

# 損傷力学モデルを利用した鋼材切削時の構成刃先脱落現象に関する検討

## Investigation into an Omission Mechanism of Built-up Edge based on Damage Mechanics Model

精密工学専攻 19号 菊地洋志

Hiroshi Kikuchi

### 1. 緒言

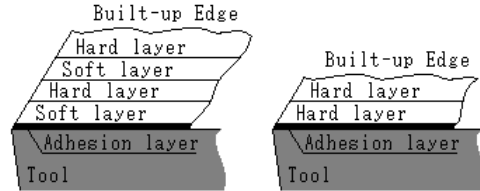
切削加工において仕上げ面粗さを悪化させる主要因の一つに構成刃先がある<sup>(1)</sup>。自動車部品やOA機器などのメーカーは主要な部品製造において快削鋼を用いる事によって切削加工時の構成刃先を抑制し、高効率化と高精度化を両立させている。従来、快削成分として鉛を添加していたが、近年では環境負荷物質の規制を自主目標に掲げる企業が多くなり、これに応える形で非鉛快削鋼が開発され始め、再び構成刃先対策が重要な課題となっている。

構成刃先のライフサイクルは発生・成長・脱落から構成され、発生に関しては親和性<sup>(2)</sup>や凝着力<sup>(3)</sup>による考察、成長に関しては被削材マイクロ組織の不均一性<sup>(4)</sup>や被削材不均質部の応力集中効果<sup>(5)</sup>による考察、脱落に関してはすくい面上のせん断力<sup>(3)</sup>による考察が成されている。以上を要すると次の様に構成刃先のライフサイクルは考えられる。

図1に示す様に工具刃先における被削材の破壊によって生じた被削材新生面は工具面との親和性に応じて凝着する。凝着後の被削材挙動は結合強度の大小によって決まる。結合強度が小さい場合は凝着が生じて凝着層の塑性変形<sup>(6)</sup>によって被削材/工具間界面が不安定積層配置的になり、凝着層は直ちにせん断破壊を起こす。その結果、凝着の工具刃先への影響はわずかとなり工具刃先形状が被削材仕上げ面に転写され、典型的な流れ型の切りくずが生じる。結合強度が大きい場合は常に凝着する。凝着層は切削に伴う塑性流動<sup>(6)</sup>によって加工硬化が生じ、母材に比べて変形抵抗が増加する。これに引き続き、図1(a)に示す凝着層に隣接する母材の柔らかな層、硬い層も塑性流動とこれに伴う加工硬化が開始する<sup>(7)</sup>。両層の変形抵抗は共に増加するが硬い層に挟まれた柔らかい層がスクイズアウトされ、結果として図1(b)の様加工硬化した母材の硬い層が凝着層の上に積層する。同層は凝着層上部と同材種である為に親和性が高く凝着する。被削材内部で同様なスクイズアウトと凝着が発生し、これが構成刃先の成長となる。成長した結果、切削によって生じる背分力方向のせん断力が界面の結合強度を超えた場合に構成刃先は脱落する。

脱落に関して既存の研究<sup>(3)</sup>では、被削材/工具界面の結合強度(凝着力)と摩擦分力方向のせん断力のバランスだけで脱落するとしている。通常、一つの外部変数のバランスのみでは、構成刃先の様な周期的な現象は発生せず、一つの平衡状態に収束する。従って、構成刃先は非平衡状態にあると考えられ、内部状態を考慮しなければならない。そこで本研究では構成刃先の内部状態の変化を考慮した被削材/工具界面モデルを導入し、構成刃先の発生と脱落を議論する。同モデルに対して凝着面積率および損傷面積率という内部変数を用い、その時間変化を分子軌道法計算と損傷力学を利用して見積もった。その結果、構成刃先の

脱落周期を見積もる事が可能となった。同結果は仕上げ面粗さを悪化させる構成刃先の抑制にも繋がる知見であると思われるので報告する。



(a) Adhesion (b) Squeeze out  
Fig. 1 Built-up Edge image

### 2. 構成刃先凝着理論

#### 2.1 遷移状態理論の援用

本研究では脱落を論ずるので前述の結合強度が大きい場合を対象とする。既存の研究によると切削界面における凝着に関して鋼材切削時のペラグは工具に凝着しても化学反応はしていないと考察されている<sup>(8)</sup>。この報告と構成刃先は周期的に脱落するという事実より、被削材/工具間の凝着は非平衡状態にあり、結合は遷移状態論を含むべきであると類推する事ができる。そこで本研究では被削材/工具間の凝着をポテンシャルの井戸と呼ばれる被削材/工具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、その後、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できるとする。すなわち被削材原子は工具表面特定サイトでの離脱(凝着していない)状態から、遷移状態となるポテンシャルの障壁を越えて凝着状態となるというモデルを考える。

さて、工具すくい面上に凝着する被削材面積率の時間変化は次式のように表現される<sup>(9)</sup>。

$$\dot{\theta} = \frac{k_a}{N} (1 - \theta) \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ は凝着面積率、 $k_a$ は凝着速度定数、 $N$ は工具すくい面上のメタルコンタクト領域に存在する凝着可能サイト数の単位面積あたりの個数である。工具表面を図2に示す一様なタングステン結晶面(W-W間:2.9[Å])だとし、タングステン一原子上に被削材一原子が凝着出来るとすると、凝着サイト数 $N$ は $1.37 \times 10^{19} [1/m^2]$ となる。

次に、凝着速度定数を求める。図2において状態Xから遷移状態Yを通り状態Zへ状態変化する場合を考える。遷移状態Yを不帰点とする事で、状態Xと遷移状態Yの間に準平衡状態を仮定する事ができる。そこで平衡状態を仮定した質量作用の法則を用いると、遷移状態の速度がMaxwell-Boltzmann速度分布に従う事となる。これを用いて遷移状態方程式を解く事で状態Xから状態Zへ状態変化する際の速度定数、すなわち凝着速度定数 $k_a$ を求める事ができる。

$$k_a = \left( \frac{k_B T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{n_Y}{n_X} = \left( \frac{k_B T}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{q_Y}{q_X} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right) \quad (2)$$

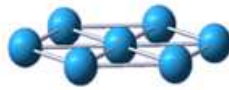
ただし、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は温度、 $m$ は粒子の質量、 $n_X$ と $n_Y$ は状態Xと遷移状態Yの濃度であり、 $q_X$ と $q_Y$ は状態Xと遷移状態Yの単位面積あたりの分配関数である。また $\Delta E_a$ は状態Xと遷移状態Yのエネルギー差(活性化エネルギー)である。状態Xと状態Zでは基底状態の調和振動子の分配関数を持つとする。この時の分配関数は

$$q = \frac{\exp(-h\nu/2k_B T)}{1 - \exp(-h\nu/k_B T)} \quad (3)$$

となる。ただし $h$ はプランク定数、 $\nu$ は原子の基底状態における振動数である。式(3)を式(2)に代入すると、凝着速度定数 $k_a$ は次式となる。

$$k_a = \nu_a \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right) \quad (4)$$

求めた凝着速度定数を式(1)に代入する事で、凝着面積率 $\theta$ の時間変化を求める事が出来る。



Toolmaterial(W)  
Fig. 2 Rake face model

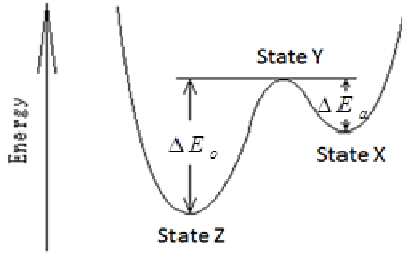


Fig. 3 Transition state model

## 2.2 被削材/工具界面モデル

被削材/工具界面を図4に示すような、工具面に対して垂直な軸のみの一次元四原子モデルにて近似する。凝着速度定数を求めるために必要な活性化エネルギーと基底状態での振動数は、同モデルで被削材界面原子以外の三原子を固定し、被削材界面原子のみを一軸上で動かした際(図4中のXを変化させる)に得られる系のポテンシャルエネルギーから求める。なお、切削時の工具刃先では破壊現象を伴うため、切削の進展に伴い構成刃先内部の空孔は増加すると考えられる。そこで、空孔濃度の変化を図4中の $X_0$ を変化させて表す。Fe-Fe間の平衡核間距離は $2\text{\AA}$ であるから $X_0=2\text{\AA}$ の時に空孔濃度0%とする。便宜的に、 $X_0$ に空孔0.5個、1個、1.5個に相当する $1\text{\AA}$ 、 $2\text{\AA}$ 、 $3\text{\AA}$ を加える事で空孔濃度14%、25%、33%の状態を表現し、構成刃先内部状態の変化を考慮した。系のポテンシャルエネルギー計算及び基底状態での振動数計算は分子軌道法計算ソフトGaussian03を用いて行った。

図4のモデルから求めた各空孔濃度でのポテンシャルエネルギー曲線を図5に示す。また、ここから求めた凝着速度定数 $k_a$ を表1にまとめる。算出した $k_a$ を用いる事で式(1)から凝着面積率 $\theta$ の時間変化を求める事が可能となる。

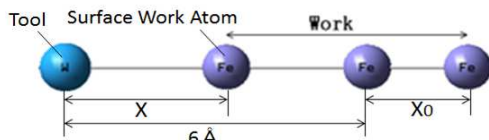


Fig. 4 Local model

Table. 1 Adhesion equation constants

Temp	Porosity	0%	14%	25%	33%
400°C		$2.65 \times 10^{23}$	$1.44 \times 10^{22}$	$3.57 \times 10^{19}$	$3.20 \times 10^{18}$
500°C		$1.47 \times 10^{24}$	$1.16 \times 10^{23}$	$6.44 \times 10^{20}$	$7.34 \times 10^{19}$
600°C		$5.50 \times 10^{24}$	$5.74 \times 10^{23}$	$5.99 \times 10^{21}$	$8.22 \times 10^{20}$

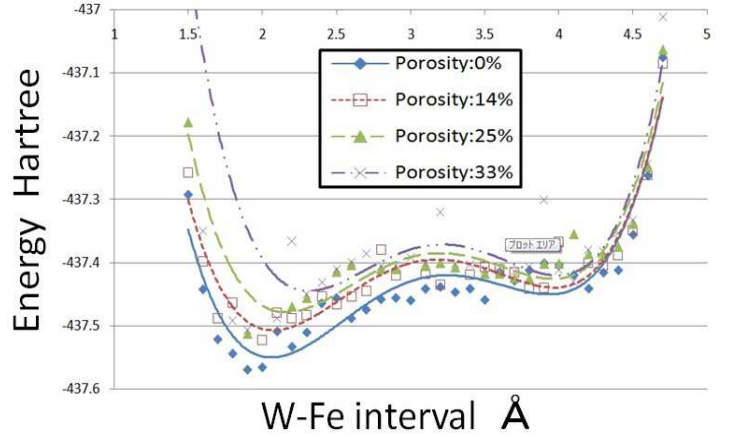


Fig. 5 Energy curve

## 3. 構成刃先脱落理論

### 3.1 損傷力学

損傷力学は、弾性変形、塑性変形、ひずみ速度の影響、疲労試験、破断などを含む金属材料の力学特性をモデル化する理論として、ほとんど唯一の理論体系であると考えられる<sup>(10)</sup>。そこで本研究では、構成刃先脱落現象に損傷力学を利用する。

切削加工がある程度進展すると、損傷面積率が増加し、凝着面積率が減少すると考えられる。この損傷発展方程式は、Lemaitre<sup>(11)</sup>により統一モデルとして提案された以下の形式を採用する。

$$\dot{D} = \left( -\frac{Y}{S} \right)^s \dot{\epsilon}_{eq} \quad (5)$$

上式(5)において、損傷が発展する条件は以下のとおりになる。

$$\dot{D} = 0, \quad \epsilon_{eq} < \epsilon_{pd} \quad \text{の場合} \quad (6\cdot a)$$

$$\dot{D} > 0, \quad \epsilon_{eq} \geq \epsilon_{pd} \quad \text{および} \quad \sigma_{eq} \geq \sigma_f \quad \text{の場合} \quad (6\cdot b)$$

$$0 \leq D \leq D_{cr} \quad (6\cdot c)$$

すなわち、累積相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ が損傷発生限界ひずみ $\epsilon_{pd}$ に達し、相当応力 $\sigma_{eq}$ が疲労限 $\sigma_f$ を超えているとき、式(5)に従い損傷が発展する。損傷面積率 $D$ の最大値はクラック発生限界損傷値 $D_{cr}$ である。 $S$ および $s$ は材料定数である。式(5)中の弾性ひずみエネルギー解放率 $Y$ は次式(7)により表現される。式(7)中の $R_v$ は三軸関数であり、式(8)に表される。

$$-Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2G(1-D)^2} R_v \quad (7)$$

$$R_v = \left[ \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu)T_x^2 \right] \quad (8)$$

式(7)、(8)において $G$ 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、材料定数 $S$ は式(9)、損傷発生限界ひずみ $\epsilon_{pd}$ は式(10)で表現される<sup>(11)</sup>。

$$S = S_0^p (1 + c_s \dot{\epsilon}_{eq}) \quad (9)$$

$$\epsilon_{pd} = \epsilon_{pd0} (1 + c_\epsilon \dot{\epsilon}_{eq}) \quad (10)$$

### 3.2 各パラメータの導出

損傷面積率の  $D$  の時間変化を求めるためには、式(5)～式(10)中のパラメータ値が必要になる。都井らの研究<sup>(10)</sup>により、鋼材 SM490A におけるパラメータ値は表 2 のようになる。式(7)中の横弾性係数  $G$  は同鋼材における縦弾性係数  $E=210[\text{GPa}]$ 、ポアソン比  $\nu=0.3$ <sup>(11)</sup> により  $G=80.8[\text{GPa}]$  とする。また、応力三軸度  $T_x$  は Lemaitre, Desmorat<sup>(12)</sup> による報告により 0.58 という値が提案されているため、これを採用する。

Table. 2 Material constants for SM490A

$s$	$S_0^p[\text{MPa}]$	$C_s[\text{sec}]$	$\epsilon_{pd0}$	$C_\epsilon[\text{sec}]$	$D_{cr}$
1	0.47	$0.3625 \times 10^{-3}$	0.110	$-0.3750 \times 10^{-4}$	0.53

#### 3.2.1 切削実験と切屑観察

式(5)中の相当ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{eq}$  を求めるため、SM490A 板材端面に対し乾式二次元切削を行い、切屑観測を行った。切削条件を表 3 に、各切削速度で生成された切屑および切屑厚さを図 6 に示す。

Table. 3 Cutting condition

Work piece	SM490A
Tool	Cemented carbide K10
Rake angle	0 degree
Flank angle	20 degree
Cutting speed	10, 15, 20 m/min
Depth of cut	0.1 mm
Width of cut	4.5 mm



(a)  $V=10\text{m/min}$  Thickness=1.37mm (b)  $V=15\text{m/min}$  Thickness=1.06mm (c)  $V=20\text{m/min}$  Thickness=0.87mm

Fig. 5 Shape of chip

#### 3.2.2 実験結果

一般的に構成刃先が発生するとせん断角が大きくなり切屑が薄くなる。また、切屑裏面から光沢が失われる。

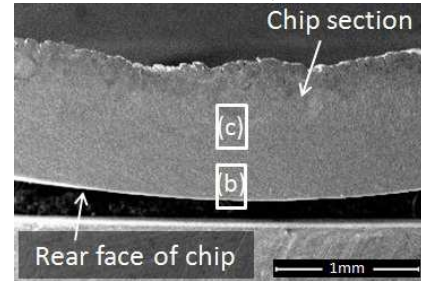
ここで図 5 より、切削速度の増加に伴い切屑が薄くなるのが分かる。また、切屑裏面を観察すると、切削速度 10[m/min]では滑らかなのに対し、それ以上の切削速度ではえぐられた箇所がみられた。以上のことより、切削速度 15, 20[m/min]では構成刃先が発生していると考えられる。

#### 3.2.3 ひずみ速度算出

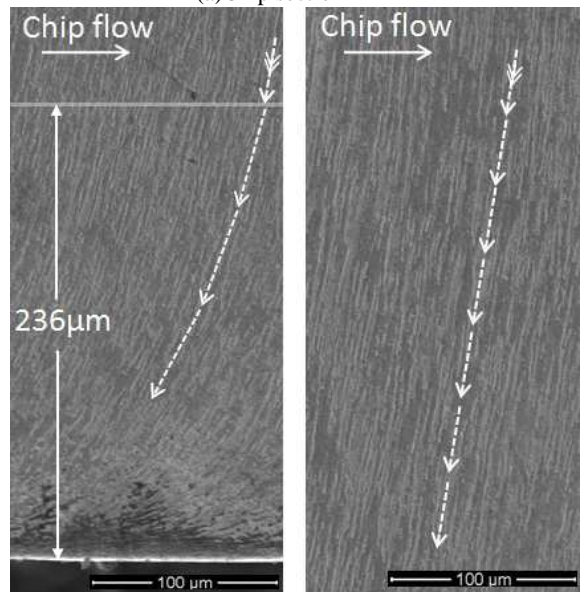
切削速度 15[m/min]における切屑の側面をエメリー紙およびアルミナで鏡面に仕上げ、ナイタル(0.3%硝酸エタ

ノール)にてエッチングした。処理面を SEM で組織観察した結果を図 6 に示す。

同図(b), (c)中に組織の流れを点線矢印で示した。これより、工具すくい面から 236[ $\mu\text{m}$ ]の範囲で切屑にひずみが生じていると考えられる。この値を用いてひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を求める。二次元切削の力学的関係から切削速度 15[m/min]、切屑厚さ 1.06[mm]、切り込み 0.1mm における切屑排出速度  $V_c$  を求めると、0.023[m/min]となる。よって、工具すくい面上切屑ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 0.023/236[\mu\text{m}] = 97[1/\text{s}]$  となる。



(a) Chip section



(b) Edge of chip section

(c) Inside of chip section

Fig. 6 Strain range on rake face

#### 3.2.4 相当ひずみ速度、相当応力算出

すくい面上の工具-被削材間を平面ひずみ状態と考え、せん断応力  $\tau$  とせん断ひずみ  $\gamma$  のみが働くとする。相当ひずみ増分  $d\epsilon_{eq}$  とミーゼスの相当応力  $\sigma_{eq}$  は次式のとおりになる。

$$d\epsilon_{eq} = \frac{d\gamma}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3}\tau \quad (12)$$

式(11)と前項で求めたひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  より式(5)中の相当ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{eq} = 56[1/\text{s}]$  となる。ここで、被削材 SM490A の引っ張り強さは 490[MPa]であり、せん断抵抗は引張り強さの 60%~80%程度と言われている<sup>(13)</sup>。また、鋼材の引張強さは一般的に温度と共に低下する<sup>(14)</sup>。これらの事実と、式(12)より 400, 500, 600°Cにおける相当応力を表 4 にまとめる。

Table.4 Equivalent stress in various temperature

Temp[°C]	400	500	600
$\sigma_{eq}[\text{MPa}]$	341	203	101

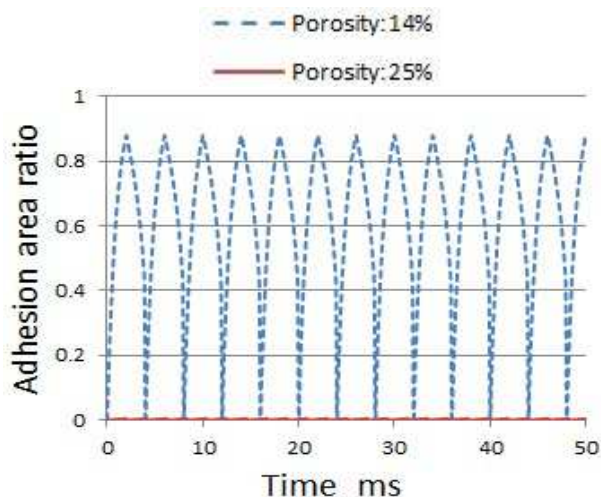


#### 4. 構成刃先脱落周期シミュレーション

求めた凝着面積率, 損傷面積率の時間発展式から構成刃先脱落周期をシミュレーションする. 流れは以下のとおりである.

切削加工が開始すると, ほとんどの場合被削材は工具界面に付着し, 構成刃先の足場となる<sup>(2)</sup>. また, この付着は化学的な機構での凝着であると知られている<sup>(2)</sup>. このため, 先ずは式(1)に従い凝着面積率が増加していく. その後ある程度加工が進行すると, 被削材/工具界面でのひずみが損傷発生限界ひずみに達し, 式(5)に従い損傷面積率が増加し, その分凝着面積率は減少する. 損傷面積率がクラック発生限界損傷値に達した時点で, 被削材/工具界面でマイクロクラックが発生<sup>(10)</sup>し, 構成刃先が脱落すると考える. 以上の過程を一周期とし, 構成刃先脱落周期を予測する. 図7に被削材/工具界面温度 500°C, 600°C, 700°Cにおける空孔濃度 14%, 25%でのシミュレーション結果を示す.

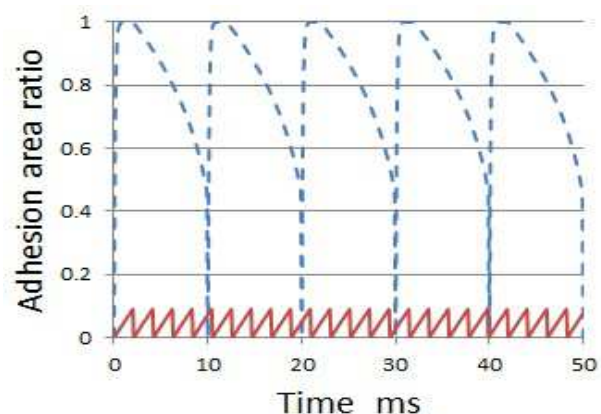
一般的に鋼材切削の場合, ①構成刃先生成・脱落周期は5~30ms, ②切削温度の上昇に伴い構成刃先は凝着しやすくなり周期が遅くなる, と言われている<sup>(15)</sup>. 図7(a), (b)における空孔濃度 25%の凝着面積率は小さく, 構成刃先が成長出来ていないと考えられる. その他の構成刃先が成長出来ていると考えられる結果において, 脱落周期・傾向共に通説に近いシミュレーションが可能である.



(a) Rake face temp:500°C

Cycle time of Built-up Edge omission(14%):4ms

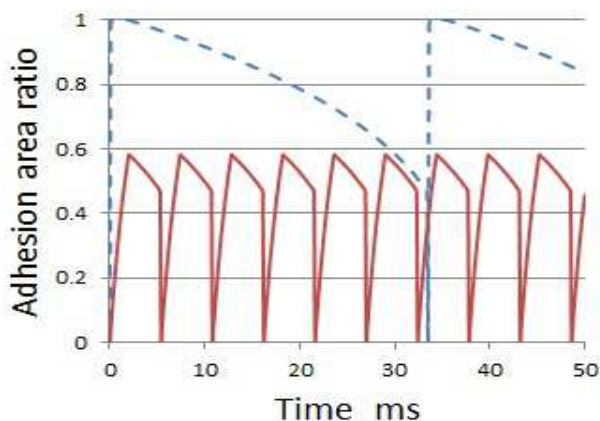
Cycle time of Built-up Edge omission(25%):2.1ms



(b) Rake face temp:600°C

Cycle time of Built-up Edge omission(14%):10ms

Cycle time of Built-up Edge omission(25%):2.1ms



(c) Rake face temp:600°C

Cycle time of Built-up Edge omission(14%):33.5ms

Cycle time of Built-up Edge omission(25%):5.4ms

Fig. 7 Built-up Edge omission cycle simulation

#### 5. 結言

構成刃先の脱落について考察を行い, 次の結果を得た.

- (1) 構成刃先の内部状態変化を考慮した界面モデルを提案した.
- (2) 提案したモデルに対し分子軌道法と損傷力学を用い, 通説に近い構成刃先脱落周期シミュレーションが可能である.

本研究は仕上げ面粗さを悪化させる構成刃先の抑制に繋がる知見になると考えられる.

#### 参考文献

- (1) 片山昌, 削られる側の視点論点, 仕上げ面粗さと構成刃先生成の予測, 機械技術, **45**-1(1997) pp. 106-111.
- (2) 竹山秀彦ら, 構成刃先に関する基礎研究(第1報, 構成刃先の発生), 機械技術, **32**-242(1966) pp. 1563-1579.
- (3) 鳴瀧良之助ら, 構成刃先の生成, 脱落機構に関する研究, 機械技術, **36**-290(1970) pp. 1754-1760.
- (4) 片山昌ら, 鋼のマイクロ組織の不均一性に着目した構成刃先成長モデル, 精密機械, **62**-9(1996) pp. 1345-1349.
- (5) 橋村雅之ら, 環境にやさしい低炭非鉛快削鋼の開発, 新日鉄技報, **386**(2007) pp. 42-46.
- (6) 桜本拓也ら, 切削工具すくい面上摩擦分力の予測法に関する一試案, 精密工学会誌(掲載可)
- (7) 竹山秀彦ら, 構成刃先に関する基礎研究(第2報) 構成刃先の成長機構, 精密機械, **34**-403(1968) pp. 537-540.
- (8) 白杵年ら, コーテッド工具における BeIag の生成と工具摩耗, 精密工学会大会学術講演会講演論文集, (2009)A06
- (9) 慶伊富長, 反応速度論, 東京化学同人, 東京(1969)
- (10) 都井裕ら, 損傷力学モデルによる金属材料の力学特性の同定と予測, 日本機械学会, **69**-679(2003) pp. 30-37.
- (11) Lemaitre, J., A Course on Damage Mechanics, 2nd ed., (1996), 1-228, Springer
- (12) Lemaitre, J and Desmorat, R., Engineering Damage Mechanics(2005), 1-88, Springer
- (13) 高橋幸雄, プレス打ち抜きと型設計, 日刊工業新聞社, 東京(1970)
- (14) 富士明良, 工業材料入門, 東京電機大学出版局, 東京(2009)
- (15) 牧野亮哉ら, 低炭素鋼切削における構成刃先現象, 精密機械, **39**-3(1973) pp. 299-305.