切削表面の塑性流動が切りくず厚さにおよぼす影響を 考慮した切削機構のモデル化*

吉田 協** 湊 純一郎** 見山克己*** 齋藤 繁*** 高島敏行***

Modeling of Cutting Mechanism Considering the Effect of Surface Plastic Flow on Chip Thickness

Kanou YOSHIDA, Junichiro MINATO, Katsumi MIYAMA, Shigeru SAITO and Toshiyuki TAKASHIMA

In this study, the relationships between chip thickness and the energies consumed in the cutting process, using a simplified cutting model in which the effect of surface plastic flow on chip thickness was considered, were analyzed under the supposition that the ratio of energy consumed by the effect of surface plastic flow remaining on the machined surface to total cutting energy is equivalent to the ratio of additional chip thickness resulting from the effect of surface plastic flow to measured chip thickness. C2801 brass, A1100 aluminum, and SUS304 stainless steel were cut orthogonally at a low cutting speed and the effect of surface plastic flow on the cutting mechanism was compared among the three materials. The following results were obtained. Total cutting energy was composed of four energies: shear energy without the effect of surface plastic flow, friction energy without the effect of surface plastic flow, energy consumed in surface plastic flow, and additional friction energy resulting from the effect of surface plastic flow. With the use of the “chip constant” which is specific to a material and is negligibly affected by cutting conditions, the energies consumed in the cutting with plastic flow can be expressed as a function of shear strain. In the cases of C2801, A1100, and SUS304, the ratios of energy consumed by the effect of surface plastic flow remaining on the machined surface to total cutting energy were approximately 10%, 13%, and 17%, respectively.

Key words: orthogonal cutting, cutting forces, cutting energy, chip thickness, surface plastic flow, shear strain, shear stress

1. 緒 言

金属の切削加工の際の切削表面には塑性流動が残留し、一般に材料の表面性状に有害とされる、いわゆる加工層が生成される。中山・田村は、板状被削材の端面の2次元切削を行い刃先前方の変形状況を詳細に観察した結果、せん断領域が切削予定面よりも下方にまで広がっているために、刃先が通過する以前にすでに切削予定面には塑性流動が起こっていることを確認し、これが切削表面に塑性流動を残留させる主な要因であると指摘している¹⁾²⁾。

このような点を踏まえて、前報では切削表面の塑性流動が切削機構に与える影響を明らかにするために、塑性流動を伴う複雑な切削現象を簡単なモデルに置き換え、塑性流動を無視して求めている一般のせん断エネルギーの中に、切削表面の塑性流動の生成に消費されるエネルギーが含まれていることを考慮した解析を行い、塑性流動と切削機構諸因子の関係を検討した。検証のためにC2801黄銅とA1100アルミニウムの低速2次元切削実験を実施し、主として以下の結果を得た³⁾⁴⁾。

- (1) 切削表面の塑性流動量は切り込みとせん断ひずみの積に、また、単位切削幅あたりの主分力に比例する。
- (2) 一般のせん断エネルギーの10%~13%が切削表面の塑性流動の生成に消費されている。
- (3) 切削表面の塑性流動の生成に消費されるエネルギーは、切削条件によっては摩擦エネルギーと同等か、あるいはそれ以上になることもある。

しかしながら塑性流動の生成と摩擦エネルギーの関係についての言及には至らなかった。塑性流動を伴う際の切削機構をさらに明らかにするためには、塑性流動の生成が摩擦エネルギーにどれほどの影響を与えているかも含めて、全切削エネルギーがどのように構成されているかについての検討が必要である。

ところである条件で切削すればある厚さの切りくずが排出され、同時に多少なりとも塑性流動が切削表面に残留する。ここで仮想的に塑性流動がない場合を考えると、切削性は向上して厚さのより薄い切りくずが排出されるとともに、全切削エネルギーもより少なくて済むであろう。この仮想的な切削と実際の切削における切りくず厚さの差（切りくず厚さの増加分）と、全切削エネルギーの差は塑性流動の生成の影響によって生じたものである。全切削エネルギーの差は、塑性流動の生成に起因する全切削エネルギーの増加分に相当しており、せん断エネルギー中の塑性流動の生成に消費されるエネルギーの他に、塑性流動の生成によって摩擦エネルギーが影響を受けた分も含まれていると考えられる。

こうした観点から、本研究では切削表面に残留する塑性流動量と切りくず厚さの関係を単純化した切削モデルを用いて、塑性流動の生成が切削機構に与える影響を検討した。筆者らが提案している“切りくず定数”⁵⁾（単位切りくず断面積あたりの主分力であり、切削条件の変化にあまり影響を受けない実験定数）を用いると、全切削エネルギーは切りくず厚さと比例関係で表される。従って、切りくず厚さの増加分が実際の切りくず厚さに占める割合は、全切削エネルギーの増加分が実際の全切削エネルギーに占める割合に密接に関係することになる。これを基に塑性流動を考慮した際の全切削エネルギーの構成、塑性流動と切削機構諸因子の関係を解析した。

本報告では加工硬化しやすく難削材とされるSUS304ステ

* 原稿受付 平成27年7月22日

掲載決定 平成27年10月29日

** 正会員 北海道科学大学工学部（札幌市手稲区前田7-15-4-1）

*** 北海道科学大学工学部（札幌市手稲区前田7-15-4-1）

ステンレス鋼⁶⁾の2次元切削を行うとともに、比較的切削性の良好な材料であるC2801と、軟らかく延性に富むA1100についての前報の実験結果³⁾も利用し、これら3種の材料で解析結果の検証を行った。

2. 切削表面の塑性流動と切削機構の関係

2.1 塑性流動と切削機構の関係に関する前報までの概要

図1に予め被削材側面に切削方向と垂直に付けておいた条痕が、切削後の仕上げ面近傍では切削方向に曲げられ、切削表面で δ_f の塑性流動量が生じている状態をモデル化し、一般の2次元切削機構モデルに併せて示す。

全切削エネルギーは切削抵抗主分力と切削速度の積($F_c \cdot V$)として一般には単位時間あたりで表されるが、単位時間あたりの除去量($w \cdot t_1 \cdot V$)で除すと、単位切削体積あたりの全切削エネルギー $W (= F_c / (w \cdot t_1))$ が得られる。以下、切削で消費される各エネルギーは同様に単位切削体積あたりで示す。全切削エネルギーは一般には単純に($W = W_s + W_f$)として求めており、 W_s はせん断面せん断エネルギー($\tau_s \cdot \gamma_s$)、 W_f は工具すくい面での摩擦エネルギー($F/(w \cdot t_2)$)である。 τ_s はせん断面せん断応力、 γ_s はせん断面のせん断ひずみである。

中山・田村は切削表面に塑性流動を生じさせるエネルギーを全切削エネルギーの中に入めるとするとき、せん断ひずみ γ_s はそのまま、一般に求めているせん断エネルギーを構成するせん断応力 τ_s がどのように変更されるかを、解析的に示している¹⁾²⁾。

せん断領域の広がりや塑性流動を生成させている点に着目すれば、一般のせん断エネルギー W_s には、式(1)に示すように塑性流動の生成に消費されるエネルギー W_δ が含まれると考えられる。図1に示したように実際の切りくず厚さ t_2 は変わらず、従ってせん断ひずみ γ_s はそのままにしてせん断応力 τ_s を τ'_s に修正することによれば、塑性流動の影響を排除した際のせん断エネルギーは式(2)で示される。式(3)のエネルギー W_δ において、 τ_δ は切削表面を塑性流動させる際のせん断応力、 $\gamma_\delta (= \delta_f / t_1)$ はその際のせん断ひずみである。

Fig. 1 Cutting model of deformation and energy consumption during cutting

$$W_s = W'_s + W_\delta \quad (1)$$

$$W'_s = \tau'_s \cdot \gamma_s \quad (2)$$

$$W_\delta = \tau_\delta \cdot \gamma_\delta \quad (3)$$

式(1)を流動量 δ_f で整理すると、流動量と切削機構諸因子の基本的関係は式(4)で表すことができる³⁾。 C_τ は式(5)に示すように3つのせん断応力から成る。式(4)中の $(t_1 \cdot \gamma_s)$ は近似的にせん断面の切削予定面への投影長さ $(t_1 \cdot \cot \phi)$ を表している。

$$\delta_f = C_\tau \cdot t_1 \cdot \gamma_s \quad (4)$$

$$C_\tau = \frac{\tau_s - \tau'_s}{\tau_\delta} \quad (5)$$

次に主分力 F_c と切りくず厚さ t_2 の関係は、切削幅 w とすれば比例定数 m を用いて式(6)で示される。筆者らは m を切削条件の変化にあまり影響を受けない、単位切りくず断面面積あたりの主分力である切りくず定数として提案しており³⁾、4.2節で現象的側面から若干の説明を加える。

$$F_c = m \cdot w \cdot t_2 \quad (6)$$

切りくず定数 m を用いると、式(4)、(6)から式(7)が示される。ここで $r_c (= t_1 / t_2)$ は切削比である。3種の材料において、式中の $(r_c \cdot \gamma_s)$ は切り込み t_1 の増加に伴ってほとんど変化せず、すくい角 γ の増加に伴って僅かに減少傾向を示す。 $(r_c \cdot \gamma_s)$ は1に近い値を示しあまり変化しないので、流動量 δ_f は単位切削幅当たりの主分力(F_c / w)に対してほぼ比例関係にあることがわかる。

$$\delta_f = \frac{C_\tau \cdot r_c \cdot \gamma_s \cdot F_c}{m \cdot w} \quad (7)$$

以上のような検討の基に被削材にC2801とA1100を用いた低速2次元切削実験を行い、主として塑性流動の生成によるせん断エネルギー W_s への影響の観点から報告した⁴⁾。しかしながら、塑性流動の生成による摩擦エネルギーへの影響を含めて、全切削エネルギーがどのように構成されるかなどについての検討には至らなかった。

2.2 塑性流動の生成が切りくず厚さにおよぼす影響を考慮した切削機構

2.2.1 全切削エネルギーを構成するエネルギー

図2に塑性流動の生成によって切りくず厚さはどのような影響を受けているのかを単純化して表した切削モデルを示す。切り込み t_1 およびすくい角 γ の基で切削するとき、oa面でせん断変形を受けて厚さ t_2 の切りくずが排出されると共に、切削表面には δ_f の塑性流動が残留している様子を示す。ここで仮に切削表面に塑性流動がないとした際に、被削材表面において流動量 δ_f 分だけ工具すくい面側のob面でせん断変形を受け、 $\Delta t_2 (= \delta_f \cdot \cos \gamma)$ 分薄い切りくずが排出されると考える。つまり一般に計測される切りくず厚さ t_2 は、塑性流動の影響で $(\delta_f \cdot \cos \gamma)$ 分(切りくず厚さの増加分と称する)厚くなった結果であると近似的に考える。

これに対応して一般の全切削エネルギー W は、塑性流動の生成の影響による全切削エネルギーの増加分が含まれると考えると式(8)のように示される。

$$W = W' + \Delta W \quad (8)$$

ここで

Fig. 2 Cutting model considering the influence of surface plastic flow on chip thickness

W' : 塑性流動がないとした際の全切削エネルギー

ΔW : 塑性流動の生成の影響によって生じた全切削エネルギーの増加分

式(6)の両辺を切削面積 ($w \cdot t_1$) で除すと単位切削体積あたりの全切削エネルギーは $W = (m/t_1) \cdot t_2$ となり、切り込み t_1 を一定とした際には、全切削エネルギー W は切りくず厚さ t_2 に比例する。従って、全切削エネルギーの増加分 ΔW が全切削エネルギー W に占める割合 ($\Delta W/W$) は、切りくず厚さの増加分 ($\Delta t_2/t_2$) に等しい。ここで切りくず厚さの増加分 Δt_2 は近似的に ($\delta_f \cdot \cos \gamma$) と考えているので、この関係を係数を p として式(9)で示す。

$$\frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} = p \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

せん断領域が切削予定面以下にまで広がっていることが切削表面に δ_f の塑性流動を残留させる主な原因と考えとともに、本研究では低速切削で切削距離は短いために工具の摩耗は進行しておらず、工具逃げ面の摩擦による影響などはないものとして、ここでは $p=1$ として以下の議論を進めることにする。

式(8)と(9)から式(10)が得られる。

$$W = \frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W + \frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W \\ = \frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot (W_s + W_f) + \frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot (W_s + W_f) \quad (10)$$

式(10)の全切削エネルギー W は式(11) のように示され、エネルギー W を構成する 4 つのエネルギーを式(12)から(15)に示す。

$$W = W'_s + W'_f + W_\delta + \Delta W_f \quad (11)$$

$$W'_s = \frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W_s \quad (12)$$

$$W'_f = \frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W_f \quad (13)$$

$$W_\delta = \frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W_s \quad (14)$$

$$\Delta W_f = \frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot W_f \quad (15)$$

ここで

W'_s : 塑性流動がないとした際のせん断エネルギー

W'_f : 塑性流動がないとした際の摩擦エネルギー

W_δ : せん断エネルギー中の塑性流動の生成に消費される

エネルギー

ΔW_f : 摩擦エネルギーの増加分。すなわち一般の摩擦エネルギー W_f と、塑性流動がないとした際の摩擦エネルギー W'_f の差 ($W_f - W'_f$)

式(10)の第 2 項は全切削エネルギーの増加分 ΔW に相当し、式(16)で示される。

$$\Delta W = W_\delta + \Delta W_f \quad (16)$$

塑性流動の影響を考慮していない実際の全切削エネルギー W は、式(10)において $\delta_f = 0$ として扱っており、($W_s + W_f$) で求めていることがわかる。

以上のように、塑性流動の生成が切りくず厚さにおよぼす影響を切削機構中に考慮した解析によって、全切削エネルギーは 4 つのエネルギーから構成されることが示された。

2.2.2 切削で消費される各エネルギーとせん断ひずみの関係

2.2.1 項で示した切削で消費される各エネルギーは、なんらかの共通の切削機構因子で表現できれば容易に比較が可能となる。そこで式(12)、(14)のエネルギー W'_s 、 W_δ をせん断ひずみ γ_s を用いて表すと式(17)、(18)になる。

$$W'_s = \left(\frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \right) \cdot \tau_s \cdot \gamma_s \quad (17)$$

$$W_\delta = \left(\frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \right) \cdot \tau_s \cdot \gamma_s \quad (18)$$

次に式(6)の両辺を切削面積 ($w \cdot t_1$) で除し、切削比 r_c を用いると全切削エネルギー W は式(19)で示される。

$$W = \frac{m}{r_c} \quad (19)$$

全切削エネルギー W はまた式(20)のようにせん断ひずみ γ_s で表される。

$$W = \left(\frac{m}{r_c \cdot \gamma_s} \right) \cdot \gamma_s \quad (20)$$

したがって摩擦エネルギー W_f は式(21)のようにせん断ひずみ γ_s で表される。

$$W_f = W - W_s \\ = \left(\frac{m}{r_c \cdot \gamma_s} - \tau_s \right) \cdot \gamma_s \quad (21)$$

式(21)の関係を式(13)、(15)に適用することによって塑性流動がないとした際の摩擦エネルギー W'_f 、摩擦エネルギーの増加分 ΔW_f もせん断ひずみ γ_s で表わされ式(22)、(23)に示す。

$$W'_f = \frac{t_2 - \delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot \left(\frac{m}{r_c \cdot \gamma_s} - \tau_s \right) \cdot \gamma_s \quad (22)$$

$$\Delta W_f = \frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot \left(\frac{m}{r_c \cdot \gamma_s} - \tau_s \right) \cdot \gamma_s \quad (23)$$

さらに全切削エネルギーの増加分 $\Delta W (= W_\delta + \Delta W_f)$ は式(24) のように示される。

$$\Delta W = \left(\frac{\delta_f \cdot \cos \gamma}{t_2} \cdot \frac{m}{r_c \cdot \gamma_s} \right) \cdot \gamma_s \quad (24)$$

以上のように切削表面に残留する塑性流動を考慮した際の切削に関与する各エネルギーは、切りくず定数 m を導入することによって式(20)、(22)、(23)のように示され、式(17)、(18)とともに、全て共通したせん断ひずみ γ_s との関係で表わされることになる。

2.2.3 切削表面の塑性流動量と切りくず厚さの関係

切削表面の塑性流動と切削機構因子の関係を検討する。式(14)、(17)より流動量 δ_f について整理すると、式(25)のように C_δ を係数として、流動量 δ_f は切りくず厚さ t_2 とほぼ比例関係にある。

$$\delta_f = C_\delta \cdot t_2 \quad (25)$$

$$C_\delta = \frac{\tau_s - \tau'_s}{\tau_\delta} \cdot r_c \cdot \gamma_s \quad (26)$$

式(25)は式(4)を切りくず厚さ t_2 を用いて表わしたものと同一である。本報告の、塑性流動が切りくず厚さにおよぼす影響を切削機構中に考慮して各エネルギーを求めた解析においても、流動量 δ_f と切りくず厚さ t_2 の関係は前報と同一の結果が得られることを示している。

3. 実験方法

前報では横フライス盤を用いて、C2801 (dry cutting)と A1100 (wet cutting)の矩形被削材の端面に対して、テーブルの上下動によって切り込み t_1 を与える低速2次元切削を実施した³⁾。

図1にモデル化して示している被削材側面の条痕を、2枚合わせの内側にするることによって、流動量 δ_f の測定時のバリの生成による影響をできるだけ避けている。主な測定項目は切削抵抗2分力(主分力 F_c 、背分力 F_f)、真実切り込み t_1 、切りくず厚さ t_2 と流動量 δ_f である。実験方法の詳細については前報の通りであるのでここでは省略する。

本報告の SUS304 (wet cutting)に対しては、2枚合わせにした矩形被削材端面の横フライス盤による低速2次元切削は困難であった。そこで図3に示すように、一部を切り欠いた単板の円盤状被削材をマンドレルで保持し、それを旋盤にチャッキングして切削実験を行った。工具に超硬合金 M10 種を用い、切削速度は流れ形切りくずが排出される可能な範囲で低速とした。予定切り込みに対して塑性流動層の影響が避けら

Fig. 3 Workpiece and cutting test arrangement

Table 1 Cutting conditions

Machine tool	Engine lathe TAL-460 (TAKISAWA)
Cutting method	Orthogonal wet cutting
Workpiece	SUS304 (JIS G4305)
Tool material	Carbide tool (JIS M10)
Tool shape	Rake angle $\gamma = 10, 20, 30$ deg
Depth of cut	Relief angle $\beta_r = 6$ deg $t_1 = 0.044 \sim 0.152$ mm
Cutting speed	$V = 25 \sim 26$ m/min
Cutting width	$w = 1.5$ mm
Cutting fluid	JIS K224

れるような仕上げ面が得られるように、切り込みの小さい軽切削を外周面に対して行い、半径が一定の円状に形成している。形成後に図3に示した被削材切り欠き部にバイトが来た時点で主軸を停止し、所定の切り込みを与えてから主軸を約180 degだけ回転し切削(図中の Start of cutting から End of cutting まで)する。切削直後の切り欠き部で主軸を停止し、切削部と未切削部(=基準面)との段差である半径の違いをデジタルダイヤルゲージ(1/1000 mm)で測定して真実切り込み t_1 とした。切削抵抗2分力(主分力 F_c 、背分力 F_f)は、圧電素子型工具動力計(キスラー社製)を用いて測定し、切りくず厚さ t_2 の測定にはパイプダイヤルゲージ(1/100 mm)を用いた。被削材の形状がもたらす曲率半径の影響は、直径に対して切り込みが十分に小さいので無視できるものとした。切削表面の塑性流動量 δ_f は、被削材側面の条痕の変形の程度を光学顕微鏡で観察することによって求めた。

表1に SUS304 の切削条件を示す。

以下の考察では SUS304 の結果に加えて、C2801 と A1100 の結果³⁾も利用して検討を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 切削表面の塑性流動と切削機構諸因子の関係

図4に SUS304 の切り込み t_1 と切削表面の流動量 δ_f の关系到、比較のために C2801 と A1100 の結果を併せて示す。切削性の良好な C2801 の流動量 δ_f は全体に小さく、軟らかく延性に富む A1100 の流動量 δ_f は全体に大きい。加工硬化しやすく難削材とされる SUS304 の流動量 δ_f は、同一の切り込み t_1 において C2801 と A1100 の中間程度である。3種の材料ともに切り込み t_1 の増加に伴って流動量 δ_f は増加し、すくい角 γ の増加に伴って減少している。

図5に SUS304 の切りくず厚さ t_2 と流動量 δ_f の关系到、C2801 と A1100 の結果を併せて示す。切り込み t_1 やすくい角 γ は変化しているが、両者をほぼ比例関係として整理すると、図中の赤線の傾きが式(25)における係数 C_δ に相当する。

表2に SUS304 の係数 C_δ の値とともに C2801 と A1100 の値を示す。SUS304 の係数 C_δ は他材料に比べて大きく、C2801 と比較すれば同一の切りくず厚さ t_2 に対して約1.9倍の塑性流動が残留することがわかる。

図6に SUS304 における切り込み t_1 と切削抵抗 F_c 、 F_f の関係を示す。切削抵抗 F_c 、 F_f は切り込み t_1 の増加に伴って増加

Fig. 4 Depth of cut t_1 versus surface plastic flow δ_f

Fig. 5 Chip thickness t_2 versus surface plastic flow δ_f . Cutting conditions, same as Fig. 4

Table 2 Coefficient C_δ	
C2801	0.099
A1100	0.144
SUS304	0.193

Fig. 6 Depth of cut t_1 versus cutting forces F_c, F_t . Cutting conditions, same as Fig. 4

Table 3 Shear stress and ratio of shear stress			
	τ_s MPa	τ'_s MPa	τ'_s/τ_s
C2801	418	374	0.895
A1100	131	113	0.866
SUS304	620	513	0.827

Fig. 7 Depth of cut t_1 and chip thickness t_2 versus principal cutting force F_c . Cutting conditions, same as Fig. 4

し、すくい角 γ の増加に伴って減少する一般的な傾向を示す。SUS304 の平均せん断応力 τ_s は、切り込み t_1 やすくい角 γ の変化にかかわらずほぼ一定の値が得られた。式(12)で計算されたエネルギー W'_s をせん断ひずみ γ_s で除すと、塑性流動がないとした際のせん断応力 τ'_s が得られる。

3 種の材料の平均せん断応力と応力の比を表 3 に示す。式(12), (14)よりせん断エネルギー W_s に占める、せん断エネ

Fig. 8 Depth of cut t_1 versus cutting ratio r_c . Cutting conditions, same as Fig. 4

Fig. 9 Chip thickness t_2 versus principal cutting force per unit cutting width F_c/w . Cutting conditions, same as Fig. 4

Table 4	Chip constant m	MPa
C2801		450
A1100		141
SUS304		801

Fig. 10 Principal cutting force per unit cutting width F_c/w versus surface plastic flow δ_f . Cutting conditions, same as Fig. 4

ルギー中の塑性流動の生成に消費されるエネルギー W_δ の割合 (W_δ/W_s) は $(1-\tau'_s/\tau_s)$ となる。表 3 を参照すれば、エネルギーの割合 (W_δ/W_s) は C2801 で約 10%, A1100 は約 13% であるのに対し、SUS304 は約 17% と最も大きい。

4.2 切削表面の塑性流動と切削抵抗の関係

切りくず定数 m を解析の中に導入すれば、切削に関与する各エネルギーは、せん断ひずみ γ_s を基にして相互に比較が可能となるから、ここで SUS304 の切りくず定数 m を確認しておくことは C2801, A1100 と比較検討する上で重要である。

Fig. 11 Shear strain γ_s versus cutting energies : W = total cutting energy, W_s' = shear energy without the effect of surface plastic flow, W_f' = friction energy on rake face without the effect of surface plastic flow, ΔW = additional total cutting energy resulting from the effect of surface plastic flow, and W_δ = energy consumed in surface plastic flow. Cutting conditions, same as Fig. 4

Fig. 12 Depth of cut t_1 versus ratios of energy : W , W_s' , W_f' , and W_δ , same as Fig. 11, and ΔW_f = additional friction energy resulting from the effect of surface plastic flow. Cutting conditions, same as Fig. 4

Table 5 Ratios of energy

	W_s'/W	W_f'/W	W_δ/W	$\Delta W_f/W$	$\Delta W/W$
C2801	0.795	0.104	0.089	0.012	0.101
A1100	0.779	0.088	0.121	0.013	0.133
SUS304	0.609	0.219	0.128	0.044	0.173

そこで式(7)で示した流動量 δ_f と主成分力 F_c の関係を検討するにあたって、切りくず定数 m に関して若干の現象的説明を加えておく。

SUS304 における切り込み t_1 および切りくず厚さ t_2 と主成分力 F_c の関係を図 7 に示す。主成分力 F_c はすくい角 γ や切り込み t_1 の変化によってかなり変化している。主成分力 F_c と切り込み t_1 の関係を直線近似すると、 F_c は切片を有しているの、比切削抵抗 $K_s (= F_c / (w \cdot t_1))$ は寸法効果を示すといえる。

次に切りくず厚さ t_2 と主成分力 F_c の関係では、各プロットはその時の切り込み t_1 との差 ($t_2 - t_1$) だけ右に移動することになる。この移動量の違いは各プロットの切削条件における切削比 r_c に依存する。図 8 に示すように切削比 r_c はすくい角 γ や切り込み t_1 の増加に対して増加傾向を示している。同時に図 7 に示したように例えば切り込み $t_1 =$ 約 0.16mm において、各すくい角 γ が大きくなると主成分力 F_c のプロットの右への移動量は、 $(a > b > c)$ のように相対的に小さくなっている。切りくず厚さ t_2 に対する主成分力 F_c のプロットは、結果として 1 つの比

例直線近傍に分布するように切削比 r_c が変化することを示している。

図 9 に SUS304 の単位切削幅あたりの主成分力 (F_c/w) と切りくず厚さ t_2 の関係に、比較のために C2801 と A1100 の結果を併せて示す。切削条件の変化にあまり影響を受けず、(F_c/w) は切りくず厚さ t_2 と材料毎にほぼ比例関係で表されることがわかる。この傾きが式(6)で示した切りくず定数 m であり、SUS304 においても新たにこの関係を確認した。表 4 に SUS304 の切りくず定数 m の値とともに C2801 と A1100 の値を示す。

図 10 に SUS304 の単位切削幅あたりの主成分力 (F_c/w) と流動量 δ_f の関係に、C2801 と A1100 の結果を併せて示す。切削条件の変化にあまり影響を受けず、(F_c/w) は流動量 δ_f とほぼ比例関係で表される。同一の (F_c/w) に対して C2801 と SUS304 の流動量 δ_f は同等程度であり、A1100 の流動量 δ_f はそれらの 4 倍程度ある。

4.3 切削表面の塑性流動と消費されるエネルギーの関係

流動量 δ_f と切りくず厚さ t_2 の関係を単純モデル化し、解析によって得られた切削に関与する各エネルギーと、せん断ひずみ γ_s の関係を図 11(a), (b), (c) に示す。SUS304 における塑性流動の生成がないとした際の摩擦エネルギー W_f' は、本実験の範囲内では他材料に比べてせん断ひずみ γ_s との比例直線からややずれる結果となったが、全般には各エネルギーはせん

Fig. 13 Depth of cut t_1 versus ratio of energy $\Delta W/W_f$. Cutting conditions, same as Fig.4

断ひずみ γ_s とほぼ比例関係にある。このことは 2.2.2 項の各式中における、塑性流動の生成の影響による切りくず厚さの増加分 Δt_2 ($=\delta_f \cdot \cos \gamma$) と実際の切りくず厚さ t_2 の割合 ($\Delta t_2/t_2$) が、切削条件にあまり影響を受けず材料毎に固有なほぼ一定の値をとることを示している。

塑性流動の生成の影響によって生じた全切削エネルギーの増加分 ΔW と、せん断エネルギー中の塑性流動の生成に消費されるエネルギー W_s の差は、摩擦エネルギーの増加分 ΔW_f を示している。SUS304 は他材料に比べて塑性流動の生成による摩擦エネルギーへの影響が相対的に大きいことを示している。

切り込み t_1 に対する各エネルギーが全切削エネルギー W に占める割合の関係を図 12(a), (b), (c) に示す。表 5 に各エネルギーの割合の平均を示す。

塑性流動がないとした際のせん断エネルギー W'_s が、全切削エネルギー W に占める割合 (W'_s/W) は、C2801 と A1100 に比較して SUS304 が小さく、塑性流動がないとした際の摩擦エネルギーの割合 (W'_f/W) は SUS304 が大きい。

全切削エネルギーの増加分 ΔW が占める割合 ($\Delta W/W$) は、C2801, A1100 と SUS304 ではそれぞれ約 10%, 約 13% と約 17% である。例えば、塑性流動の生成の影響による全切削エネルギーの増加分の割合は、SUS304 は C2801 の約 1.7 倍である。このエネルギーの割合 ($\Delta W/W$) は材料毎にほぼ一定の値を示し、切りくず厚さの割合 ($\Delta t_2/t_2$) でもある。

摩擦エネルギーの増加分 ΔW_f が占める割合 ($\Delta W_f/W$) は、3 種の材料ともに割合としては小さく、C2801 と A1100 の約 1% に対して SUS304 は約 4% である。

このように SUS304 は他材料に比べて塑性流動の生成による全切削エネルギーへの影響は大きく、摩擦エネルギーへの影響も大きいことがわかる。

全切削エネルギーの増加分 ΔW が、摩擦エネルギー W_f に対する割合 ($\Delta W/W_f$) と切り込み t_1 の関係を図 13 に示す。切り込み t_1 やすくい角 γ は変化しているが、SUS304 の割合 ($\Delta W/W_f$) は C2801 と同程度の範囲にプロットされている。

A1100 の割合 ($\Delta W/W_f$) はそれらよりも相対的に大きい。3 種の材料ともに切削条件によっては、エネルギー ΔW はエネルギー W_f に匹敵するかそれ以上に大きい場合もあるから無視できない。

5. 結 言

切削表面の塑性流動を伴う実際の切削と、塑性流動がないとした仮想的な切削を対比させることによって、塑性流動を伴う複雑な切削現象の一端の解明を試みた。そのために塑性流動と切りくず厚さの関係を単純化した切削モデルを設定し、塑性流動と切削に関与するエネルギーや、切削機構諸因子の関係などを解析した。

本報告では SUS304 の 2 次元切削実験を新たに実施するとともに、比較のために前報の C2801 と A1100 の実験結果も利用して解析結果を検証することによって、以下の点が明らかになった。

- (1) 全切削エネルギーは 4 つのエネルギーから構成される。すなわち、塑性流動がないとした際のせん断エネルギーと摩擦エネルギー、せん断エネルギー中の塑性流動の生成に消費されるエネルギー、摩擦エネルギーの増加分である。これらの各エネルギーはせん断ひずみとほぼ比例関係で表わすことができる。
- (2) 同一の切りくず厚さに対して、3 種の材料で SUS304 が最も流動量が多く生成する。また単位切削幅あたりの主分力に対する流動量では、SUS304 は C2801 と同程度であり A1100 が最も多い。
- (3) 全切削エネルギーに対する、塑性流動の生成に起因する摩擦エネルギーの増加分の占める割合は C2801, A1100 と SUS304 でそれぞれ、約 1%, 約 1% と約 4% である。また全切削エネルギーの増加分の占める割合はそれぞれ、約 10%, 約 13% と約 17% であり、SUS304 は塑性流動の影響をより多く受ける。
- (4) 摩擦エネルギーに対する、塑性流動の生成に起因する全切削エネルギーの増加分の割合は、SUS304 は C2801 と同程度であるのに対して A1100 が最も大きい。また、全切削エネルギーの増加分は、3 種の材料ともに条件によっては摩擦エネルギーに匹敵しているかそれ以上になる場合もあるので無視できない。

参 考 文 献

- 1) 中山一雄, 田村清: 切削抵抗における寸法効果 - 軽切削の研究-, 精密機械, 31, 362 (1965) 240.
- 2) K. Nakayama and K. Tamura: Size Effect in Metal-Cutting Force, Trans. ASME, J. Eng. Industry, Feb. (1968) 119.
- 3) 吉田協, 湊純一郎: 切削表面の塑性流動量を考慮した切削機構, 精密工学会誌, 75, 3 (2009) 390.
- 4) 吉田協, 湊純一郎: 切削表面に残留する塑性流動層生成に消費されるエネルギー, 精密工学会誌, 78, 8 (2012) 700.
- 5) 吉田協, 湊純一郎: 旋削における切削抵抗の簡便な推定法, 日本機械学会論文集(C 編), 79, 808 (2013) 554.
- 6) 狩野勝吉: 難削材の切削加工技術, 工業調査会, (1989) 155.