ゴム含有軟質コンポジット材の切削現象と切りくずの温度依存性*

山本 礼^{*1}, 森田 昇^{*2}, 山岡 克徳^{*3}

A Study on the Cutting Phenomenon and Temperature Dependence of Soft Composite Material including Rubber

Rei YAMAMOTO^{*1}, Noboru MORITA and Katsunori YAMAOKA^{*1} Hitachi Chemical Co., Ltd. Tsukuba Research Laboratory
Wadai 48, Tsukuba, Ibaraki, 300-4247 Japan

The orthogonal cutting method of soft material with acrylic rubber and graphite was investigated by measuring the deformation of the material and the chip at several conditions in temperature. The experimented rake angle and temperature were 10, 30, 55 and 68 degrees, and -5, 0, 10, 15 and 20 degrees Celsius respectively. The mode of the deformation of the work during cutting changed from the shearing to hitting wedge mode at the rake angle higher than 55 degrees. The thrust force became negative at the higher rake angle. It was suggested that the increasing force to push up the work by the rake face. The tool with double-deck on rake face was found to be effective to control the thrust force. It was found that the surface of the chip become adhesive and rough with an increase in temperature. The chip was contacted on the rake surface of the tool widely at 20 degrees Celsius. It was suggested that the increase of the friction force on the rake face result in rougher surface and more adhesive of the chip.

Key Words : Soft Material, Rubber, Composite, Cutting, Chip, Cutting Force

1. 緒 言

電子機器の高性能化に伴い発熱量の増大が問題となっている。そのため、熱源となる半導体チップから効率よく熱を伝搬する熱伝導材料の開発が望まれている。熱伝導材料は、熱伝導フィラーと樹脂からなる柔軟なコンポジットシートが主流である。シートを形成する従来の工法、例えば射出成形、塗工、押出し、プレスでは、シート表面は樹脂で覆われる。樹脂は熱伝導率が低いため、シートを熱源に密着させる界面で熱抵抗となってしまう。そこで筆者らは、切削によって樹脂とフィラーが同一面にできることを見出し、二次元切削加工時の切りくずを熱伝導シートとして利用する方法を考案した⁽¹⁾。

樹脂の切削に関しては、発泡ポリスチレンや四フッ化エチレン樹脂を被削材とした研究事例^{(2),(3)}があり、すくい角や切り込み量が切りくず生成挙動に与える影響を検証している。四フッ化エチレン樹脂では、低速切削において連続型切りくずを得ている。筆者らも、二次元切削加工を用いて、黒鉛フィラーが分散した柔軟ゴムを被削材とした二次元切削加工実験を行い、切りくずのカールを減少させる加工条件（すくい角、被削材温度、切削速度）の指標を明らかにした^{(4),(5)}。切削速度を低速にすると切削抵抗とカールは共に減少した。これは四フッ化エチレン樹脂の切削と同じ傾向である。また、高い被削材温度、大きなすくい角において、切削抵抗とカールは共に減少する結果である。また、すくい角に応じて被削材の変形状態が変化することもわかった。一方、加工現象の明確な解析や切りくず表面の特性に関しては今後の検証課題としていた。

そこで今回は、すくい角と被削材温度に重点を置き加工時の被削材の変形状態の観察と切削抵抗から、加工現象を解明すること試みた。被削材温度の違いによる切りくずの表面状態の変化を、表面粗さと粘着力で評価した。

* 原稿受付 2011 年 6 月 17 日

^{*1} 正員, 日立化成工業 (株) 筑波総合研究所 (〒300-4247 茨城県つくば市和台 48)^{*2} 正員, 富山大学大学院 工学部 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190) (現 千葉大学)^{*3} 正員, 富山大学大学院 工学部 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190) (現 東邦工業 (株))

E-mail: rei-yamamoto@hitachi-chem.co.jp

2. 実験方法

2・1 被削材

被削材は、図 1 に示すように黒鉛フィラーが分散したアクリルゴムである。黒鉛には結晶方向に 200W/mK 以上の熱伝導率を持つ板状の膨張黒鉛フィラーを使用した。アクリルゴムは非架橋で使用した。被削材の貯蔵弾性率を図 2 に示す。測定にはセイコーインスツルメント社製 DMS6100 を使用し、周波数 1 Hz の繰返し引張り荷重を厚み 1.0 mm の切りくずに負荷した。図 2 から貯蔵弾性率は温度依存性を持つことがわかる。 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下の温度では被削材はガラス状態となり、その温度以上では樹脂のミクロブラウン運動が始まり弾性率が急激に減少する。図 2 は、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 近辺で樹脂がミクロブラウン運動からマクロブラウン運動へ移行しゴム状態となることを示している。

加工時の被削材の変形を明確に観察するため、図 3 に示すように被削材に格子パターンを印刷した。パターン作製には金属メッシュを使用し、パターンの色付けは白色顔料とイソプロピルアルコールを $1:1$ で配合した溶液を用いて、スプレー塗布によって行った。

2・2 二次元切削装置

図 4 に示す加工装置を用いて、加工時の被削材の変形挙動の観察および切削抵抗（主分力、背分力）を測定した。図 5 に加工部の模式図を示す。切込み量は、ダイヤルゲージにより 0.1 mm 単位でくさびの押込みを調整し、設定される。切削加工は、LM ガイド上に設置した試料ホルダーがモータによってスライドし、固定した工具ホルダーの刃に試料が接触して行われる。また、試料ホルダー部に組み込んだ動力計によって切削抵抗を測定することができる。水晶圧電式動力計（キスラー社製 9256A2）で発生した電位差をチャージアンプ（キスラー社製 5807 A）で増幅し出力する。別途、それぞれの方向（x, y, z 軸）で 10 N , 20 N , 30 N , 40 N の荷重を負荷し、発生した電位差と荷重の補正を実施する。この相関係数を用いて加工時の切削抵抗（主分力、背分力）を算出する。また、工具上部に設置したハイスピードカメラ（Photron 社製 FASTCAM-NEO 32K）で被削材の変形状態を観察できる。シャッター速度を $1/10000$ 秒、撮影速度を 1 秒当り 1000 フレームで撮影した。メタルハライド光源装置（住田光学ガラス社製 LS-M250, LS-M350）を用いて撮影範囲の明るさを調整した。

加工条件を表 1 に示す。切り込み量 2.4 mm 、切削速度 100 mm/s の条件で、すくい角の違いによる加工状態の変化を観察した。加工状態及び切削抵抗の被削材温度依存性の検証は、切り込み量 1.0 mm 、切削速度 100 mm/s で行った。被削材温度は、切削箇所から 10 mm 被削材ホルダー側に離れた箇所ではシース型熱電対を被削材に接触させ測定した。また、背分力を制御する検討において、工具に取り付けた第 2 のすくい面を構成するガイド（図 9 で後述）への衝撃を抑えるため、切削速度を 60 mm/s とした。

Fig. 1 Work material

Fig. 2 Relationship between storage elastic modulus and temperature

Fig. 3 Printed gratings on working material surface

Fig. 4 Orthogonal cutting equipment

Fig. 5 The pattern diagram of the part of cutting

Table 1 Experimental conditions

Tool material	SHK40
Rake angle α [degree]	10, 30, 55, 68
Relief angle β [degree]	1
Depth of cut h [mm]	1.0, 2.4
Width of cut b [mm]	10
Cutting speed v [mm/s]	100, 60
Cutting length l [mm]	20
Work temperature θ [°C]	-5, 0, 5, 10, 20

2・3 切りくず評価方法

切りくずの表面の評価は表面粗さ、表面粘着力、表面露出元素の3項目により実施した。本被削材は常温では柔軟であるため、接触式では触針が被削材を押込むことが懸念される。そこで、表面粗さ測定にはレーザー干渉を利用する非接触式表面粗さ計（菱化システム社；VS-Measure）を用いた。表面粘着力の測定には、プローブタック試験機（RHESCA 社；TAC-II）を使用した。φ5.1 mm（SUS304）の円筒端面のプローブをシート表面に0.5 Nの荷重で10 s間押付け、引き離す時の最大引張り力を粘着力として定義した。表面に露出した成分の分析にはエネルギー分散型のEPMA（PHILIPS 社；E-SEM XL-30）を用いた。元素分析時の表面画像は同機のSEM機能で撮像した。

切りくずの断面の状態をSEM観察した。切りくずの断面は次の手順で加工した。マイクローム（大和光機社製；REM-700）で断面を荒削りした後、ドラエッチングする。エッチングには反応性イオンエッチング装置（アルバック社製；CSE4110）を用いた。アルゴンガスと酸素ガスを1：4の割合で注入し100 W、0.7 MPaで20分間エッチングした。

2・4 工具と被削材の接触面積評価方法

加工時の被削材と工具との接触面積を定量化した。切りくずと工具の接触面積がわかるように、すくい面上にホワイトボード用マーカーのインク（PILOT 社製；WBMA-40RF-L）を塗布した。ホワイトボードマーカーは、アルコール系溶媒を使用しており、溶媒が蒸発した塗料は、力がかかると容易に脆性破壊し被着体から剥離する。この現象を利用して、被削材と工具の接触部の明確化を図った。切りくずと接触した表面は塗料が剥離し工具表面が露出するため、接触部分を容易に色で見分けることができる。更に、加工後に塗料を塗布した工具側面をデジタルカメラで撮影し、画像処理ソフト（Image J）を用いて2値化処理をした。その際しきい値は147とした。そして、2値化によって切り分けた接触部分を $0.043 \text{ mm}^2/\text{pixel}$ でピクセル換算し面積を算出した。

3. 実験結果と考察

3・1 すくい角の違いによる被削材の変形

切りくず内の格子パターン数を増やし変形状態を明確化するために、切り込み量は 2.4 mm に設定した。被削材温度は、 0°C に固定した。図6にすくい角の違いによる加工状態の変化を示す。

すくい角 10° において、被削材は大きく変形している。格子パターンの縦線が左側に傾いており、正方格子が平行四辺形状に変形していることから、被削材全体にせん断を受けたと考えられる。なお切りくずの格子パターンが不鮮明である理由は、切りくずが切れ刃稜線（紙面に垂直）方向に膨らんでいることが要因である。工具が被削材にせん断変形を与えるものの、切れ刃先端付近のせん断破壊が進展せずに、被削材が切れ刃稜線方向に膨らんだためと考える。すくい角 30° では、 55° に比べ切れ刃先端付近でのせん断面が明らかになっている。また、切れ刃先端で亀裂が発生している。これは、すくい面が被削材をむしり取ることで発生していると推測する。すくい角が 55° 、 68° ではクラックの発生が見られず、明確なせん断面は観察されない。刃先で被削材を分離し、工具側面で被削材を押し分ける、くさびの打ち込み加工⁽⁶⁾⁽⁷⁾のような現象である。

本実験で用いた軟質材において、すくい角が小さい場合、被削材は切れ刃先端部だけでなく被削材の大部分の領域でせん断変形を受ける。また、連続型の切りくずは得られるものの厚みが切れ刃稜線方向に大きくばらつく。そして、すくい角を大きくすると、せん断変形は減少する。このように加工現象は、すくい角が大きくなるに従ってせん断からせん断を伴わない切断へと推移する。

3・2 すくい角の違いによる切削抵抗の変化

図6に示した実験の切削抵抗の変化について検証した。図7にすくい角 α 毎の切削抵抗の変化を示す。主分力は、すくい角が大きくなるとともに減少している。背分力はすくい角 55° 以上で負になっている。負の背分力は、木材やプラスチックの二次元切削でも確認されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

この結果について以下のように考察した。被削材の変形の結果（図6）から、すくい角が大きいと、くさびを被削材に打ち込んだように、刃先で被削材を分離し、工具側面で被削材を押し分けながら加工が進展していくと推測する。工具側面で被削材を切りくず排出側に持ち上げようとする力が増加し背分力が負になったと考える。図8には、背分力が負になるとき被削材が動かされる方向と、すくい面に平行な力 F_p 、垂直な力 F_v を示す。

Fig. 6 Relationship between rake angle α and morphology of chip
 $\beta = 1^\circ$, $h = 2.4 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $v = 100 \text{ mm/s}$, $l = 20 \text{ mm}$, $\theta = 0^\circ\text{C}$

例えば、V字型のくさびのように刃の側面の角度が対称の場合、すくい面側と逃げ面側で均等に被削材を押すため、背分力成分は相殺されゼロに近い値になる⁽¹⁰⁾。しかし、本実験で用いた工具のように、切削方向に対して刃の形状が非対称、つまり正の逃げ角がついている場合、すくい面側で被削材を分離する作用が強くなると想定される。よって、被削材は切りくず排出側に押し上げられ分離され、その結果として背分力が負になっていると考える。

3・3 すくい面多段化

背分力が負になると、刃先が浮きやすくなり切りくずの厚みに影響を与えることが懸念される。製品生産のため切削面積の大型化を図った場合、シート（切りくず）面内の厚みばらつきに繋がる。一方で、最小の変形で加工をするためには、すくい角は大きい方が望まれる。つまり、大きなすくい角の形状を維持しながら、背分力を制御する方法が必要になる。

切削加工では、切りくずを介してすくい面が被削材に力を与える。そこで、背分力を制御する手段として、すくい面の形状に着目し、図9に示す2段すくい面を有する工具を考えた。すくい角が大きい第1のすくい面と、すくい角が小さい第2のすくい面を持つ。すくい面の多段化はチップブレーカーとして効果があることが知られている⁽¹¹⁾。本研究では、加工時に、第2のすくい面上の力 $F_{p'}$ と $F_{v'}$ が新たに加わり、第2のすくい面に平行な力 $F_{p'}$ が背分力を制御するのではないかと考えた。

本実験では、第1のすくい面のすくい角を68度、第2のすくい面のすくい角を10度として、第2のすくい面の位置を切れ刃先端から2 mm、4 mmと変化した場合の切削抵抗の変化について検証した。第2のすくい面を設置せず第1のすくい面のすくい角を10度にした工具を用いた条件を、第2のすくい面が切れ刃先端から0 mmにある条件として取り扱った。

Fig. 7 Plot of cutting force along cutting path

$\beta = 1$ degree, $h = 2.4$ mm, $b = 10$ mm, $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm, $\theta = 0$ °C

Fig. 8 The dynamic model at high rake angle

Fig. 9 The model of tool with the second rake face

実験結果を図 10 に示す. 第 2 のすくい面がない場合と第 2 のすくい面を 2 mm, 4 mm で設置した場合, いずれも主分力には大きな変化は見られない. 一方, 背分力は第 2 のすくい面の位置を切れ刃先端に近づけると顕著に増加しているのがわかる. 第 2 のすくい面が切りくずを介して, 被削材を押付ける力が働いていると考える.

本実験の加工状態を図 11 に示す. 第 2 のすくい面が 0 mm の場合は, 被削材がせん断変形を受けているのがわかる. 切れ刃先端から 2 mm に第 2 のすくい面がある場合, 切れ刃先端での被削材の変形は減少しているものの, 第 2 のすくい面と接触する際に切りくずの変形が生じる. 切れ刃先端から 4 mm の場合は, 被削材および切りくずに変形は殆ど見られない. 図 10 の背分力と照らし合わせると, 背分力がゼロに近い値となる切れ刃先端から 2 mm の第 2 のすくい面を用いた場合, 切りくずを製品シートとして扱うことは厳しく, 切れ刃先端から 4 mm の場合は, 切りくずの形状に問題はないが, 背分力をゼロにする効果は僅かである.

Fig. 10 The change of cutting force with the second rake face

$\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 60$ mm/s, $l = 20$ mm, $\theta = 0$ °C

Fig. 11 The change of chip's morphology with the second rake face

$\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 60$ mm/s, $l = 20$ mm, $\theta = 0$ °C

本実験から、第2のすくい面で背分力の制御が可能であることはわかった。今後更に、背分力の絶対値を小さくかつ被削材および切りくずの変形を最小に抑える、第2のすくい面のすくい角と切れ刃先端からの距離の最適化を行っていきたい。

3・4 被削材温度依存性

被削材の変形が小さくなったすくい角 68 度を用いて、変形の被削材温度依存性を検証した。切り込み量は 1 mm とした。被削材の変形状態を格子パターンで確認した。実験結果を図 12 に示す。

温度が高くなるにつれて、格子パターンが大きく歪んでいるのがわかる。被削材温度 20 °C では、切れ刃先端で被削材は圧縮され、分離され難くなっており、すくい角 68 度の工具でも、切れ刃先端で被削材を圧縮している。切りくずも大きく変形している。一方で低温の 0 °C では、変形は殆ど確認されない。温度が上昇するに従って、被削材の弾性率が減少し、樹脂の粘性の影響を受けたためと考える。

切削抵抗を図 13 に示す。被削材温度が上昇すると、主分力は減少し、背分力は正の方向に近づく。主分力の減少は、被削材の柔軟化が要因であると考えられる。背分力が正の方向へ変化することは、被削材がすくい面側へ押し上げる現象から逃げ面側へ圧縮される方向へ変わることを意味する。高温化によって切れ刃先端で分離されず、切れ刃先端で与える圧縮力が、被削材を逃げ面側へ押す作用へ関与していると推測する。

実験結果から得られた切削抵抗の値を使用して以下の式から、すくい面上の力を算出した。この式はすくい面が切りくずを介して被削材にせん断変形を与える二次元切削の理論から得られるものである。すくい面が加工に大きく関わると仮定し本式を使用した。結果を図 14 に示す。

$$F_p = F_x \sin \alpha + F_y \cos \alpha \quad (1)$$

$$F_v = F_x \cos \alpha - F_y \sin \alpha \quad (2)$$

Fig. 12 The change of chip's morphology depending on work temperature
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 13 Cutting force at various work temperature
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm,
 $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 14 Force on rake face at various work temperature
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm,
 $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 15 The picture of adhesion area on rake face
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm,
 $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 16 Adhesion area on rake face with work material depends on work temperature

被削材温度が 20 °C の場合、すくい面での摩擦力が急激に増加している。被削材と工具すくい面側の接触状態を観察した。すくい面の接触箇所の画像を図 15 に、接触面積の推移を図 16 示す。図 15 に示した画像の左端が工具切れ刃先である。工具すくい面は赤色の水性塗料で塗布されており、工具の画像左端において、切りくずと接触した部分の塗料が剥がれているのがわかる。接触部分は被削材温度とともに拡大しているのも分る。図 16 は、画像処理によって接触して塗料が剥がれた面積を定量化したものである。被削材温度が 10 °C 以上になると、接触面積の増加が顕著になっているのがわかる。

被削材および工具表面には少なくとも微小凹凸は存在する。両者界面を潤滑剤がなく乾燥した環境で摩擦した場合、凸部どうしが接触した状態となる。表面粗さの凸部どうしが接触している部分を真の接触面積と言い、微小凹凸を平滑と仮定した時の接触面積を見かけの接触面積と言う。図 15 で示した工具と切りくずの接触部は、微視的に見た接触ではなく巨視的に見た接触状態、つまり見かけの接触面積を示していると考えられる。そして、摩擦力は見かけの接触面積と見かけの摩擦応力の積であること⁽¹²⁾⁽¹³⁾から、図 15 および図 16 で示した高い被削材温度 20 °C での接触面積の増加は、図 14 に示した摩擦力の増加を表しているものと考ええる。見かけの摩擦応力とは、真の接触面積で発生した凝着によるせん断破壊応力に、真の接触面積と見かけ上の接触面積の比を掛けた値である。

3・5 切りくず表面の特性

すくい角が 68 度と大きい場合でも、被削材温度が高くなると被削材の変形が発生することがわかった。その時の切りくず表面の変化を表面粗さと表面の粘着力で評価した。

図 17 にシート表面の SEM 画像を示す。被削材温度が高い場合、シート表面に部分的に盛り上がった箇所が多数観察された。図 18 にすくい面側の切りくず表面粗さの温度依存性を示す。被削材温度が高くなるに従い表面粗さが増加している。これは、図 16 の結果からわかるように切りくずと工具の接触面積が増え、見かけの接触面積増加によって摩擦力が大きくなったためと考える。被削材表面の粘着力測定結果を図 19 に示す。粘着力は被削材温度の上昇とともに増加している。つまり、被削材温度が高く切りくず表面粗さが大きくなるほど、粘着力が高くなる傾向にある。従来の粘着テープの研究例⁽¹⁴⁾では、表面粗さが大きくなるほど粘着力は低くなる傾向が見られるので、本研究の結果はこれとは逆の相関を示している。

この要因を調査するため、さらに切りくず表面の樹脂量を EPMA で調べた。図 20 に黒鉛単体と被削材温度 0 °C で加工した切りくずのスペクトルを示す。切りくずでは、アクリルゴム由来のピーク P1, P2 が確認できた。ピーク高さの温度依存性を図 21 に示す。ピーク高さは被削材温度によらずほぼ一定である。EPMA では表層 1~3 μ m に存在する元素を検出するので、その範囲に存在する樹脂量は、被削材温度によらずほぼ一定であることがわかる。つまり、表層近傍に存在する樹脂量と粘着力との相関はない。

Fig. 17 The picture of chip's surface

$\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 18 Relationship between roughness and work temperature

$\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 19 Relationship between adhesion strength and work temperature

$\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

切りくず表面（図 17）において，被削材温度 0 °C，20 °C の場合とも切削方向に鱗状の紋様が見られる．被削材温度 20 °C の突起部頂点ではそのような鱗状の紋様が見られない．つまり，被削材温度が高く鱗状の紋様がない突起部が多いほど粘着力が高く，鱗状の紋様を示す部分が多いほど粘着力が低くなる関係にある．さらに鱗状の切りくずの断面（図 22）を見ると，表面付近では黒鉛粒子が切削方向に傾斜している様子が観察される．

以上の諸現象から，切りくずの表面粗さが大きくなるほど粘着力が高くなる原因を以下のように考えた．図 23 に鱗状の紋様部分と突起部分の推定断面図を示す．

- (1) 工具との摩擦で切りくず表面付近の黒鉛粒子が傾斜する．
- (2) 黒鉛粒子の傾斜により形成された表面の鱗状の紋様は，傾斜した黒鉛が樹脂の流動を妨げるため粘着性が低下する．図 23 (a) に示すように黒鉛粒子間には樹脂が存在することが想定されるため，EPMA による表面樹脂量に大きな変化はないと考えられる．
- (3) 突起部は鱗状の紋様が見られないことから，黒鉛の傾斜がないと考えられる（図 23 (b)）．そのため樹脂の流動は妨げられず，粘着力は低下しない．
- (4) 突起部が多い切りくずは高い粘着性を示す．

以上が被削材表層の断面構造から推測した表面粗さと粘着力の関係の仮説である．

一方で，突起部はすくい面での樹脂の凝着摩擦を増加させる要因になると考える．その理由は，摩擦力の被削材温度依存性から説明できると考えた．先ほど述べたように摩擦力は接触面積と見かけの摩擦応力の積で表せる．見かけの接触面積は図 15，16 の結果から 10 °C 以降で大きく増加しているのがわかる．ここで，切りくずの粘着力が凝着部のせん断破壊強さに相関があると仮定すると，図 19 の結果から見かけの摩擦応力は温度とともに緩やかに増加していると言える．これらの結果から，接触面積と粘着力の積の傾向は，図 14 に示した摩擦力の被削材

温度依存性に一致するよう見える． よって， 温度が上昇するとすくい面での見かけの接触面積と樹脂の凝着によるせん断破壊強さが増加し， 摩擦力が大きくなった結果， シート表面粗さが悪化したと考えることができる．

Fig. 20 EDX spectrum of chip and graphite

Fig. 21 Content of element (P1, P2) within resin depends on work temperature
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm,
 $v = 100$ mm/s, $l = 20$ mm

Fig. 22 The picture of chip's surface and cross-sectional
 $\alpha = 68$ degree, $\beta = 1$ degree, $h = 1.0$ mm, $b = 10$ mm, $\theta = 0$ °C

Fig. 23 The image of cross-sectional near the surface

4. 結 言

今回、軟質コンポジット材の二次元切削実験を行い、その加工現象の解明と切りくず表面の評価を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) すくい角の違いによって被削材の変形状態は変化した。すくい角を大きくすると、せん断変形が減少し、工具側面と切れ刃先端で被削材を分離するような加工となった。
- (2) 主分力は、すくい角を大きくすると減少した。一方で、背分力は大きなすくい角（55 度以上）で負の方向に変化した。これは工具すくい面で被削材を切りくず排出側へ持ち上げる作用によるものと考えられる。
- (3) すくい面を 2 段化した工具を用いることで、背分力を制御できることがわかった。
- (4) すくい面と工具の接触面積は、被削材温度の上昇にともない増加する傾向を示した。
- (5) 被削材温度が高くなると切りくず表面の粗さ、粘着力が増加した。これは、高温の被削材ではシート表層で黒鉛が傾斜しない部分が現れ、樹脂の突起部が形成されるためであると考えた。
- (6) 高い被削材温度での摩擦力の増加は、切りくずと工具の見かけの接触面積の増加と、樹脂の粘着力増加から推測されるせん断破壊応力の増加が要因であると考えた。

文 献

- (1) 山本礼, 吉田優香, 吉川徹, 矢嶋倫明, 関智憲, “黒鉛粒子配向制御によるコンポジットシートの高熱伝導化”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 13, No. 6 (2010), pp. 462-468.
- (2) Malak, S., and Anderson, I., “Orthogonal Cutting of Polyurethane Foam”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 47, (2005), pp. 867-883.
- (3) 小林昭, “プラスチック切削における切りくず生成機構”, 日本機械学会論文集, Vol. 30, No. 220 (1964), pp. 1467-1475.
- (4) Yamamoto, R., Morita, N., Yamaoka, K., and Yajima, M., “A Cutting Method of a Soft Material to Make Thin Sheet” *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, Vol. 1, (2010), pp. 197-200.
- (5) 山本礼, 森田昇, 矢嶋倫明, 山岡克徳, “切削加工を用いた軟質コンポジット材のスライシング”, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 11 (2010), pp. 1255-1260.
- (6) 土肥修, 横山正夫, “木材切削力解析: 第 1 報, 先割れをとまなう二次元切削の場合”, 日本機械学会論文集, Vol. 40, No. 340 (1974), pp. 3523-3532.
- (7) Wyeth, D., “An Investigation into the Mechanics of Cutting using Data from Orthogonally Cutting Nylon 66”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, (2008), pp. 896-904.
- (8) 永澤茂, 菊池一哉, 多賀智治, 村山光博, 福澤康, 片山勇, “くさび刃による板紙の切断特性”, 日本塑性加工学会誌, Vol. 48, No. 558 (2007), pp. 64-68.
- (9) 金澤憲一, 李瀛, 史寅, 小泉親秀, “ナイフ状刃物による切断加工に関する研究 (第 1 報)”, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 9 (1996), pp. 1340-1344.
- (10) 木村志郎, 横地秀行, 竹中左恵, “くさび型刃物による圧入切削 (第 2 報)”, 木材学会誌, Vol. 30, No. 4 (1984), pp. 309-314.
- (11) Fang, N., “Machining with Tool-chip Contact on the Tool Secondary Rake Face”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 44, (2002), pp. 2337-2354.
- (12) 白樫高洋, 臼井英治, “工具すくい面の摩擦特性”, 精密機械, Vol. 39, No. 464 (1973), pp. 966-972.
- (13) 臼井英治, 白樫高洋, 加工の力学入門, 改訂第 1 版 (2006), p. 27, 東京電機大学出版局.
- (14) Katainen, J., Paajanen, M., Ahtola, E., Pore, V., and Lahtinen, J., “Adhesion as an Interplay between Particle Size and Surface Roughness” *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 304, No. 2 (2006), pp. 524-529.