

# 回転工具による発泡スチロールの切削

大石 健司\*・村上 豪一\*\*

## Cutting of styrofoam with Rotary Cutter

Kenji Oishi \*, Koichi Murakami\*\*

### Abstract

The styrofoam is used well for the model material of the Evaporative Pattern Casting Process. However, the styrofoam is difficult to cut, because it is soft and low-intensity. It is found that the styrofoam is easy to cut with the cutter knife on large rake angle and large inclination angle. In this paper, experiments to obtain a basic data of plane cutting are carried out with round blade. As a result, it has been found that the good surface can be obtained with 45° or more rake angle and 70° or more inclination angle. Furthermore, the prototype rotary cutter is made and examinations are carried out.

**Key words:** styrofoam, cutting, rake angle, inclination angle, surface roughness, cutting processing

### 1. 緒言

消失模型鑄造法の模型材料として、発泡スチロールが多く使用されており、3次元形状の作成には通常の工作機械を用いた切削加工が適用されている。しかし、被削材が軟質低強度であるため、通常の金属加工用、あるいは木工用の切削工具を用いると、切りくずが不連続な粉状、または塊状となり、「削る」より「むしり取る・砕き取る」といった加工状況となり、加工面にむしれ痕や欠けの穴が残存する。このため、多くの場合手作業による補修が必要となる。

発泡スチロールは鋭利な刃で工夫すれば容易に切断することができる。これまでにカッターナイフを用いて、低速2次元切削<sup>1)</sup>を行っており、工具のすくい角、傾斜角が大きければ良好な切削となることを報告している。また、発泡スチロールの外丸削り<sup>2)</sup>でも、低速2次元切削の実験と同様に、すくい角、傾斜角が大きければ極めて良好な切削が可能であることを明らかにしている。

本研究ではこれらの実験結果を3次元加工用回転工具に応用することを目標に、工具を円形刃とした平面切削の基礎資料を取得する実験を行った。そして良好な切削となるときすくい角、傾斜角の領域を幾何学的に明らかにした。さらに、それを基に回転工具を作成し、切削実験を行い、平面切削の場合と比較し、切削良好となる工具形状を幾何学的に検討した。

### 2. 直線刃による平面切削

図1は鋭利な直線刃物で工具のすくい角、傾斜角などを変えて低速2次元切削を行った結果である。図1(a)は良好な切削の場合で、厚さが一定の連続した切りくずを生成している。一方、図1(b)は切削不良の場合で、切りくずはむしり取った、または欠き取ったような塊状に生成され、仕上げ面にもむしれ痕や欠けによる凹凸が残存する。

図2にすくい角、傾斜角を変えたときの良好切削領域を示す。すくい角、傾斜角が小さいと切削不良となるが、すくい角、傾斜角がともに45°以上の領域では良好な切削が可能であることがわかる。

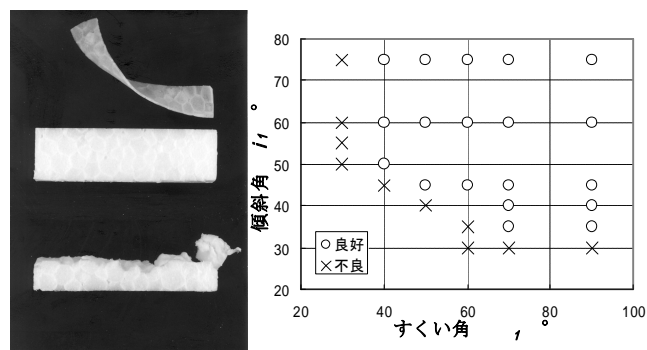


図1 発泡スチロールの切削形態 図2 傾斜切削の効果

\*電子機械工学科

平成22年8月31日受理

\*\*専攻科生産システム工学専攻(現:(株)アルトナー)

### 3. 円形刃による平面切削

#### 3.1 実験方法

回転工具の基礎資料を得るため、切れ刃を円形刃とし、これを直線運動させて平面を加工する(以下、平面切削)を行った。

被削材は実際に消失模型に使用されているもので、原粒径 1.1~1.2mm, 発泡倍率 50 倍, 曲げ強さ約 0.3MPa, 圧縮強さ約 0.1MPa のものである。図3は実際に工具を取り付けた実験装置の全体写真である。刃物は切れ刃の鋭利な市販の切断用ナイフ(オルファ(株)製), 直径 60mm, 刃厚 0.35mm, 材質 SKS 7 タングステン鋼を購入のまま使用した。

すくい角  $\gamma_1$  は便宜上、円形刃本体を基準とした。図4はすくい角  $\gamma_1$  deg の工具に傾斜を与えていない状態、および傾斜角を  $i_1$  deg だけ与えた状態を示す。

実験には、PHOENIX製のフライス盤 FM-100 の回転軸を固定して使用し、そのテーブルに THK 製アクチュエータ VLA 型を X 軸方向に固定し被削物固定台とした。

表1に実験条件を示す。すくい角  $\gamma_1$  を4段階、傾斜角  $i_1$  を3段階ずつ設定し、それぞれの組み合わせで切削を行った。切削条件は、切込み  $h$  を 1mm, 切削速度  $V$  を 50mm/sec, 送り量  $f$  を 3mm とした。



図3 実験装置の外観

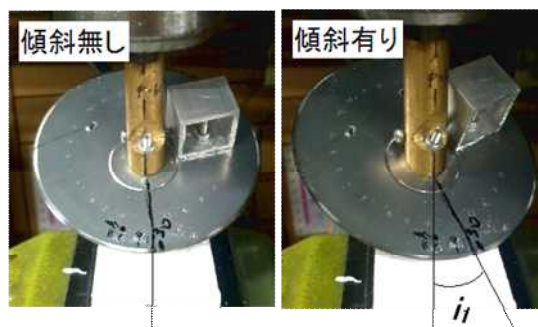


図4 傾斜角  $i_1$  の設定方法

表1 実験条件

実験条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・切込み <math>h</math> 1mm</li> <li>・送り量 <math>f</math> 3mm</li> <li>・切削速度 <math>V</math> 50mm/sec</li> <li>・すくい角 <math>\gamma_1</math> 30, 45, 60, 70°</li> <li>・傾斜角 <math>i_1</math> 45, 60, 70°</li> </ul>
------	---

#### 3.2 実験結果

図5は平面切削後の仕上げ面の外観写真である。また、図6はそのときの切りくず形態の写真である。

傾斜角  $i_1$  が 45° のときはいずれのすくい角  $\gamma_1$  でも、切りくずは全て粉状となり、仕上げ面はむしれ痕で形成されており、良好な切削とは言えない。傾斜角  $i_1$  が 60° のときはすくい角 45° 以上での切りくずは、連続しているが多少むしり取ったようなものとなっており、仕上げ面は平らであるが毛羽立った状態となっている。さらに、傾斜角  $i_1$  が 70° のときは、いずれのすくい角  $\gamma_1$  でも連続した切りくずを排出し、つやが出るほどきれいな仕上げ面となることわかる。レーザ変位計により粗さを測定すると、 $Rz:0.1\mu\text{m}$  ほどとなった。これらの結果から円形刃による平面切削ではすくい角を 45° 以上で傾斜角  $i_1$  は十分大きくする必要があることが分かる。

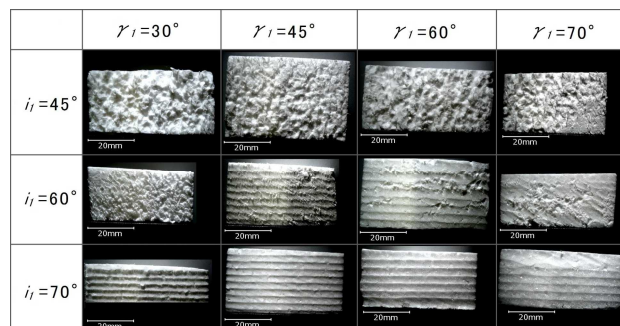


図5 仕上げ面の外観

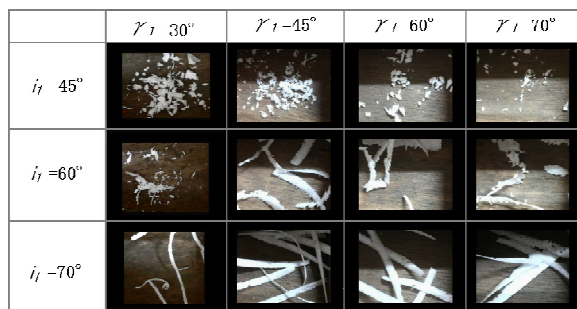


図6 切りくず形態

図7にすくい角  $\gamma_1$  と傾斜角  $i_1$  を変化させたときに良好な切削となる領域を示す。「○」で示している領域ではつやがでるほど良好な仕上げ面となっており、破線より上の領域で良好な切削となっている。さらにすくい角  $\gamma_1$  が  $30^\circ$ 、傾斜角が  $i_1 80^\circ$  で切削を行うと良好な切削となった。この図から傾斜角  $i_1$  が  $70^\circ$  以上であればほぼ良好な切削が可能であることが分かる。

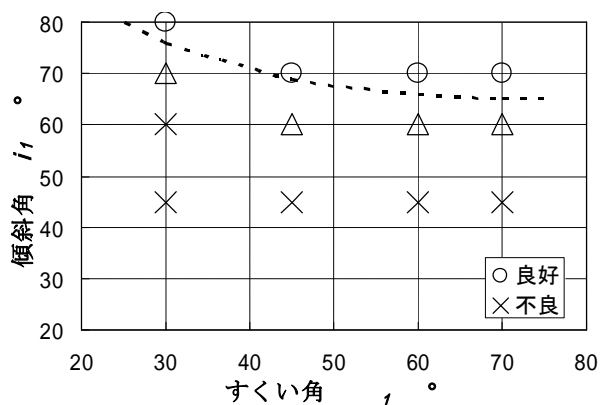


図7 すくい角  $\gamma_1$  と傾斜角  $i_1$  による切削良否の変化

### 3. 3 工具形状の幾何学的な検討

表2に示す各記号を使って、切削に関与する切れ刃の幾何学形状を検討する。

直線刃ではすくい角、傾斜角とも切れ刃のどの部分でも同一であるが、円形刃の場合、単に円形刃本体のすくい角、傾斜角では整理できない。つまり、円形刃では切れ刃が曲線であるため、切削を行う切れ刃の位置によって、それぞれすくい角  $\gamma$ 、傾斜角  $i_1$  が変わってくる。

図8に示すように、すくい角  $\gamma_1$  を与えた円形刃物の傾斜角  $i_1$  を大きくしていくと、切削方向から見たすくい角  $\gamma_2$  (実効すくい角) が大きくなっていく。

また、図9に示すように、すくい角  $\gamma_1$  を与えた円形刃に切込み  $h$  を与えると、切削幅両端の点  $x$ 、 $y$  での  $Z$  軸方向から見た切れ刃の接線の角度が変化してくる。この接線の角度の変化量は傾斜角  $i_2$  に一致し ( $90^\circ$  と接線の角度の差が傾斜角  $i_1$  である)、切削方向側 (図9

の点  $y$ ) では傾斜角  $i_1$  が減少することになる。このため、切込み  $h$  は傾斜角  $i_1$  が切削不良となる領域 ( $70^\circ$  以下) にならないよう制限されることになる。

上述のすくい角  $\gamma$ 、傾斜角  $i_1$ 、切込み  $h$  の関係を明らかにするために、円形刃による工具形状を幾何学的に考察した。

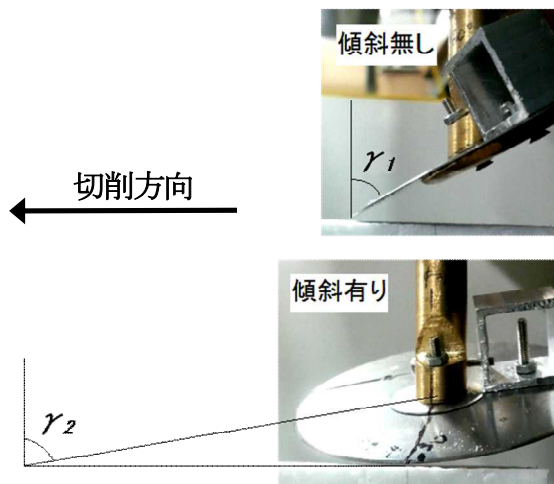


図8 傾斜を与えたときの実効すくい角  $\gamma_2$

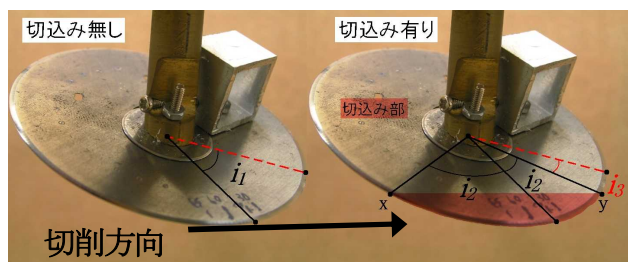


図9 切込んだときの傾斜角の変化

表2 記号一覧

$\gamma_1$	すくい角
$\gamma_2$	傾斜を与えたときの切削方向から見たすくい角 (実効すくい角)
$\gamma_3$	逃げ角
$\gamma_4$	傾斜を与えたときの切削方向から見た逃げ角
$i_1$	傾斜角
$i_2$	切削幅両端部の点において、 $Z$ 軸方向から見た工具切れ刃の接線の角度の変化量
$i_3$	切削幅両端部の切削方向前面での傾斜角 (実効傾斜角)
$h$	切込み
$f$	送り
$r$	工具半径

### 3. 4 傾斜角 $i_1$ のとき切削方向のすくい角 $a_2$

傾斜をつけると切れ味が良くなる一つの理由として、切削方向から見たすくい角  $a_2$  (実効すくい角) が大きくなるということが挙げられる。これは直線刃でも同じことが言える。図10は、すくい角  $\gamma_1$ 、傾斜角  $i_1$  を与えた円形刃物の三面図である。この図は傾斜方向から見たものとなっている。実効すくい角  $a_2$  を求めると式(1)が得られる。

$$A = \sqrt{r^2 + (r \tan i_1)^2} = r\sqrt{1 + \tan^2 i_1}$$

$$B = r \sin a_1 = r \cos \gamma_1$$

$$a_2 = \sin^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

$$a_2 = 90 - a_1 = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{\cos \gamma_1}{\sqrt{1 + \tan^2 i_1}}\right)$$

..... (1)

ここで、

- $a_2$ : 実効すくい角
- A: 切削方向の工具面沿いの斜辺
- B: 切削面から工具中心までの高さ
- $a_1$ : 実効逃げ角

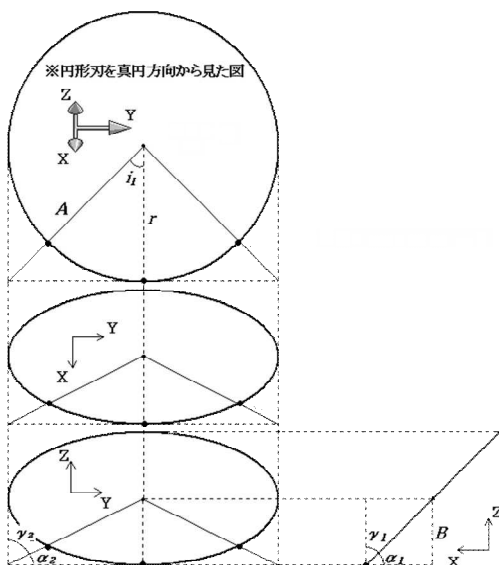


図10 すくい角  $\gamma_1$ 、傾斜角  $i_1$  を与えた工具の三面図

図11に式(1)から求めた実効すくい角  $a_2$  と傾斜角  $i_1$  の関係を示す。傾斜角  $i_1$  が大きくなるにつれて実効すくい角  $a_2$  も大きくなっているのがわかる。

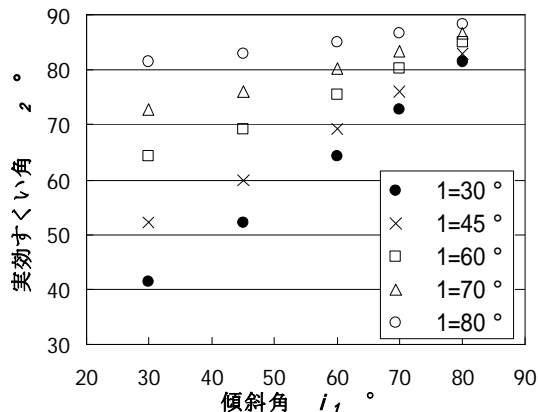


図11 傾斜角  $i_1$  と実効すくい角  $a_2$  の関係

### 3. 5 切削幅端部での実効傾斜角

円形刃に切込み  $h$  を与えていくと、切削幅が増加する。同時に、その部分の切れ刃の傾斜角が変化する。つまり工具本体の傾斜角を確保しても、切り込み  $h$  が大きくなると切削幅端部の傾斜角が変化する。このため、切削前面の切れ刃の実効傾斜角  $i_3$  が小さくなって切削不良となる恐れが生じる。このことにより、切り込み  $h$  が制限されることになる。

切削幅両端で傾斜角の変化量が最大となるので、これを  $i_2$  として求めると(2)式で求められる。これから、切削幅端部での実効傾斜角は(3)式で求められる。

$$i_2 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{h}{r \cos \gamma_1}\right)$$

..... (2)

$$i_3 = i_1 - i_2$$

..... (3)

ここで、

- $i_1$ : 初期設定の傾斜角
- $i_2$ : 切込みによる傾斜角の変化量
- $i_3$ : 切削幅端部の実効傾斜角

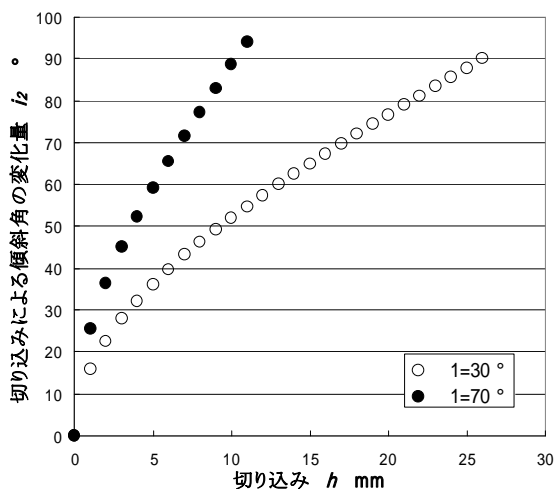


図12 切り込み  $h$  と傾斜角の変化量の関係

図1 2は円形刃の半径  $r$  を30mmとしたときの切込み  $h$  と実効傾斜角の変化量を示す。切込み  $h$  が増大するに伴い変化量が増大する。この結果、実効傾斜角  $i_3$  は減少することになる。すくい角  $\gamma$  が大きいほど、切込み  $h$  による影響が大きくなることがわかる。

#### 4. 円形刃の回転運動による平面切削

##### 4. 1 実験方法

図1 3, 1 4に示すように、平面切削の工具を、フライス盤のZ軸と直角に取り付け、これを回転させて側面切削で平面切削を行った(以下、回転切削と呼ぶ)。すくい角と傾斜角は平面切削時と同様に設定した。アクチュエータはY軸方向に取り付けた。ただし、このときX軸を切込み方向、Y軸が切削方向、Z軸が送り方向とした。

仕上げ面の評価は外観写真と、キーエンス(株)製のレーザ変位計LK G30, 測定範囲 $\pm 5$ mm, スポット径30 $\mu$ で表面の凹凸を測定した。

表3に実験条件を示す。すくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  を4段階ずつ設定し、それぞれの組み合わせで切削を行った。切削条件は、切込み  $h$  を1mm, 回転数  $N$  を200rpm, 送り量  $f$  を3mmとした。

表3 実験条件

実験条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・切込み <math>h</math> 1mm</li> <li>・送り量 <math>f</math> 3mm</li> <li>・回転数 <math>N</math> 200rpm(切削速度: 63m/min)</li> <li>・すくい角 <math>\gamma</math> 30, 45, 60, 70<math>^\circ</math></li> <li>・傾斜角 <math>i_f</math> 30, 45, 60, 70<math>^\circ</math></li> <li>・テーブル送り 50mm/sec</li> </ul>
------	---

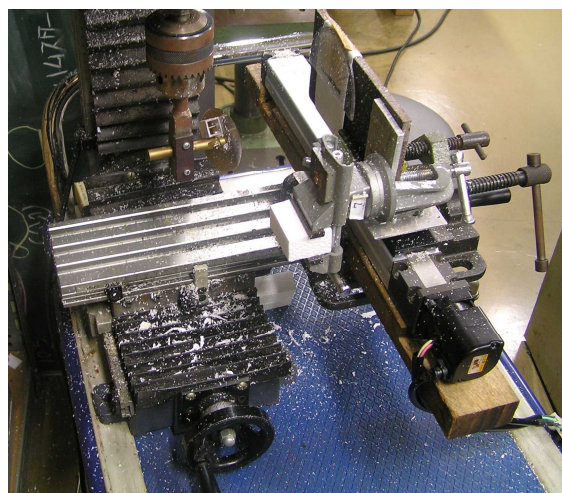


図1 3 実験装置の概観

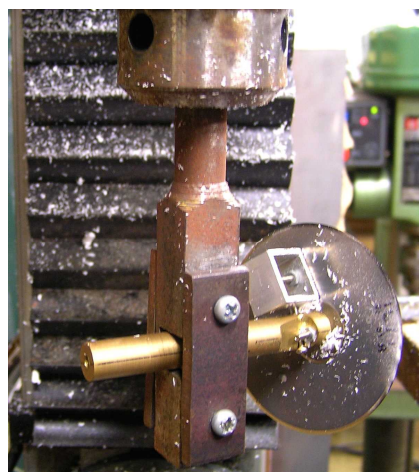


図1 4 取り付け工具

##### 4. 2 実験結果

図1 5は回転工具でアップカットを行ったときの仕上げ面の外観写真である。図5の平面切削に比較して明らかに異なる面となった。つまり、すくい角、傾斜角が小さい時でも、平面切削では、むしろ痕の凹凸が顕著であったが、回転切削ではむしろ痕が見られない。また、すくい角、傾斜角が大きい時は平面切削ほど良好な面にらないことが分かる。

図1 6に仕上げ面の最大高さ  $Rz$  とすくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  の関係を示す。すくい角  $\gamma$  と傾斜角  $i_f$  が小さいと最大高さ  $Rz$  が大きくなり、すくい角  $\gamma$  と傾斜角  $i_f$  が大きくなる程最大高さ  $Rz$  は小さくなる。

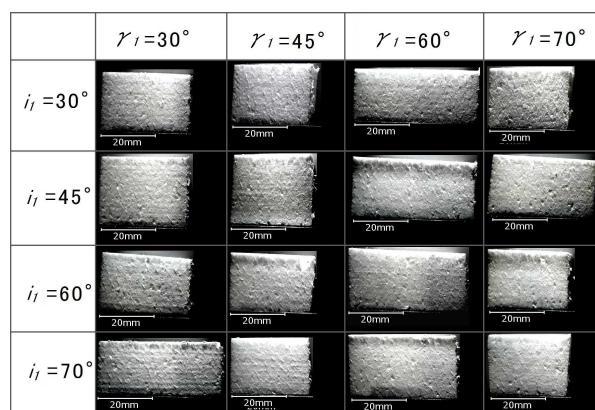


図1 5 仕上げ面の外観

すくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  とともに30 $^\circ$  のとき  $Rz=0.36$ mm と大きく、すくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  とともに70 $^\circ$  のとき  $Rz=0.16$ mm と最も良好な面となっている。しかし、すくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  とともに70 $^\circ$  で平面切削した場合は  $Rz=0.1$ mm であったため、平面切削よりも劣る結果となった。

またアップカット、ダウンカットの比較では、すく

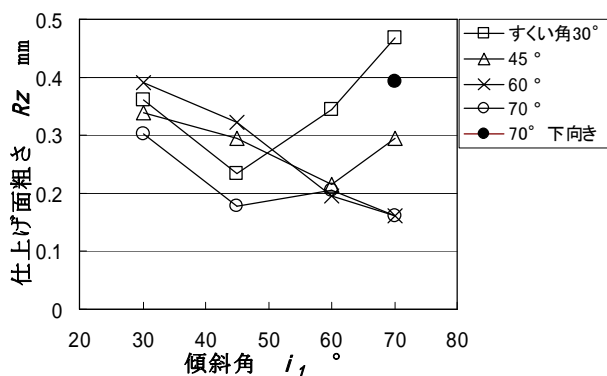


図16 仕上げ面粗さ

い角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  ともに  $70^\circ$  でも, ダウンカットの場合, すくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  ともに  $30^\circ$  のときと変わらない仕上げ面となった。つまり, アップカットの方が良好な面が得られることが分かった。

#### 4.3 考察

回転工具による切削において, 工具形状の幾何学的な考え方は平面切削と同じである。しかし, 仕上げ面粗さ  $Rz$  からわかるように平面切削のときと同じすくい角  $\gamma$ , 傾斜角  $i_f$  であっても, 回転工具として使用した場合は良好な場合で1.5倍ほどの粗さであり, また不良面では逆に回転切削の方が粗さは小さい結果となった。不良面がそれほど粗くないのは, 回転切削の場合切取厚さが小さくなり, 破壊規模も小さくなることが考えられる。また, すくい角, 傾斜角が大きい時に, 回転切削が劣るのは, 回転刃の軌跡による幾何学的凹凸が発生することもあるが, それ以上に粗さが増大している。これらの現象の詳細は現状では不明で今後の課題である。

また, 通常はアップカットでは工具寿命を短縮させるが, 被削材が軟質低強度の発泡スチロールの場合は, 工具摩耗やびびりは発生しないので, アップカットの方が適しているといえる。

#### 5. 結 言

円形刃による平面切削において, 次のことが明らかになった。

- (1) 傾斜角が  $70^\circ$  以上, 傾斜角  $70^\circ$  以上で切削良好となる。
- (2) 実効傾斜角は, 切込みが大きい程減少し, その変化量はすくい角が大きい程大きい。
- (3) したがって, 切り込み  $h$  が制約される。

円形刃を回転工具として使用した場合, 次のことが明らかになった。

- (4) すくい角, 傾斜角が大きいほど良好な切削となる。
- (5) 平面切削ほどすくい角, 傾斜角の影響は大きくない。
- (6) アップカットの方が仕上げ面精度が良い。

#### 参考文献

- 1) 大石健司, 発泡スチロールの被削性—低速二次元切削による検討—, 精密工学会誌, 第72巻, (2006) 第8号, pp1030-1031
- 2) 大石 健司・後藤 誠司, 発泡スチロール切削用工具の開発—外丸削りによる検討—, 弓削商船高等専門学校紀要, 平成19年2月発行, 第29号, pp65-69