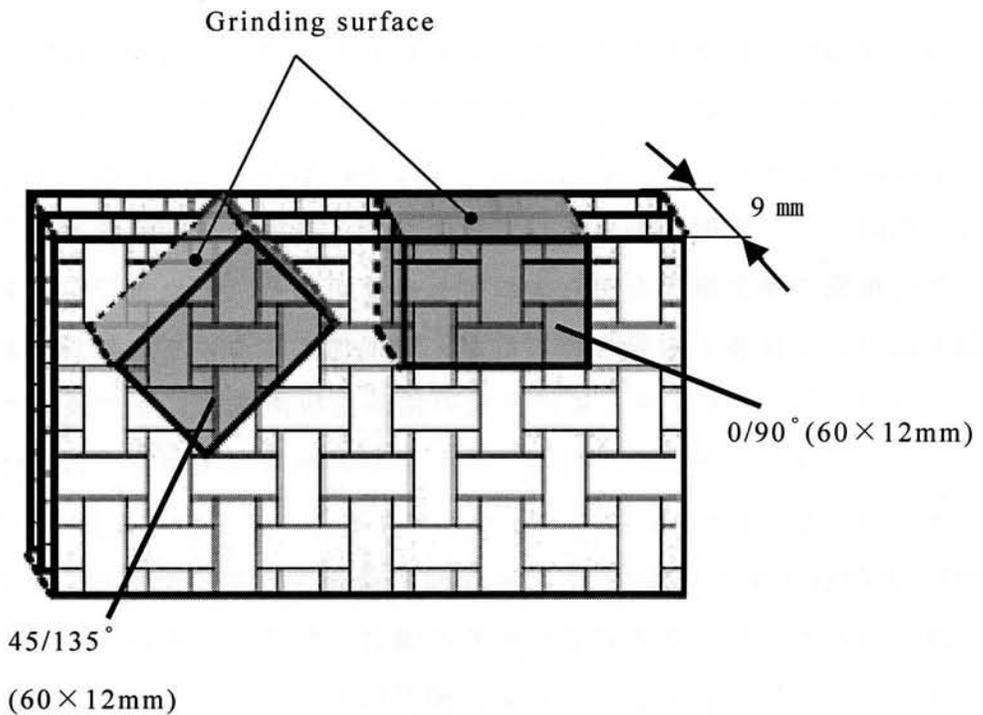


図 3.1 被削材

3. 3 ダイヤモンドホイールによる GFRP の研削加工

3. 3. 1 実験方法

岡本工作機械製作所製の平面研削盤 (PFG-450G) を使用し, 被削材表面をダイヤモンドホイール (SDC80N50BS41-3) を用いてスパークアウト研削で仕上げた後, アップカット研削を行った. この時の研削条件を表 3.1 に示す.

以下、いずれの実験においても被削材の端面を積層された層に平行な方向で実験を行った。なお、本実験における被削材中のガラス繊維方向は、図 3.2 に示すように $\theta / (90 + \theta)^\circ$ として定義する。

表 3.1 実験条件

Grinding manner	Up cut
Grinding wheel	SDC80N50BS41-3 ($\phi 180 \times 10$ mm)
Workpiece	GFRP
Fiber angle	$0/90^\circ$, $45/135^\circ$
Depth of cut	$10 \mu\text{m}$
Grinding speed	32 m/s
Feed rate	0.15 m/s
Coolant	Dry

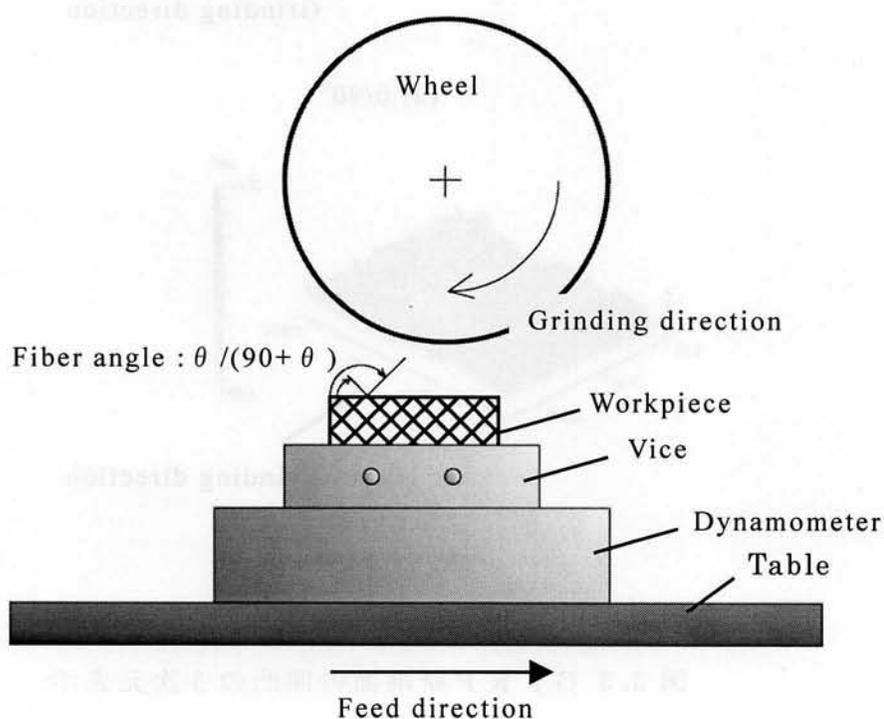


図 3.2 実験装置の概要図

3.3.2 GFRP研削面の凹凸の測定

図 3.3 は被削材を研削した表面をレーザ顕微鏡で観察し、表面の凹凸を 3 次元表示した図である。図 3.3(a) は繊維角度が $0/90^\circ$ の場合であり、図 3.3(b) は $45/135^\circ$ の場合の図である。いずれの図においても研削方向に平行に条痕が見られ、表面の凹凸が大きいことがわかる。凹凸の差が $20\mu\text{m}$ 以上となっている領域もあり、砥粒による研削痕だけではなく、研削表面に損傷や切り残しがあることが考えられる。そこで、このように複雑な形状となっている研削表面を、SEMを用いて詳しく観察した。

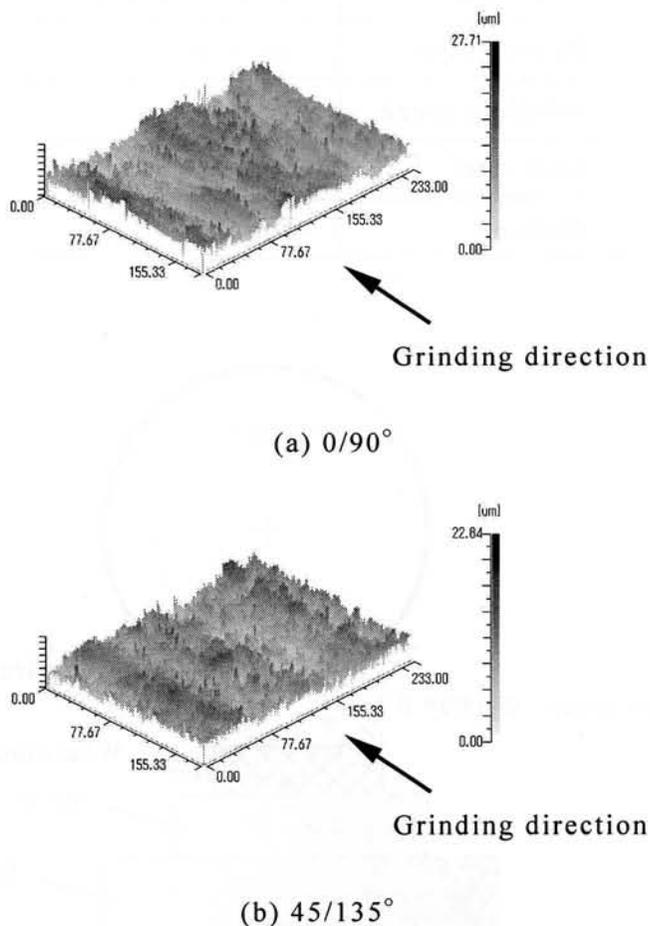
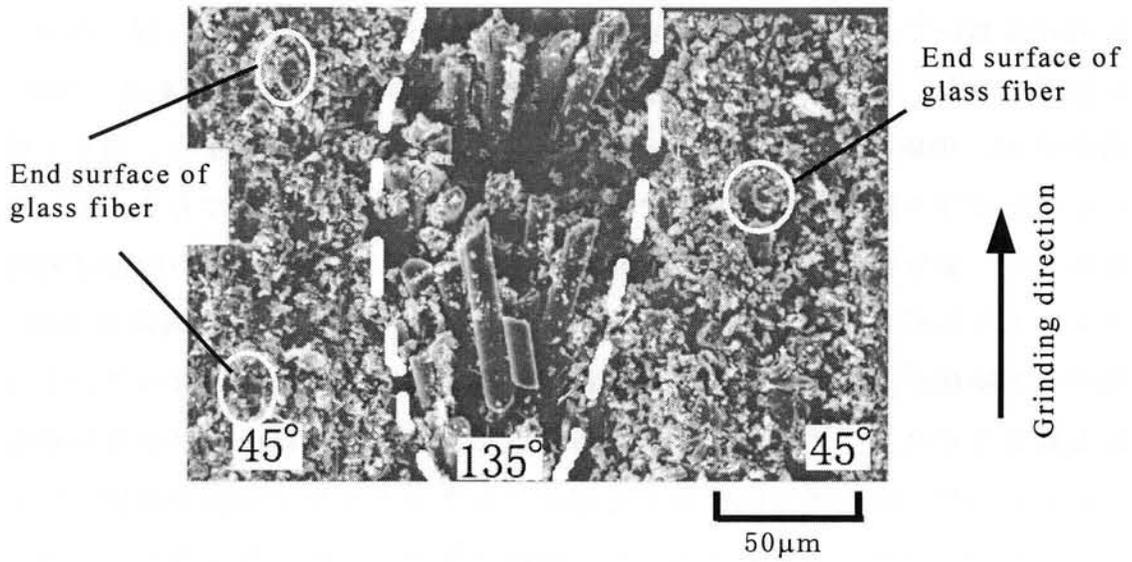


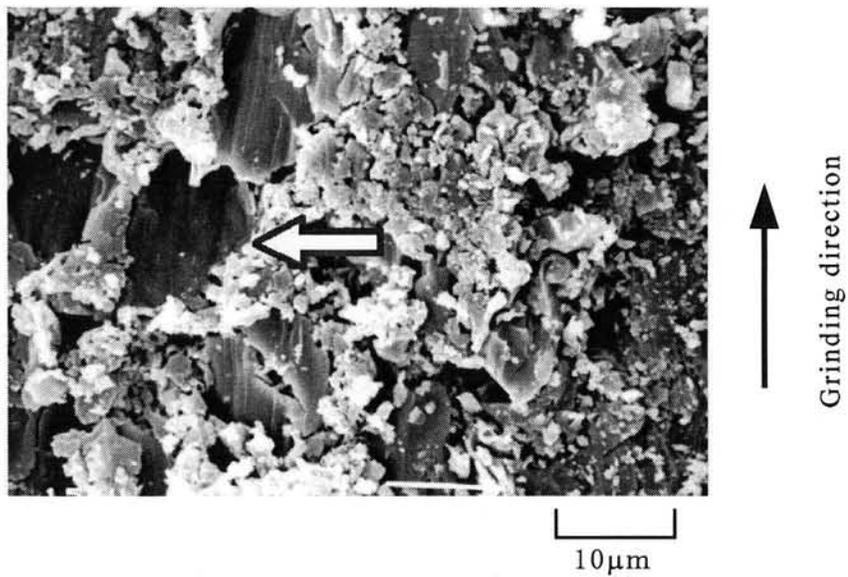
図 3.3 GFRP 研削面の凹凸の 3 次元表示

3. 3. 3 GFRP研削面のSEM観察

図 3.4 に 45/135° GFRP の研削表面を SEM で撮影した写真を示す。図 3.4(a) において、白点線で囲まれた 135° 表示部分は繊維角度が 135° のヤーン部分であり、45° 表示部分は繊維角度が 45° のヤーン部分である。135° 繊維が 45° 繊維部よりも下方で破壊していることがわかり、また、切りくずとなったガラス繊維が研削表面よりも突出している所も観察できる。45° 部分は 135° 部分と比べると平滑な面となっていて、ガラス繊維の端面は白円で示すように所々で観察できる。また、図 3.4(b) のように繊維角度が 135° のガラス繊維が矢印で示すように母材より抜け出た後が空洞となっている部分も観察できた。この写真から分かるように、45° 繊維部分は平滑な研削面となるが 135° 繊維部分は研削予定面よりも下方でガラス繊維が破壊していることがわかった。このような 135° 繊維の破壊形式は、第 2 章の一方向 GFRP 材を研削した場合でも見られたことから、クロス GFRP においても繊維角度が 135° となる部分ではガラス繊維は主に曲げによって破壊するものと考えられる。



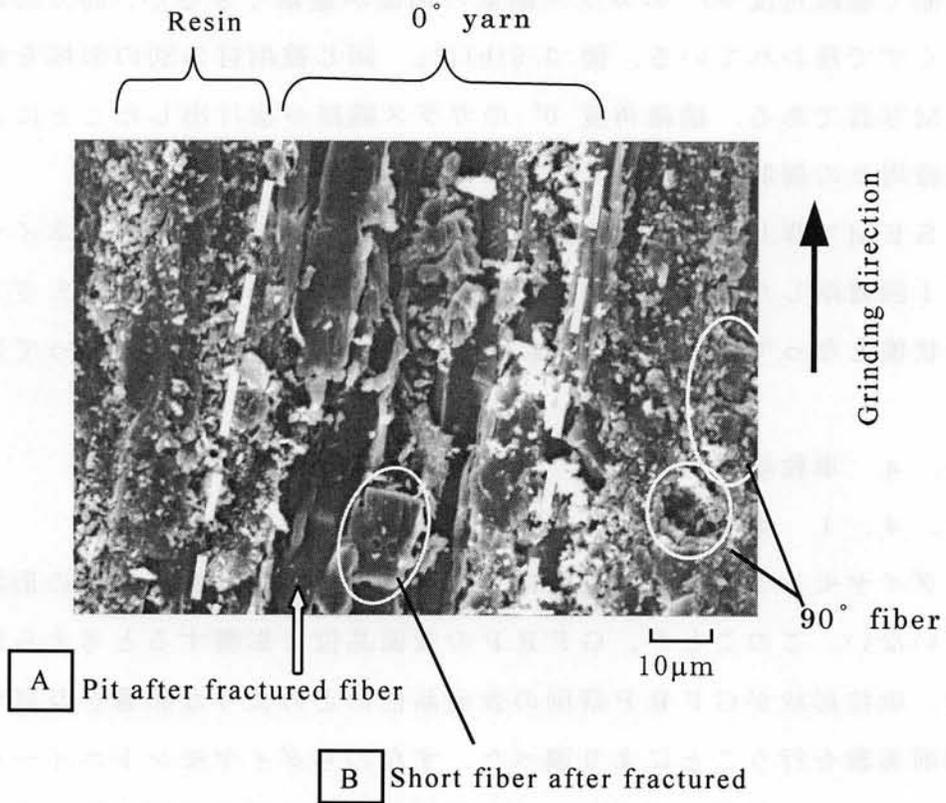
(a) 繊維角度 45° および 135° 部分の研削表面



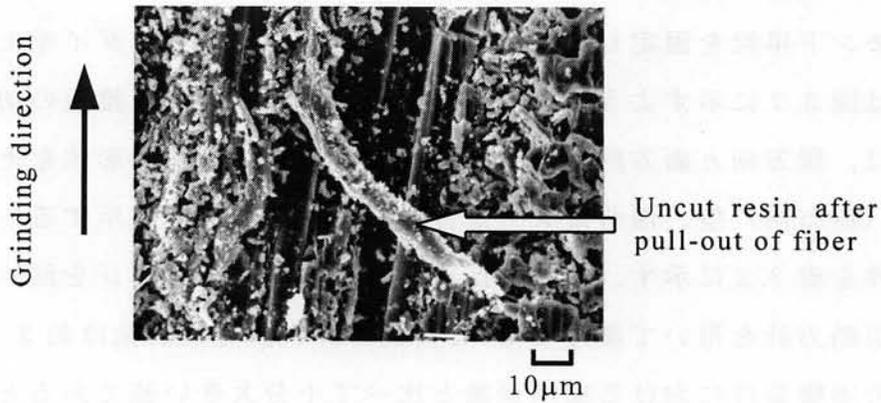
(b) 繊維角度 135° 部分の研削表面

図 3.4 45/135° GFRP の研削表面の SEM 写真

図 3.5 に 0/90° GFRP の研削表面を SEM で撮影した写真を示す。図 3.5(a) において、写真の幅の中央部分で白点線で囲まれた領域は繊維角度が 0° のヤーン部分であり、その左側の領域は樹脂のみの領域である。



(a) 0°および90°ヤーン上のSEM写真



(b) 0°ヤーン上のSEM写真

図 3.5 45/135° GFRP の研削表面のSEM写真

0° ヤーンの領域では、ガラス繊維が研削表面より抜け出したことによるくぼみ（Aで表示）が観察できる。また、短く破断されたガラス繊維が研削面に残った状態（Bで表示）も観察できる。写真右隅では、非常にわかり難い状態で繊維角度 90° のガラス繊維の端面が観察できるが、部分的に樹脂の切りくずで覆われている。図 3.5(b)は、同じ被削材の別の領域を観察した SEM写真である。繊維角度 0° のガラス繊維が抜け出したことにより、この繊維周りの樹脂のみが削り残されている様子がわかる。

SEMで詳しく観察した結果、クロスGFRPをSDC80ホイールを用いて1回研削した後の表面は、ガラス繊維の破壊のされ方がさまざま、複雑な状態となっていて、部分的に表面品位が悪化する状態となっている。

3. 4 単粒切削実験

3. 4. 1 実験方法

ダイヤモンドホイール表面に突き出た砥粒形状はある一定の形状とはなっていない。このことが、GFRPの表面品位に影響すると考えられる。そこで、砥粒形状がGFRP研削の表面品位にどのような影響を及ぼすかを単粒切削実験を行うことにより調べた。すなわちダイヤモンドホイールの砥粒モデルとして3種類のダイヤモンド単粒を用いて単粒切削実験を行い、切削抵抗の測定および切削痕の観察を行った。

図 3.6 に装置の概要を示す。研削盤の主軸に円盤を取りつけ、その外周にダイヤモンド単粒を固定してフライ切削で実験を行った。ダイヤモンド単粒の形状は図 3.7 に示すように、四角錐型、円錐型で、四角錐型の切削方向については、稜方向と面方向の両方で行った。以下、各単粒形状をそれぞれ四角錐Ⅰ（稜方向）型、四角錐Ⅱ（面方向）型、円錐型と表示する。この時の実験条件を表 3.2 に示す。切削抵抗は、半導体ひずみゲージを貼った自作の枠組み型動力計を用いて測定した。この動力計の固有振動数は約 3.5kHz であり、この実験条件における切削現象と比べて十分大きい値であると考えられる。得られた測定データをストレージスコープに保存し、パーソナルコンピュータで処理した。切削痕の観察はレーザ顕微鏡（レーザテック 1LM21）を用いて行った。

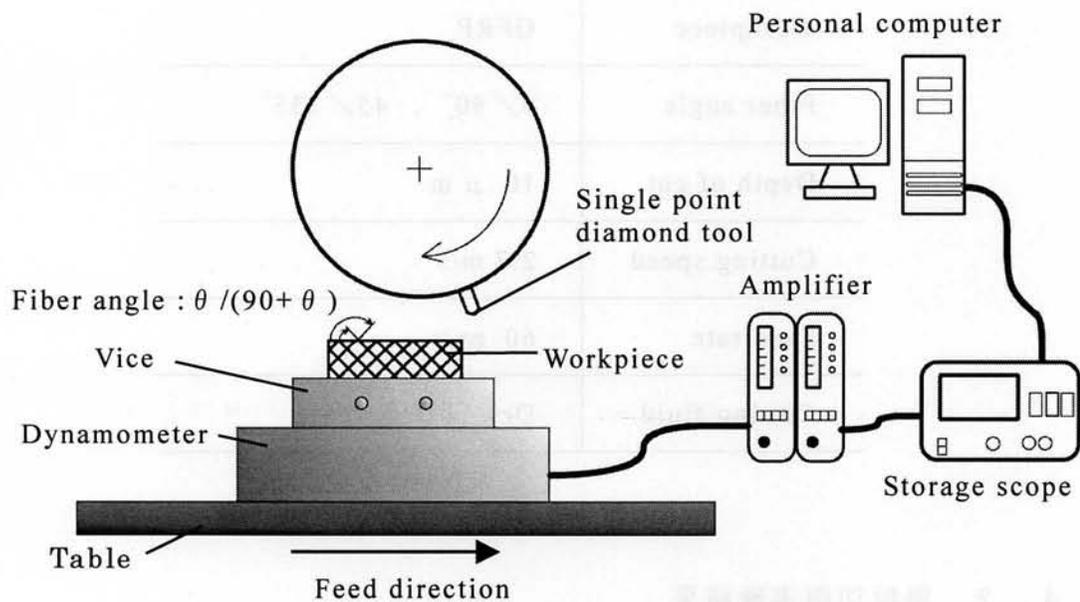


図 3.6 単粒切削実験装置の概要

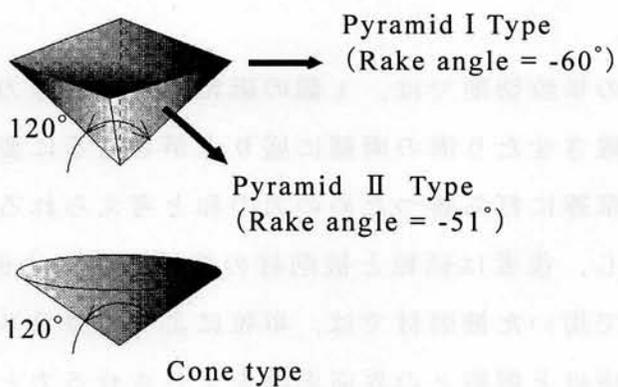


図 3.7 単粒形状

表 3.2 単粒切削実験条件

Grinding manner	Fly up cut
Workpiece	GFRP
Fiber angle	0 / 90° , 45 / 135°
Depth of cut	10 μm
Cutting speed	2.7 m/s
Feed rate	60 mm/s
Cutting fluid	Dry

3.4.2 単粒切削実験結果

3.4.2.1 単粒切削抵抗

GFRPをダイヤモンド単粒でフライ切削したときの主分力および背分力と、被削材のガラス繊維方向との関係を図 3.8 に示す。この図より、被削材中の繊維方向を変えても切削抵抗にあまり大きな違いは見られないが、単粒の形状によって切削抵抗が大きく異なっていることがわかる。円錐型単粒を用いた場合に切削抵抗が最も大きく、四角錐Ⅱ型、四角錐Ⅰ型の順に小さくなった。

金属の単粒切削では、1個の砥粒に働く主分力は、被削材を切り屑として変形分離させたり溝の両側に盛り上がらせるに要する力と、砥粒と被削材との間の摩擦に打ち勝つための力の和と考えられる。そして前者は溝の断面積に比例し、後者は砥粒と被削材の接触面積に比例するものと考えられる⁽⁴⁾。本実験で用いた被削材では、単粒によってガラス繊維が押しのけられ、曲げられて繊維と樹脂との界面剥離を生じさせる力と、切り屑の生成および単粒と被削材との摩擦に打ち勝つ力が関係していると考えられる。ここで、各単粒を工具として考えてみた場合、切り込みを t とすると、最下点に来たときの投影面積および接触面積は表 3.3 のようになる。

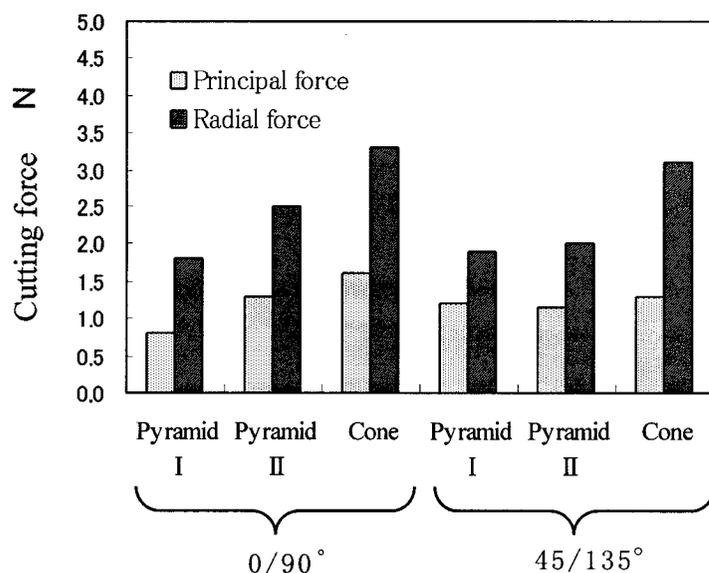


図 3.8 各単粒における切削抵抗と被削材中のガラス繊維方向の関係

表 3.3 切り込み t における各単粒の投影面積および接触面積



	Pyramid I	Pyramid II	Cone
Projection area	$1.7t^2$	$1.2t^2$	$1.7t^2$
Touch area	$3.8t^2$	$1.9t^2$	$5.5t^2$

円錐型の単粒では、接触面積が四角錐型よりも大きいため、摩擦の成分が大きくなり、抵抗が大きくなることがわかる。また、円錐型の単粒では切れ刃のないことから、切り屑の生成が困難で切り残しも多く、摩擦の影響が大きく関係していると考えられる。四角錐型の単粒では、四角錐II型の方がすくい角の値が大きく、投影面積、接触面積の両方とも小さいが、切削抵抗は四角錐I型よりも大きかった。後で述べるが、本実験においては、どの形状の工具であってもガラス繊維の切り残しが存在したが、四角錐II型が最も切

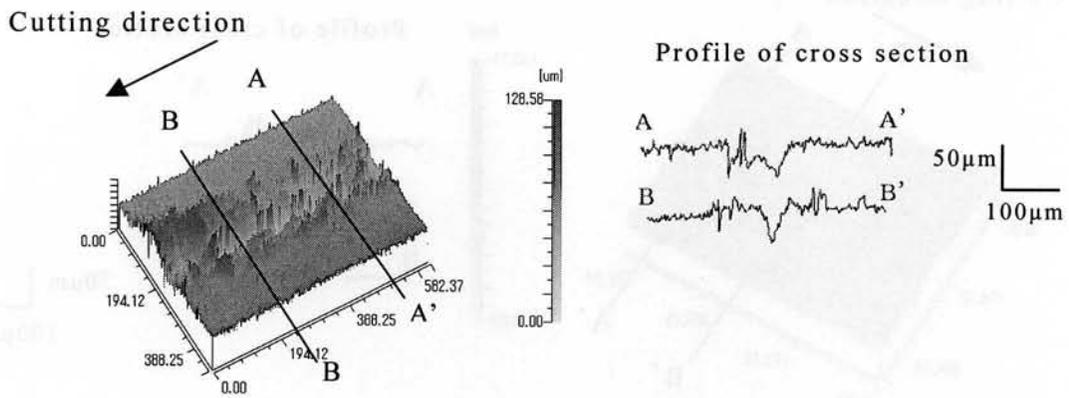
り残しが少なかった。したがって四角錐Ⅱ型では、ガラス繊維を切りくずとしてすくい面となる単粒前方の平面に沿って排出させる力が大きく、そのため切削抵抗が大きくなったものと考えられる。

3. 4. 2. 2 単粒切削痕形状

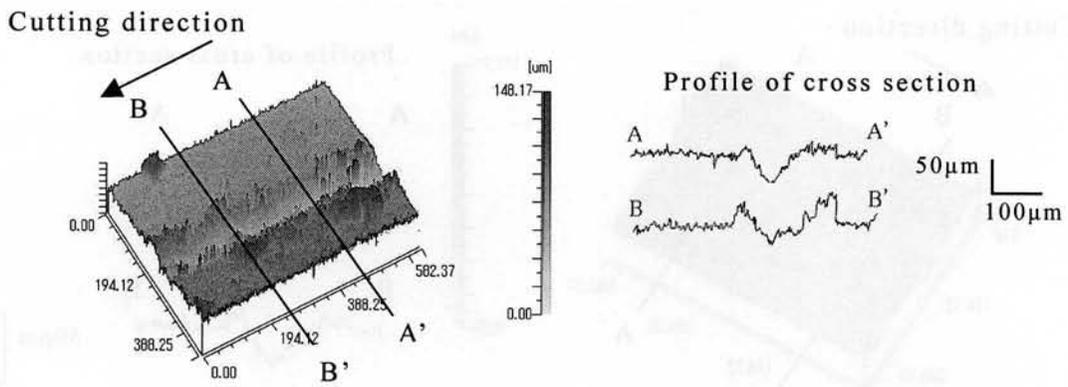
単粒切削後の切削痕をレーザ顕微鏡を用いて観察した。実験に使用した被削材のうち、ガラス繊維の方向が $45/135^\circ$ を用いた場合の切削痕の3次元形状および断面形状を図 3.9 に示す。切削方向はいずれも図の右奥から左手前方向である。図 3.9(a) は四角錐Ⅰ型の単粒を用いた場合で、切削痕の溝形状が B-B' 断面のように単粒の断面形状である V 形状になっている所と、部分的に切り残しが存在するために A-A' 断面のように V 形状が崩れている所とがある。また、切削痕の縁の領域で盛り上がりのような形状が見られるが、金属を単粒切削した際に切削痕縁に生じるいわゆる盛り上がりとは異なり、切削痕の縁で切り残されたガラス繊維が単粒によって左右の方向に押し出され、被削材表面よりも上方に現れたものである。図 3.9(b) は四角錐Ⅱの単粒を用いた場合で、切削痕縁での表面からの盛り上がりが多少見られるが、3種類の単粒の中で切削痕が一番明瞭で、切り残しも一番少ない。図 3.9(c) は円錐型単粒を用いた場合で、切削痕の断面形状が V 形状の溝になっておらず、切削痕上に多数の切り残しがあることがわかる。

さらに、ガラス繊維の方向が $0/90^\circ$ の被削材についても同様の実験を行った。切削痕形状は、図 3.9 の各単粒形状の場合とよく似た形状であった。

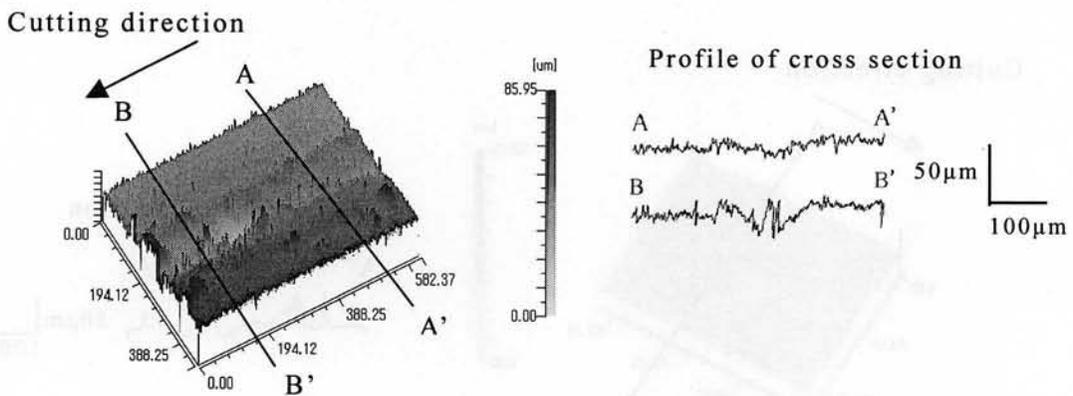
以上の観察結果より、単粒に四角錐Ⅰおよび円錐型形状を用いた場合、切り残しが多く、表面状態に及ぼす影響が大きいことがわかった。



(a) 単粒形状：四角錐 I

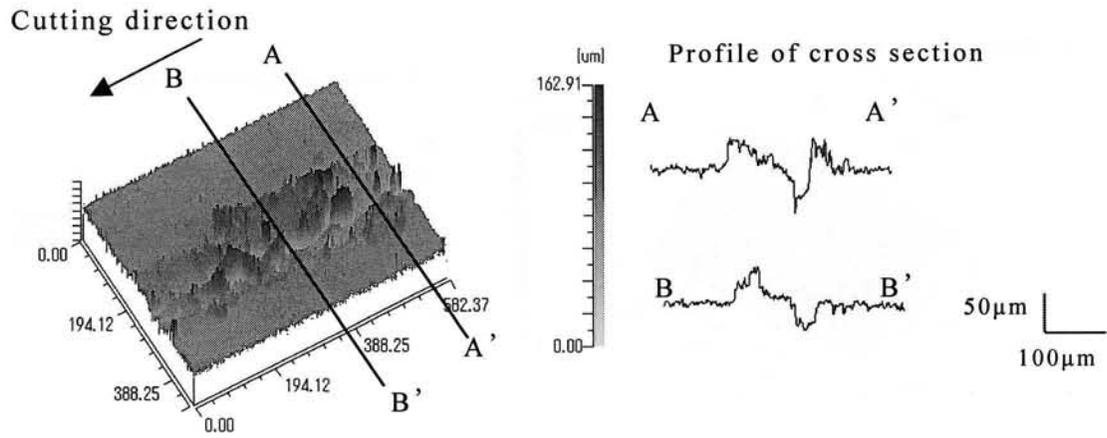


(b) 単粒形状：四角錐 II

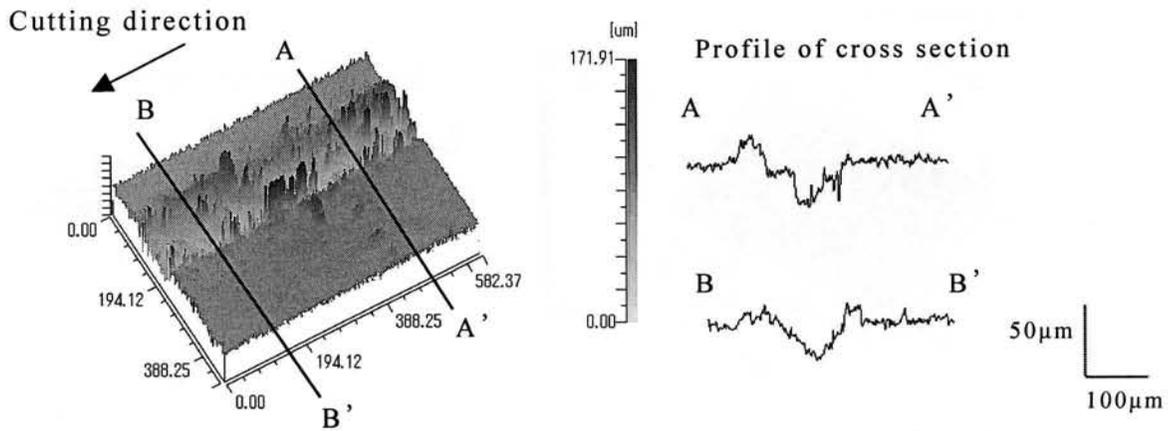


(c) 単粒形状：円錐

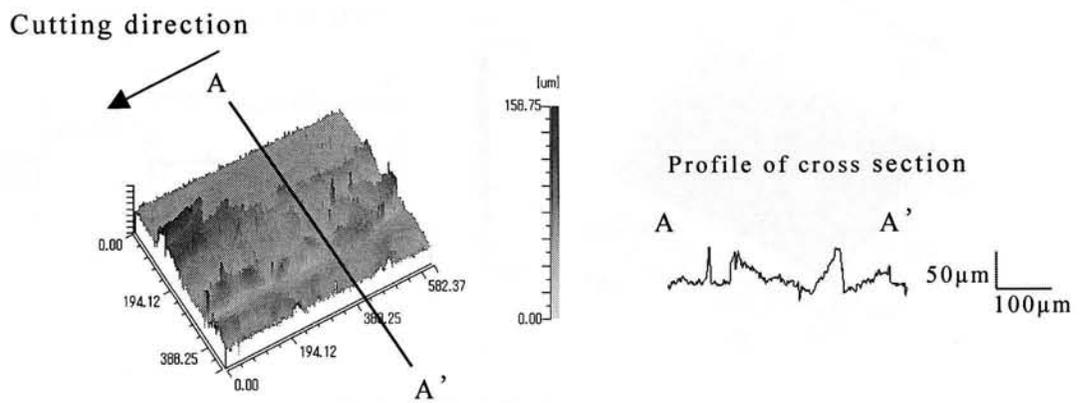
図 3.9 45/135° GFRP および各単粒を用いた場合の切削痕形状



(a) 単粒形状：四角錘 I



(b) 単粒形状：四角錘 II



(c) 単粒形状：円錐

図 3.10 0/90° GFRP および各単粒を用いた場合の切削痕形状

3. 5 GFRPの単粒切削急停止実験

前節の結果より，ダイヤモンドホイールで研削した場合に，砥粒形状が四角錐Iおよび円錐型形状である場合に研削面に及ぼす影響が大きく現れやすいことが考えられる．したがって，さらに詳しく考察するために，これら2つの単粒形状を用いて切削急停止実験を行った．そして，切り屑の生成の仕方や切削痕付近の被削材の変形や破壊などについて詳しく観察した．切削痕の観察にはSEMを用いた．

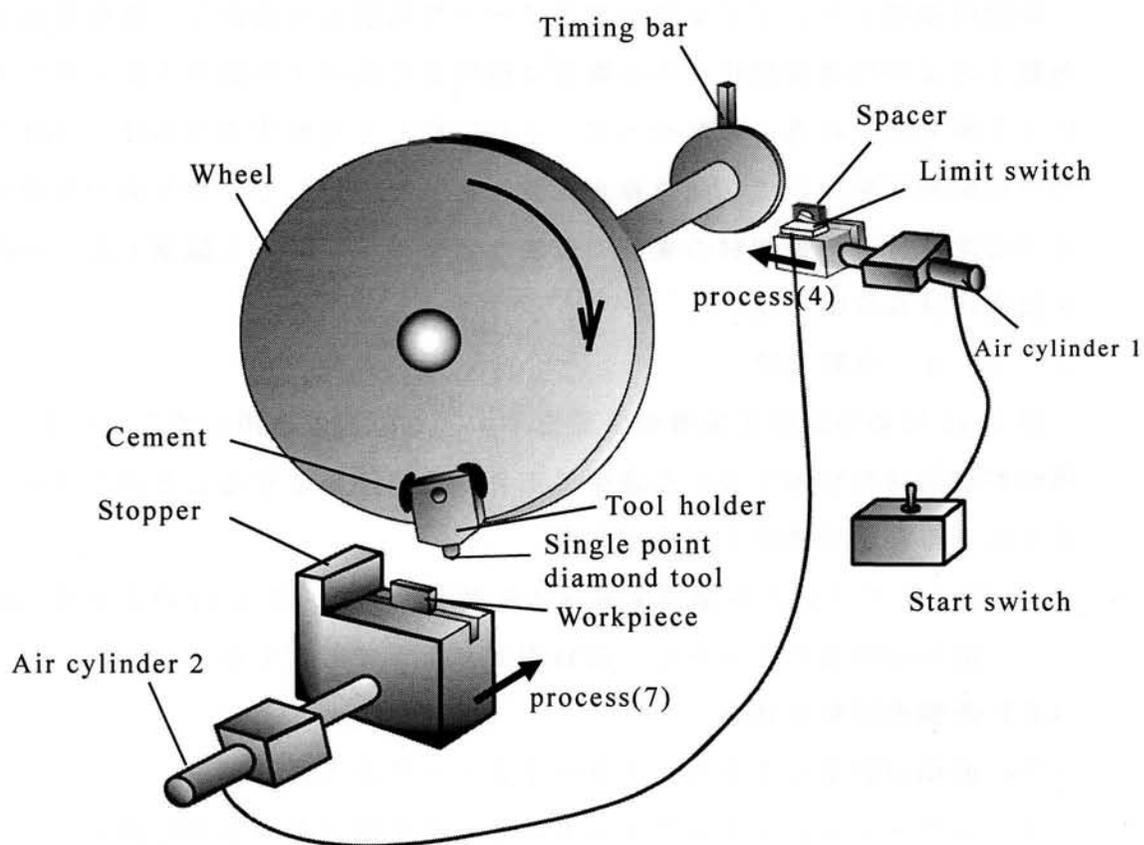
3. 5. 1 実験装置

図3.11に切削急停止装置の概要を示す．この装置を用いることによって，単粒が被削材を切削している途中で工具を急に停止させることができる．急停止に至る経過は次のとおりである．

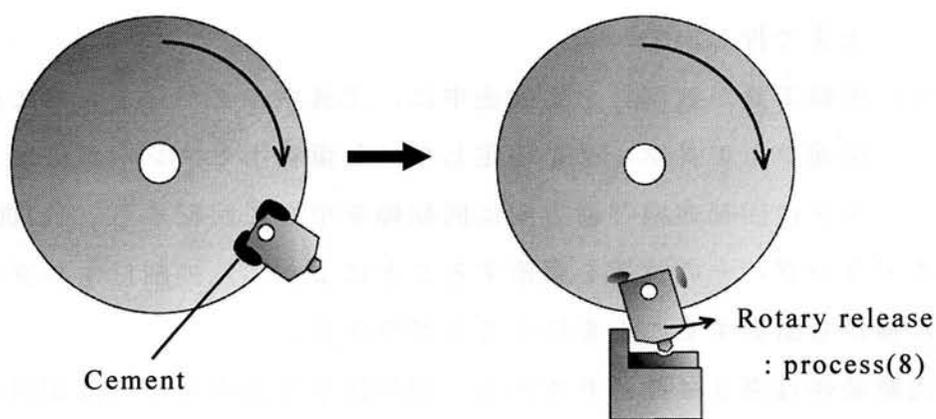
- (1) 図3.7で示した各単粒を組み込んだホルダを，図3.11のように円盤側面の回転軸にセットし，歯科用セメントで固定する．
- (2) 円盤を回転させる．
- (3) 回転が安定してから，スタートスイッチを入れる．
- (4) エアーシリンダ1がリミットスイッチを載せた台を押し出す．
- (5) タイミングバーがスペーサを弾き飛ばす
- (6) リミットスイッチがONになる．
- (7) エアーシリンダ2が作動し，被削材を載せた台を単粒工具の回転軌跡上まで押し出す．
- (8) 単粒工具が被削材を切削途中で，工具ホルダがストッパに衝突し，切削途中で工具ホルダを固定していた歯科用セメントが破壊し，工具ホルダは回転方向と逆方向に回転軸を中心に回転する（(b)図参照）．

タイミングバーの位置を調節することによって，被削材ホルダが工具ホルダに横から衝突することを防ぐことができる．

実験条件は表3.4の通りである．切削途中で急停止した被削材の切削痕をSEMを用いて観察した．



(a) 急停止装置の全体の概要図



(b) 切削急停止時の工具ホルダの動き

図 3.11 切削急停止装置の概要図

表 3.4 急停止切削の実験条件

Grinding manner	Fly cut
Workpiece	GFRP
Fiber angle	0 / 90° , 45 / 135°
Depth of cut	50 μm
Cutting speed	2.7 m/s
Feed rate	0 mm/s
Cutting fluid	Dry

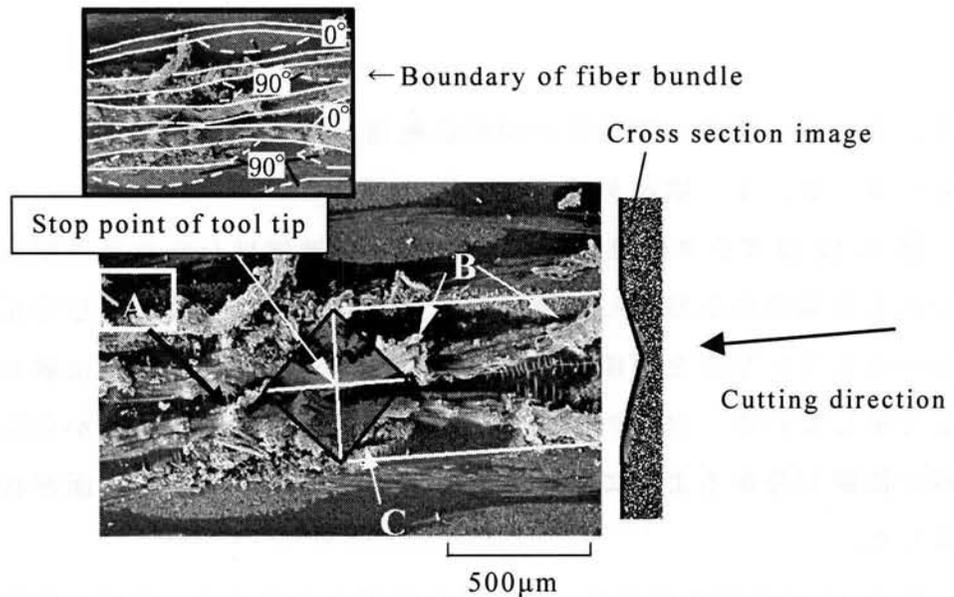
3. 5. 2 急停止実験後の切削痕観察

3. 5. 2. 1 繊維角度が 0/90° の場合

図 3.12 はガラス繊維の方向が 0/90° の被削材を四角錐 I 型単粒を用いて切削した場合の急停止した溝部分を示す。単粒の軌跡および停止した位置がわかるように写真を画像処理した。単粒の先端が停止した位置を単粒先端として示している。以下の図において、切削方向はすべて右から左で、単粒の停止位置が分かるように画像処理し、写真右側に切削痕断面形状を模式的に表した。

図 3.12 の矢印 A 付近は、切削停止位置より前方で、単粒と接触していない領域であるが、矢印 A の 0° 方向のガラス繊維東部が被削材表面よりも上方に盛り上がっている。この領域においては、単粒による力を受けて単繊維と樹脂との界面ではせん断により剥離が生じ、樹脂は弾性変形および塑性変形し、ガラス繊維は弾性変形する。切削が急停止して単粒から受ける力が解放されると、樹脂、ガラス繊維ともに弾性変形分は元の状態に戻ろうとするが、ガラス繊維との界面で剥離した樹脂は破壊されたままであるため、曲がったままの盛り上がった状態になったと考えられる。また、矢印 B 付近では 0° 方向のガラス繊維の切り残しが見られる。四角錐 I 形状を用いた場合、0° 方

向の繊維は単粒前方の稜線を含む2つの面によって切削されるとともに横に押しつけられ、ガラス繊維と樹脂との界面はせん断が生じ剥離しやすいと考えられる。さらに、被削材は単粒によって切り開かれ、ガラス繊維は切削方向に対し左右方向へ曲げられるため、切り残しが生じやすくなる。矢印Cの部分は90°方向のガラス繊維束であるが、繊維束中でガラス繊維と繊維束に含浸している樹脂とが剥離している様子が見られる。これは、切れ刃となる単粒側方の稜線によって被削材はある程度は切削されるが、ガラス繊維が曲げられ樹脂との界面でせん断が生じたために剥離したためだと考えられる。



Fiber angle : 0/90°

Tool shape : Pyramid I

図 3.12 急停止位置における切削痕のSEM写真

図 3.13 は 0/90° の被削材を円錐型単粒を用いて切削し、急停止した場合の溝部写真である。中央部の丸い部分で単粒が停止した。切削痕表面において矢印A付近の90°方向のガラス繊維は削り取られた跡がなく切り残しが

多かった。また、矢印Bで示す部分においては単粒によって樹脂が溝の上方へ押し出されるように塑性変形した様子が観察できる。工具が運動を続けるためには、工具前方の変形領域の材料をさらに変形させ、切り屑として排出させるか、または切削方向に対して工具の両側に押し広げるかのどちらかの作用が必要である⁽⁵⁾。この観察結果より、切り屑が生成されずに切り残しが生じていることから、単粒は被削材の切削予定部分を前方から側方にかけて円弧状に弾性変形させて押し広げながら切削方向へ進むと考えられ、ガラス繊維は切削過程で局所的な曲げを受けて破壊したと考えられる。また、その際矢印Cで示すようなくぼみが生じることがあり、図3.5で観察したようなくぼみの原因となると考えられる。

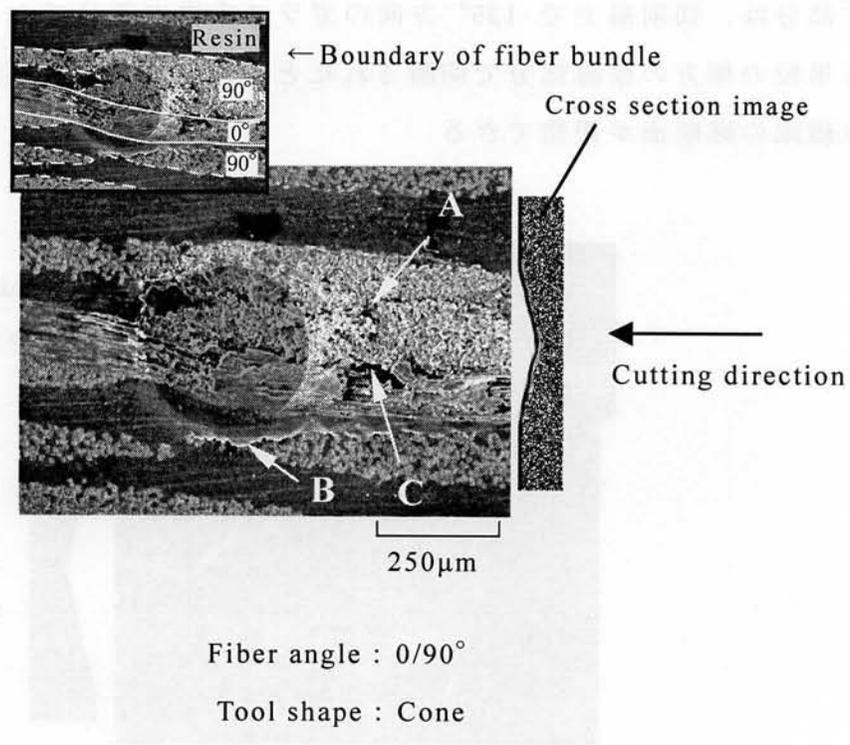


図 3.13 急停止位置における切削痕のSEM写真

3. 5. 2. 2 繊維角度が 45/135° の場合

図 3.14 は 45/135° の被削材を四角錐 I 型単粒を用いて切削し、急停止したときの溝先端の写真である。ひし形の部分で単粒が急停止した。矢印 A で示す部分は 45° 方向のガラス繊維束で、ガラス繊維の多少の切り残しがあるもののほとんどのガラス繊維は切断されている。しかし、この繊維束中においてガラス繊維と樹脂が表層部では大部分剥離している。四角錐 I 型の単粒を用いた場合では、稜線を含む二つの面によって被削材が切削されるとともに横に押しつけられる。単粒が切削方向に進むにつれ被削材は押しつけられつつ溝幅が拡大していくため、単繊維と樹脂の界面がせん断されて剥離すると考えられる。特にガラス繊維の方向が 45° の場合、ガラス繊維が負のすくい角である単粒の稜線の形状に沿って曲げられやすく、界面剥離が生じやすいと考えられる。矢印 B で示す部分は、切削痕上で 135° 方向のガラス繊維束部分であるが、切れ刃となる単粒の側方の稜線部分で切断されたと考えられ、切削痕表面においてガラス繊維の破断面が観察できる。

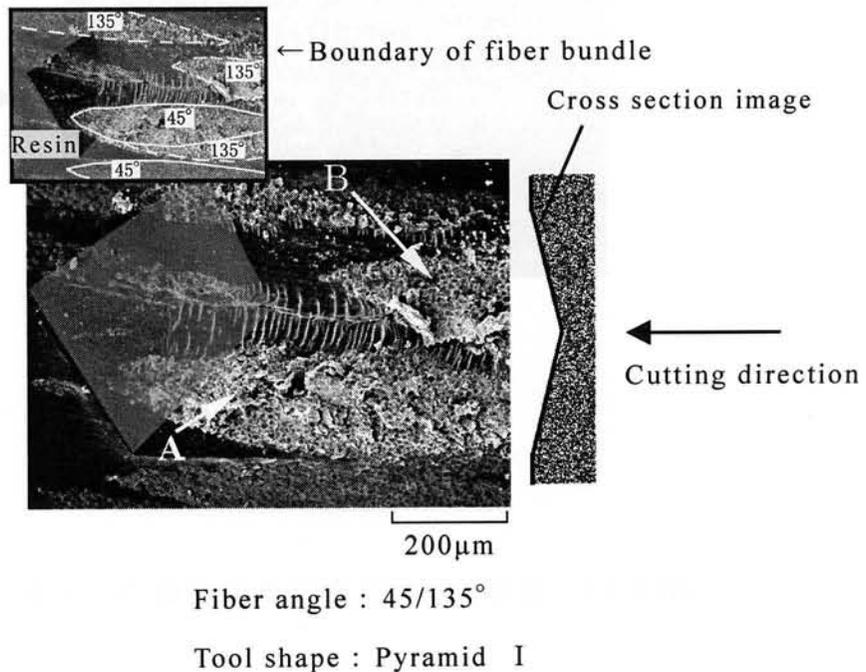


図 3.14 急停止位置における切削痕の SEM 写真

図 3.15 は $45/135^\circ$ の被削材を円錐型単粒を用いて切削し、急停止した溝先端の写真である。中央部の丸い部分で単粒が停止した。ガラス繊維の切り残しが多く、 $0/90^\circ$ 被削材の場合よりも切り屑が連続的である。切削停止位置より前方で切り屑の堆積が見られる。これは、切り屑を排出しようとしているが、工具形状から切れ刃がなく、ガラス繊維を切断できないため、あるいは樹脂とガラス繊維との接着が強いために、このような状態になったと考えられる。

さらに、図 3.16 は単粒が急停止した切削部前方の領域で、図 3.15 中の矢印 A 付近を拡大したものである。写真のほぼ上半分に当たる 45° 方向のガラス繊維束と、写真のほぼ下半分に当たる 135° 方向のガラス繊維束との境に亀裂が入り、 135° 方向のガラス繊維が掘り起こされたような状態となっている。これらのことから、特に 135° 方向のガラス繊維は単粒による力を受けて、単粒と接触する前に切削方向の前方で押し起こされた後、さらに曲げられて破壊したと考えられる。このことが原因でダイヤモンドホイールで研削した際、図 3.4(a)で見られたような研削表面が生じ、またガラス繊維が切り屑となって研削表面より排出された場合、図 3.4(b)のようなくぼみが生じたと考えられる。

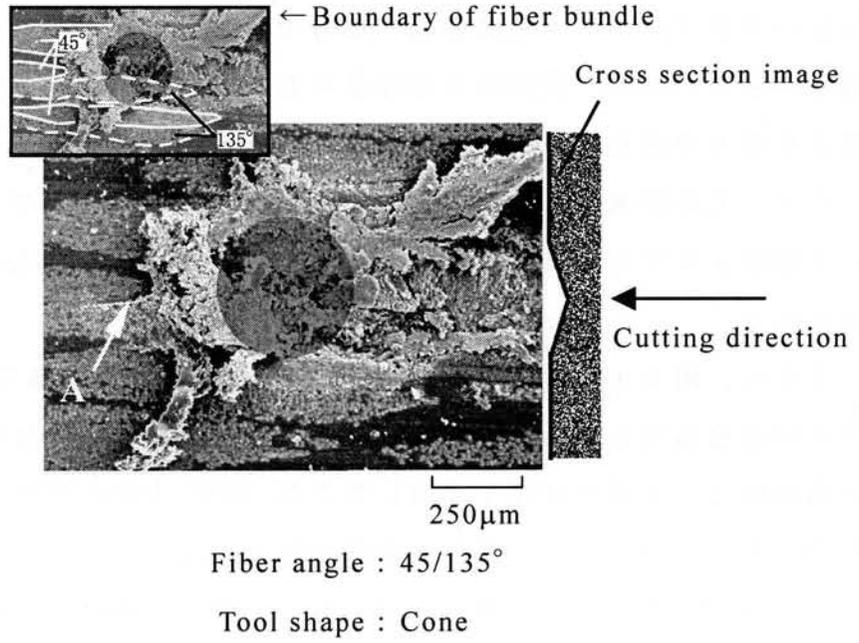


図 3.15 急停止位置における切削痕のSEM写真

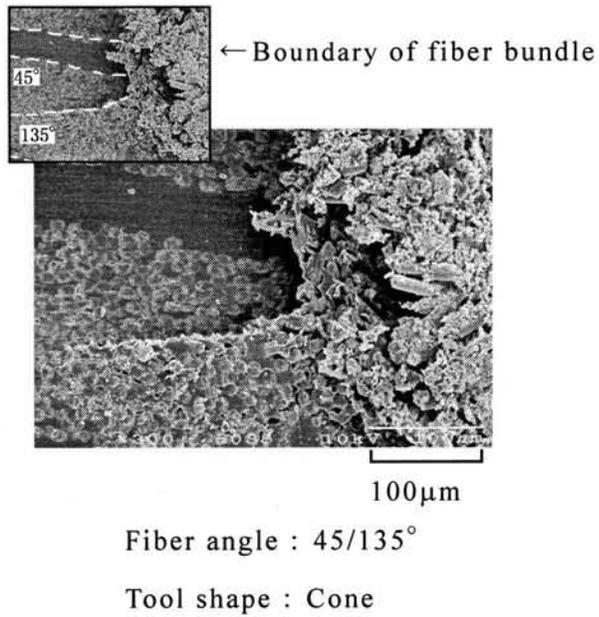


図 3.16 図 3.15 の矢印 A 付近の拡大写真

3. 6 結言

GFRPをダイヤモンドホイールで研削したときの研削痕の生成機構を調べた。特に、表面状態が悪くなる原因を調べるために、GFRPを単粒切削した結果、以下のことがわかった。

- (1) 単粒切削抵抗を測定した結果、円錐型と四角錐型では円錐型を用いた場合の方が切削抵抗値が大きく、四角錐型では、切削方向に稜部を前方とした四角錐Ⅰ型の方が値は小さい。また、被削材中の繊維方向による切削抵抗の違いはほとんどなかった。
- (2) 円錐型単粒を用いた場合、特に摩擦の影響が大きく切削抵抗値が大きくなった。
- (3) 実験に用いた単粒形状のうち四角錐Ⅱ型を用いた場合、最も削り残しが少ない。四角錐Ⅰ型では、切れ刃にあたる稜線によって樹脂と繊維がともに切断されるが、 0° 方向のガラス繊維は切り残されやすい。円錐型では、切り屑が生成されにくく、切り残が多い。
- (4) 単粒形状に円錐型を用いた場合、 0° 方向のガラス繊維は所々で局所的な曲げで破壊し、その跡がくぼみとなる。また、 135° 方向のガラス繊維は切削方向に対し、単粒前方において被削材表面よりも下方で押し起こされた後、曲げ破壊し、切り屑となって排出された場合はその跡がくぼみとなる。これらの現象が原因で、ダイヤモンドホイールによる研削加工の際、ガラス繊維の表面への突き出しや研削面のくぼみが生じる。

参考文献

- (1) 中島利勝，大橋一仁，塚本真也，吉川竜治：ガラス繊維強化プラスチックの研削過程に関する研究，精密工学会誌，57,7(1991)1253.
- (2) 片平和俊，渡邊裕，大森整，加藤照子：先進繊維強化PEEKのELID研削特性とトライボロジー評価，砥粒加工学会誌，46,4(2002)199.
- (3) GFRP操作棒の研削ねじ加工，加工技術データファイル，(1985)4-40.
- (4) 松井正己，中里昭三：超仕上げ作用とその原理，養賢堂，(1965)127.
- (5) 長谷川嘉雄，花崎伸作，安富雅典，室町 隆：円すい形工具を用いたアルミニウム単結晶の単粒切削に関する研究，日本金属学会誌，46,10(1982).

第4章

各種砥石によるCFRPの乾式研削

4.1 緒言

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、比強度、非弾性率が高く、その優れた機械的特性よりさまざまな用途に使用されている。CFRPは、強化材である炭素繊維の配向によって、大きく2種類に分けられる。1つは、一定の本数を束ねた炭素繊維束を平織りに織って布状とし、そのシートを積層してエポキシ樹脂で固化したもの（以下、クロスCFRPと呼ぶ）と、もう1つは炭素繊維を一方向に引き揃えて薄い布状としたシートを同じ方向に積層し、エポキシ樹脂で固化したもの（以下、一方向CFRPと呼ぶ）である。これまで、クロスCFRPの利用が多かったが、一方向のCFRPは炭素繊維の軸方向に対して引張り強度が著しく強いので、引張り強度が必要な方向に繊維軸を設定できる等の点から、利用される頻度も多くなってきている。CFRPは航空機、搬送用機械のアーム、自動車のボディおよびプロペラシャフト、スポーツ用品として使われているにとどまらず、近年精密部品にまで用途が広がりつつある。そのため厳しい寸法公差が要求される部品もある。CFRP製品は成形加工のみで製品として使用されることは稀で、多くの場合、端面の仕上げや穴あけなどの機械加工が必要である。これらCFRPの機械加工のうち、切削においては、切削残留量が生じること⁽¹⁾や、繊維の切残しが生じ、それが逃げ面を擦過し、工具の磨耗を促進する⁽²⁾ことが報告されている。精度のよい製品を得るためには、研削加工が望ましいと考えられるが、CFRPの研削加工についての報告は少なく、これまで小径メタルボンド砥石を用いてヘリカル切込みで、穴加工を行った研究⁽³⁾やELID研削方法を用いた研究⁽⁴⁾が報告されている程度である。しかし、機械部品にも利用される場合、成形加工の後、切削や研削加工が必要となる場合も多い。例えば、輪転機のローラにCFRPが用いられているが、中空のCFR

Pパイプを円筒研削した後、鉄メッキされることがある。また、自動搬送システムの構成部品としての利用では、高い平面度が要求されていて、フライス加工の後、平面研削が必要となっている。

このように、CFRPの研削加工が必要とされているにもかかわらず、CFRPの切削加工に関する研究と比べると、研削に関する報告はわずかであり、適した研削条件などの加工ノウハウがほとんどない。このようなことから、CFRPの機械加工を行う製造者も限られており、材料自体が高価格であることから、CFRP製品はさらに高価格になっている。CFRPの加工ノウハウ等が蓄積され、CFRPが容易に機械加工されるようになれば、CFRPの用途もますます広がり、価格の低下も期待できる。そこで、本章では、まずCFRPにより適した研削条件を見出すこととした。

4.2 被削材

被削材は、図4.1のように炭素繊維の束を平織りにしたシートを積層したクロスCFRP（図4.1(a)）と、炭素繊維を一方向に引き揃えたシートを積層した一方向CFRP（図4.1(b)）の2種類を用いた。厚さ5ミリのこれら

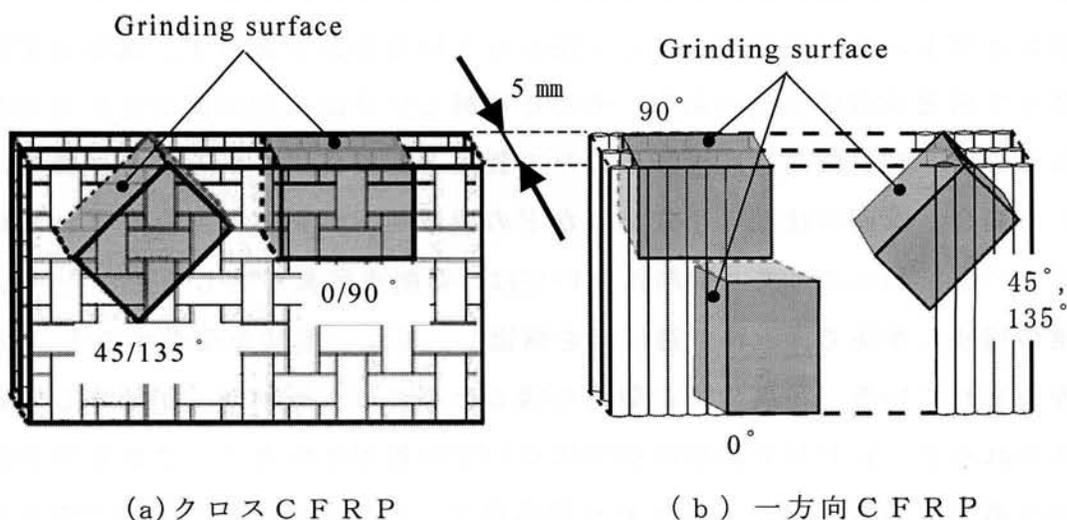


図 4.1 被削材の種類

の板材から，図のように繊維軸方向と，斜め 45° の方向に，縦 10 mm，横 15 mm に切り出して繊維角度を変えた材料を作成した．それぞれの繊維角度は， 0° ， 45° ， 90° ， 135° となる．クロスCFRPの場合は，繊維角度が同時に2つ存在することになり， $0/90^\circ$ ， $45/135^\circ$ のように記述する．これらの端面を研削した．表 4.1 に一方向CFRPの機械的性質を示す．

表 4.1 一方向CFRPの機械的性質（繊維軸方向）
(Fiber contents : 60 vol%)

Tensile strength	2250 MPa
Young's modulus	135 GPa
Ultimate strain	1.7 %

4. 3 研削実験装置および方法

被削材には一方向CFRPとクロスCFRPの両方を用いた．実験では平面研削盤（岡本工作機械製作所製 PFG-450G）を用いて，被削材の端面を，層に平行な方向に，乾式平面研削を行った．図 4.2 に実験装置の概要を示す．被削材の繊維角度 θ は図 4.2 のように定義し，クロスCFRPの場合は平織りのシートを積層してあるので，繊維軸の向きが二方向あるため $\theta / (\theta + 90)$ と表す．被削材中の繊維角度の影響を調べるために，一方向CFRPでは，繊維角度をそれぞれ 0° ， 45° ， 90° ， 135° とした試料を用い，クロスCFRPでは $0/90^\circ$ および $45/135^\circ$ の試料を用いた．試料の大きさは，いずれも $10 \times 15 \times 5$ mm である．研削速度を変えて実験を行うために，インバータを介して主軸モータを変速した．表 4.2 に実験条件を示す．

研削面の表面粗さは，表面粗さ測定器（小坂研究所製サーフコーダ SE-40C）を用いて，テーブルの送り方向に対し直角方向に測定した．

使用した砥石は表 4.2 に示したように，一般砥石として GC36 と GC220 砥石を用い，超砥粒ホイールとしてダイヤモンドホイールの SDC200，SDC400，

SD230 と、cBNホイールのCB230を用いた。このうち、SDC200とSDC400ホイールについては、砥粒がNi被覆合成ダイヤモンドで、集中度125、無気孔のレジンボンドのホイールである。ドレッシング後のレジンボンドホイール表面には、レジンボンドホイールにおいてよく見られるボンドテールが観察された。次に、SD230ホイールについては、砥粒は合成ダイヤモンドで、集中度50である。このダイヤモンドホイールはダイヤモンドの熱損傷を防ぐため、低融点フリットを使用し、近年開発されたビトリファイドボンドのホイールである。従来から用いられている無気孔のメタルボンドやレジンボンドのホイールとは異なり、気孔があるので、切りくずの排除が容易で、研削能率が高い特徴を持ち⁽⁵⁾、難削材の研削加工に対して用途が広まりつつある。また、CB230ホイールについては、砥粒がcBNで、有気孔のビトリファイドボンドのホイールである。

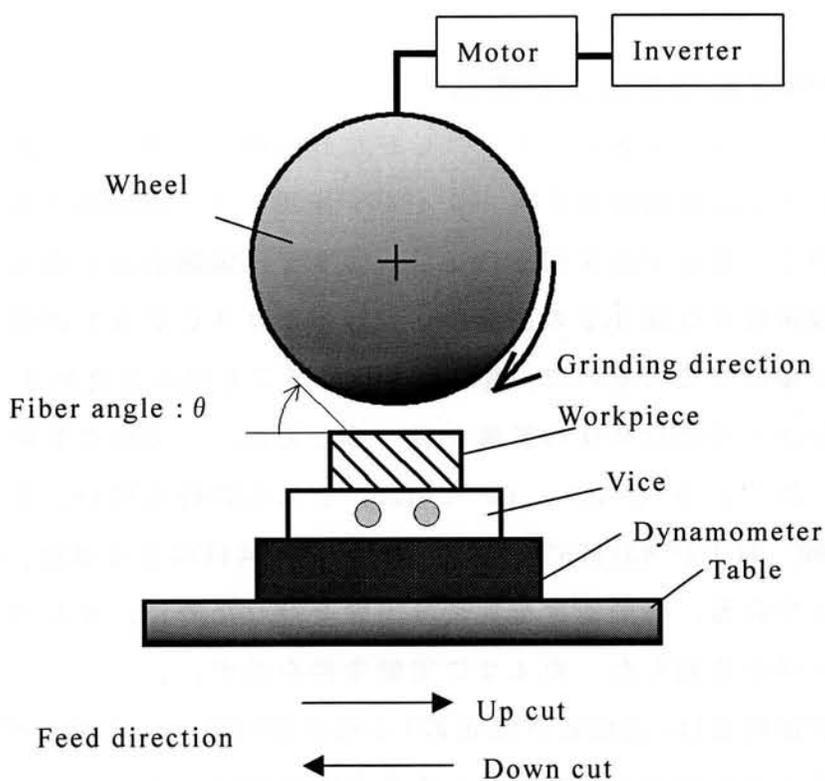


図 4.2 実験装置の概要

表 4.2 研削実験条件

Grinding manner	Up cut, Down cut
Wheel	GC Wheel : $\phi 200 \times 10$ mm GC36J12V0, GC220J12V Resin diamond grinding wheel (Nagoya diamond Co. Ltd.): $\phi 175 \times 10$ mm SDC200N125B, SDC400R125B Vitrified superabrasive grinding wheel (Noritake Company) : $\phi 180 \times 13$ mm SD230P50VD2GP, CB230P50VD2GP
Workpiece	Unidirectional CFRP, Cloth CFRP L 15×H 10×W 5 mm
Fiber angle	0, 45, 90, 135° (Unidirectional CFRP) 0/90, 45/135° (Cloth CFRP)
Depth of cut	10 μ m
Wheel speed	12.5, 25.0, 37.5m/s
Feed rate	0.043 m/s
Grinding fluid	Dry
Truer	C60M with brake
Dresser	Single point diamond tool, WA240GV, WA500GV

ドレッシング方法については、GC 砥石には単石ダイヤモンドでドレッシングを行い、ダイヤモンドホイールおよび cBN ホイールに対しては、C60M のブレーキ付き砥石でツルーイングの後、表 4.2 で示したドレッシング用砥石のうち、各ホイールの粒度よりも少し大きい粒度の WA スティック砥石を手で軽く押し付けてドレッシングを行った。

研削抵抗は自作の枠組み型動力計(固有振動数約 3 kHz)を用いて測定した。

4. 4 研削実験結果および考察

4. 4. 1 研削速度および研削方向の影響

まず，被削材の繊維角度，研削方向，研削速度の影響を調べるために，被削材に一方向CFRPを用い，1パスのみのアップカットおよびダウンカット研削を行った．砥石には表面粗さに及ぼす影響が観察しやすいように，砥粒の平均粒径の大きいGC36砥石を使用した．各被削材の表面粗さと繊維角度の関係を図4.3に示す．アップカット，ダウンカットともに繊維角度が 135° の場合に，表面粗さが最も大きくなった．この 135° 一方向CFRPの研削表面を観察すると，アップカット，ダウンカットどちらの場合においても，所々に研削方向にスクラッチのように傷が入り，目視でも表面が損傷していた．特に研削速度 37.5 m/s の場合，その表面損傷がはっきりと観察できた．その例を図4.4に示す．このように，繊維角度が 135° の場合，研削速度が表面粗さに及ぼす影響が顕著に現れやすかった．また， 45° および 90° の一方向CFRPの場合，表面粗さはほぼ同じで，本実験中，最も小さい値と

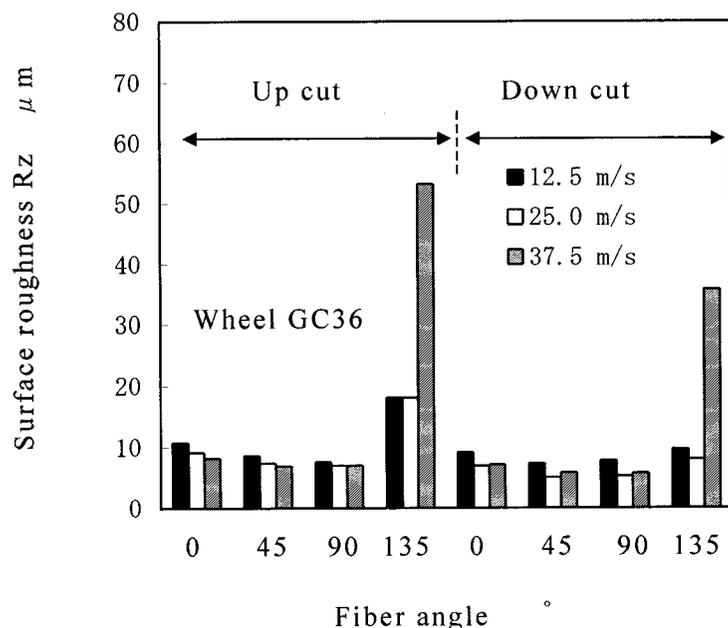
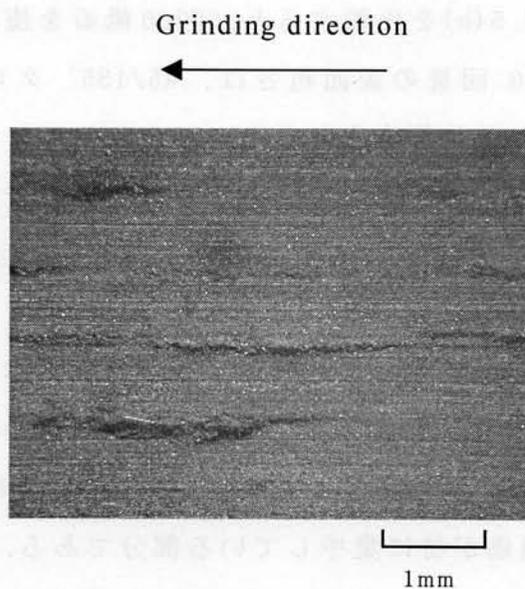


図 4.3 表面粗さと繊維角度の関係

なった。研削方向の影響については、ダウンカットの方がアップカットよりも表面粗さは良かった。また、ダウンカットの場合、砥石周速が 25.0 m/s において、表面粗さが最も良かった。



Wheel:GC36, Grinding manner:Down cut,
Wheel speed:37.5 m/s

図 4.4 135° 一方向 CFRP の研削表面の損傷

4. 4. 2 砥石の種類による影響

次に、砥石の種類による研削面の表面粗さへの影響を調べるために、表 4.2 に示した種々の砥石を用いて実験を行った。超砥粒ホイールの粒度は、仕上げ用としても用いることのできる #230 とした。GC 砥石については、ほとんど同じ粒径の GC220 砥石を選んだ。

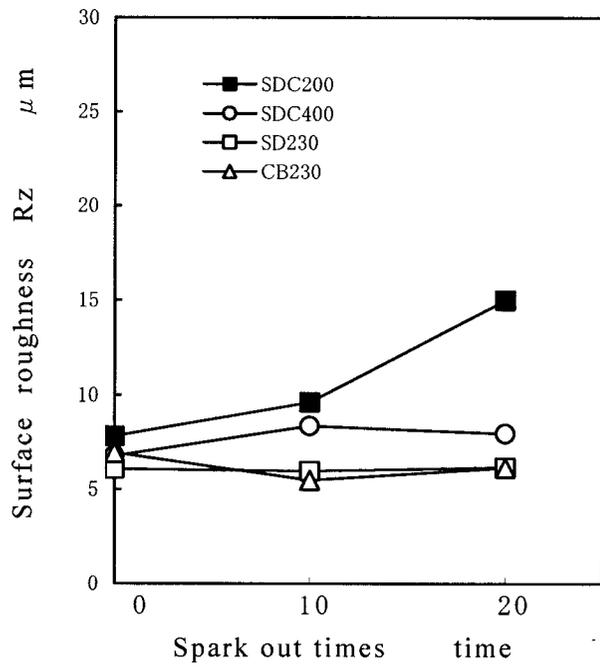
砥石を比較するために、研削条件を同じとして、スパークアウト回数を増やしながら表面粗さを測定した。1パス目の研削条件は、図 4.3 の表面粗さの結果を考慮して GC 砥石にとっては良い条件と思われる、研削速度 25.0m/s でダウンカット研削とした。被削材には CFRP 製品として一般に

広く用いられているクロスCFRPを用いた。

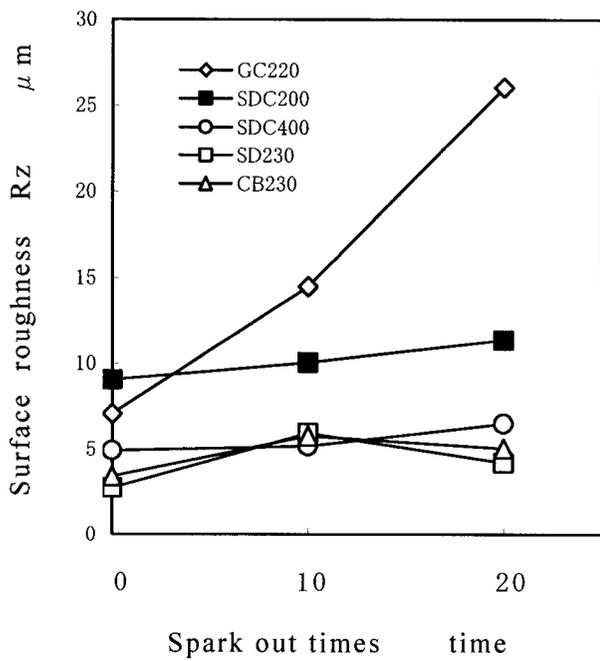
実験結果を図 4.5 に示す。図 4.5(a)は被削材に 0/90° のクロスCFRPを用いた場合の表面粗さとスパークアウト回数の関係で、図 4.5(b)は 45/135° クロスCFRPの場合である。切込み 0 でのパス回数を横軸にとっており、スパークアウト回数 0 回とは、ダウンカット研削 1 パス後の結果を表している。図 4.5(a)と図 4.5(b)を比較すると、GC220 砥石を使用した場合を除いて、スパークアウト 20 回後の表面粗さは、45/135° クロスCFRPの方が、0/90° クロスCFRPの場合よりも良いことがわかった。また、図 4.5(b)の結果から、一般砥石である GC220 の砥石を用いた場合、スパークアウトの回数を増やすと表面粗さが悪くなり、スパークアウト 20 回後の研削表面は目視でも所々に傷が認められた。

この傷の様子を詳しく調べるために、SEM（日本電子製走査型電子顕微鏡 JSM-220A）を用いて研削面の観察を行った。観察の前には圧縮空気を研削面に吹き付けて切りくずを除去した。この時の研削面の写真を図 4.6 に示す。図 4.6(a)は表面損傷が特に集中している部分である。研削方向に沿っていくつかの大きな傷が見られる。図 4.6(b)は同じ研削面上で観察されたもので、砥石より脱落した砥粒を撮影したものである。圧縮空気を吹き付けても取り除けなかったことから、表面に食い込んだ状態であると考えられる。これは、ドレッシング時に小さなき裂の入っていた砥粒が、繰り返しスパークアウトを行っているうちに脱落し、この脱落した砥粒が研削表面で繰り返し押し込まれ、研削面に図 5 (a)のような傷を作ったものと考えられる。

他の砥石については、図 4.5(a), (b)の結果から、SD230 ビトリファイドボンドホイールと CB230 ホイールを用いた場合の表面粗さはほぼ同じで、かつその表面粗さは最も小さかった。また、SDC200 レジンボンドホイールを用いた場合は、ダウンカット 1 パス後の表面粗さが悪く、繊維の削り残しが存在すると考えられる。スパークアウトを行っても、この削り残しを容易に削り取ることができないうえに、樹脂部分を削り取る結果、繊維が浮き上がることになるため、スパークアウト回数が増えても表面粗さは良くなり、むしろ表面が悪化したと考えられる。図 4.5(b)より、スパークアウト 0 回での表面粗さを比較すると、ダイヤモンド砥粒でほぼ同じ砥粒径⁽⁶⁾の SD230 ビトリ



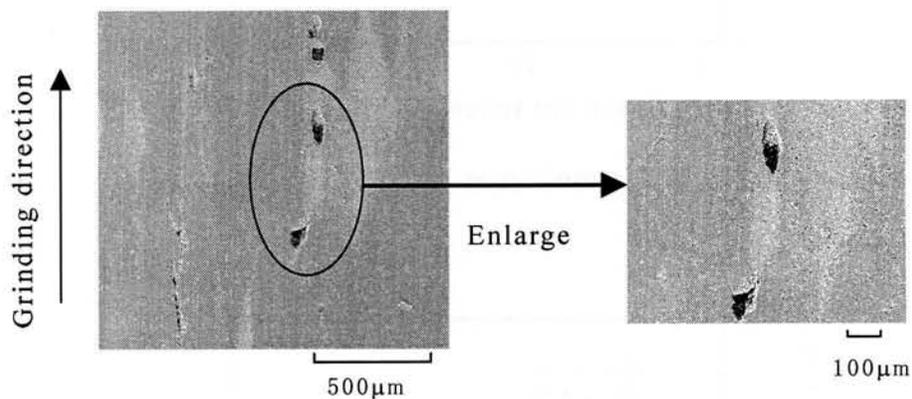
(a) 0/90° クロスCFRPの場合



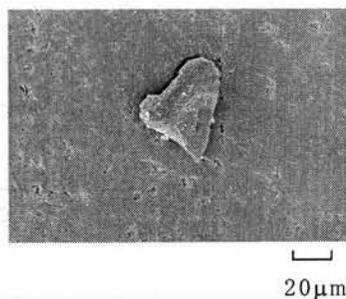
(b) 45/135° クロスCFRPの場合

図 4.5 表面粗さとスパークアウト回数の関係

ファイドボンドホイールの方が SDC200 レジンボンドホイールを用いた場合よりも値が小さかった。さらに、SDC400 レジンボンドホイールの砥粒の平均粒径は、SD230 ビトリファイドボンドホイールの場合と比べほぼ半分であるので、SDC400 レジンボンドホイールを用いた場合の方が、表面粗さは最も良くなると思われたが、結果は逆で、45/135° クロスCFRPの場合、SD230 ビトリファイドボンドホイールを用いた方が表面粗さは良くなった。これらのダイヤモンドホイールの仕様の違いは、ボンドの種類と気孔の有無であるので、両ホイール表面の状態がどのように異なっているかを詳しく観察した。



(a) 研削表面



(b) 研削表面上に残された砥粒

Grinding wheel : GC220, Workpiece : 45/135° Cloth CFRP,
Spark out times: 20

図 4.6 CFRP の研削表面の損傷

図 4.7 にダウンカット 1 パス後の砥石表面を、光学顕微鏡で観察した時の写真を示す。黒線で囲った部分はダイヤモンド砥粒である。図 4.7(a) は SDC200 レジンボンドホイールの表面で、砥粒周りおよび研削方向に対し砥粒後方のボンドテール部分に粉末状の切りくずが付着していた。図 4.7(b) は SD230 ビトリファイドボンドホイールの表面の写真で、この砥粒の前方に気孔が多数観察できる。砥粒周りに粉末状の切りくずが付着していたが、気孔部分にも同様の切りくずがそれ以上に観察できた。これは、研削中に切りくずがチップポケットである気孔にうまく排出されて砥粒のすくい面上に堆積しなかったためであると考えられる。そのため、切りくずが砥粒切れ刃を鈍らせることなく、研削することができたため、気孔が多数ある SD230 ビトリファイドボンドホイールを用いた場合の方が、SDC200 レジンボンドホイールを用いた場合よりも表面粗さが良くなったと考えられる。

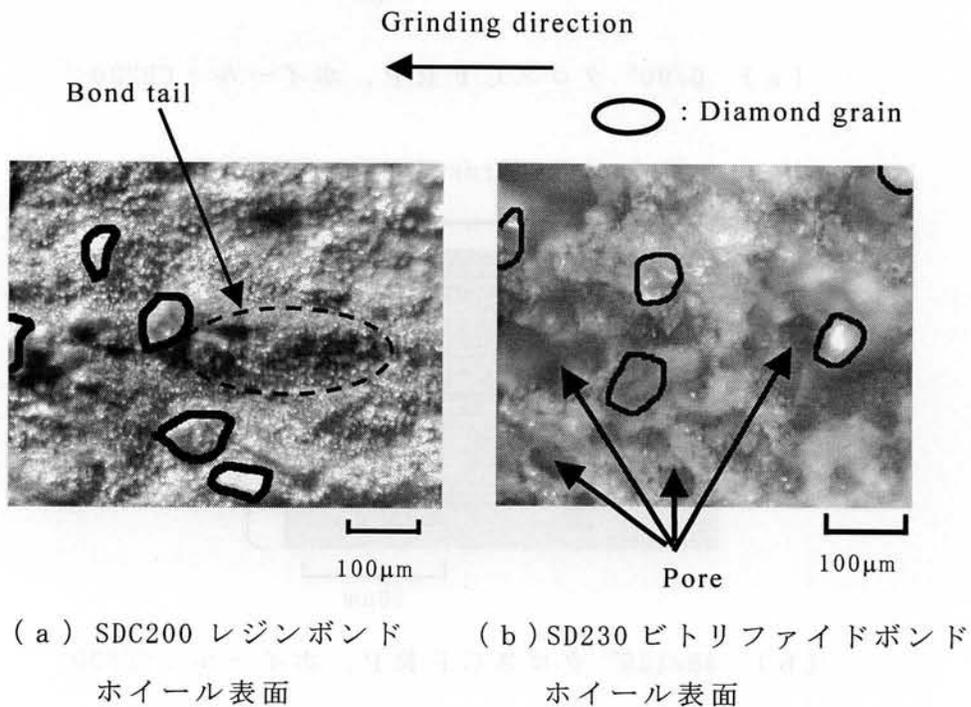
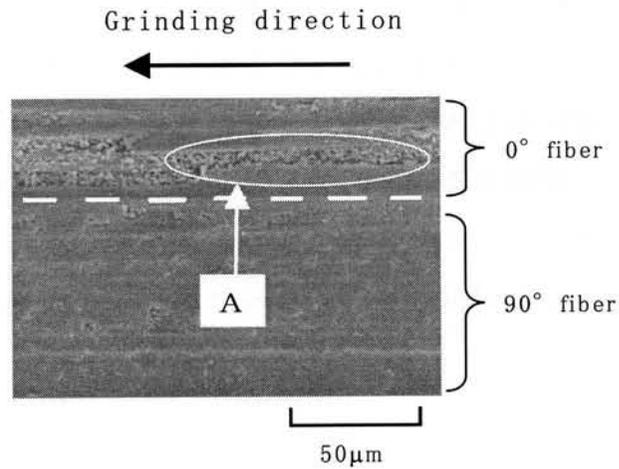


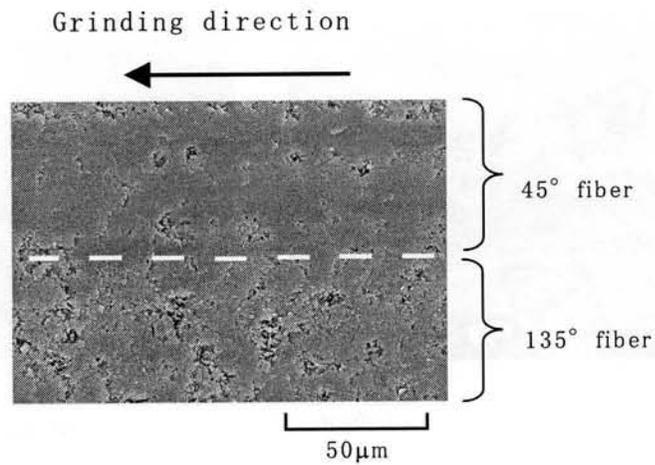
図 4.7 ダイヤモンドホイール表面の観察

4. 4. 3 超砥粒ホイールによる研削表面の観察

次に、研削表面の観察をSEMを用いて行った。一例として、クロスCFRPをCB230ホイールでダウンカット研削したときの、研削表面の写真を図4.8に示す。研削表面に残された切りくずを圧縮空気を取り除いた後に観察



(a) 0/90° クロスCFRP, ホイール: CB230



(b) 45/135° クロスCFRP, ホイール: CB230

図 4.8 CFRP 研削表面のSEM観察

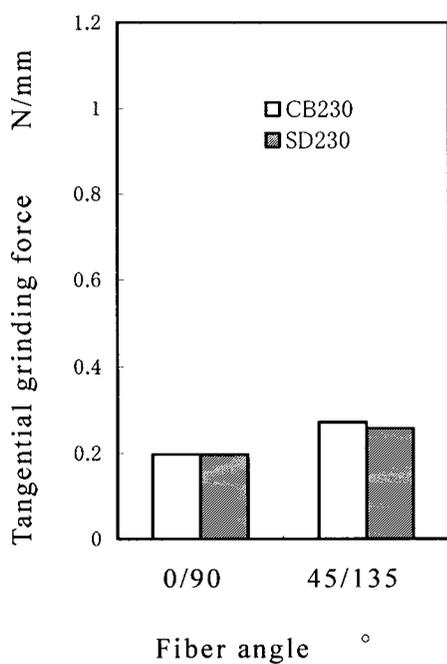
を行った。図 4.8(a)は $0/90^\circ$ クロスCFRPの研削表面の写真で、図 4.8(b)は $45/135^\circ$ クロスCFRPの写真である。図 4.8(a)において、白点線より上側が 0° 繊維束部分で、下側が 90° 繊維束部分である。図中の 0° 繊維束部分で、矢印Aで示す黒い溝状に見える部分は、繊維が樹脂から抜けた跡である。これは、研削中に研削面に垂直な方向の力が作用し、繊維がせん断されると同時に繊維と樹脂との界面ではく離が起これ、繊維が切りくずとなったためにその繊維の跡が溝のように見えたものと考えられる。 90° 繊維束部分は、研削表面が樹脂で覆われた状態で滑らかに見え、繊維の端面は観察できなかった。図 4.8(b)において、白点線より上側が 45° 繊維束部分で、下側が 135° 繊維束部分である。研削表面は全体が樹脂で覆われた状態で、 45° 方向の繊維束、 135° 方向の繊維束のどちらの研削面においても繊維の端面は観察できなかった。所々に黒い点状に見えるのは、繊維端が十分に樹脂で覆われず窪んでいる部分で、穴があいているなどの大きな損傷ではない。また、図 4.8(a)と比べると、繊維が抜けた跡もなかった。さらに、SD230 ビトリファイドボンドホイールを用いた場合についても研削面を観察したが、CB230 ホイールの場合とほぼ同様の状態であった。このように、 $0/90^\circ$ クロスCFRPの研削表面は 0° 方向の繊維が樹脂から抜けた跡が窪みとなって、表面粗さは $45/135^\circ$ の場合よりも大きくなったと考えられる。

4. 4. 4 SDホイールとcBNホイールの研削抵抗

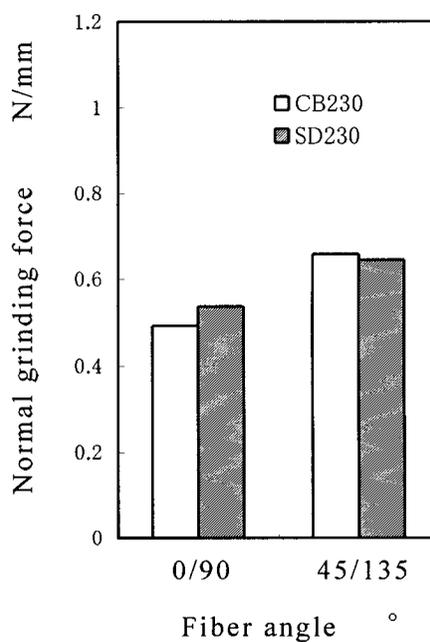
これまでの結果から、表面粗さがほぼ同じ程度で、最も良かったSD230 ビトリファイドボンドホイールとCB230 ホイールを用いて、研削抵抗を測定し、どちらのホイールがCFRP研削により適しているかを調べた。クロスCFRPをダウンカット研削した際の研削抵抗を図 4.9 に示す。図 4.9(a)は、接線研削抵抗と繊維角度の関係を、図 4.9(b)は法線研削抵抗と繊維角度の関係を示している。どちらのホイールを用いても、研削抵抗の値はほぼ同じであった。繊維角度の影響については、 $45/135^\circ$ クロスCFRPの方が $0/90^\circ$ クロスCFRPよりも、研削抵抗の値は多少大きくなった。

また、一方向CFRPに対しても同様にSD230 ビトリファイドボンドホイ

ールおよびCB230ホイールを用いて研削抵抗を測定した結果を図4.10に示す。図4.10(a)は接線研削抵抗と繊維角度の関係を、図4.10(b)は、法線研削抵抗と繊維角度の関係を示す。研削抵抗の値を比較した結果、どの繊維角度においても、これら2つのホイールの研削抵抗の差は小さいことがわかった。繊維角度の影響については、45°の場合が研削抵抗の値が最も大きく、次いで135°の場合で、90°、0°の順に小さくなった。

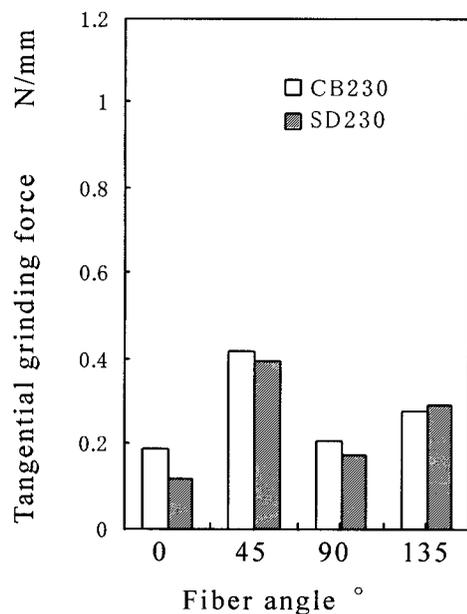


(a) 接線研削抵抗と繊維角度の関係

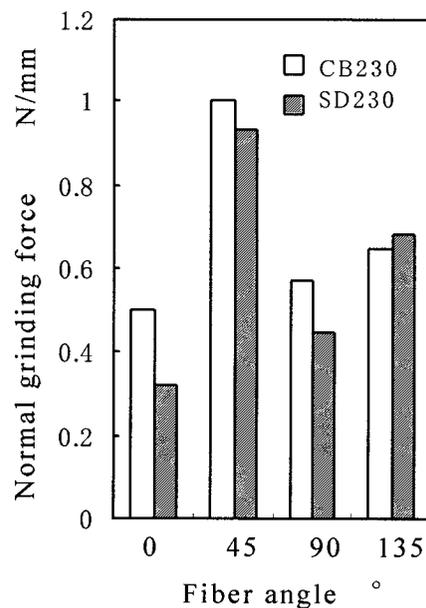


(b) 法線研削抵抗と繊維角度の関係

図4.9 研削抵抗とクロスCFRPの繊維角度の関係



(a) 接線研削抵抗と繊維角度の関係



(b) 法線研削抵抗と繊維角度の関係

図 4.10 研削抵抗と一方向CFRPの繊維角度の関係

4.5 SEM内二次元切削

ここで、これまで得られた結果では、GC36 砥石を用いた実験より図 4.3 で示したように、一方向CFRPの実験結果では繊維角度 135° の場合が表面粗さは最も大きくなった。しかし、各種砥石を用いた実験より図 4.5 で示したように、同じ繊維角度を持つ 45/135° クロスCFRPの方が、0/90° クロスCFRPの場合より表面粗さは良かった。砥石について比較した図 4.5 の結果から、GC 砥石よりも研削面粗さが小さいSD230 ビトリファイドボンドホイールを用いた場合でも同様に、一方向CFRPの研削実験を行った。表面粗さの測定結果を図 4.11 に示す。

GC36 砥石の場合と同様に 135° の値が最も大きく、90° の場合最も小さい値となった。これらのことから、砥石に関係なく、135° 繊維に対する研削機

構が、一方向CFRPの場合とクロスCFRPの場合とで異なると考えられる。

そこで、特に 45° 、 135° の繊維角度に注目して、研削加工の際、切りくずがどのように生成され排出されるのかを調べるために、ダイヤモンド工具を砥粒に見立てて、微小切込みで、低速二次元切削を行った。ダイヤモンドホイールでの研削加工をモデル化するために、工具材料はダイヤモンド焼結体とした。また、ダイヤモンドホイールの砥粒形状としては、三角錐形状が多く存在するという報告⁽⁷⁾を参考にして、工具の頂角は 120° の山形とした。この場合、すくい角 -60° 、逃げ角 30° の工具で二次元切削したことになる。このときの切削条件を表 4.3 に示す。図 4.12 に実験装置の概略を示す。被削材の繊維角度は研削の場合と同様、図中の θ のように定義する。実験はSEM内において行い、切削過程の様子を側面からその場観察した。

被削材には $45/135^\circ$ クロスCFRPと 135° 一方向CFRPを用い、切りくず生成と排出の観察をするとともに、炭素炭素繊維の挙動についても観察した。

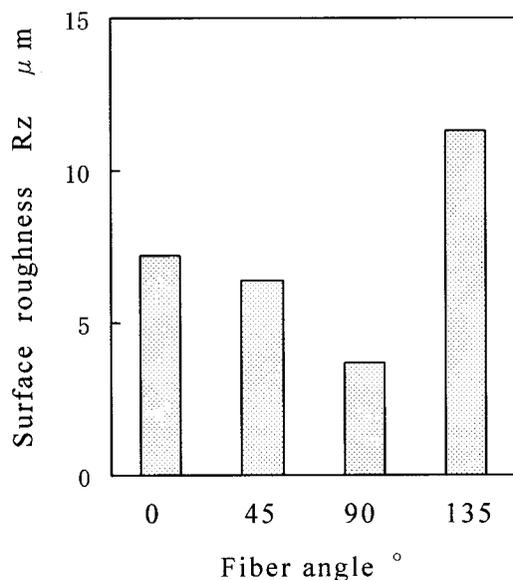


図 4.11 SD230 ビトリファイドボンドホイールを用いた場合の一方向CFRPの研削表面粗さ

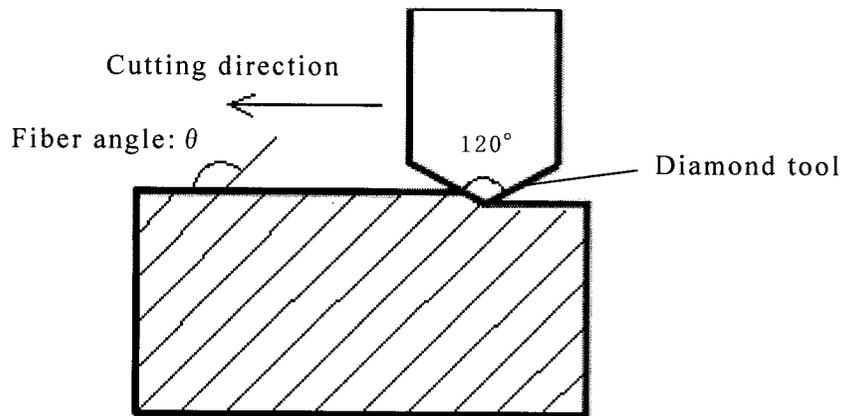


図 4.12 SEM内二次元切削実験の概略図

表 4.3 SEM内低速二次元切削における切削条件

Tool material	Sintered diamond
Tool geometry	Rake angle: -60° , Clearance angle: 30° (Vertical angle : 120°)
Workpiece	Unidirectional CFRP Cloth CFRP
Depth of cut	$5 \mu\text{m}$
Cutting speed	$10 \mu\text{m/s}$
Cutting fluid	Dry

切削しながらその場観察した時の写真を図 4.13, 図 4.14 に示す. 図 4.13 は被削材が $45/135^\circ$ クロス CFRP の場合で, 135° 繊維束部分が観察できる写真である. 図 4.14 は被削材が 135° 一方向 CFRP の場合の写真である. 図 4.13(a) の状態から工具を $10 \mu\text{m}$ 進めたときの写真が図 4.13(b) である. 図中に示すように, 炭素繊維と樹脂の層が交互に存在する. 図 4.13(b) の写真は, 刃先部分 (矢印 A) で樹脂層を变形させている瞬間で, 刃の先端におい

て樹脂層が変形し、炭素繊維との界面ではく離が生じているのが観察できた。この矢印Aの部分では、樹脂層は塑性変形し、切削表面を薄く覆う状態が観察できた。また、工具が通過した後の切削面は、工具先端よりも上側に見られたことから、切削面の弾性変形が回復したものと考えられる。切削面は比較的均一な高さを維持していて、安定した切削状態であることが確認できた。

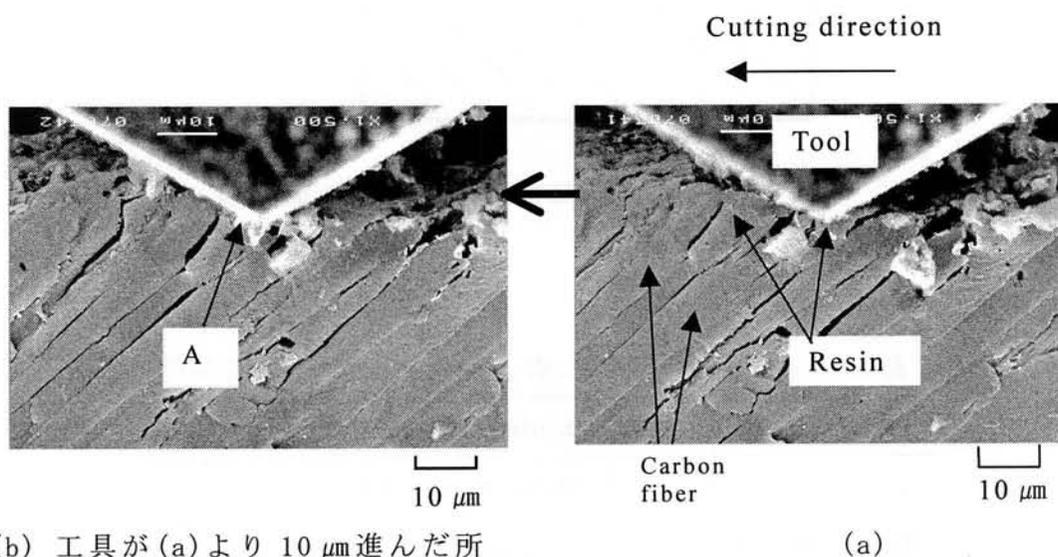
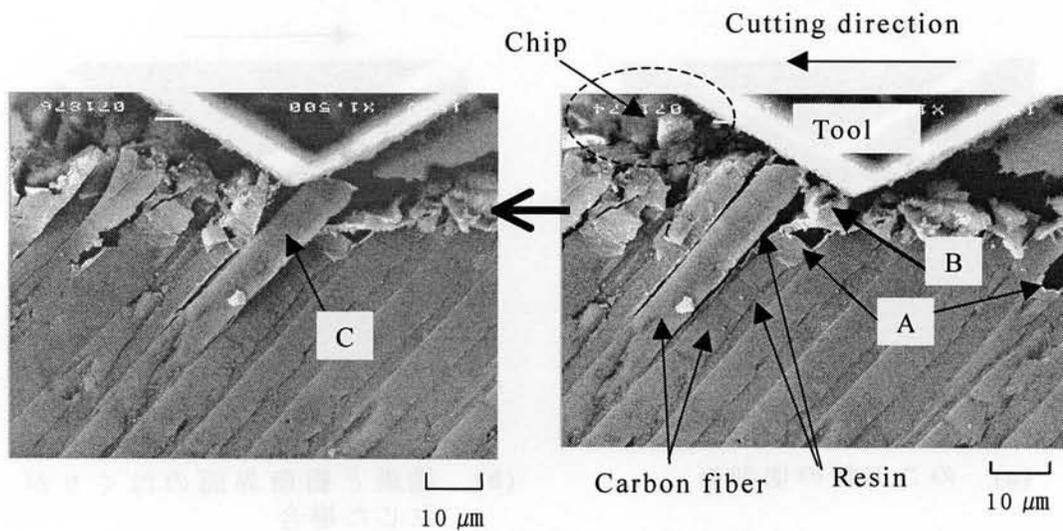


図 4.13 クロスCFRPのSEM内切削その場観察

同様に、135° 一方向CFRPに対してもSEM切削の様子を撮影した写真を図 4.14 に示す。図 4.14(a)の状態から工具を 10 μm 進めた時の写真が図 4.14(b)である。図中(図 4.14(a))に示すように、炭素繊維と樹脂の層が交互に存在する。図 4.14(a)の写真中、矢印Aで示すように炭素繊維が所々で設定切込みよりも深い位置で破壊している部分が観察できた。矢印Aで示す繊維は切削面よりも下方で繊維軸に垂直に破断しており、せん断破壊したものと考えられる。また、このせん断破壊した繊維の周りの樹脂は、矢印Bで示すように繊維と同時に破壊せずに、その穴を埋めるように押し込まれていた。図 4.14(a)から工具がさらに切削方向に進むと(図 4.14(b))、工具先端が次の繊維(図 4.14(b)の矢印C)上を通過する時、その繊維端は工具す

くい面に沿って下方向に押され、繊維が凸方向に弓なりに弾性変形し、この繊維と樹脂との界面ではく離が進行した。また、この矢印Cに示した繊維は切り残された状態となった。この切り残された繊維は、繊維と樹脂とのく離もあることから、この状態で続けて次の切削を行った場合には樹脂による拘束を受けずに大きく弾性変形し、曲げによって破壊すると考えられるが、この場合矢印Aのように切込みよりも深い位置で破壊するものと考えられる。



(b) 工具が (a) より 10 μm 進んだ所

(a)

図 4.14 135° 一方向 CFRP の SEM 内二次元切削その場観察

ここで、図 4.13 においても切削距離が長くなると、図 4.14(a) にも示したように工具のすくい面上に粉末状の切りくずが付着し、工具の進行とともに切りくずが堆積した。図 4.14(a) 中の黒点線の円内には破断した繊維が観察でき、この硬い繊維が切削面に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。砥石で考えた場合、気孔が存在すればこの切りくずは、すくい面前方に堆積されずに、気孔に入り込んでいくため、切りくずの排出が良好になり、研削面は切りくずの影響を受けないと考えられる。

次に，上図 4.14 の写真は， 135° 一方向 CFRP の SEM 内切削において比較的切削表面状態の良い部分を撮影したものであったが，切削場所によっては，図 4.15 のように切削面状態が悪い部分も多く観察できた．すなわち，図 4.15(a) に示す写真のように，切削面は全体的にのこ刃状になっていて，炭素繊維の破壊の位置がまちまちであった．また，図 4.15(b) に示すように，繊維と樹脂とのはく離が生じ，炭素繊維が大きくたわんだ状態も観察できた．

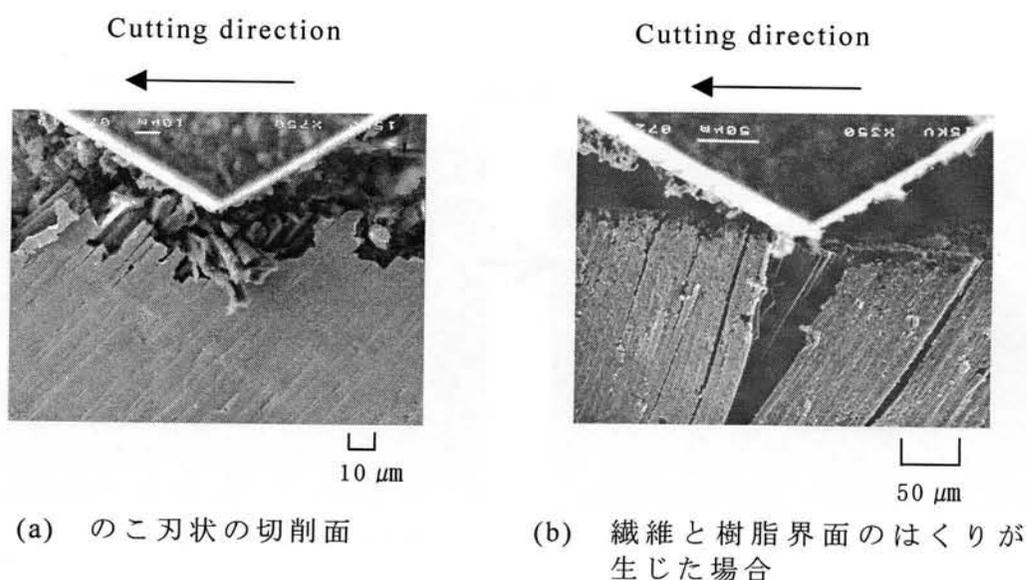


図 4.15 135° 一方向 CFRP の悪い二次元切削面の典型的な状態

これらの結果から 135° 一方向 CFRP では， $45/135^\circ$ クロス CFRP よりも繊維と樹脂との界面のはく離が進行しながら繊維が大きく弾性変形するため，繊維の破壊する位置が常に同じところに生じなかったと考えられる．クロス CFRP では，繊維の弾性変形量が小さいことから，繊維を平織りにすることにより繊維の弾性変形を抑制する効果があることがわかる．特に，繊維角度が 135° の場合，一方向 CFRP と比べると，これに 45° 方向の繊維を平織りし， $45/135^\circ$ のクロス CFRP にすることにより，この弾性変形を抑制する効果が顕著に現れたと考えられる．

4. 6 結 言

一方向CFRPおよびクロスCFRPを研削加工した結果、以下のことがわかった。

- (1) GC36 砥石を用いて研削した結果、アップカットよりもダウンカットのほうが表面粗さは良好であった。
- (2) GC36 砥石を用い、研削速度を変えてCFRPをダウンカット研削した場合、表面粗さは研削速度 25.0 m/s において良好だった。
- (3) CFRPの研削加工には、有気孔の超砥粒ホイールが適していて、本実験条件では、SD230P50VD2GP, CB230P50VD2GP が最も表面粗さは良く、研削抵抗はほぼ同じ値であった。
- (4) 一方向CFRPよりもクロスCFRPの方が、研削面の表面粗さは良かった。これは繊維を平織りにすることにより、研削中の繊維のたわみが抑制されるためである。
- (5) クロスCFRPでは、0/90° クロスよりも 45/135° クロスの方が、表面粗さは良好だった。

参考文献

- (1) 金枝敏明, 高橋正行: C F R P (炭素繊維強化プラスチック) の切削機構に関する研究(第2報) - 切削残留量ならびに加工変質深さの解析 -, 精密工学会誌, 56, 6(1990)1058.
- (2) 花崎伸作, 野村昌孝: F E MによるC F R Pの切削機構の解析(食い付き時の繊維破壊挙動), 日本機械学会論文集(C編), 61, 583(1995)1163.
- (3) 朴 圭烈, 大森 整, 中川威雄: 小径メタルボンド砥石によるプラスチックおよびC F R Pの研削加工, 砥粒加工学会誌, 39, 1(1995)33.
- (4) 朴 圭烈, 大森 整, 中川威雄: 電解インプロセスドレッシング研削法によるプラスチックおよびC F R Pの鏡面研削加工, 砥粒加工学会誌, 38, 6(1994)327.
- (5) 田中武司: ダイヤモンドホイール研削工学, 現代図書, (1999)79.
- (6) 瀬高信雄, 他: 人造ダイヤモンド技術ハンドブック, サイエンスフォーラム, (1989)322.
- (7) タمام マハムード, 田牧純一, 閻 紀旺, 鈴木茂人: 走査型レーザ顕微鏡を用いたダイヤモンド砥粒切れ刃の立体形状の測定, 砥粒加工学会誌, 47, 6(2003)314.

第 5 章

C F R P の研削面の生成機構

5. 1 緒言

第 4 章では，C F R P に適した研削条件について結果を得たが，研削表面の観察時に見られたように，母材である樹脂が研削面に広がっていて，炭素繊維の端面が観察できない状態であった．ほぼ同じ加工表面が C F R P の切削時でも観察されている^(1,2)が，この特徴的な加工表面の生成機構については報告された例がない．今後，C F R P の形状精度の向上や，より適した研削条件を追求する上で，この加工面の生成機構を解明することは重要であると考えられる．

そこで，どのようにして研削面に樹脂が広がる状態となるのかを追求することとした．すなわち，本章では，C F R P の研削時に特有の現象を明らかにし，その研削機構を解明することを目的とした．砥石を用いた研削実験に加えて，単粒切削実験を行うことにより，より詳しい研削機構の考察も行った．

5. 2 単粒切削実験

研削現象を単純化するために，単粒を用いて切削実験を行った．図 5.1 に単粒切削実験の概略を示す．被削材は第 4 章で用いたものと同じ一方向 C F R P で，繊維角度も同じく 0° , 45° , 90° , 135° とした．

実験装置，切削条件とも第 4 章と同じであるが，砥石の代わりに円盤を主軸に取り付け，その外周にダイヤモンド単粒を取り付けてフライアップカットで実験を行った．単粒の形状は図 5.1 に示すとおり頂角 120° の円錐型である．表 5.1 にこの実験条件を示す．

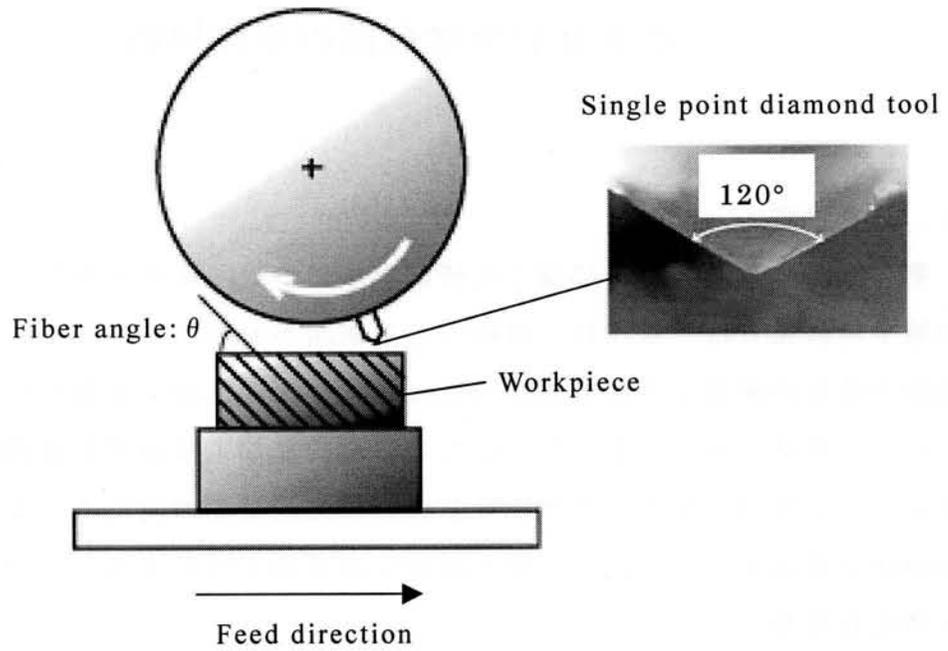


図 5.1 単粒切削実験装置の概要

表 5.1 単粒切削実験条件

Tool	Sintered diamond
Tool geometry	Cone (Vertical angle : 120°)
Depth of cut	$10 \mu\text{m}$
Cutting speed	25 m/s
Feed rate	0.043 m/s

単粒によってつけられた切削痕をSEMを用いて観察した。単粒が最下点を通じた付近での切削痕の写真を図 5.2 に示す。図 5.2(a)～(d)は、それぞれ繊維角度が 0° , 45° , 90° , 135° の場合のSEM写真である。切削痕の幅および切削方向を図中の矢印で示す。 0° の場合、写真のように繊維が水平に配向されている様子がよくわかる。所々で繊維が破壊していて切りくずとなり、繊維の脱落した跡が観察できた。Aの黒点線内では、繊維が繊維軸に垂直に破断している様子が観察できた。 45° の場合、繊維の端面が観察できない状態で、繊維がどのようにして破壊しているのかがわからなかった。切削痕の表面は全体に樹脂が広がった状態で滑らかに見える。 90° の場合、切削痕の表面は滑らかな部分と粗い部分とが観察できた。粗く見えるところでは、繊維が樹脂界面とはく離してはつれた状態であるためと考えられる。 135° の場合、 45° の場合とよく似ているが、黒点線B内で繊維の端面と思われる部分も観察でき、 45° の場合よりもやや粗い状態である。また、Cで示す切削痕の縁の部分も 45° の場合よりも、バリのような状態がやや大きかった。

これらのように、切削痕を観察しても繊維端面の観察が困難な状態であり、炭素繊維の破断面の様子がわからなかった。そのため、研削機構を考察するためには、加工面上からの観察だけでは不十分である。

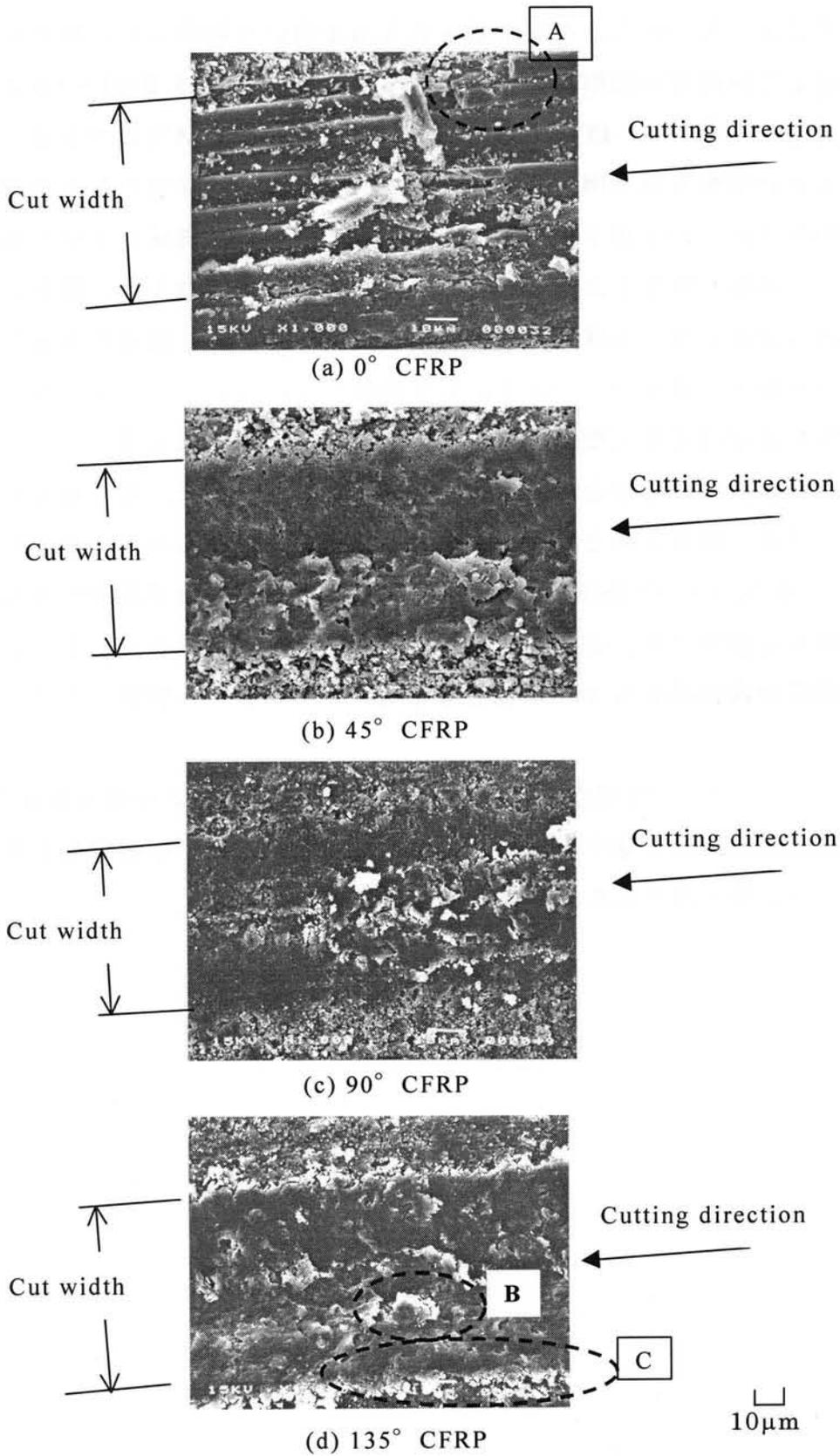


図 5.2 一方向 CFRP の単粒切削痕の SEM 観察

5.3 研削断面観察用のための被削材および実験方法

研削機構を調べるために研削断面を観察することとした。そのために、被削材は4章で用いたものと同じであるが、図5.3のような被削材を作成した。すなわち、試料を研削表面となる面に垂直に切断し、切断面同士をシアノアクリレート接着剤で接着して、これを被削材とした。実験装置は4章と同じ装置を用いた。

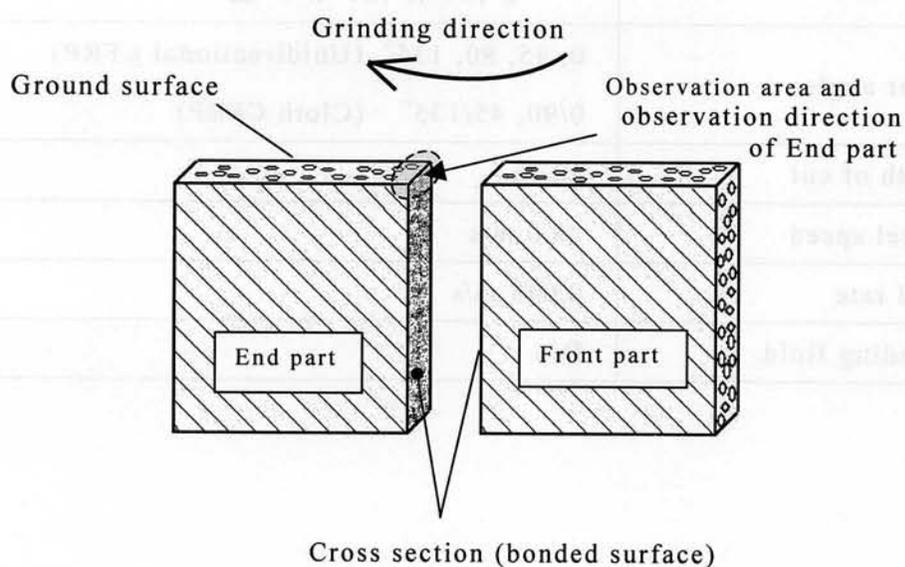


図 5.3 断面観察用の被削材

試料端面を表5.1の条件で数回研削し、スパークアウト研削を行って平らにならし初期面とした。4章で得た比較的表面粗さが良好だった研削条件、すなわち、表5.1の研削条件に示すように有気孔ビトリファイドボンドのダイヤモンドホイールSD230P50VD2GPを用い、研削速度25 m/s、切込み10 μmで研削を行った。研削後、被削材をアセトン中で超音波洗浄して接着剤を溶解し、試料を再び分割した。説明の都合上、図5.3に示すように接着面を境に分割した右側の部分をフロント側、左側の部分をエンド側と呼ぶこととする。フロント側とエンド側部分の研削断面領域を、斜め上方からSEMを用いて観察した。図5.3にはエンド側の観察領域と方向を示しているが、フロ

ント側も同様に観察を行った。

表 5.1 研削実験条件

Grinding manner	Down cut
Wheel	SD230P50VD2GP : $\phi 180 \times 13$ mm
Workpiece	Unidirectional CFRP, Cloth CFRP L 15 × H 10 × W 5 mm
Fiber angle	0, 45, 90, 135° (Unidirectional CFRP) 0/90, 45/135° (Cloth CFRP)
Depth of cut	10 μ m
Wheel speed	25.0 m/s
Feed rate	0.043 m/s
Grinding fluid	Dry

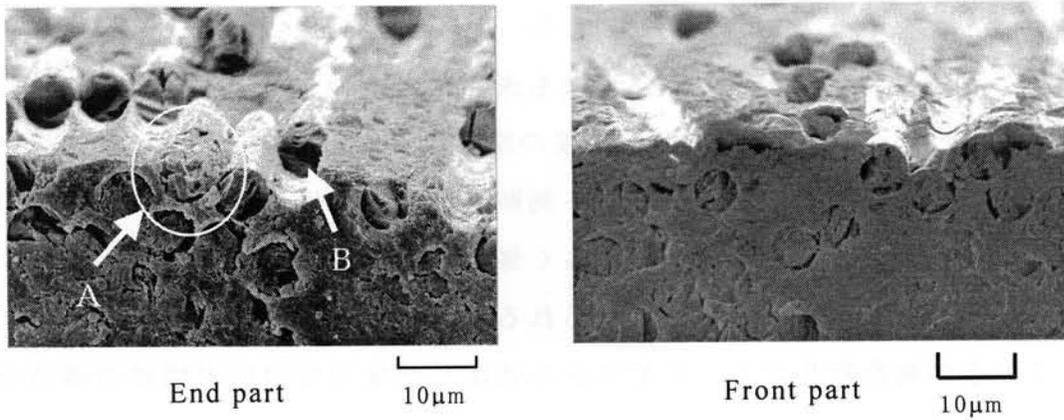
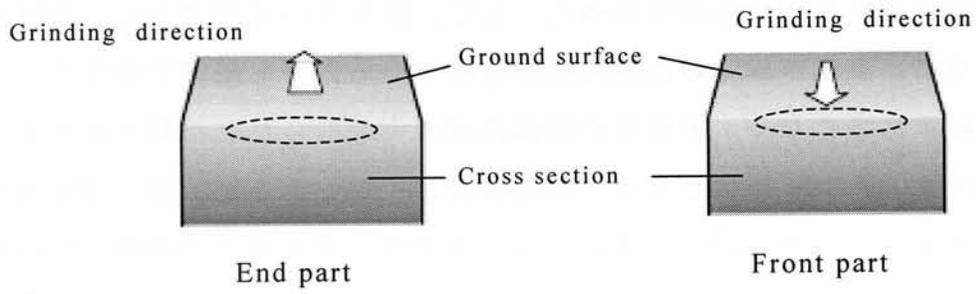
5. 4 実験結果および考察

5. 4. 1 CFRPの研削断面の観察

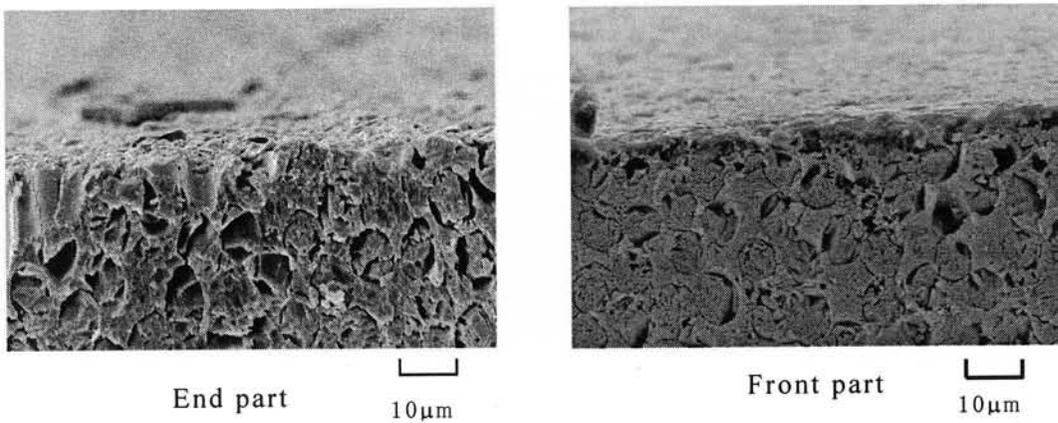
図 5.3 に示した研削断面観察用の被削材を研削後、フロント側とエンド側部分の研削表面の断面の観察をSEMを用いて行った。このときのSEM写真を図 5.4 に示す。図 5.4(a)～(d)は、それぞれ繊維角度が 0°, 45°, 90°, 135° の場合である。ここで、これらの観察の結果に加えて、第4章で得られたSD230ビトリファイドボンドホイールで一方向CFRPを研削した時の、表面粗さの結果についても考察する。図 5.4(a)に示す $\theta = 0^\circ$ の場合では、矢印Aで示すように、繊維が削られている部分が観察できた。また、矢印Bで示すように、繊維が繊維軸に垂直に破断し、脱落している様子も観察できた。このため、表面は繊維直径(7 μ m)程度の規模の凹凸が現れるものと考えられ、第4章の図 4.11 で示した $\theta = 0^\circ$ における表面粗さ(最大高さRz)とほぼ同じ値

となっている。図 5.4(b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ の場合の研削面は、他と比較して断面の凹凸も少なく滑らかであった。また、図 5.4(c) の写真から、矢印 C で示すように、繊維が繊維軸に斜めに削られている部分も観察できたが、そのような繊維は多くなく、大部分の繊維は表面上で削られた位置がほぼそろっているため、図 4.11 に示したように表面粗さが最も小さかったと考えられる。図 5.4(d) に示す $\theta = 135^\circ$ の場合では、矢印 D で示す部分で繊維が研削面よりも下方で破壊し、そのため窪みができていた。矢印 D で示すように窪みが深い場合には、この繊維周りの樹脂が繊維端面上に広がったとしても、十分その穴を埋めることはできないため、図 4.11 に示したように 135° の場合、用いた被削材の繊維角度のうちで最も表面粗さが大きくなったと考えられる。また、 135° のフロント側では、繊維の脱落が目立った。これは、この被削材の作成方法の都合上、 135° フロント側断面の表面付近の繊維長が短くなるために繊維と母材との接着面積が小さく繊維と樹脂との界面強度が小さかったために容易に脱落したものと考えられる。

これらの観察結果から、CFRP を切削した場合には炭素繊維の破壊は主にせん断によることが報告されている⁽³⁾が、研削の場合、せん断破壊に加えて、図 5.4(a) に示したように繊維単体も砥粒によって削られることが確認できた。

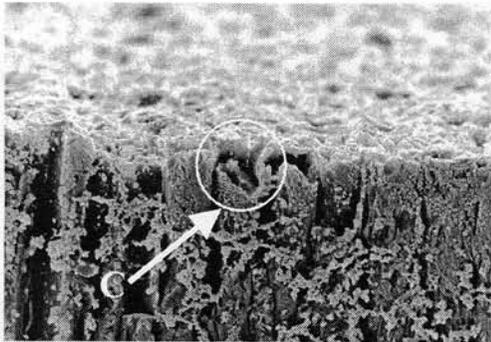


(a) 0° 一方向CFRP



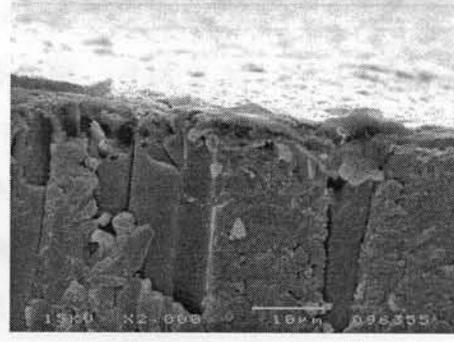
(b) 45° 一方向CFRP

図 5.4 一方向CFRP研削断面のSEM写真(その1)



End part

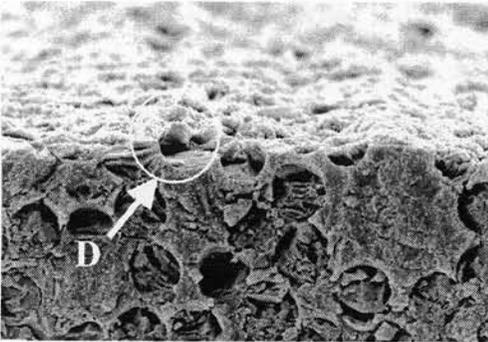
10 μ m



Front part

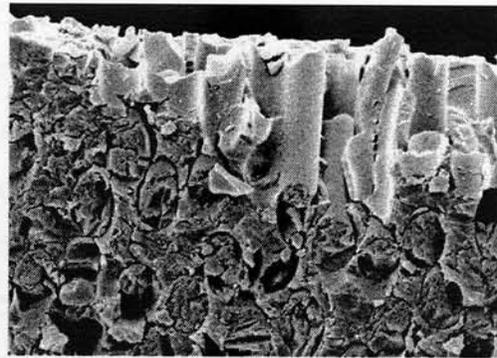
10 μ m

(c) 90° 一方向CFRP



End part

10 μ m



Front part

10 μ m

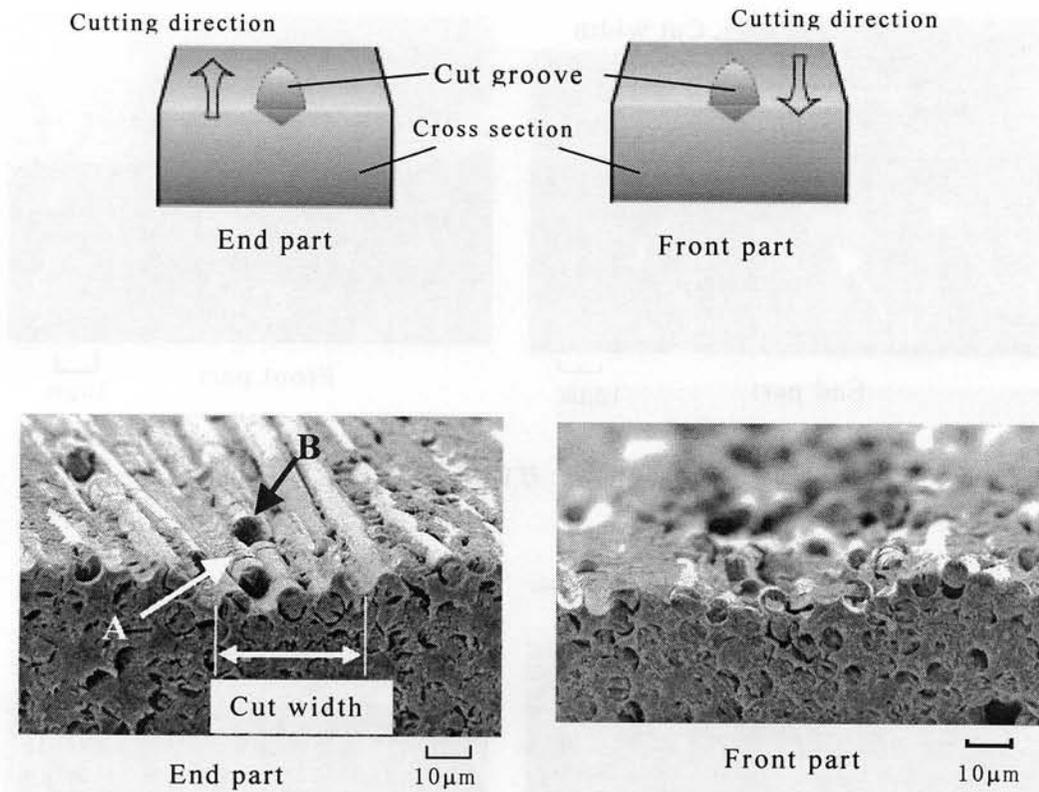
(d) 135° 一方向CFRP

図 5.4 一方向CFRP研削断面のSEM写真(その2)

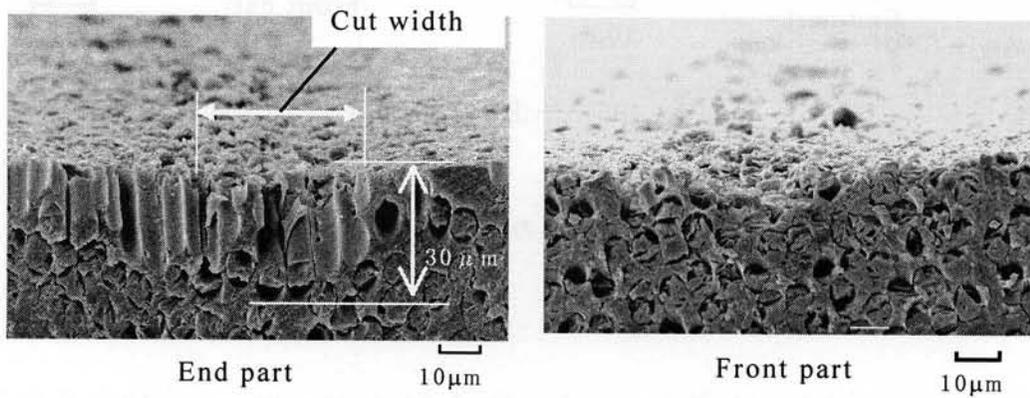
5. 4. 2 単粒切削による切削痕断面の観察

砥石を用いた場合、多数の砥粒による作用が重なり、研削現象が非常に複雑になるため、単粒切削実験を行い、砥粒単独ではどのような研削状態になるのかを調べた。すなわち、単粒を用いて前節と同様に切削後の溝断面を観察することとした。研削盤の主軸に砥石の代わりに円盤を取り付け、その外周に5.2節の実験に用いたダイヤモンド単粒を固定しフライカット実験を行った。被削材には図5.3と同様の断面観察用の一方向CFRPを用いた。単粒が最下点を通過する際に接着した面の境界を通過する位置に被削材を研削盤のテーブルに固定した。テーブル横方向の送りを0として、切削中、研削盤の主軸に平行にテーブルを送り、切削痕を接着境界上に付けた。実験後、前節と同じ方法で被削材を分割し、フロント側とエンド側の切削痕断面を観察した。

この時のSEM写真を図5.5に示す。図5.5(a)は、 0° 一方向CFRPの単粒切削断面写真である。矢印Aで示すように、繊維上に単粒先端によって引っかかれた跡が観察できた。この状態は、何度か実験、観察するうちに偶然見つかったもので、常にこのように炭素繊維そのものを削り取るわけではなかった。しかし、多数の砥粒からなる砥石では写真のような研削痕が付くことが充分起こり得るため、先に示した砥石による研削断面、図5.4(a)において矢印Aで示した部分は、砥粒により繊維が引っかかれ削り取られた部分と考えられる。また、矢印Bで示すように、繊維軸に垂直に破断した繊維が観察できた。これは繊維がせん断破壊したものと考えられる。図5.5(b)は、 45° 一方向CFRPの単粒切削断面写真である。単粒の接線方向への断面形状であるV形に近い形状に繊維の抜けた跡があり、繊維と樹脂との界面ではなく離している様子が観察できた。設定切込みが $10\mu\text{m}$ に対して、繊維と樹脂との界面はく離の深さが約 $30\mu\text{m}$ と大きくなっており、その幅も切削幅より大きくなった。被削材作成の都合上、繊維角度が 45° の場合、エンド側部分の研削断面付近では繊維長が短くならざるを得ず、繊維と樹脂との界面接着面積が小さくなるため、単粒によって加わった力が界面接着力よりも大きくなり、このように損傷が深くまで及んだものと考えられる。従って、一旦分割せずに単粒切削した場合には、これほど深い部分にまで、繊維が抜けた跡

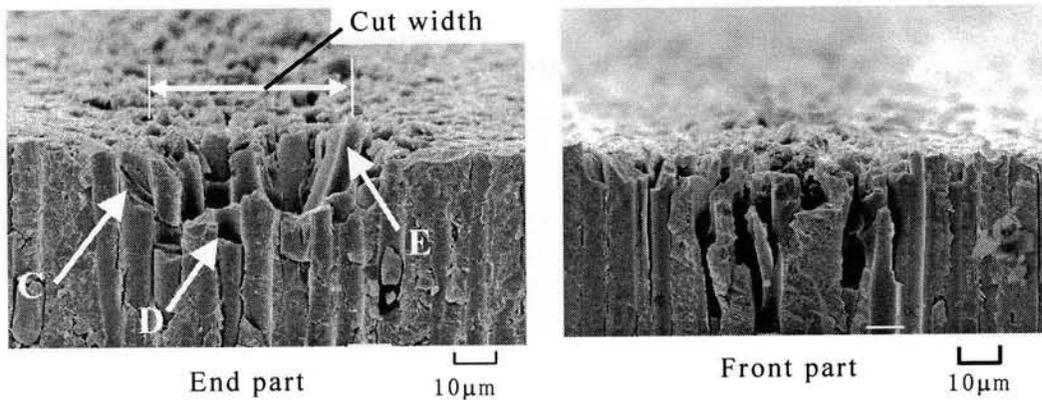


(a) 0° 一方向CFRP

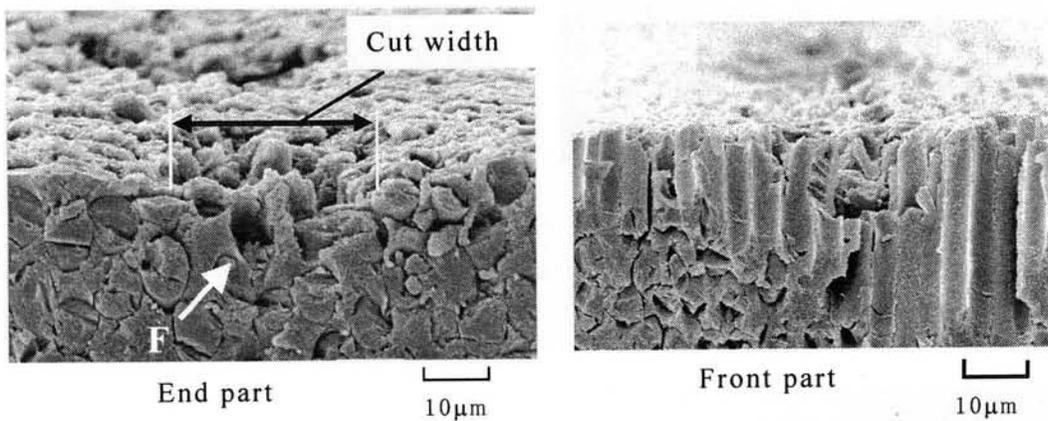


(b) 45° 一方向CFRP

図 5.5 単粒切削断面のSEM写真 (その1)



(c) 90° 一方向CFRP



(d) 135° 一方向CFRP

図 5.5 単粒切削断面のSEM写真 (その2)

が見られることはないと考えられる。図 5.5(c) は、90° 一方向CFRPの単粒切削断面写真である。矢印Cで示すように繊維が斜めに削られている様子が観察できた。矢印Dの繊維は、繊維軸に垂直に破断しており、せん断破壊したものと考えられる。また、繊維のみが設定切込みよりも深い位置で破壊し切りくずとなったために、矢印Eで示すように、この繊維周りの樹脂が残った状態も観察できた。この原因は次のように考えられる。単粒が切削方

向に進むにつれ被削材は押しのけられつつ徐々に溝幅が拡大していく。このとき、繊維はたわむが、炭素繊維と樹脂の弾性変形量の差により界面ではく離が生じる⁽⁴⁾。また、その後、曲げ変形が大きくなると繊維はせん断破壊する。CFRPを二次元切削した場合、繊維の分断点は工具のすくい角や繊維角によって決まる⁽⁴⁾が、図5.5(c)の場合においては、切削予定線よりも下方であった。このはく離し分断された繊維は切りくずとなって被削材より排出されるが、この繊維周りの樹脂部が削り残されたと考えられる。砥石による研削の場合は、このように削り残された樹脂が砥石によって撫で付けられるために、繊維端面上に樹脂が広がったものと考えられる。図5.5(d)は、135°一方向CFRPの単粒切削断面写真である。矢印F部分では、繊維は切りくずとなって排出されるが、その繊維周りの樹脂は弾性変形しただけで削り残され、繊維の跡が空洞となった状態が観察できた。フロント側では、135°被削材の研削断面と同様、繊維が脱落した切削痕断面が観察された。これは、研削の場合と同様にフロント側断面の表面部分では繊維長が短く接着強度が小さいことが原因であると考えられる。

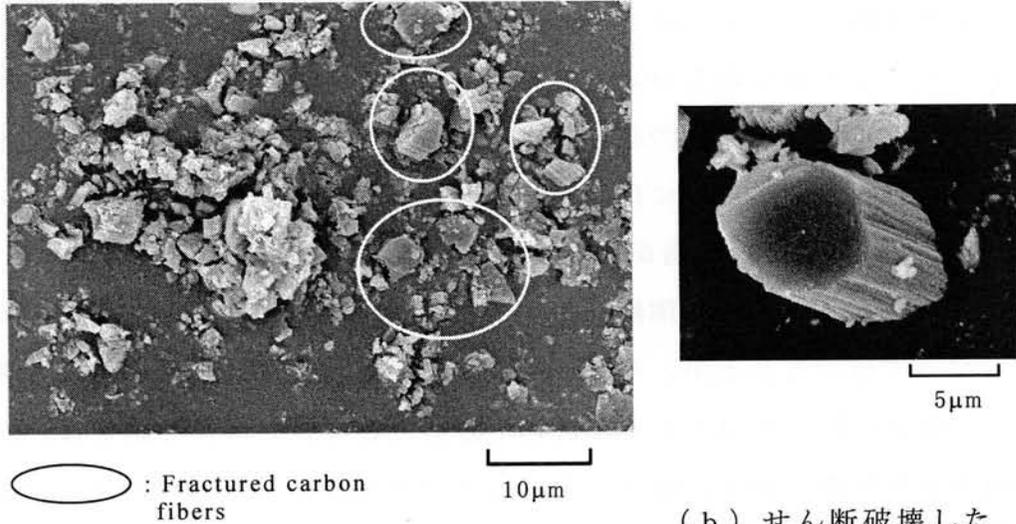
5.5 切りくずの観察

CFRPの研削の際に生成される切りくずの観察を行った。ダウンカット1パス後の研削表面に残された切りくずをSEMを用いて観察した。

5.5.1 45/135°クロスCFRPの研削切りくず

繊維角度が45/135°となるクロスCFRPを用いて研削実験を行った後の研削表面に残された切りくずの写真を図5.6に示す。切りくず中には粉状の樹脂および炭素繊維が観察できた。図5.6(a)の円で囲った部分は炭素繊維が細かく砕かれたものである。その他の部分では、樹脂および繊維が熔融することなく細かく削られて、粉状になった様子が観察できた。このように、樹脂のみでなく繊維も細かく削られていることがわかった。さらに、図5.6(b)の写真に示すように、繊維が繊維軸方向に垂直に破断している切りくずもごく稀に観察することができたが、これは繊維がせん断破壊したものと

考えられる。また、切りくずが付着していた研削面に圧縮空気を吹き付けると、切りくずは全て吹き飛ばされ、表面に固着したものはなかった。



(a) 研削表面の切りくず

(b) せん断破壊した炭素繊維

図 5.6 研削表面の切りくずのSEM写真

図 5.7 は、研削後のホイール表面に粘着テープを軽く触れさせて、ホイール表面に付着した切りくずを採取し、SEMで観察した写真である。ホイールに付着した切屑も研削面上に残った切りくずと同様の状態で、粉状であった。ホイール表面の幅は被削材の幅よりも大きかったが、被削材を研削した表面部分においては、ホイール上に切りくず付着のための黒い筋がつき、研削した部分がはっきりとわかった。このホイール表面に圧縮空気を吹きつけると、気孔の奥に入り込んだ部分を除いて、切りくずはほとんど吹き飛ばされ、表面が黒くなっていた部分は、ほぼ元のホイール表面の色に戻った。これらのことから、切りくずは被削材の研削表面やホイール表面に溶着して付着していたのではないと考えられる。

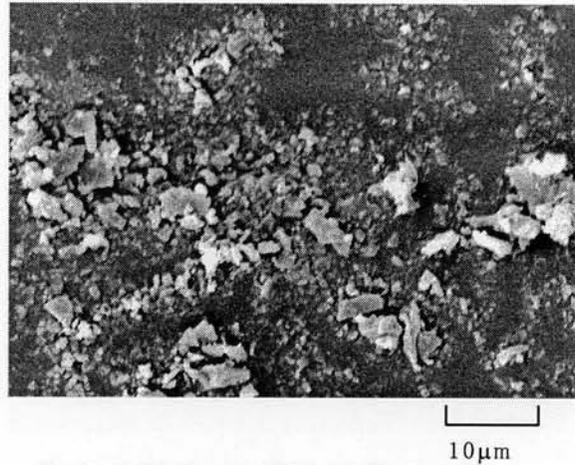
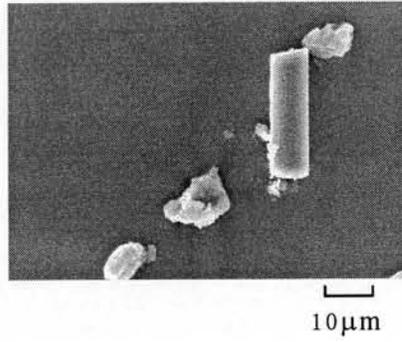


図 5.7 ホイール表面に付着した切りくずのSEM写真

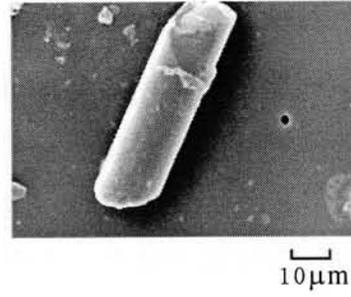
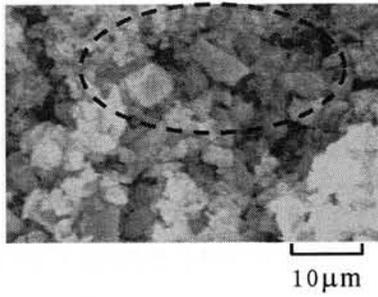
5.5.2 一方向CFRPの研削切りくず

さらに、繊維角度の影響を考慮するために、一方向CFRPを被削材に用いて前述と同じ条件で実験を行った。得られた切りくずを炉中で550℃まで熱し、樹脂のみを灰化させた。この切りくずをSEMで観察した写真の一例を図5.8に示す。

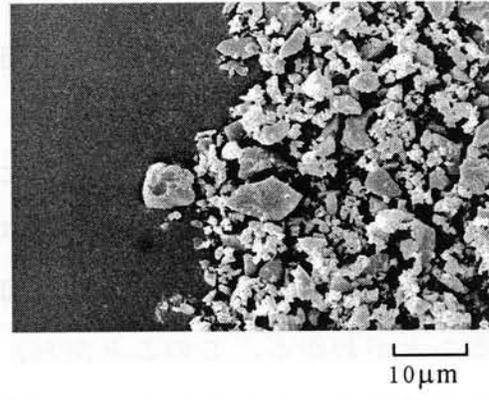
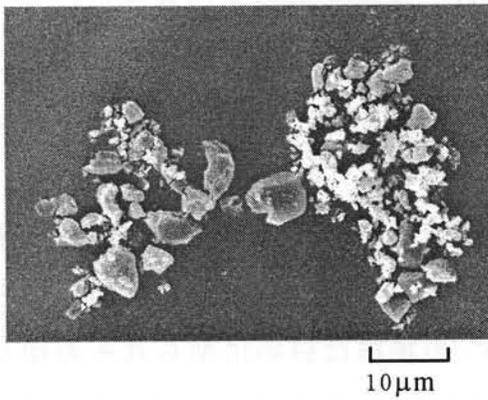
図5.8(a)は、繊維角度0°の場合で、切りくず中の炭素繊維は、写真のように長いものが多かったが、細かく砕けた繊維も観察された。0°の場合、砥粒は繊維を繊維軸方向に削ろうと進むが、繊維と樹脂との界面の接着力は繊維軸方向の強度よりも弱いので界面ではく離を起こすと考えられる。この繊維が曲げられて破壊し、写真のような長い切りくずとなる。図5.8(b)は繊維角度45°の場合である。黒点線内に細かく砕けてた炭素繊維があるが、灰化した樹脂に埋もれて、繊維の観察が困難であった。切りくず中にごく稀に観察できた比較的長い繊維の写真も図5.8(b)中に示す。繊維が斜めに削られていることがわかる。このことから、45°の繊維は斜めに削られその切りくずが非常に細かいことがわかった。図5.8(c)は繊維角度90°の場合である。炭素繊維の直径は7μmであることから、写真に示す切りくずは、研削されて細かく砕けた繊維だと考えられる。図5.8(d)は繊維角度135°の場合である。この繊維の破壊状態も細かく砕けた状態であるが、45°の場合よりもその大きさは大きい。



(a) 繊維角度 0° の切りくず



(b) 繊維角度 45° の切りくず



(c) 繊維角度 90° の切りくず

(d) 繊維角度 135° の切りくず

図 5.8 樹脂を灰化させた後の切りくず中の炭素繊維の SEM 写真

5.6 研削熱の影響

これまで述べてきた内容には、研削熱の影響は考慮されていないため、研削中の研削温度の測定を行い、研削熱の影響について調べた。図 5.9 に研削温度の測定方法の概略を示す。被削材の下部から研削表面に向かって垂直に、直径 1 mm の穴をあけ、各素線の直径が 0.1 mm の K 型（クロメル-アルメル）熱電対をエポキシ樹脂で埋め込んだ。熱電対専用アンプ AD595AD（アナログデバイス社製）を用いた増幅回路を作成し、熱電対で発生する出力電圧を増幅した。この IC は、冷接点補償機能が付いているため冷接点を設ける必要がなく、小型、高性能の増幅回路を作成できる。この IC 内部とその周辺の回路図を図 5.10 に示す⁽⁵⁾。

図 5.11 に作成したアンプの写真を示す。このアンプでは熱電対が切れたときに LED のランプが点灯するので、研削表面に熱電対が露出して切れた時が容易にわかるようになっている。図 5.12 にこのアンプの出力電圧と温度の関係を示す。この図のように、出力電圧と温度は比例した関係になっていることが確認できた。

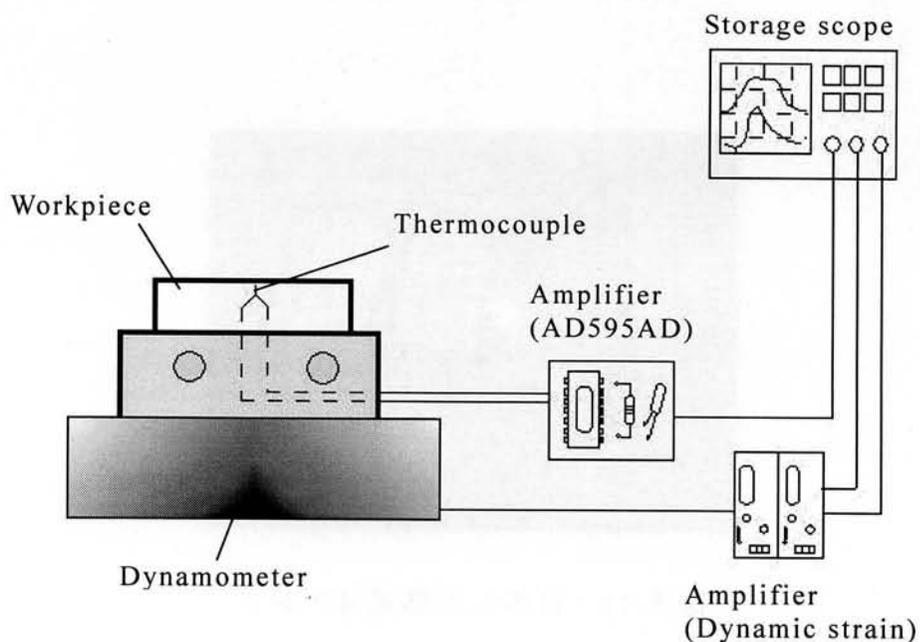


図 5.9 研削温度測定方法の概略

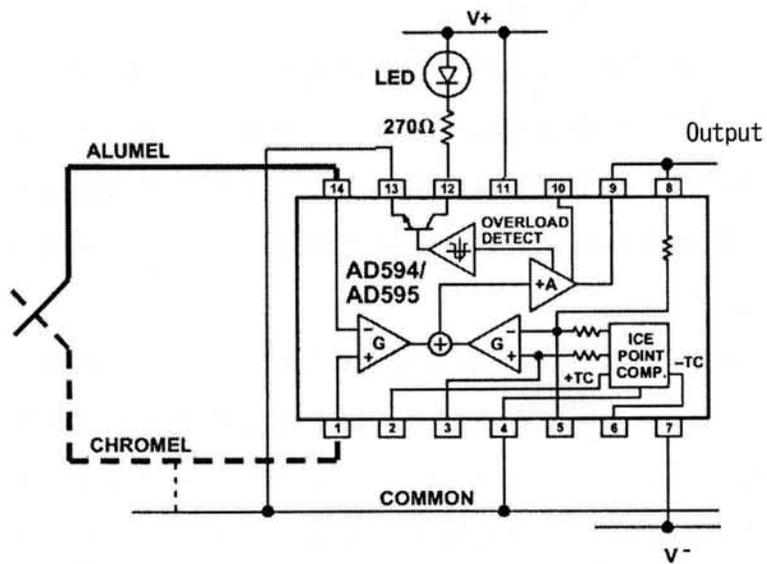


図 5.10 AD595AD 内部とその周辺の回路図

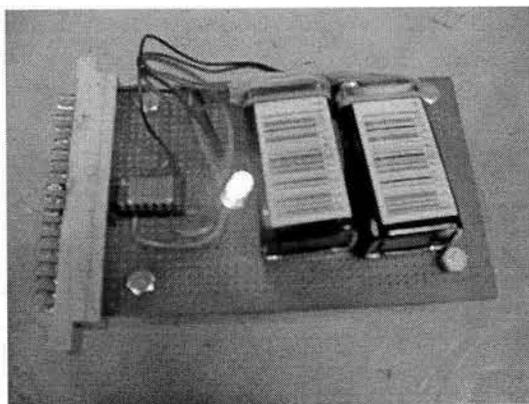


図 5.11 自作した熱電対アンプ

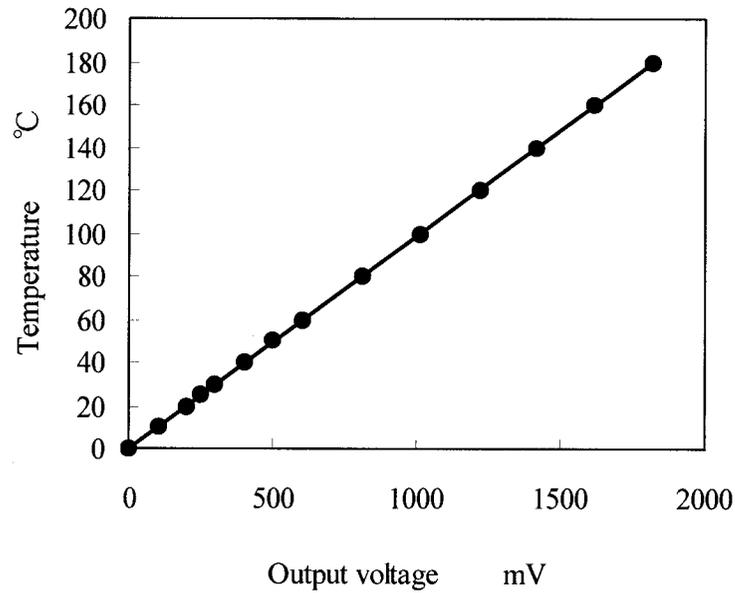


図 5.12 温度とアンプ出力電圧の関係

研削温度を測定する際の研削条件は表 5.1 と同じ条件で、繰り返し設定切込み $10\mu\text{m}$ でダウンカット研削を行い、毎回研削温度を測定した。測定データは、ストレージスコープ（岩崎通信，DS6121）を用いて記録した。研削抵抗も同時にストレージスコープに入力して、この抵抗の波形が立ち上がるタイミングで研削温度の記録を開始した。測定例を図 5.13 に示す。図中のピークとなった値を研削温度とした。研削表面からの距離を横軸にとった測定結果を図 5.13 に示す。研削表面に熱電対が現れて切れる直前を研削表面からの距離が 0 として表している。図 5.14 より研削表面温度は $0/90^\circ$ ， $45/135^\circ$ クロス CFRP ともほぼ同じで約 $120^\circ\text{C}\sim 130^\circ\text{C}$ であった。

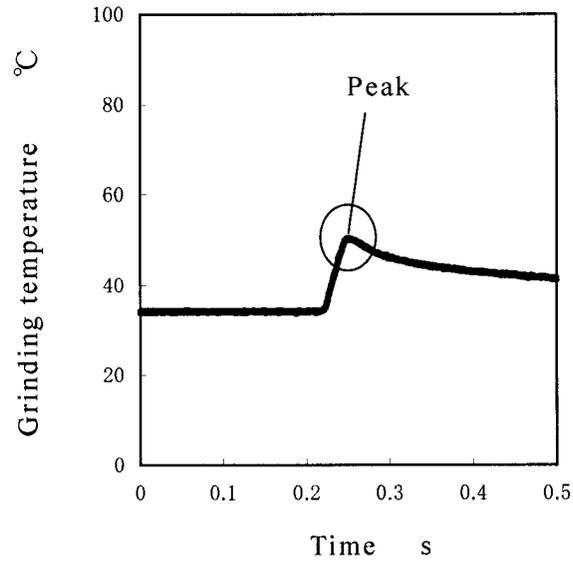


図 5.13 研削温度の測定例

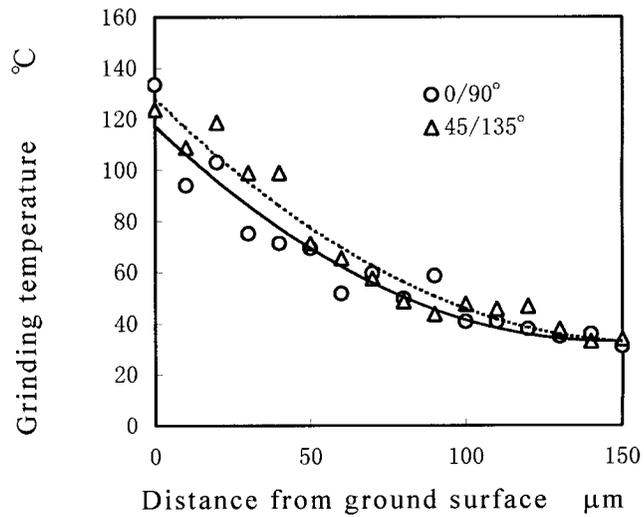


図 5.14 クロスCFRPの研削温度

ここで、エポキシ樹脂のガラス転移点は 120°C 前後といわれているが⁽⁶⁾、研削熱によって樹脂が何らかの影響を受けているかどうかを調べるために、

研削中に冷却することとした。研削液を用いた場合、冷却効果の他に潤滑作用もあり、乾式研削とは異なる研削状態となるため、単純に冷却効果のみを与えられる冷風研削を行った。図 5.15 に示すように、ボルテックスチューブ型の冷風発生装置（東浜製、エアークーラーAC-60）を用いて、ホイール側面から冷風を吹きかけた。この時の冷風発生装置の突出口での冷風の温度は、 -19°C であった。実験に用いたホイールが多気孔のビトリファイドボンドであり、冷風がホイールの砥粒層を通り抜けることができるため、冷却効果が高くホイール表面、被削材とも冷風によって充分冷却できる。他の被削材を冷風研削した報告⁽⁷⁻⁹⁾では、研削方向に対し後方から冷風を吹きつける方法が効率が良いとされているが、本実験ではホイール側面から吹きつける方が冷風発生装置の出口ノズルが被削材の研削ポイントに最も近づけることができ、被削材表面の冷却効果が最も高かった。

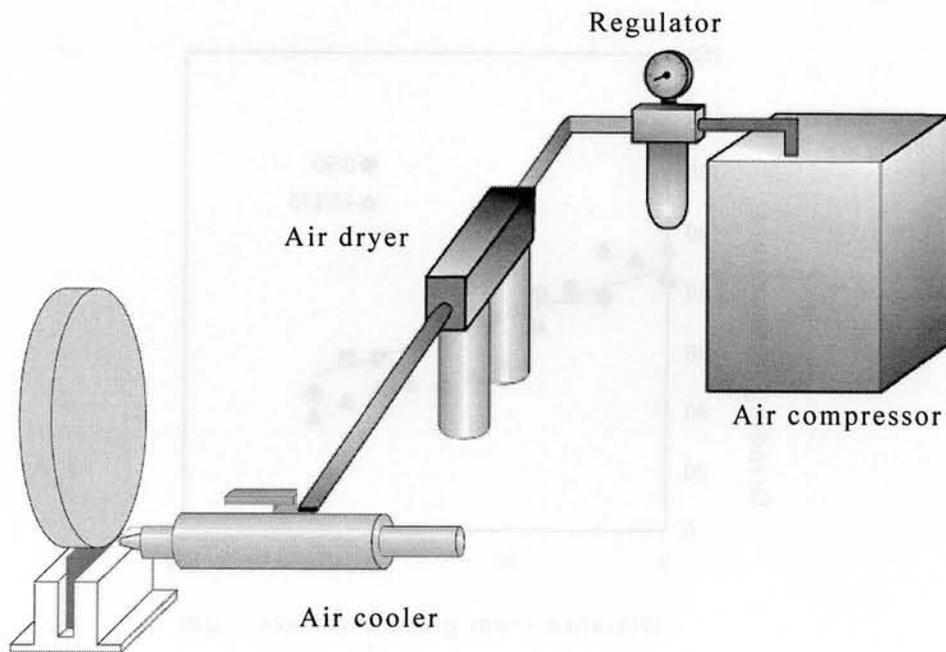


図 5.15 冷風研削装置の概略

クロスCFRPを冷風研削した時の研削温度の測定結果を図5.16に示す。0/90°、45/135°クロスCFRPとも、研削表面温度を約90°Cにまで低減することができ、冷風による冷却作用がよく効いていることがわかった。

研削温度による研削面状態への影響を調べるために、SEMを用いて、冷風のある場合とない場合について、それぞれ表面の観察を行った。一例として、45/135°クロスCFRPの研削表面の写真を図5.17に示す。どちらの写真も研削面に樹脂が広がって繊維端面が観察しにくい状態で、差異がないことがわかる。0/90°の被削材についても表面状態に差異はなかった。これらの結果および被削材の母材は熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂であること、また切りくずの状態も考慮すると、冷風を使用しない場合でも研削時に熱可塑性樹脂のように樹脂が軟化するとは考えにくい。したがって、研削熱によって樹脂は流動しなかったと考えられる。

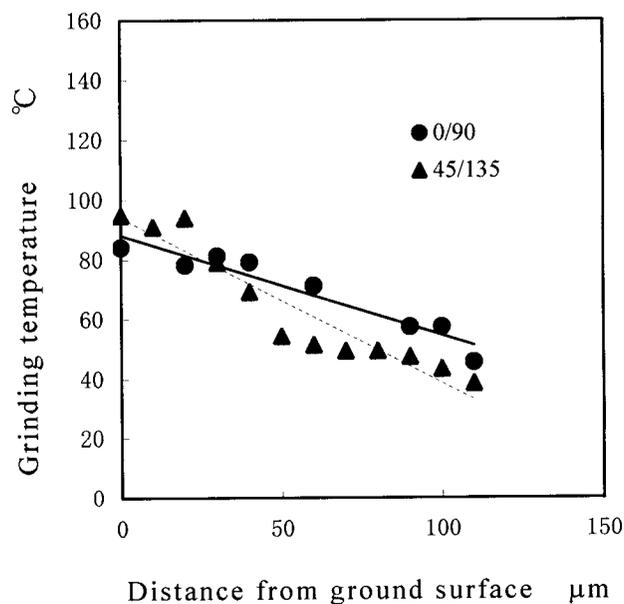
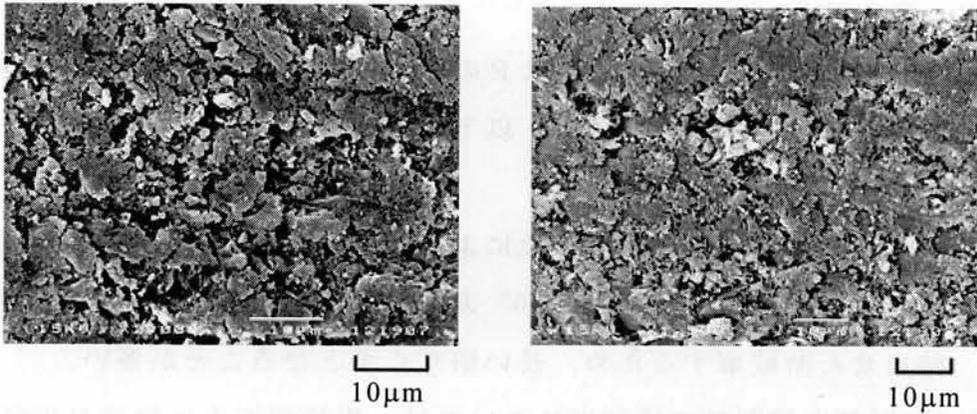


図 5.16 冷風研削時のクロスCFRPの研削温度



(a) 冷風ありの場合 (b) 冷風なしの場合

図 5.17 45/135° クロスCFRPの研削表面のSEM写真

さらに、それぞれの表面粗さの測定を行った。図 5.18 に測定結果を示す。繊維角度が 45/135° の場合はほぼ同じ値となったが、0/90° の場合、冷風を使用した方が表面粗さは多少小さくなる傾向となった。現段階ではさらに低い温度の冷風を使用することによって、表面粗さが改善されるかどうかは不明である。

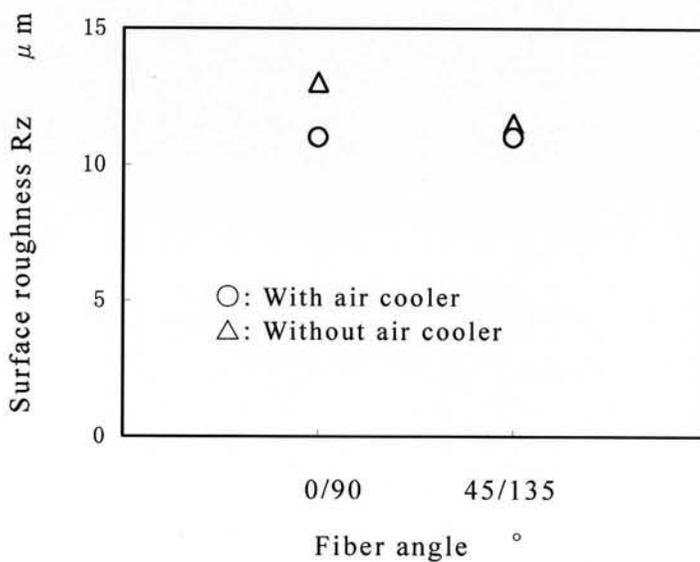


図 5.18 冷風の有無による表面粗さの違い

5.7 結 言

一方向CFRP及びクロスCFRPの研削実験を行い、研削断面や切りくずの観察、研削温度の測定の結果、以下のことがわかった。

- (1) 被削材中の炭素繊維は、砥粒によって直接削られ、切りくずは細かく砕けた形状となる。ただし、 0° 方向の繊維は樹脂界面とのはく離と同時にせん断破壊するため、長い切りくずとなることが多い。
- (2) 0° 以外の被削材の研削面においては、繊維端面上に樹脂が広がって、繊維端面が観察しにくい状態となる。これは、研削熱による影響ではなく、炭素繊維周りの削り残された樹脂が砥粒によって撫で付けられ、繊維端面を覆うためである。
- (3) CFRPの乾式平面研削時の研削温度は本実験条件においては、約 $120^\circ\text{C}\sim 130^\circ\text{C}$ であり、この研削熱による樹脂の軟化は認められなかった。
- (4) 本実験条件においては、 $0/90^\circ$ 、 $45/135^\circ$ と繊維角度が変わっても研削温度はほぼ同じ値であった。

参考文献

- (1) 野村昌孝：CFRPの切削に関する研究，大阪大学学位論文。
- (2) 金枝敏明，高橋正行：CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の切削機構に関する研究（第2報）－切削残留量ならびに加工変質深さの解析－，精密工学会誌，56,6(1990)1058.
- (3) 花崎伸作，野村昌孝：FEMによるCFRPの切削機構の解析（食い付き時の繊維破壊挙動），日本機械学会論文集（C編），61,583(1995)1163.
- (4) 金枝敏明：CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の切削機構に関する研究（第3報）－工具刃先丸味ならびに逃げ角の影響－，精密工学会誌，57,3(1991)491.
- (5) アナログデバイセス:AD594/595 データシート, Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation.
- (6) 剣持潔，高柳寛司：製品科学研究所ニュース，24,5,9(1992).
- (7) 田中武司，磯野吉正，盛貞悦一：CBNホイールによる軟鋼の冷風研削における研削現象，砥粒加工学会誌，46,5(2002)234.
- (8) 田中武司，磯野吉正，盛貞悦一：CBNホイールによる延性材料の冷風研削現象について，砥粒加工学会誌，46,9(2002)452.
- (9) 田中武司，盛貞悦一：CBNホイールによる焼入れ鋼の冷風／ミスト／冷風ミスト研削現象について，砥粒加工学会誌，48,1(2004)35.

第6章

総括

繊維強化プラスチック（FRP）の利用は、その優れた成形性、機械的特性等により、現在の利用範囲にとどまらずますます拡大しつつある。小径部品や機械部品としての用途では厳しい寸法精度が要求されていることから、研削加工の必要性が求められている。しかし、複合材料の機械加工に際しては、従来の機械加工の知識のみでは対応できない問題も含まれる。

本論文では、複合材料の中でも様々な分野で使用され、応用範囲の広いガラス繊維強化プラスチック（GFRP）と炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の研削加工について実験的に研究を行った。GFRPについては、寸法精度よく加工することにより、今後プリント基板の薄板化や部品実装の高密度化、製品の軽量化や表面品位の向上に貢献することができる。研削面は部分的にキズがついたり、粗い状態となることがあるため、この原因について考察した。すなわち、繊維角度の影響や砥石の影響について詳しく調べた。CFRPについては、その用途から平面度に対する要求が厳しい部品もある。そこで、適切な研削条件を見出し、研削機構について考察を行った。繊維角度や砥石の種類の影響を実験的に調べるために、研削抵抗や表面粗さの測定、研削断面や切りくずの観察、さらに単粒切削を行った。また、研削熱の影響を調べるために、研削温度の測定や冷風研削も行った。

本研究で得られた主な結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 第2章では、GFRPに対しスパークアウト研削や平面プランジ研削で加工を行い、これらの加工方法の違いが加工後のGFRPの表面品位にどのような影響を与えるかを追求した。スパークアウト研削は最初の研削加工によって生じたガラス繊維の切り残し量を減少させる作用をするが、繊維角度の大きい試料表面に生じるガラス繊維部のくぼみ量の減少には効果がなかった。平面プランジ研削では研削回数の増

加にともなってガラス繊維の切り残し量が増加することが明らかになった。

(2) 第3章では、GFRPの研削痕の原因を種々の形状のダイヤモンド単粒を用いたフライカット実験によって調べた。その結果、円錐型の形状では切り屑が生成されにくく切り残しが多かった。さらに繊維角度については、 0° 方向のガラス繊維は所々で局所的な曲げで破壊し、その跡がくぼみとなる。また、 135° 方向のガラス繊維は切削方向に対し、単粒前方において被削材表面よりも下方で押し起こされた後、曲げ破壊し、切り屑となって排出された場合はその跡がくぼみとなる。これらの現象が原因で、ダイヤモンドホイールによる研削加工の際、ガラス繊維の表面への突き出しや研削面のくぼみが生じることが明らかになった。これらのことから、研削加工が必要な面は 135° の繊維角度にならないように設計することが、表面品位の向上につながるということがわかった。

(3) 第4章では、CFRPの研削加工を行い、砥石には有気孔の超砥粒ホイールが適していることが明らかになった。研削方式については、アップカットよりもダウンカットの方が表面粗さは良好であった。また、一方向CFRPよりもクロスCFRPの方が研削面の表面粗さは良好であり、これは繊維を平織りにすることにより研削中の繊維のたわみが抑制されるためであることを明らかにした。さらに、クロスCFRPでは、 $0/90^\circ$ クロスよりも $45/135^\circ$ クロスの方が、表面粗さは良好であることが明らかになった。

(4) 第5章では、CFRPの研削面の生成機構について調べた。その結果、被削材中の炭素繊維は、砥粒によって直接削られ、切りくずは細かく砕けた形状となるが、繊維角度が 0° 方向の場合、繊維は樹脂界面とはく離すると同時にせん断破壊するため、長い切りくずとなることが多かった。 0° 以外の被削材の研削面においては、繊維端面上に樹脂が

広がって、繊維端面が観察しにくい状態となったが、これは研削熱による影響ではなく、炭素繊維周りの削り残された樹脂が砥粒によって撫で付けられ、繊維端面を覆うためであることを明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始ご懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科花崎伸作名誉教授に心から感謝の意を表します。

研究当初から現在に至るまで，本研究の遂行にあたり，終始御指導，御検討，御鞭撻，御配慮いただきました大阪大学大学院工学研究科藤原順介助教授に心より感謝の意を表します。

本論分の達成にあたり，有益なご助言とご教示を賜りました大阪大学大学院工学研究科三好隆志教授，竹内芳美教授，森 教安教授に対して厚く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり，適正なご指導，御力添えを賜り，公私共常に御配慮いただきました大阪大学大学院工学研究科宮本猛助手に深く感謝の意を表します。

さらに，実験装置の作成や実験方法について，常にご助言を頂きました大阪大学大学院工学研究科岩崎信三技官，森山重信技官に心から感謝いたします。

常日頃，様々に研究をサポートして頂いた大阪大学大学院工学研究科加工機構解析学領域研究室の皆様に深く感謝致します。

最後に，常に暖かく見守ってくれた妻，長女に心から感謝します。