

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

繊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			方	向	G	F	R	Р	材	の	研	削	加	I.	表	面	品	位	に	つ	い	て					
					研	削	加	T	方	法	の	影	響			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12
	2	•	1		緒		論	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12
	2	•	2		試	料	の	作	成	方	法	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	13
	2	•	3		実	験	方	法	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	•	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	—	ク	ア	ウ	\mathbb{P}	口	数	の	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	•	18
		2	•	4	•	3		平	面	プ	ラ	ン	ジ	研	削	旦	数	の	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	22
	2	•	5		結		言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	24
参	考	文	献	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	25
第	3	章		G	F	R	Р	の	単	粒	切	削																	
				—	単	粒	形	状	が	ガ	ラ	ス	繊	維	強	化	プ	ラ	ス	チ	ツ	ク							
				(G	F	R	Ρ)	の	研	削	加	I.	面	に	及	ぼ	す	影	響			•	•	•	•	•	27
	3	•	1		緒		言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	27
	3	•	2		被	削	材	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	28
	3	•	3		ダ	イ	ヤ	モ	ン	ド	ホ	イ	-	ル	に	よ	る	G	F	R	Ρ	の	研	削	加	I	•	•	28
		3	•	3	•	1		実	験	方	法	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	•	28
		3	•	3	•	2		G	F	R	Р	研	削	面	の	凹	ഫ	の	測	定	•	•	•	•	•	•	•	•	30
		3	•	3		3		G	F	R	Р	研	削	面	の	S	E	Μ	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
			2		1		2		1		畄	粉	朷	別	扺	抺	•	•	•	•		•	•	•	•		•		36

		3	•	4	•	2		2		単	粒	切	削	痕	形	状	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	38
	3	•	5		G	F	R	Ρ	の	単	粒	切	削	急	停	止	実	験	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	41
		3	•	5	•	1		実	験	装	置	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	41
		3	•	5	•	2		急	停	ТF	実	験	後	の	切	削	痕	観	察	•	•	٠	•	•	•	•	•	٠	43
			3		5	•	2		1		繊	維	角	度	が	0 /	/9()°	の	場	合	•	•	•	•	•	•	•	43
			3	•	5	•	2	•	2		繊	維	角	度	が	45	5/1	135	5°	の	場	合	•	•	•	•	•	•	46
	3	•	6		結	言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	49
参	考	文	献	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	50
第	4	章		各	種	砥	石	に	よ	る	С	F	R	Ρ	の	乾	式	研	削	•	•	•	•	•	•	•	•	•	51
	4	•	1		緒		言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	51
	4	•	2		被	削	材	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	•	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	朩	イ	-	ル	に	よ	る	研	削	表	面	の	観	察	•	•	•	•	62
		4	•	4	•	4		s	D	朩	1		ル	と	с	В	N	ホ	イ	<u> </u>	ル	の	研	削	抵	抗	•	•	63
	4		5		S	E	М	内	<u> </u>	次	元	切	削	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	65
	4		6		結		言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	71
参	考	文	献	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	72
第	5	章		С	F	R	Ρ	の	研	削	面	の	生	成	機	構	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	•	73
	5	•	1		緒	盲	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	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		С	F	R	Ρ	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	<	ず	の	観	察	•	•	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	85

		5	•	5	•	1		45	/ 1	35	0	ク	П	ス	С	F	R	Ρ	の	研	削	切	ŋ	<	ず	•	•	•	85
		5	•	5	•	2			方	向	С	F	R	Р	の	研	削	切	り	<	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	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•]	01

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 てだけではなく,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、G FRP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⁽³⁾.さらに、炭素繊維強化プラスチック(CF RP: 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,C FRP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,切れ刃のチッピ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,通常の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し⁽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.GF RP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、詳しく調べることとした.

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.

 $\mathbf{5}$

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一,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(GF RP)の切削機構に関する研究, 精密工学会誌, 53,9(1987)1447.
- (23) 王 暁渡,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) G F R P の仕上面品位について一,精密工学会誌, 55,4(1989)709.
- (24) 王 暁渡,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) F R P の切削仕上面創成機構一,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 Mnufacturing 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GF RP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,渡邉裕,大森整,加藤照子:先進繊維強化PEEKのELI D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 一精密工学会誌,55,8(1989)1456.
- (44) Xiangming Wang and Langchi Zhang : EFFECT OF CURING CONGITIONS ON THE MACHINABILITU OF UNIDIRECTIONAL FIBRE-REINFORED 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) conposite 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 Mnufacturing 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 Mnufacturing 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一, 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一, 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一,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一,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)一,精密工学会, 63,10(1997)1469.
- (64) 帯川利之, 白樫高洋, 臼井英治: 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GFRP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

2.1 緒言

ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)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.GFRP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GFRP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、 GFRP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GF 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 間隔に一列に保持した型に不蝕和 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



(b) 上面から見た図

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.

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

表 2.1 実験条件

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 角度の変化に村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 おいて砥石に村して 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+側の変化は 図中に示すように切り残し量の変化を示し,図の一側の変化はくぼみ量の変 化を示す.切り残し量は繊維角が 90°付近で 5 μ 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 μ m とやや大きな値を示している が, $\theta = 90^{\circ}$ 付近では 3 μ 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 θ = 90°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 μm 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槻念を、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 mm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 状態で、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△一△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接し量 は小さくほぼ一定である(2~3µm).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 θ = 90° 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

Starting point of tensile fracture (Hackle)



 $2~\mu{
m m}$

Compression side of bent fracture (Compression lip)

(a) 0°



5 μm

(b) 45°

Grinding direction (all figure)

Starting point of tensile fracture (Hackle)



(c) 90°

 $2 \ \mu \mathrm{m}$

1 P.W. 4 Dixt. 2, 50/ 6030

Compression side of bent fracture (Compression lip)

5 μm

(d) 150°

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 θ = 90°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, θ = 90°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,その後に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らないが、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 μm 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一様な面の場合,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



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 削方向との相対的関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)
 -ガラス繊維強化硬質塩化ビニル樹脂の切削加工一,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 暁渡,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) G F R P の仕上面品位について一,精密工学会誌, 55,4(1989)709.
- (20)王 暁渡,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) F R P の切削仕上面創成機構一,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

一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 クロスの繊維方向が 0° および 90° となるクロス (0/90°) と 45° および 135° となるクロス (45/135°)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°クロスの積層板と45/135°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.

 $\mathbf{27}$

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° と,45° および 135° となる 45/135° 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θ/(90+θ)。として定義する.

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

表 3.1 実験条件





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°の場合であり,図 3.3(b)は 45/135°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 20µm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.



Grinding direction

(a) $0/90^{\circ}$



Grinding direction

(b) 45/135°

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G FRP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.





Uncut resin after pull-out of fiber

(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S EM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で、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.

34



図 3.6 単粒切削実験装置の概要



図 3.7 単粒形状

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

表 3.2 单粒切削実験条件

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.

36



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

77777	TAT
	1+1×1
$\gamma \gamma $	111. V/1
	11/1////

	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°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Πの 単粒を用いた場合で、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°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.

38



Profile of cross section



(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 3.9 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



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に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に、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

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

表 3.4 急停止切削の実験条件

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°方向のガラス繊維束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

43

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 押しのけられ,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.



500µm

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.



Fiber angle : 0/90° Tool shape : Cone

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 に横に押しのけられる.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,ガラス繊維が切削方向 と同じ向きであるため,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



Fiber angle : 45/135° Tool shape : Pyramid I

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°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°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.



Tool shape : Cone

図 3.15 急停止位置における切削痕のSEM写真



Tool shape : Cone

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、切り残しが多い.
- (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,渡邉裕,大森整,加藤照子:先進繊維強化PEEKのELI D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CF RP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ELI D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

51

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、C FRP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、C FRP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10mm,横 15mm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°,45/135°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)

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

(Fiber contents : 60 vol%)

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θ/(θ+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CF RPでは0/90°および45/135°の試料を用いた.試料の大きさは,いずれも 10×15×5 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、 c B N 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 c B N で、有気孔のビトリファイ ドボンドのホイールである.



Grinding manner	Up cut, Down cut
Wheel	GC Wheel : φ 200×10 mm GC36J12V0, GC220J12V
	Resin diamond grinding wheel (Nagoya diamond Co. Ltd.): φ 175×10 mm SDC200N125B, SDC400R125B
	Vitrified superabrasive grinding wheel (Noritake Company) : ϕ 180×13 mm SD230P50VD2GP, CB230P50VD2GP
Workpiece	Unidirectional CFRP, Cloth CFRP
	$L 15 \times H 10 \times W 5 mm$
Fiber angle	0, 45, 90, 135° (Unidirectional CFRP)
	0/90, 45/135° (Cloth CFRP)
Depth of cut	10 μm
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

表 4.2 研削実験条件

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3kHz)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.

Grinding direction



1 m m

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らず、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

58





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.



) SDC200 レジンボンド (b) SD230 ビトリファイドボンド ホイール表面 ホイール表面

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CF RP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で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°クロスCFRPの研削表面の写真で、図4.8(b) は 45/135°クロスCFRPの写真である.図 4.8(a)において、白点線よりト 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り、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°繊維東部分 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、繊維端が充分に樹脂で覆われ 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°クロスCFR P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°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CF RP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°クロスCFRPの方が 0/90°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



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SE M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°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

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

表 4.3 SEM内低速二次元切削における切削条件

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°クロスCFRPの場合で, 135°繊維東部分が観察でき 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 10µm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)で樹脂層を変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 10µm 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は破壊せずに、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、繊維と樹脂とのはく 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.



(a) のこ刃状の切削面

Cutting direction



(b) 繊維と樹脂界面のはくりが
 生じた場合

図 4.15 135°一方向CFRPの悪い二次元切削面の典型的な状態

こららの結果から 135°一方向CFRPでは、45/135°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°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: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.
- (2) 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.
- (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CFRP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CFRP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) タマム 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

CFRPの研削面の生成機構

5.1 緒言

第4章では、CFRP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CFRP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、CFRP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、CFRP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CF RP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 µm			
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 を通過し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ほ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 C F R P の単粒切削痕の S E M 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.



Cross section (bonded surface)

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 µ m 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.

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

表 5.1 研削実験条件

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 θ =0°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 θ =0°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) θ =45°,(c) θ =90°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 っているので,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 θ =135°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を切削した場合で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.



End part

Front part



(a) 0° 一方向CFRP



(b) 45° 一方向CFRP

図 5.4 一方向 C F R P 研削断面の S E M 写真 (その 1)







(d) 135° 一方向CFRP

図 5.4 一方向 C F R P 研削断面の S E M 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 く離している様子が観察できた.設定切込みが10μmに対して、繊維と樹脂 との界面はく離の深さが約 30µm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



End part



図 5.5 単粒切削断面の S E M 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、樹脂および繊維が溶融す 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.





5µm

(b) せん断破壊した炭素繊維

(a) 研削表面の切りくず

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.



 $10 \mu m$

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



 $10 \mu m$



(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1mmの穴をあけ、各素線の直径が0.1mmのK型(クロメルーアルメル) 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 デバイセズ社製)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 10µm 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°,45/135° クロスCFRPともほぼ同じで約 120℃~130℃であった.



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℃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℃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℃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.



Distance from ground surface µm

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℃~130℃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°, 45/135°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) アナログデバイセズ: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(CF RP)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CFR P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.