

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560116

研究課題名（和文） 複合材料の振動外周刃切断方式による高能率・長寿命切断技術の開発

研究課題名（英文） Development of vibratory OD-blade slicing method with high efficiency and long tool life for composite materials

研究代表者

石川 憲一 (ISHIKAWA Ken-ichi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00064452

研究成果の概要（和文）：現在、複合材料が各方面で多く用いられ、その中でも炭素繊維強化プラスチック積層板（CFRP）は航空機用部材等として数多く使用されるようになってきている。一方、CFRPは成形加工後において切断や穿孔等の各種機械加工が施されることが多く、特に切断加工には外周刃切断方式が用いられる傾向にある。しかしながら、CFRPの切断加工では、それに含まれる強靱な炭素繊維の影響によって工具摩耗が著しいという問題点を有する。そこで、本申請研究ではCFRPに代表される複合材料の切断方式として振動外周刃切断方式の適用性を検討するものであり、切断抵抗に加えて、切断精度や工具寿命等について検討した。その結果、(1)振動切断を行うことによって無振動切断と比較し、切断抵抗は減少するとともに、工具摩耗量は約半分に抑制される、(2)振動切断による表面粗さ、うねり、チッピングは無振動切断と同等なものとなる、ことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Composite materials are expected to be effective for use in mechanical and structural parts, such as airplane parts. Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) are frequently used. When CFRP are used for mechanical structural parts, the need to slice or drill them is inevitable; an abrasive machining method by OD-blade has been widely used to slice them. However, one drawback of the OD-blade slicing method is low tool life due to the hardness of carbon fiber. This study was performed to establish and examine the practical applicability of the vibratory OD-blade slicing method to slice composite materials, such as CFRP. The obtained results are follows. (1) The slicing force and tool wear in vibratory slicing remarkably decreases compared with in the conventional slicing. (2) The slicing accuracy such as the surface roughness, waviness and edge chipping in the vibratory slicing method is similar to them in the conventional slicing method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 生産工学・加工学

キーワード：切削・研削加工，複合材料，切断加工，砥粒加工，外周刃，振動，高能率，工具寿命

## 1. 研究開始当初の背景

現在、CFRPやKFRPに代表される複合材

料（Composite Material）は航空機産業、スポーツ産業など多岐に亘り使用されている。

特に複合材料の長所である「高強度で軽量」である特性は広く知られている。しかしながら、このような複合材料を各種構造材料として使用する場合、成形後における機械加工は避けることができず、特に、切断加工が占める技術的位置づけは高い。一方、航空機用に使用される構造材料のように、近年、長尺で且つ厚さが数 10mm を有する複合材料の切断加工においては、加工能率、加工精度（切断面の変質、寸法精度、切断面粗さ、チッピングなどの欠け）に加えて、切断幅や工具摩耗に起因した加工経費の増加が問題視されている。このような切断加工に対する要求に関して、従来、厚さが 0.5mm 以下の薄板であればシャーリングが用いられ、あるいはある程度の厚板の場合にはレーザ切断やウォータージェット加工が一部実用化されているが、板厚を問わずして最も使用されている切断技術が外周刃による研削切断方式である。しかしながら、外周刃切断方式の場合では比較的良好な切断精度が得られるものの、強靱な繊維を切断することに起因した加工点温度の上昇などの影響から、工具摩耗が非常に著しいという問題を有しており、高能率で且つ工具の長寿命化をもたらさうる新規技術開発が求められている。

## 2. 研究の目的

上述の研究背景と申請者の現在までの研究実績に基づき、本申請研究は「複合材料の振動外周刃切断方式による高能率・長寿命切断技術」の開発を目的に実施する。すなわち、本申請研究の具体的目的（達成目標）は、次に示す 5 項目のとおりである。すなわち、

- (I) 振動外周刃切断方式における複合材料の切断特性に関して、切断抵抗の挙動を確認、
- (II) 加工精度として切断面の表面粗さやうねり、並びに工具寿命として工具摩耗量に及ぼす振動の効果を確認、
- (III) 繊維方向の違いが切断特性に及ぼす影響の解明、並びに外周刃工具の長寿命化も含めた最適な切断条件の明確化と切断指針作成、

である。また、本申請研究では複合材料として CFRP を対象とした。

## 3. 研究の方法

本申請研究では、「複合材料を切断対象とした振動外周刃切断方式」について、適宜目的と実施項目の見直しを図りつつ、次に示す 3 項目を中心に研究を実施した。なお、これら項目番号は<2. 研究の目的>で述べた(I)~(III)にそれぞれ対応している。

- (I) 基礎的事項の確認：ここでは従前の研究で行ってきた検討と同一の振動切断条件下において一連の実験を行い、複合材

料切断における振動付与の基礎的効果について切断抵抗の観点から確認する。

- (II) 工具寿命の延伸効果と加工精度検証：上記(I)で得られた結果に基づき、複合材料の切断において最も問題となる低工具寿命に関して、振動付与の観点から検討するとともに、加工精度についても実験的に明らかにする。

- (III) 複合材料は多層積層構造になっていることから、積層方向が切断特性に及ぼす影響を明らかにすることを通じて、複合材料切断に適した切断方向等に関する指針作成を行う。

## 4. 研究成果

ここに代表的な研究成果を示す。なお、<3. 研究の方法>に示した(I)~(III)に対応させて記述する。

### (I-1) 実験装置及び CFRP の積層構成

本研究の実施にあたり、切断抵抗の検討実験においては外周刃スピンドルに作用する切断トルクを計測できる「円振動スピンドルを搭載した振動外周刃切断装置」を用いた。すなわち、この場合においては外周刃側へ円振動を付与する方式を採用とした。一方、切断精度である表面粗さやうねり、チッピングに加えて、工具摩耗量の検討実験においては、より信頼性の高いデータを取得することを目的に、市販の外周刃切断装置、並びにピエゾ式加振機を用いた。すなわち、この場合においては、工作物側に鉛直方向振動を付与する方式を採用した。

また、実験に使用した工作物には炭素繊維のシートをイミド系樹脂によって固化させ、厚さ 2mm に積層した CFRP 板を用いた。積層は[45/0/-45/90]2s として与えられる 16 層から構成されている。

### (I-2) 切断抵抗の変化

硬脆材料を切断対象とした場合では、振動切断を行うことによって切断抵抗の減少効果が得られている。そこで、CFRP を切断対象として外周刃に円振動を付与した場合における切断抵抗の変化を検討した。切断抵抗を計測する場合、外周刃を回転させるモータの負荷トルクの変化を切断トルクとして評価した。

図 1 に CFRP を対象とした場合に得られた無振動切断並びに振動切断における切断 1 パス中の切断トルク波形の一例を示す。この結果から、硬脆材料を対象とした場合と同様に、CFRP の振動切断においても、無振動切断に比較して切断トルクの値が約半分減少していることがわかる。これは振動切断にあつては、切断加工中に外周刃と工作物が接触と分離を繰り返す微小断続切断を行うことから、その分離の際に加工液が加工部へ流入し、切りくずが排出されやすくなるためである。

と考えられる。さらには、CFRPの切断では強靱な炭素繊維が切断抵抗や工具寿命に大きな影響を及ぼすと考えられる。そのような中において、振動切断にあっては微小断続切断に起因した真の切断時間(回数)の減少がもたらされることから、それが切断トルクの低減につながるものと考えられる。

ところで、著者らによる硬脆材料を切断対象とした振動外周刃切断方式の加工特性を検討した結果に関し、特に切断抵抗においては、砥粒による微小切削現象に起因した研削抵抗の他にも、砥粒と工作物相互間で発生する摩擦力に起因した接触抵抗が発生することが理論・実験の両面から明らかにされている。そして、振動を付与することによって、接触抵抗の飛躍的低減に伴う切断抵抗の減少効果が得られることが明らかにされている。したがって、本研究で検討するCFRPの場合においても振動を付与することによって切断抵抗の減少が得られるが、これは、上記接触抵抗の低減に伴うことに起因するものと考えられる。

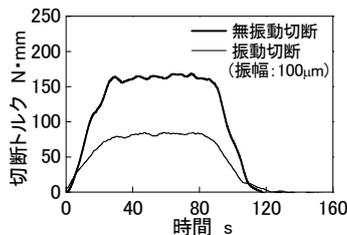
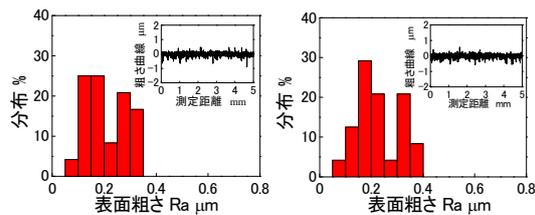


図1 切断トルクの変化

### (II-1) 表面粗さ並びにうねりの挙動

切断精度の評価方法に関しては、工作物を切断し、その切断面を触針式表面粗さ測定機(株式会社東京精密製: SURFCOM1400D)にて測定した。なお、表面粗さについては算術平均粗さ Ra によって評価した。表面粗さの測定位置は工作物の切断開始部分を「入口」、切断中心部分を「中間」、切断終了部分を「出口」とした。なお、切断片を「装置側」、「オペレータ側」とし、1つの切断片に対して計12箇所の表面粗さを測定し評価した。一方、表面うねりの測定位置は切断面の中間を測定し、装置側、オペレータ側の計2箇所を測定し、評価を行った。

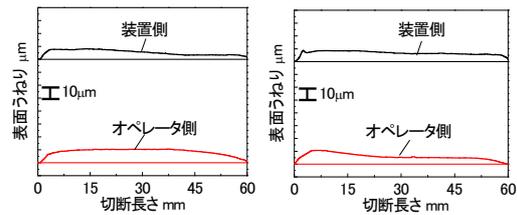


(a)無振動切断 (b)振動切断

図2 表面粗さの測定結果

図2(a)に無振動切断、(b)に振動切断(振幅25μm)の場合で得られた切断面の表面粗さ分布を示す。なお、各図中に表面粗さ曲線の一例を示す。図2の結果より、硬脆材料と同様に、CFRPの振動切断に対しては無振動切断と比較して、表面粗さ曲線および粗さ分布に大きな変化は見られないことがわかる。

図3(a)に無振動切断、(b)に振動切断(振幅25μm)で得られた表面うねりの結果を示す。図3の表面うねりの結果を見ると、表面粗さの結果と同様に、無振動切断と振動切断を比較しても、その差異は認められないという結果となった。



(a)無振動切断 (b)振動切断

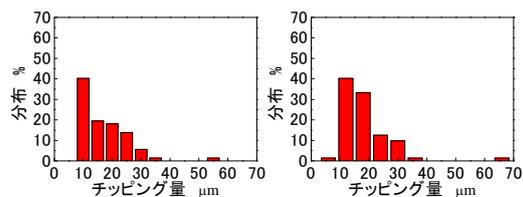
図3 表面うねりの測定結果

表面粗さおよび表面うねりの切断精度に関して、無振動切断および振動切断に大きな影響が見られない理由としては、外周刃の弾性変形量があると考えられる。すなわち、切断加工中の外周刃は切断抵抗を受けることによって弾性変形を生じるが、本実験で用いている工作物の厚さは2mmであるため、切断による外周刃の弾性変形は小さいと考えられる。このことから、無振動切断と振動切断を比較して、表面粗さおよびうねりの結果には大きな変化が見られなかったものと考えられる。

### (II-2) チッピングに関する検討

CFRPの切断加工では炭素繊維の飛び出しによって切断面に劣化や損傷(以後、チッピングと記す)を与え、そのような現象は材料強度の低下に繋がる問題とされている。そこで、無振動切断と振動切断を行った場合に、振動付与が工作物の切断面におけるチッピングに与える影響を検討した。

図4(a)に無振動切断、(b)に振動切断におけるチッピング量(チッピングの大きさ)の分布を示す。これらより、無振動切断と振動切



(a)無振動切断 (b)振動切断

図4 チッピング量の測定結果

断において同等のサイズのチップング量が生じており、チップング量の差異は認められない結果となった。したがって、CFRPを対象として振動切断を行った場合でも、切断片に与えるチップング量は無振動切断と同様な結果を得ることができると言える。

### (II-3) 連続切断による工具摩耗量

硬脆材料の場合における外周刃直径摩耗量の結果では、振動切断を行うことによって工具摩耗を抑制することができることが明らかにされている。そこで、CFRPを振動切断する場合における外周刃の工具摩耗量について検討した。さらに、CFRPの切断加工では加工液や工作物の洗浄等の後処理に問題があることから、乾式切断を行うことが多い。したがって、ここでは乾式切断と湿式切断の違いによる検討も併せて実施した。本実験は無振動切断と振動切断（振幅 25 $\mu\text{m}$ ）のそれぞれの条件下において、各 50 回の連続切断を行った。

図 5(a)に湿式切断における無振動切断と振動切断に関する切断回数と外周刃直径の摩耗量の結果を示し、同図(b)に乾式切断の結果を示す。この結果より、湿式切断と乾式切断では大きな変化は見られなかったが、従前の硬脆材料の場合と同様に、振動切断は無振動切断に比べて外周刃の摩耗量は約半分に減少することがわかる。これは前述のとおり、振動を付与することによって、外周刃にかかる切断抵抗が減少したことが考えられる。とくに振動切断にあっては切断抵抗の中に含まれる摩擦成分である接触抵抗の低減がもたらされることによって、工具摩耗の抑制効果が得られたものと考えられる。また、湿式切断と乾式切断で大きな差異が見られないことから、CFRPの切断では加工部の発熱に起因した熱的摩耗よりも、強靱な炭素繊維の切断に起因した衝撃摩耗が工具摩耗に著しく影響を及ぼすものと考察される。

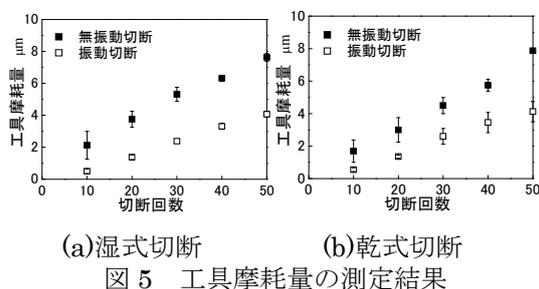


図 5 工具摩耗量の測定結果

したがって、CFRPに対して振動切断を行うことによって、工具摩耗量が抑制されることから、振動付与による切断方法は工具寿命の延伸に有効であると考えられる。

### (III-1) 繊維方向が切断トルクに及ぼす影響

ここでは繊維方向別による切断抵抗の変化を明らかにするために、切断抵抗の評価を実施した。切断抵抗の測定には前述と同様に、円振動スピンドルを搭載した振動外周刃切断装置を用いた。そして、外周刃を回転させるスピンドル用モータの負荷トルクの変化を切断トルクとして評価した。

図 6 に一方向強化 CFRP の繊維方向別による測定した 1 パスの切断における切断トルクの変化を示す。図 5(a)~(c)は繊維方向  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の結果であり、それぞれに無振動切断、振動切断での結果を示す。これらの結果から、無振動切断と振動切断で比較すると、繊維方向に関係なく振動切断の方が無振動切断に比べ切断トルクは小さい。

一方、繊維方向別で見ると、振動の有無にかかわらず繊維方向が  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  になるにつれて切断トルクは増加している。これは、繊維方向  $0^\circ$  の場合では切断加工中に繊維が切断方向に剥離する現象が生じる。一方、繊維方向  $45^\circ$  や  $90^\circ$  の場合では切断方向への繊維の剥離が生じにくいことから、繊維方向  $0^\circ$  と比較して切断抵抗が増加したと考えられる。さらに、繊維方向によって CFRP の破壊応力は異なり、等方性 CFRP に圧縮応力を付与した場合は、応力と同一方向の繊維層で最初に破壊が発生することが報告されている。このことから、切断加工中の CFRP には切断方向への荷重、すなわち圧縮応力が作用し、それに対しては繊維方向  $0^\circ$  の強度が繊維方向  $45^\circ$  や  $90^\circ$  に比べ劣る。その結果、繊維方向が  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  と増加するにつれて切断トルクは増加したと考えられる。

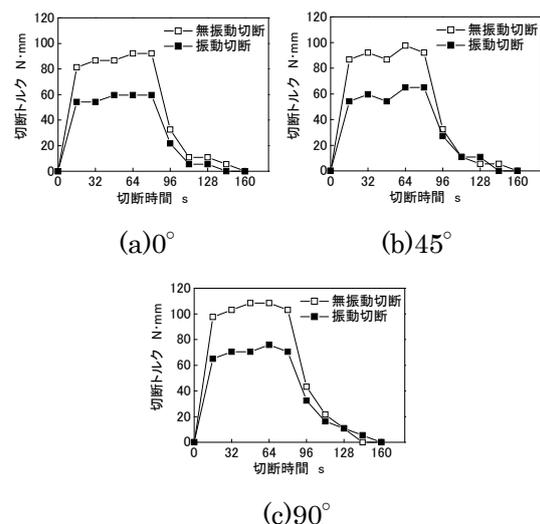


図 6 繊維方向と切断トルクの関係

### (III-2) 繊維方向が工具摩耗量に及ぼす影響

ここでは、一方向強化 CFRP を用いることによって、繊維方向別における外周刃の工具

摩耗量の変化を検討した。

図 7 は繊維方向別に得られた無振動切断、振動切断における、50回連続切断時の切断回数と工具摩耗量の結果を示す。これらの結果より、繊維方向に関係なく振動切断の方が無振動切断に比べ工具摩耗量の減少が見られる。そして、繊維方向別に比較すると、繊維方向が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ になるにつれて工具摩耗量が増加している。これは切断トルクの考察で述べたとおり炭素繊維の破壊機構に起因していると考えられ、切断トルクは繊維方向 $90^\circ$ の場合で最も大きくなる。一方、繊維方向 $90^\circ$ となる場合では繊維方向 $0^\circ$ のような繊維の裂けや剥離の現象が生じにくいことから切断抵抗は増加するとともに、外周刃の摩耗が促進されたと考えられる。以上のことから、繊維方向が $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ になるにつれ、外周刃にかかる抵抗が増加し、工具摩耗が増加したと考えられる。

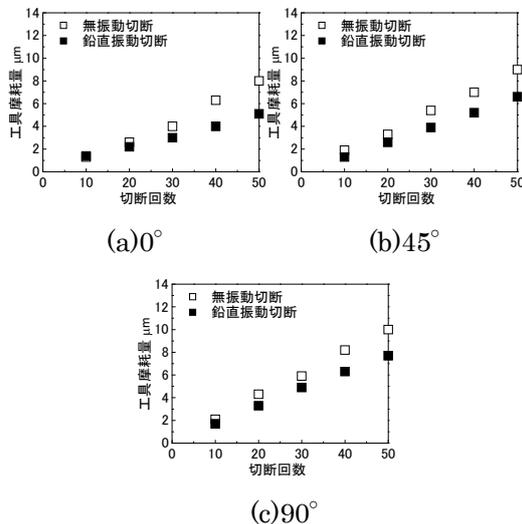


図 7 繊維方向と工具摩耗量の関係

### (III-3) 繊維方向がチップングに及ぼす影響

ここでは、一方向強化 CFRP を用いることによって、切断面のチップングに及ぼす繊維方向の影響を検討した。

図 8 に繊維方向別の無振動切断、振動切断によって得られたチップング量の分布を示す。この結果より、繊維方向別に比較すると、振動の有無にかかわらず繊維方向 $90^\circ$ の場合は他の繊維方向に比べチップング量が幾分大きくなっていることがわかる。この理由として、繊維方向 $0^\circ$ の場合は切断方向と繊維方向が同一であるため、端面より炭素繊維がまとまって剥離する形でチップングが生じるためである。

一方、繊維方向 $90^\circ$ の場合は端面より炭素繊維が折れるようにしてチップングが生じており、そのチップング量は端面より材料の内側まで進行していた。すなわち、繊維方向

に沿って炭素繊維が剥離することによって比較的大きなチップングが生じると考えられる。また、チップング量がより大きく生じている部分はバリの生成と同様に切断面下部であることも確認できた。

以上より、切断片に与えるチップングの発生率は無振動切断と同様な結果を得ることができることから、振動付与による切断面に対する悪影響は生じないといえる。しかしながら、チップングは繊維方向によってその発生機構が異なり、繊維方向 $90^\circ$ の場合ではよりチップング量が増大することが明らかとなった。

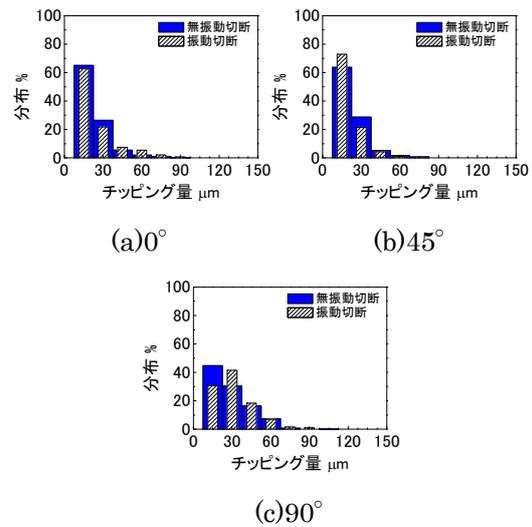


図 8 繊維方向とチップング量の関係

そして、これら一連の成果は今後さらに需要が加速すると予想される複合材料に対して、その切断方法に対する指針を与えるものであり、特に振動付与の効果は高いと言える。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 畝田道雄, 成瀬 尚, 山下義徳, 石川憲一: 複合材料 (CFRP) を切断対象とした振動外周刃切断方式の加工特性に関する研究—繊維方向が切断特性に及ぼす影響—, 砥粒加工学会誌, 53, 10 (2009) 627-632. (査読有)
- ② 畝田道雄, 成瀬 尚, 石川憲一, 諏訪部仁: 複合材料を切断対象とした振動外周刃切断方式の加工特性に関する基礎研究, 砥粒加工学会誌, 52, 7 (2008) 412-416. (査読有)

[学会発表] (計 0 件)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

石川 憲一 (ISHIKAWA Ken-ichi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00064452

### (2)研究分担者

畷田 道雄 (UNEDA MICHIO)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00298324