

経常研究

# トロコイド加工による切削加工の生産性向上に関する研究

荒井 辰也\* 近藤 弘康\* 水堀 文剛\*

Research on Productivity Improvement in Trochoidal Milling  
ARAI Tatsuya, KONDO Hiroyasu and MONDORI Bungo

トロコイド加工における条件設定の知見蓄積を目的として、工具径や切削条件が切削力に与える影響を調査するとともに、生産性向上の効果について検証を行った。その結果、溝幅に対して工具径が大きいと切削力変動が生じて工具寿命が低下するおそれがあることや、半径方向切込みに比べて1刃送り量や切削速度の増加が切削力変動に与える影響は小さいことが分かった。また、工具摩耗試験を行うことで、通常加工に比べてトロコイド加工は工具寿命が長く、単位時間当たりの加工効率が良いことを実証し、生産性の高い加工が可能となることを示した。

Key words: トロコイド加工、切削力、工具寿命、加工効率、高生産性

## 1 はじめに

切削加工を行う中小企業は、国内外における価格競争のため、生産性向上や製造コストの低減が求められている。中でも、荒加工工程では、金属板等の材料から部品形状の概形を削り出すため除去量が多く、加工時間が長く工具の損傷が大きいことから、加工時間の低減や工具寿命の増大による加工コストの削減効果が大きく、これらを実現する高効率な加工方法が必要とされている。

高効率かつ工具寿命の長い加工を行うための加工法の1種として、トロコイド加工が挙げられる。トロコイド加工とは、円周軌道と直線運動を組み合わせた円弧状の軌跡で加工する方法で、狭い領域であっても工具の負荷を抑えながら、生産性の高い加工を行うことができると注目されている。

本加工法は、加工事例の紹介<sup>1)</sup>や工具寿命評価<sup>2)・3)</sup>といった取組はなされているものの、溝幅に対する工具径や切削条件の選定方法に関する情報は少ない。現場で適用するには、加工法の特徴を活かし、十分に効果を発揮するための条件設定に関わるノウハウの蓄積を必要とする。

そこで本研究では、トロコイド加工の条件設定の知見蓄積を目的として工具径や切削条件が切削力に与える影響を調査するとともに、工具摩耗試験を行うことで生産性向上の効果について検証を行った。

## 2 研究の方法

### 2.1 加工条件が工具負荷に与える影響

#### 2.1.1 加工する溝幅の検討

溝形状を対象とするトロコイド加工において、溝幅に対する工具の選定方法を調査するため、溝幅と工具径の組み合わせによる加工実験を行った。加工機は5軸マシニングセンタ(DMG森精機 DMF180)を用いて、図1に示すとおり被削材(S50C)を切削抵抗測定装置(日本キスラー 9265B)上に固定して加工した。

工具は径10mm、8mm、6mmの3種の超硬スクエアエンドミル(ミスミ TSC-HEM4R10, TSC-HEM4R8, TSC-HEM4R6)を用いた。加工時の工具経路を図2に示す。溝幅に対して工具径が大きくなると、円弧部の加工において1切込みの接触長さが大きくなり、予期せぬ振動が発生する恐れがある。一方、工具径が小さいと、剛性不足による工具破損の恐れがあるため、溝幅に対する工具径



図1 実験段取り

\* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

の影響を調査する必要がある。そこで、加工円弧と工具中心軌跡の径の比を円弧比とし、円弧比が 0.25、0.33、0.50、0.67 となるように工具径ごとに 4 種類の溝幅を設定した。溝幅条件を表 1 に示す。

切削条件は側面切削のメーカー推奨条件と同値とし、軸方向切込みは工具径の 1.5 倍、半径方向切込みは工具径の 0.1 倍とした（表 2）。なお、円弧内側切削の場合、加工円弧の方が工具中心軌跡よりも経路が長くなることから、工具外径の送り速度は工具中心の送り速度よりも大きくなる。そのため、送り速度に円弧比を乗じ、工具外径の送り速度が表 2 の値となるよう補正を行った。以後、トロコイド加工において、送り速度は補正後の工具中心の値で表し、1 刃送り量は工具外径における値で表す。

## 2. 1. 2 切削条件の検討

生産性向上を目的として単位時間当たりの切りくず排出量を増加する際、1 刃送り量  $f_z$ 、切削速度  $V_c$ 、半径方向切込み  $a_e$  の各条件が切削力に与える影響を把握する必要がある。そこで各条件を基準からそれぞれ 0.6 倍、1.4 倍に変更し加工試験を行った。溝幅は 30 mm とし、基準条件は前項の工具径 10 mm、円弧比 0.67 の条件とした。各切削条件を表 3 に示す。なお、実験段取りは図 1 と同様とした。

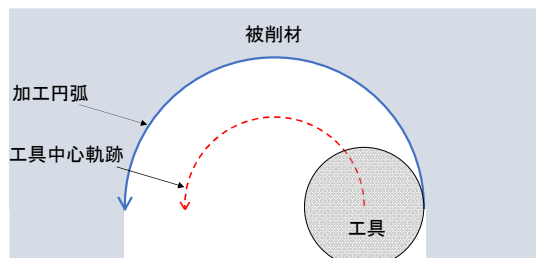


図2 被削材と工具の経路

表1 溝幅条件

| 工具径<br>D       | 10   |      |      |      | 8    |      |      |      | 6    |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 溝幅(加工円弧径)<br>H | 13.3 | 15   | 20   | 30   | 10.7 | 12   | 16   | 24   | 8    | 9    | 12   | 18   |
| 工具中心軌跡径<br>H-D | 3.3  | 5    | 10   | 20   | 2.7  | 4    | 8    | 16   | 2    | 3    | 6    | 12   |
| 円弧比<br>(H-D)/H | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 0.67 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 0.67 |

表2 切削条件

| 工具径 [mm]                 | 10    | 8     | 6     |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| 切削速度 $V_c$ [m/min]       | 100   | 100   | 100   |
| 軸方向切込み $a_p$ [mm]        | 15    | 12    | 9     |
| 半径方向切込み $a_e$ [mm]       | 1.0   | 0.8   | 0.6   |
| 回転数 $n$ [rpm]            | 3,200 | 4,000 | 5,300 |
| 送り速度 $V_f$ [m/min] (補正前) | 1,140 | 1,160 | 1,170 |
| 1 刃送り量 $f_z$ [mm/tooth]  | 0.09  | 0.08  | 0.07  |

## 2. 2 工具摩耗試験

### 2. 2. 1 通常加工との比較

幅 30 mm、長さ 100 mm、深さ 15 mm の溝を加工形状として、トロコイド加工と通常加工での工具摩耗試験を行った。試験段取りは図 3 のとおりとし、摩耗試験用被削材で溝を 1 つ加工するごとに USB カメラで刃先を観察し、切削抵抗測定装置（日本キスラー 9265B）を用いて切削力を測定した。なお、溝は 1 条件につき 4 回加工した。

通常加工のパスは  $a_p$  3 mm の溝加工を 2 回（溝両端）行った後、残りの 10 mm は  $a_e$  4 mm 2 回と  $a_e$  2 mm 1 回の肩削り加工により除去し、これを 1 セットとして深さ方向に 5 セット行うことにより、1 つの溝を加工した（図 4）。

表3 切削条件

|                            | 基準    | $f_z$ 0.6 倍 | $f_z$ 1.4 倍 | $V_c$ 0.6 倍 | $V_c$ 1.4 倍 | $a_e$ 0.6 倍 | $a_e$ 1.4 倍 |
|----------------------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 切削速度<br>$V_c$ [m/min]      | 100   | 100         | 100         | 60          | 140         | 100         | 100         |
| 軸方向切込み<br>$a_p$ [mm]       | 15    | 15          | 15          | 15          | 15          | 15          | 15          |
| 半径方向切込み<br>$a_e$ [mm]      | 1.0   | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 0.6         | 1.4         |
| 回転数<br>$n$ [rev/min]       | 3,200 | 3,200       | 3,200       | 1,920       | 4,480       | 3,200       | 3,200       |
| 送り速度<br>$V_f$ [m/min]      | 760   | 456         | 1,064       | 456         | 1,064       | 760         | 760         |
| 1 刃送り量<br>$f_z$ [mm/tooth] | 0.09  | 0.05        | 0.12        | 0.09        | 0.09        | 0.09        | 0.09        |

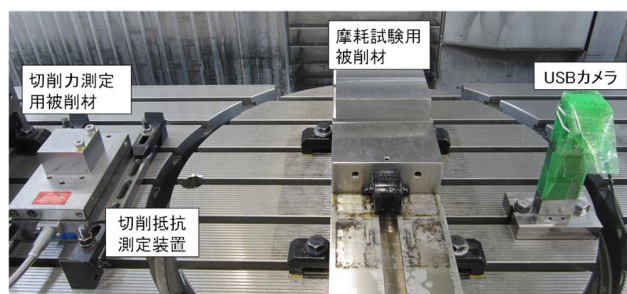


図3 工具摩耗試験段取り

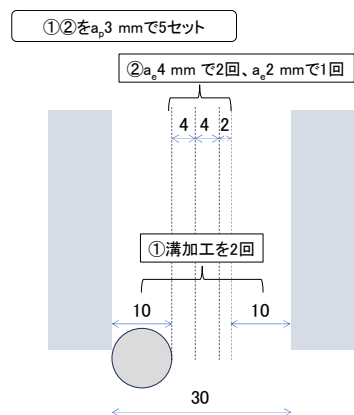


図4 通常加工のパス

各切削条件を表4に示す。トロコイド加工は基準条件とした。通常加工の条件は、単位時間当たりの切りくず排出量  $Q(a_p \times a_e \times V_f / 1000 \text{ cm}^3/\text{min})$  をトロコイド加工と等しくするため、送り速度を 380 mm/min (条件1) としたが、加工時の音が激しく、加工面の凹凸が著しかったため、送り速度を 190 mm/min (条件2) とした。また、切削力は、切削力測定用被削材を表5に示す切削条件で肩削り加工して測定し、主成分の1刃切込みごとの最大値の平均値を算出した。トロコイド加工と通常加工では

表4 工具摩耗試験切削条件

|                                               | トロコイド加工条件 | 通常加工条件 |       |
|-----------------------------------------------|-----------|--------|-------|
|                                               |           | 条件1    | 条件2   |
| 切削速度<br>$V_c$ [m/min]                         | 100       | 100    | 100   |
| 軸方向切込み<br>$a_p$ [mm]                          | 15        | 3.0    | 3.0   |
| 半径方向切込み<br>$a_e$ [mm]                         | 1.0       | 10     | 10    |
| 回転数<br>$n$ [rev/min]                          | 3,200     | 3,200  | 3,200 |
| 送り速度<br>$V_f$ [m/min]                         | 760       | 380    | 190   |
| 1刃送り量<br>$f_z$ [mm/tooth]                     | 0.09      | 0.03   | 0.02  |
| 単位時間当たりの切りくず排出量<br>$Q$ [cm <sup>3</sup> /min] | 11.4      | 11.4   | 5.7   |

表5 切削力測定時の切削条件

|                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| 切削速度<br>$V_c$ [m/min]     | 100                      |
| 軸方向切込み<br>$a_p$ [mm]      | トロコイド加工: 15<br>通常加工: 3.0 |
| 半径方向切込み<br>$a_e$ [mm]     | 1.0                      |
| 回転数<br>$n$ [rev/min]      | 3,200                    |
| 送り速度<br>$V_f$ [m/min]     | 1,140                    |
| 1刃送り量<br>$f_z$ [mm/tooth] | 0.09                     |

$a_p$  が異なることから、結果は摩耗試験開始前の各値で徐し、変化率の比較を行った。

### 3 結果及び考察

#### 3. 1 加工条件が工具負荷に与える影響

##### 3. 1. 1 加工する溝幅の検討

トロコイド加工を1回行った際の切削力波形を図5に示す。なお、工具が円弧を描くため、XY平面上で主成分と送り成分の方向が変化していくことから、X方向及びY方向の切削力の合力を算出した。

工具径 10 mm、8 mm の円弧比が小さい条件において、波形が大きく変動する様子が見られた。この特徴について調査するため、周波数解析を行った。

切削力波形をFFT解析した結果の例を図6に示す。切削力変動が見られる工具径 10 mm、円弧比 0.33 の条件においては、2,000 Hz 付近に大きなピークが見られるため、切削力変動の原因であることが推察される。そこで、工具の刃が被削材と接触する周波数(強制振動周波数)より高い周波数を、切削力変動に伴う振動周波数と考え、周波数帯域により波形の分離を行った。

具体的には、工具回転数[rev/s]に刃数: 4 を乗じて強制振動周波数を算出し、[強制振動周波数 + 10 Hz] よりも高い周波数成分のみを抜き出して逆FFT処理することで波形を求めた(図7)。得られた波形データから、1刃切込みごとに振幅(最大値-最小値)を求め、それらの最大値:  $A_{max}$  を算出した(図8)。

図6及び図7から、切削力変動を強制振動周波数以上で分離できることが分かる。加えて、図8においては、図5の切削力波形で変動が見られた条件(工具径 10 mm、8 mm における円弧比 0.25 及び 0.33) において値が高いため、 $A_{max}$  により切削力の変動の大きさを比較できると考えられる。

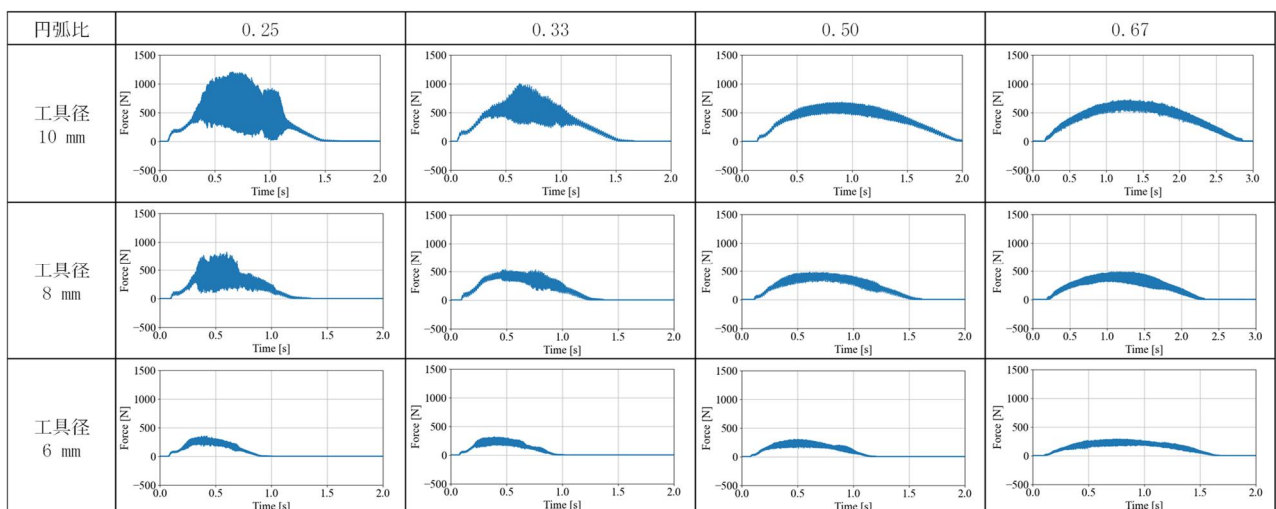
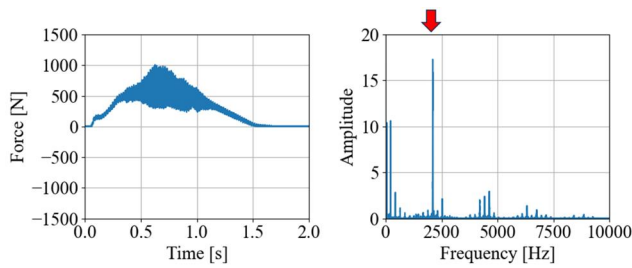
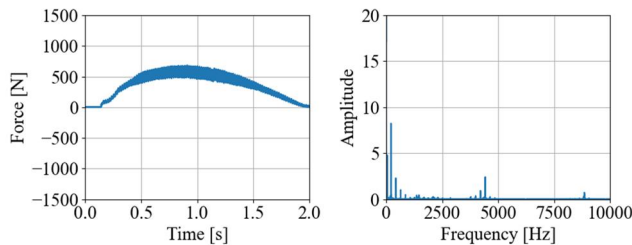


図5 切削力波形

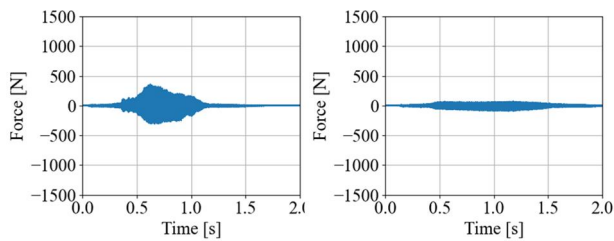


(a) 工具径10 mm、円弧比0.33



(b) 工具径10 mm、円弧比0.5

図6 生波形とFFT結果



(a) 工具径10 mm、  
円弧比0.33

(b) 工具径10 mm、  
円弧比0.5

図7 強制振動周波数以上の周波数を逆FFTした波形

切削力の変動は工具に負荷を与え、工具寿命に影響を及ぼすことが危惧されることから、この値が高くない範囲で条件設定を行うことが望ましい。本実験においては、工具径が8 mm よりも大きい場合、円弧比が0.5以上となるように工具径を選定することにより、加工時の切削力変動が少なく加工できると考えられる。

### 3. 1. 2 切削条件の検討

評価パラメータとして、切削力変動を評価する  $A_{max}$  に加え、変動を除いた円弧上の切削力の最大値を評価するため、強制振動周波数以下の周波数を逆FFTした波形における1刃切込みごとの平均値の最大値： $M_{max}$  を算出した。

解析した結果を図9に示す。 $M_{max}$  は  $f_z$ 、 $V_c$ 、 $a_e$  の各パラメータの増減に伴って増減したが、変化量は  $a_e$ 、 $f_z$ 、 $V_c$  の順に大きく、 $V_c$  はほぼ一定であった。このことから、切削力をできるだけ増加させずに効率を上げるには、 $V_c$  の増加が最も有効であることが分かる。

次に、 $A_{max}$  は、 $a_e$  の増加に伴い大きく値が増加した。また、 $f_z$  を増減すると値は微小に増減するもののほぼ一定であり、 $V_c$  を増減すると値はどちらもやや減

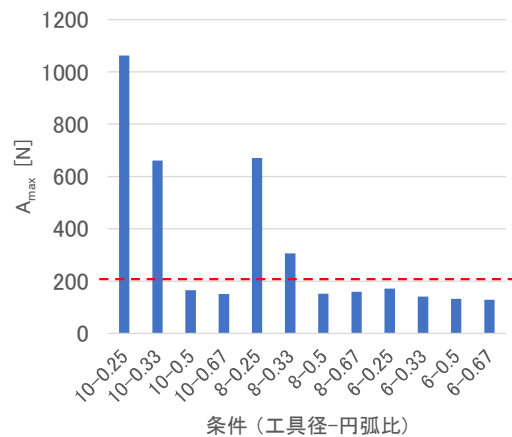
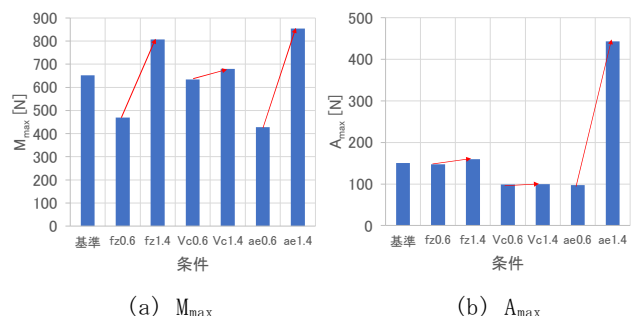


図8 1刃切込みごとの波形の振幅の最大値( $A_{max}$ )



(a)  $M_{max}$

(b)  $A_{max}$

図9 パラメータ算出結果

少しした。このことから、 $a_e$  を増加すると切削力の変動が生じやすく、 $f_z$  や  $V_c$  は  $a_e$  と比較して変化が少ないことが分かる。

以上のことから、切削力が低くその変動が小さい条件で効率を上げるには、① $V_c$ 、② $f_z$ 、③ $a_e$  の優先度で増加を検討することが有効であると考えられる。

## 3. 2 工具摩耗試験

### 3. 2. 1 通常加工との比較

溝加工数の増加に伴う切削力の推移を図10、4溝加工終了後の工具刃先画像を図11に示す。トロコイド加工の切削力は、2加工目までは微増でその後横ばいなのに対し、通常加工は加工数が増えるにつれて大きく増加しており、工具が摩耗していることが推察される。加えて、工具刃先写真では通常加工は大きく摩耗する一方、トロコイド加工は殆ど摩耗が進行していないことが分かる。

なお、加工に要する時間は、通常加工の19分に対して、トロコイド加工は6分40秒とトロコイド加工の方が高効率であった。

### 3. 2. 2 切削条件間の比較

溝加工数の増加に伴う切削力の推移を図12、4溝加工終了後の工具刃先画像を図13に示す。本実験での加工量においては、切削力の顕著な差は見られなかった。こ

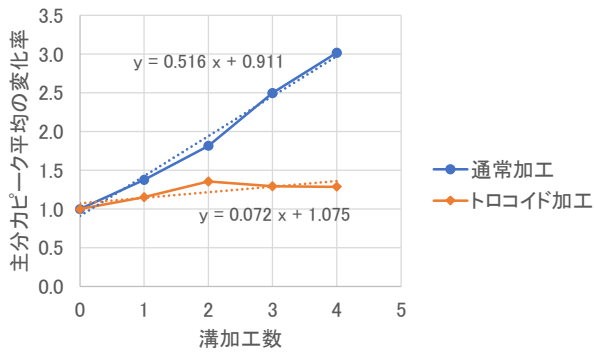


図 10 切削力の推移（通常加工との比較）

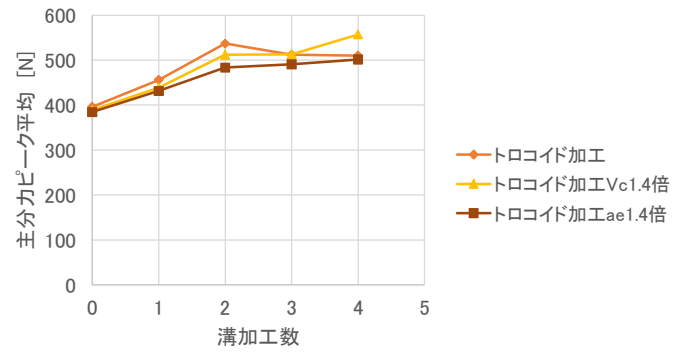
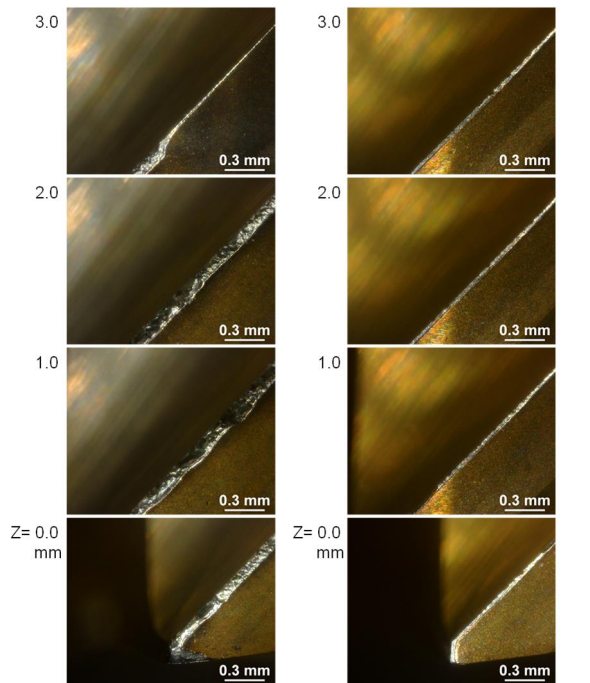
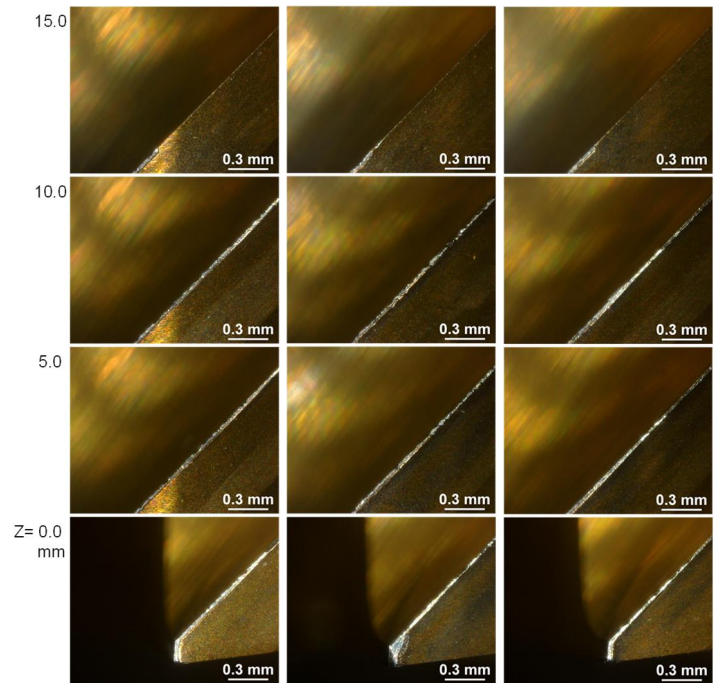


図 12 切削力の推移（トロコイド加工間の比較）


 (a) 通常加工 (b) トロコイド加工  
図11 工具刃先画像（通常加工との比較）

 (a) 基準条件 (b) Vc1.4倍 (c) ae1.4倍  
図13 工具刃先画像（トロコイド加工間の比較）

れは、工具の推奨条件を基準条件としていたが、推奨条件は工具が耐えられる負荷から余裕を持って設定され、単位時間当たりの切削除去量を 1.4 倍にしても工具損傷を受ける負荷に達しなかったためと推察される。工具刃先画像における摩耗の様子も基準条件と同程度であることから、切削速度や径方向切込みが更に大きい条件でも高効率な加工を実現できる可能性がある。

#### 4 おわりに

本研究では、トロコイド加工の条件設定の知見蓄積を目的に、トロコイド加工時の切削力測定や工具摩耗試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 溝幅に対して工具径が大きいと、切削力変動が生じて工具寿命の低下に繋がるおそれがあるため、工具径が 8 mm よりも大きい場合、円弧比 0.5 以上を目安として工具径を選定することが望ましい。

- (2) 加工効率を上げる際は、1 刃送り量  $f_z$ 、切削速度  $V_c$ 、半径方向切込み  $a_e$  のうち  $f_z$  や  $V_c$  を優先的に増加させることで、切削力変動の増加を抑制することが期待できる。
- (3) トロコイド加工は通常加工より工具寿命が長く、単位時間当たりの加工効率が良いことから、生産性の高い加工が可能となる。

#### 参考文献

- 1) 田中 洋光：“電気製鋼”，74 巻 2 号，121-124，(2003)
- 2) 國枝 泰博ほか：“精密工学会学術講演会講演論文集”，46-47，(2019)
- 3) 大塚 裕俊ほか：“精密工学会学術講演会講演論文集”，365-366，(2004)