

# ステンレス鋼 SUS304 切削における構成凝着層の生成脱落挙動の予測

## Predicting the periodic evolution of Built-up layer formation in cutting of stainless steel SUS304

工学院大学 ○山岩宏基, ◎宋小奇, 鈴木健司, 中央大学 井原透

Kogakuin University ○Koki HIRAIWA, ◎Xiaoqi SONG, Kenji SUZUKI, Chuo University Tohru IHARA

### Abstract

構成凝着層は、切削時に工具すくい面上に薄く安定的に生じる凝着物であり、有効利用することで工具刃先の保護、加工精度の改善が期待される。本研究では、難削材である SUS304 切削における構成凝着層の生成脱落挙動を予測することを目的とし、各切削条件下での構成凝着層による実すくい角の変化を考慮した凝着・脱落モデルから構成凝着層の生成脱落周期を算出して、実験値との比較・検討を行い、モデルの妥当性について評価した。

**Keywords** : 切削加工, SUS304, 構成凝着層, 脱落周期, 実すくい角

### 1. 緒言

切削加工の際に工具表面上に生じる凝着物は、その形状から構成凝着層(以下 BUL)、構成刃先(以下 BUE)、逃げ面凝着物(FBU)に分類される。BUE は生成・成長・脱落を繰り返し、脱落から表面品質の劣化、工具摩耗の生成等を招く<sup>[1]</sup>。しかし、安定的に存在できる BUL が生じると、工具刃先の保護、精度改善が期待される<sup>[2]</sup>。一方、ステンレス鋼 SUS304 は優れた耐熱性、耐食性を持っているため、医療部品、建築材料などに用いられるが、熱伝導率が低く、高加工硬化性、高親和性により、切削時に凝着物が生じやすい。先行研究では、炭素鋼切削時の凝着・脱落モデルを提案し、BUE の生成・脱落周期の予測を報告した<sup>[3]</sup>。また、BUL/BUE による実すくい角の変化が報告されたが<sup>[4]</sup>、その生成・脱落に及ぼす影響は不明な点が多い。

そこで本研究では SUS304 切削における BUL/BUE の生成挙動と安定性を調べ、更に BUL/BUE による実すくい角の変化とその影響を調査し、最後に実すくい角を考慮した BUL の凝着・脱落モデルから BUL の生成脱落挙動を予測することを目的とする。

### 2. 生成・脱落周期のシミュレーション法

#### 2.1 凝着・損傷モデル

本研究では、既報<sup>[3]</sup>の凝着・脱落モデルを用いて、BUL/BUE 凝着・脱落予測を行った。工具界面でのメタルコンタクト領域における、工具・被削材原子が原子間距離に接近しており、電子のやり取りのある結合である。また、切削時の凝着現象は自然的に発生する不可逆的な散逸過程であり、結合は遷移状態論を含むべきであることから、凝着を工具・被削材原子から定まるポテンシャルエネルギー曲線の極小に被削材原子が存在し原子振動によって極小から離脱する簡単なモデルによって近似する。そのため、凝着は化学吸着現象とみなすことができ、凝着面積率の時間変化 $\dot{\theta}$ は以下の式で算出できる。

$$\dot{\theta} = \frac{K_a}{N} (1 - \theta), K_a = v_a \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{K_B T}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は凝着面積率、 $K_a$  は凝着速度定数、 $N$  は工具面上のメタルコンタクト領域における凝着サイト数である。

また、凝着速度定数  $K_a$  は原子の振動数  $v_a$ 、活性化エネルギー  $\Delta E_a$ 、ボルツマン定数  $K_B$ 、工具すくい面上の温度  $T$  が算出できる。活性化エネルギー  $\Delta E_a$  と原子の振動数  $v_a$  は、工具界面に対して垂直方向の一次元モデルから原子軌道法ソフト Gaussian03 を用いて近似的に求めることができる。本研究で用いた SUS304 の主元素鉄 Fe は先行研究で用いた炭素鋼 S45C と同じであり、工具の種元素 WC も同じであるため、既報に計算したパラメータ  $\Delta E_a$  と  $v_a$  を採用した<sup>[3]</sup>。

また BUL/BUE は、ある程度ある程度成長すると、損傷力学に基づいた損傷面積率が増加し、凝着面積率が減少するため、脱落が生じると考える<sup>[5]</sup>。そのため、損傷面積率の変化  $\dot{D}$  は式(2)で算出できる。

$$\dot{D} = \begin{cases} \dot{D} = 0, \varepsilon_{eq} < \varepsilon_{pd} \\ \left[-\frac{Y}{S}\right]^s, \varepsilon_{eq} > 0, \varepsilon_{eq} \geq \varepsilon_{pd} \text{ and } \sigma_{eq} \geq \sigma_f \\ 0 \leq D \leq D_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $D$  は損傷面積率、 $Y$  はエネルギー開放率、 $S$  と  $s$  は材料定数、 $\varepsilon_{eq}$  は累積相当ひずみ、 $\varepsilon_{pd}$  は損傷発生限界ひずみ、 $\sigma_{eq}$  は相当応力、 $\sigma_f$  は疲労限であり、 $D_{cr}$  はクラック発生限界値であり、損傷面積率の最大値である。またエネルギー開放率  $Y$ 、三軸度関数  $R_v$  はそれぞれ以下の式で求められる。

$$Y = -\frac{\sigma_{eq}^2}{2G(1-D)^2} R_v, R_v = \frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 - 2\nu)T_x^2 \quad (3)$$

ここで  $G$  は横弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $T_x$  は応力三軸度である。

また、温度  $T$  が材料の破壊強度に及ぼす影響を考慮するため、クラック発生限界値  $D_{cr}$  と材料定数  $S$  は以下の式で表される。

$$D_{cr} = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (4)$$

$$S = \frac{\sigma_u}{2E} \left(\frac{\varepsilon_{PR} - \varepsilon_{PD}}{D_{cr}}\right)^{\frac{1}{s}} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_R$  は材料の破断強さ、 $\sigma_u$  は材料の引っ張り強さ、 $E$  はヤング率、 $\varepsilon_{PR}$  は破断ひずみ、 $\varepsilon_{PD}$  は引張試験時の損傷発生限界ひずみである。また簡易のため本研究では材料定数  $s = 1$  を用いた。

#### 2.2 切削温度と応力三軸度の予測

脱落周期のシミュレーションには、切削時の工具すくい面上の温度  $T$  と工具界面での応力三軸度の計算が必要となる。本研究では、工具すくい面上の温度  $T$  は、以下の式で計算する<sup>[6]</sup>。

$$T = T_{AB} + \Delta T_M \quad (6)$$

$$\begin{cases} \log\left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_C}\right) = 0.06 - 0.195\delta\left(\frac{R_T t_c}{l_c}\right)^{0.5} + 0.5 \log_{10}\left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_C}\right) \\ \Delta T_C = \frac{F \sin \varphi}{\rho c t_w \cos(\varphi - \alpha)}, T_{AB} = T_0 + \frac{(1 - \beta) F_S \cos \alpha}{\rho c t_w \cos(\varphi - \alpha)} \\ \beta = 0.5 - 0.35 \log(R_T \tan \varphi) \text{ for } 0.04 \leq R_T \tan \varphi \leq 10 \\ \beta = 0.3 - 0.15 \log(R_T \tan \varphi) \text{ for } R_T \tan \varphi > 10 \\ R_T = \frac{\rho c V t_w}{k} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $T_{AB}$  はせん断面上の温度、 $\Delta T_M$  は切りくず内の最大温度上昇、 $\Delta T_C$  は切りくず内の平均温度上昇、 $V$  は切削速度、 $t_w$  は切り込み、 $t_c$  は切りくず厚さ、 $w$  は切削幅、 $l_c$  は工具界面の接触距離、 $F$ 、 $F_S$  はすくい面上、せん断面上のせん断力、 $\varphi$  はせん断角、 $\alpha$  はすくい角、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱容量、 $k$  は熱伝導率、 $T_0$  は室温 25°C である。

一方、応力三軸度  $T_x$  は工具すくい面上の平均垂直応力  $\sigma$ 、平均せん断応力  $\tau$  から次のように算出できる。

$$T_x = \frac{\sigma/3}{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}, \sigma = \frac{N}{l_c w} = \frac{F_C \cos \alpha - F_f \sin \alpha}{l_c w}, \tau = \frac{F}{l_c w} = \frac{F_C \sin \alpha + F_f \cos \alpha}{l_c w} \quad (8)$$

ここで、 $F_C$  は主分力、 $F_f$  は送り分力である

#### 2.3 実すくい角

BUL/BUE が工具すくい面上に堆積することにより、図 1 に示すように、すくい角は変化する<sup>[4]</sup>。BUL/BUE を考慮した実すくい角  $\alpha_0$  は以下の式によって算出する。ここで、 $\alpha$  は BUL/BUE が無い時のすくい角、 $\alpha_B$  は BUL/BUE を考慮したすくい角の測定値である。

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_{BUE} = \alpha + \alpha_B, & \text{for BUE} \\ \alpha_{BUL} = \alpha - \alpha_B, & \text{for BUL} \\ \alpha & \text{without BUL/BUE} \end{cases} \quad (9)$$

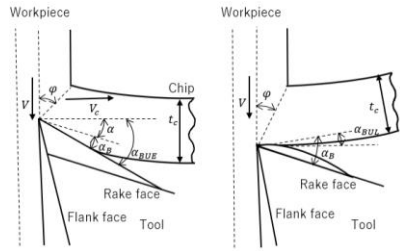


Fig. 1 Real rake angle model with (a) BUE (b) BUL

### 3. 被削材及び実験方法

切削実験は、NC 旋盤 (TAC360, 滝沢鉄工所製) にて、表 1 に示す切削条件のもとステンレス鋼 SUS304 の丸棒をすくい角  $5^\circ$  のノンコーデット超硬工具 TH10 を用いて乾式切削加工を行った。Table 1 に切削条件を示す。切削後の工具表面はレーザー顕微鏡 (VK-X200, KEYENCE 製) と走査型電子顕微鏡 SEM (JSM-6360LA, IEOL 製) を用いて凝着物形状と寸法を観察・計測した。切りくず裏面は SEM を用いて、脱落による痕の間隔を計測した。切りくず厚さは包埋樹脂に埋め込んで、マイクロスコブ顕微鏡 (VHX-1000, KEYENCE 製) で計測した。

Table 1 Cutting parameters

Cutting speed $V$ [m/min]	10, 20, 40, 60, 80, 100
Feed rate $f$ [mm/rev]	0.02, 0.05, 0.1
Width of cut $w$ [mm]	1.0
Cutting time $t$ [s]	1, 10, 30, 60, 120
Cutting fluid	Dry

### 4. 結果及び考察

Fig.2(a)には送り速度 0.05 mm/rev, SUS304 における切削時間 60s における各切削速度下での凝着物高さを測定した結果である。同図より、切削速度 40m/min 以上の場合に、凝着物は工具切れ刃近傍で大きく成長せず、コーティング状にすくい面を覆っていることが確認できた。また、この時の仕上げ面粗さには大きな変動が認められることから、20m/min 以下の場合に BUE が、40m/min 以上場合に BUL が工具表面上に生じていると言える。Fig.2(b)に送り速度 0.05 mm/rev における切削時間ごとの BUL/BUE の平均高さ変化を示す。同図に示すように BUL の高さは時間に伴ってほぼ変化しないことから、BUE より、BUL の安定性が高いと推測される。送り速度 0.02mm/rev と 0.1 mm/rev において同じ結論が得られる。また、切りくず裏面上の脱落痕間隔の測定結果と脱落物の SEM 観察から、BUL と BUE の脱落機構は異なることを確認した。

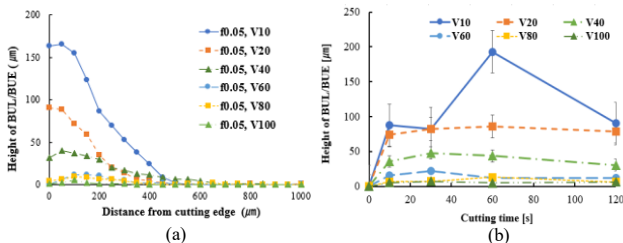


Fig.2 Variations of (a) profile of adhesion with cutting speed and (b) height of adhesion with cutting time for feed rate 0.05 mm/rev

Fig.3 に BUL/BUE における実すくい角の変化を示す。BUE の場合に実すくい角は工具すくい角  $5^\circ$  より大きく、切削速度の増大に伴って減少し、BUL の場合に実すくい角は工具すくい角  $5^\circ$  より小さいが、切削速度の増大に伴って  $5^\circ$  に近づくことを確認した。このことから、実すくい角が切削過程に大きな影響を及ぼすと考えられる。脱落周期シミュレーションでは、すくい面上の温度と応力三軸度は非常に重要なパラメータなので、ここで、実すくい角がこれらに及ぼす影響を検討・考察する。Fig.4 に送り速度 0.05 mm/rev における実すくい角を考慮した場合としない場合のすくい面上の温度 (式 6) と応

力三軸度 (式 8) の解析結果を示す。同図(a)から、実すくい角を考慮した場合としない場合のすくい面上の温度は大きな差が見られないことが認められる。一方、同図(b)から、実すくい角による応力三軸度の変化が確認できた。送り速度 0.02 mm/rev, 0.1mm/rev において同じ結論が得られる。

Fig.5 に BUL/BUE の脱落周期の実測値と実すくい角を考慮した場合としない場合の予測値を示す。Fig.5 に示すように、切削速度の増大に伴って脱落周期が減少していることが認められた。また、予測値は実測値と概ね一致していることから、シミュレーション法の有用が確認でき、BUL の脱落周期の予測が可能となった。一方、実すくい角による脱落周期の予測値の変化が確認できなかったことから、すくい面上の温度より、応力三軸度が脱落周期の予測値に及ぼす影響が小さいと考えられる。

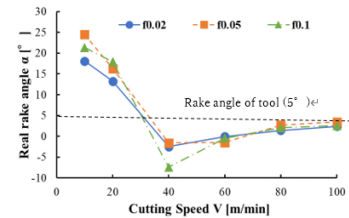


Fig.3. Variation in real rake angle

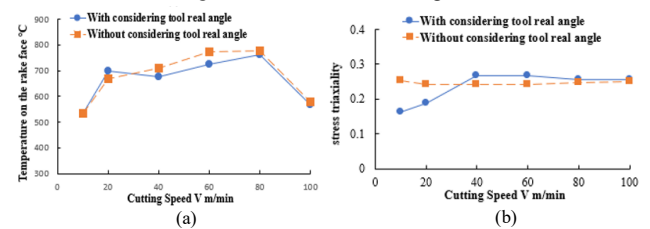


Fig.4. Predicted (a) temperature and stress triaxiality on the rake face with and without considering the real rake angle for feed rate 0.05 mm/rev

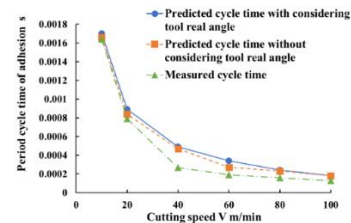


Fig.5. Comparison of cycle time of BUL/BUE between the simulation and measured result for feed rate 0.05 mm/rev

### 5. 結言

本研究ではステンレス鋼 SUS304 切削における BUL/BUE の生成挙動とその安定性を調べ、更に BUL による実すくい角を考慮した生成・脱落周期を予測するシミュレーションを用いて、BUL の生成脱落挙動の予測を行い、以下の結果を得た。

- (1) SUS304 における BUL/BUE の生成条件を確認し、BUL は安定的に存在できることを確認した。
- (2) 実すくい角がすくい面上の温度と応力三軸度に及ぼす影響を確認した。
- (3) 提案した脱落シミュレーション法により BUL の予測が可能になった。
- (4) 実すくい角が脱落周期予測に及ぼす影響は少ないことが確認された。

#### 参考文献

- 1) 大越 諒：切削加工における構成刃先の功罪，精密機械，35，413 (1969) 352-359.
- 2) 宋小奇ら：構成凝着層を利用した焼入れ鋼の切削加工技術に関する研究，精密工学会誌，82，9 (2016) 814-820.
- 3) 菊池洋志ら：低炭素鋼における損傷力学モデルを用いた構成刃先脱落機構，精密工学会誌，79，10 (2013) 955-958.
- 4) Xiaoqi Song et al. : Effects of size of build-up layer on the wear of cemented carbide tools in cutting of SUS304 stainless steel, Jou. Adv. Mech. Des., Sys., and Manu., 15, 4 (2021) p. JAMDSM0050.