

# 熱間曲げすべり変形中の工具界面のその場観察による 潤滑特性の評価

東京電機大学 工学部 先端機械工学科  
教授 柳田 明

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021008-B2)

キーワード：熱間曲げすべり，摩擦係数，その場観察

## 1. 諸言

塑性加工のトライボロジーは被加工材の表面精度や工具への焼き付き，寿命の問題が多い．近年では，鋼やマグネシウム合金の熱間成形が広く用いられている．従って，高温状態での工具と材料のトライボロジー特性を評価する試験機の開発が必要とされている．今まで板成形に関しては，摺動特性の評価方法が多く提案されているが，熱間加工に適用した事例は少ない．海外では曲げすべり試験による研究報告はここ 10 年で 15 件程度あったが，すべて冷間加工であった．著者ら<sup>1)</sup>は，直接通電加熱を用いた熱間潤滑評価試験機を用いて，フランジ部を対象とした熱間平板引き抜き試験によって，材料の摺動速度や工具コーティングが熱間摩擦係数や焼き付きに及ぼす影響の評価を行ってきた．しかし，焼き付きなどが生じやすい熱間成形のダイ肩 R 部の摺動特性の評価および潤滑機構の検討はほとんど行われておらず，その評価方法の確立が必要とされている．

本研究では，曲げすべり試験機を設計・製作し，提案する機構で被加工材のダイ肩 R 部の摩擦係数の測定が可能であるかを検証する．試験では直接通電加熱電極を導入し，ダイ肩 R 部での熱間摺動特性の評価と熱間曲げすべり加工界面を直接観察し，潤滑剤の挙動の確認を目的とする．

## 2. 試験装置及び試験材料

### 2.1 熱間潤滑評価試験機

図 1 に熱間潤滑評価試験機を示す．熱間潤滑評価試験機は最大加圧:20kN，最大引抜き力:10kN，最大引抜き速度:37mm/s である．背圧用アクチュエータは 0.14kN～1.96kN 出力できる空気圧シリンダを用いた．曲げすべり工具を，熱間潤滑評価試験機のダイセットに取り付けて，試験を行った．温度測定は，非接地型の K 熱電対を用いて行った．

### 2.2 曲げすべり試験機

図 2 に従来の曲げすべり試験機の模式図，図 3 に本研究で開発した曲げすべり試験機の模式図を示す．曲げすべり試験では，図 2 に示すように逆張力と張力を付与する装置の角度が可変もしくは 90°の角度を成すのが一般的であるが，本研究では通電加熱電極を用いるため，図 3 に示すようにガイドローラを用いて装置を同一平面上

に配置する．従って，従来の試験機では加熱された試験片をチャックし，即座に試験を行うことが困難であったが，この試験機を用いることで試験片の加熱と加工を同時に行うことが可能となる．工具の材質は，SKD61 とした．

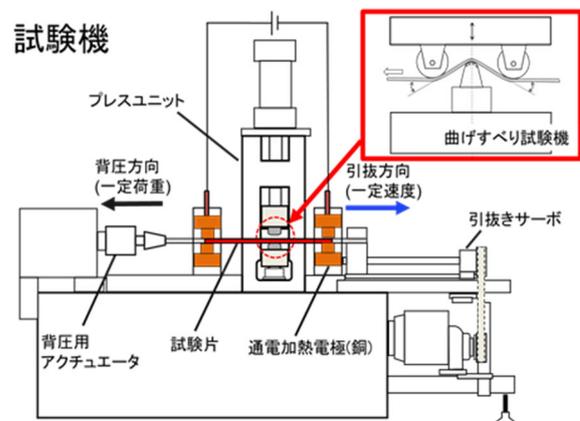


図 1 熱間潤滑評価試験機

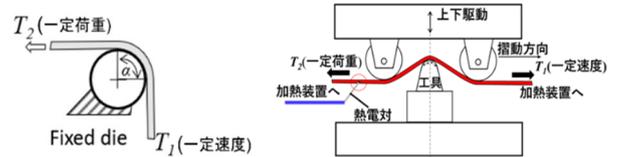


図 2 従来の曲げすべり試験機機構<sup>2)</sup>

図 3 開発した曲げすべり試験機機構

### 2.3 試験材料

表 1 に試験片の寸法を示す．試験片には超々ジュラルミン A7075 を用いた．

表 1 試験片の寸法

被加工材	長さ	厚さ	板幅
A7075	600 mm	2.0 mm	15 mm

## 3. 試験方法

### 3.1 試験手順

①通電加熱電極を用いて試験片を 450°C まで加熱し，300s を保持し(簡易溶体化処理)，②試験片と工具が設定した接触角になるようにプレスユニットの高さ制御を行っ

た後、試験片の両端を引抜き方向と背圧方向のチャックに設置する。③冷間状態で試験片を曲げ、④工具と試験片が接触しない状態で、再度試験片を加熱した。⑤加熱終了後、電源を切り、400°Cまで冷却し、後方張力付与、加圧(ガイドローラを下降)、水平前方へ摺動の順で試験を行う。加工中の引抜き荷重とプレス荷重の測定と摩擦係数の算出を行った。また、摩擦係数の導出式の確認やガイドローラによる曲げの影響を調査するためにSimufact.FormingによるFEM解析も行った。

### 3.2 A7075の温度分布

図4に簡易溶体化処理中の温度測定箇所、図5にA7075の温度分布を示す。加工場所であるAとBでは均一に加熱されていることが確認できた。

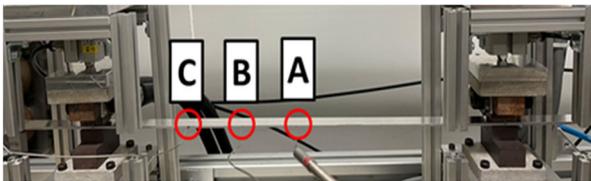


図4 温度測定箇所

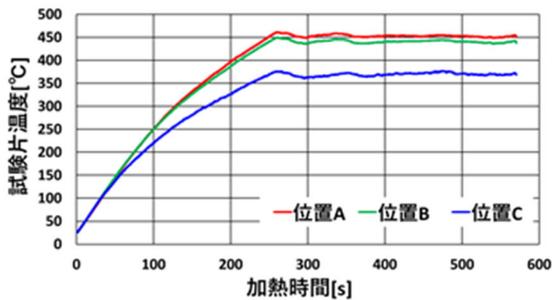


図5 A7075の温度分布

### 3.3 曲げすべり試験の摩擦係数の算出

図6に曲げすべり工具にかかる荷重を鉛直・水平方向成分で示す。

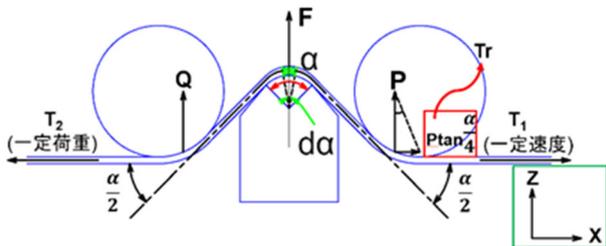


図6 曲げすべり工具に作用する力

以下に、曲げすべり試験の摩擦係数の算出方法を示す。本研究では、ガイドローラを用いた曲げすべり試験を行うためローラにかかる荷重を考慮する必要があると考えた。よって、Sahaの式<sup>3)</sup>から出側ローラに作用する引抜き方向の荷重を引くことで摩擦係数の導出を行った。ローラに作

用する引抜き方向の荷重を  $T_r$ 、力(引抜き荷重)  $T_1$ 、逆張力(背圧)  $T_2$ 、Swift張力  $T_b$ 、接触角  $\alpha$ 、摩擦係数  $\mu$  として、本研究で用いる摩擦係数の導出式を以下に示す。ただし、 $T_r$  と  $T_b$  の導出については後述する。

$$\mu = \frac{2(T_1 - T_2 - T_r - T_b)}{\alpha(T_1 + T_2)} \dots (1)$$

### 3.4 解析方法及び試験条件

FEM解析の結果を用いて、本装置では測定できないガイドローラに作用する力の推定を行い、本研究で用いる摩擦係数導出式の検証を実施する。曲げ工具と試験片のクーロン摩擦を  $\mu=0.1\sim 0.7$  で設定し(ガイドローラと試験片は  $\mu=0.1$  で固定)、解析では試験片の長さは200mmとし要素サイズは0.375mmとした。曲げパンチの先端Rは10mm、ガイドローラ径は30mm、ローラ間距離は56mmである。パンチ接触角  $\alpha$  は  $60^\circ$  とした。引抜き速度を10mm/s、背圧を0.6kN(20MPa)、0.9kN(30MPa)とした。エステル系潤滑剤は工具に  $0.7\text{mg}/\text{mm}^2$  程度塗布をした。

## 4. 結果と考察

### 4.1 摩擦係数導出式の確認

図7に  $\mu=0.1$ (左図)、 $0.6$ (右図)、背圧0.6kNでのローラ、パンチ鉛直方向荷重の解析結果、図8に摩擦係数と左右ローラに作用するZ方向(鉛直方向)荷重の比率(P/P+Q)の関係を示す。図7より、摩擦係数の増加に伴い右ローラに作用するZ方向(鉛直方向)荷重が増加することが確認できた。また図8より、摩擦係数の増加に伴い左右のローラ荷重比も線形増加することが確認できた。よって、ガイドローラに作用する荷重は摩擦係数に依存することが分かった。

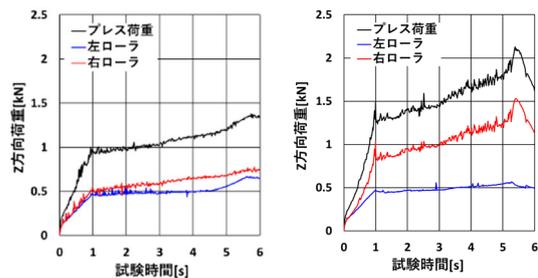


図7 ローラの鉛直方向荷重の変化

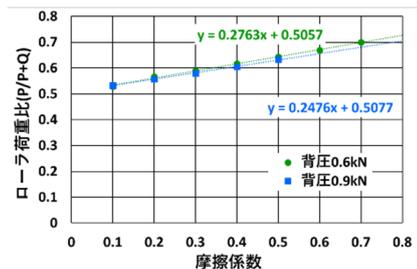


図8 摩擦係数とローラ荷重比の関係

図6より右ローラの鉛直方向荷重を  $P$  とすると、力のつり合いよりパンチ荷重  $F$  と図8で得られたローラ荷重比の摩擦係数に関する比例係数  $k$  を用いて、次の関係式が成り立つ。よって、出側ローラに作用する引抜き方向の荷重  $T_r$  を次のように表すことができた。

$$P = \mu k F \dots (2) \quad T_r = \mu k F \tan \frac{\alpha}{4} \dots (3)$$

よって、式(3)を式(1)に代入すると以下ようになる。

$$\mu = \frac{2(T_1 - T_2 - \mu k F \tan \frac{\alpha}{4} - T_b)}{\alpha(T_1 + T_2)} \dots (4)$$

そして、式(4)を  $\mu$  について整理すると以下のように表すことができた。

$$\mu = \frac{2(T_1 - T_2 - T_b)}{\alpha(T_1 + T_2) + 2kF \tan \frac{\alpha}{4}} \dots (5)$$

次に、Swift 張力  $T_b$  を算出した。板厚  $t$ 、板幅  $w$ 、パンチの曲率半径  $R$ 、相当応力  $\sigma_m$  として  $T_b$  を式(6)として以下に示す。

$$T_b = \left( \frac{\sigma_m t^2 w}{2R} \right) \dots (6)$$

従って、式(6)を式(5)に代入した式(7)を本研究で用いる摩擦係数導出式とした。

$$\mu = \frac{2(T_1 - T_2 - \frac{\sigma_m t^2 w}{2R})}{\alpha(T_1 + T_2) + 2kF \tan \frac{\alpha}{4}} \dots (7)$$

図9に解析で用いた摩擦係数と式(6)から算出した値の比較を示す。解析結果として、設定した値と近い値となり、導出した式の妥当性が確認できた。

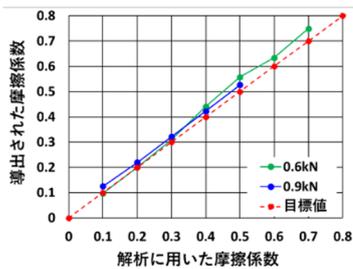


図9 解析に用いた摩擦係数と導出値との比較

#### 4.2 曲げすべり試験結果

図10に、A7075の引抜き荷重とプレス荷重を示す。 $T_1$ :引抜き荷重、 $F$ :プレス荷重、 $T_2$ :背圧とした。背圧の増加に伴い引抜き荷重とプレス荷重がともに上昇した。 $T_2=0.9$  kNの時、引抜き距離32 mm地点で試験片が破断した。0.9 kN時の引抜き荷重が引抜き開始直後から高いという結果に対して0.6 kN時よりも工具と試験片との接触面積が大きく、その分試験片の温度が下がり、降伏応力が増加することで荷重が増加したと考えられる。

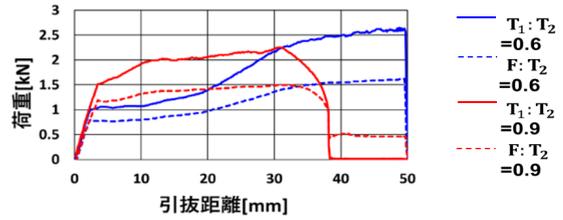


図10 A7075の引抜き荷重とプレス荷重

図11に、各背圧における摩擦係数を示す。背圧の増加に伴い摩擦係数が低下した。背圧の増加により、工具と試験片との接触面積が増大し、局所的な面圧の増加が抑えられたことが要因と考えられる。

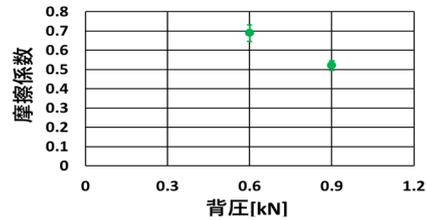


図11 背圧と摩擦係数の関係

図12に工具と接触する試験片表面の写真、図13に各背圧の表面粗さを示す。表面粗さは、KEYENCE製レーザ顕微鏡を用いて測定した。図12より、背圧の増加で試験片表面の焼付きの低下を確認できた。

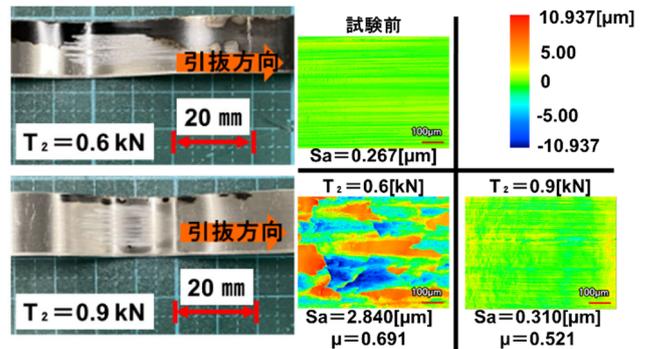


図12 試験片表面写真

図13 表面性状

図13から、背圧の増加に伴い、表面粗さ(Sa値)が小さくなっていることが分かる。図14に、FEM解析による各背圧の接触圧力を示す。赤く囲んだ工具と試験片の接触部より、背圧が増加するにつれて接触面積が大きくなることが分かった。よって、背圧の増加に伴い工具と試験片との接触面積が増大し、局所的な面圧の増加が抑えられたことにより摩擦係数が減少する、前述した考察の妥当性を確認できた。

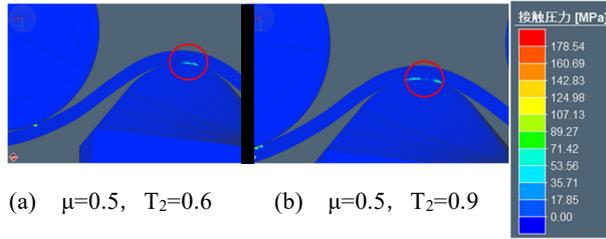


図 1 4 接触圧力の解析結果

## 5. 熱間曲げすべり加工界面の直接観察

### 5.1 界面観察方法

図 1 5 に、界面観察の模式図を示す。図 3 に示した曲げすべり機構は工具を固定し、ガイドローラを上下動させて加工を行う。そこで、工具をガラス製のものにし、下からユニオン製長焦点レンズ(UWZ 2:作動距離 200 mm)とディテクト製の最大画素数が 530 万画素である高速度カメラ(HAS-U2)を使用して加工界面を観察する。また、本試験では潤滑剤の導入部分を観察したいため、カメラとレンズを約 10°傾けて観察を行った。

### 5.2 ガラス工具の設計・製作

図 1 6 にガラス工具と治具を示す。試験片接触部をガラス製に変更し、穴の開いた治具にはめ込む形とした。ガラス工具はオハラ製のナノセラム(弾性係数  $E = 80.2 \text{ GPa}$ )を使用した。

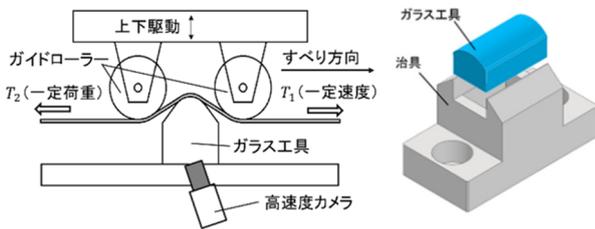


図 1 5 界面観察の模式図 図 1 6 ガラス工具と治具

### 5.3 試験方法

ガラス工具を用いて、3.1 と同様の試験手順で試験を行った。試験片は同様に超々ジュラルミン A7075 を使用したが、本試験では試験片が曲がった際に光が集中しないように、表面を 600 番の研磨紙で粗くした状態で試験を行った。試験条件は表 2 として以下に示す。また、本試験では工具の違いによる各荷重の変化や摩擦係数を比較するために、ガラス工具と同様の条件で SKD 工具を用いての試験も行った。

表 2 試験条件

引抜き速度[mm/s]	10	
後方張力(背圧)[kN]	0.6(20[MPa])	0.9(30[MPa])
引抜き距離[mm]	20	
潤滑剤	エステル系潤滑剤(48cSt)	

## 5.4 結果と考察

### (a) 曲げすべり試験結果

図 1 7 に、各背圧の引抜き荷重とプレス荷重を示す。左図が  $T_2 = 0.6 \text{ kN}$ 、右図が  $T_2 = 0.9 \text{ kN}$  の結果である。2 条件ともにガラス工具の方が SKD 工具よりも引抜き荷重とプレス荷重が低くなった。これは、ガラスと SKD61 の熱伝達効率の違いが影響しており、熱伝達率の小さいガラス工具の場合、SKD 工具よりも加工中の試験片温度が下がりづらいため、荷重が低くなったと考えられる。

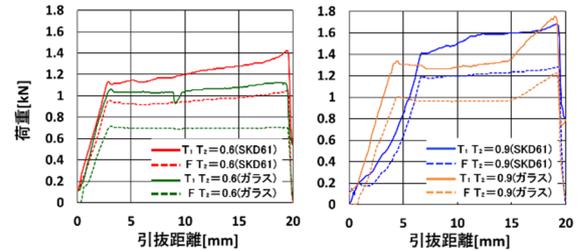


図 1 7 各背圧の引抜き荷重とプレス荷重

図 1 8 に、ガラスと SKD 工具による摩擦係数の比較を示す。ガラス、SKD 工具ともに背圧の増加するにつれて摩擦係数が減少する傾向が見られた。また、SKD 工具と比較してガラス工具での摩擦係数が小さくなった。これは、ガラスと SKD61 の弾性係数の違いが影響している。背圧が高いほど弾性係数が低いガラスは変形しやすくなるため、扁平により曲率半径が増大し、焼付きが生じにくくなった結果、摩擦係数が減少したのではないかと考えられる。

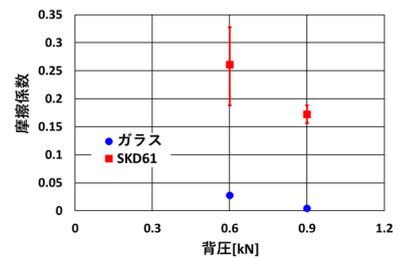


図 1 8 ガラスと SKD 工具による摩擦係数の比較

### (b) 界面観察による潤滑評価

試験中の加工界面を録画した動画から輝度値 (256 階調) を測定し、輝度値の変化から潤滑剤の挙動を観察した。図 1 9 に  $T_2 = 0.6 \text{ kN}$  時の輝度値、図 2 0 に加工界面の様子を示す。3 か所とも引抜き距離 1.0 mm 付近で潤滑剤の挙動を確認することができた。また、11 mm 地点では測定点②と③で輝度値の低下が見られた。これは、付近に潤滑剤が溜まったことで膜厚が厚くなり、色が濃くなったからである。図 1 7 左図より、9 mm 地点でガラス工具に加わる荷重が一時的に下がったのも、潤滑剤が工具と試験片の間に溜まったことによると考える。

図 2 1 に  $T_2 = 0.9$  kN 時の輝度値, 図 2 2 に加工界面の様子を示す. 引抜き距離 17-18 mm 地点で輝度値が上昇した. これは, 測定点付近の潤滑剤が不足し, 膜厚が薄くなったからである. また, 図 1 7 右図に示されているように, 15 mm を過ぎてからガラス工具にかかる荷重が急激に増加した原因も, 膜厚の減少であると言える.

## 6. 結言

ガイドローラを用いた熱間曲げすべり試験の検証を行い, 以下のことが得られた.

- 1) FEM 解析により導出した摩擦係数の式の妥当性を評価し, 今回提案した熱間曲げすべり試験に適した式であると確認できた.
- 2) ガイドローラを用いた熱間曲げすべり試験を行い, 実際に摩擦係数を測定することができた.
- 3) 熱間曲げすべり加工界面での潤滑剤の挙動などの調査を行い, 以下のことが得られた.
- 4) ガラス工具は SKD61 工具に比べて焼付きが生じにくく,  $T_2 = 0.6, 0.9$  kN とともに摩擦係数が小さくなった.
- 5) 加工界面を観察した動画から輝度値を測定し, 輝度値の変化から潤滑剤の挙動を調査した. 輝度値の変化により, 潤滑剤の有無を判断することができた.

## 謝 辞

本研究は, 公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-AF-2021008-B2) により行われました. 新規に観察装置を開発することが出来たことに対してここに謝意を表します.

## 参考文献

- 1) 柳田, FORM TECH REVIEW, **28** (2018), 21.
- 2) J L Andreasen et al., Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., (2006), p.73.
- 3) P. K. Saha and W. R. D. Wilson, Wear, **172**, (1994), p.167.

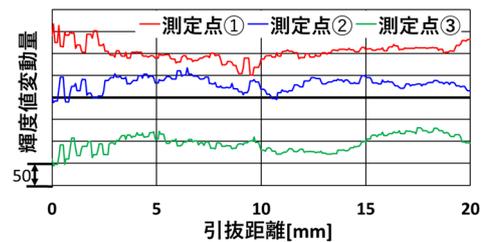


図 1 9  $T_2 = 0.6$  kN における輝度値

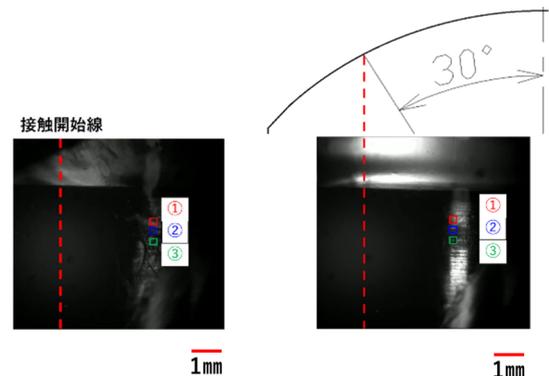


図 2 0  $T_2 = 0.6$  kN 時の加工界面

(a) 1 mm (0.1 s)地点

(b) 11 mm (1.1 s)地点

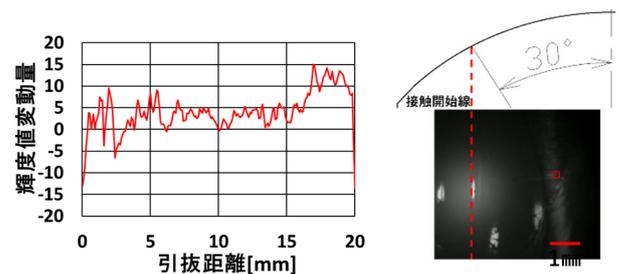


図 2 1  $T_2 = 0.9$  kN における輝度値

図 2 2  $T_2 = 0.9$  kN 時の加工界面(17 mm (1.7 s))