切りくず内金属組織の逆折れ現象*

上 神 謙 次 郎^{*1}

Back-Bending in the Primary Flow of Chip

Kenjiro UEGAMI

The primary flow in a chip may sometimes bend backward in the center of thickness a little toward rake face. This phenomenon occurs always when gaseous oxygen is blown against the cutting edge from the beginning of cutting carbon steel with the speed range in which built-up edge occurs. For this reason, it is that a wedge-type built-up edge with a sharp nose edge formed by the effect of oxide film occurs, the chip cut by the sharp built-up edge with a large rake angle impinges violently against the rake face of the tool and it is sheared again. The mechanism of the back-bending of primary flow can be explained by considering shear planes having the angle of ϕ_2 , ϕ_{21} and ϕ_{22} in addition to the ordinary shear angle ϕ_1 .

Key Words: Cutting, Chip, Primary Flow, Wedge-Type Built-up Edge, Shear Plane

1. は じ め に

切削における切りくずは種々の情報を含んでおり、これによって切削現象を論ずることがしばしばなされてきた。切りくず内の金属組織の流れの方向もその1つである。この切りくず内の金属組織の流れは刃先における激しいせん断変形の影響を大きく受けた結果生じるもので、その流れ方向角には工具のすくい角とせん断角が関係している^{1~8)}。この金属組織の流れは、切りくずが生成されるせん断面での1次塑性流れ、そして、切りくずとすくい面との摩擦によって生じる2次塑性流れとからなり、それらはいずれもすくい面側に傾き、2次塑性流れではさらによりすくい面に沿うように湾曲して生じるのが一般に見られる現象である。

この金属組織の流れが通常の場合とは異なり、切りくずのすくい面側のある範囲の厚さ内で、2次塑性流れとは逆の方向に折れ曲がる場合がある^{8~9)}。本論文は、このような現象がどのような場合に生じるのか、そして、その生成機構について検討したものである。

2. 切削急停止写真の切りくず内金属組織の逆折れ例から

図1(a), (b)は円筒端面の切削による近似二次元切削の急停止試料の断面(以下の写真もすべて同じ)を研磨後腐食して金属組織を出した写真である。試料の白い縁取りの層は研磨時の試料の縁の面だれ防止のた

(a) α -brass, $\gamma_r = -5^\circ$, $V = 14$ mpm, $d = 0.025$ mm.

(b) 0.45% C steel, $\gamma_r = 10^\circ$, $V = 18.2$ mpm, $d = 0.1$ mm.

Fig. 1 The Abrupt-cutting-stop photographs

めに行ったNiメッキの層である。図1(a)は構成刃先が生じていない七・三黄銅の切削の場合であり、同(b)は炭素鋼S45Cの鼻形構成刃先が生じている場合である。これらの写真は一般によく見られるもので、切りくず内には鮮明な金属組織の流れが見られ、2次塑性流れはすくい面側に沿うように流れている。

* 原稿受付 1997年5月26日。

*1 正員, 大阪市立大学工学部 (☎ 558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)。

Fig. 2 The Abrupt-cutting-stop photographs with back-bending in the primary flow of chip when cutting 0.45%C steel

図2(a)～(d)の切削急停止写真は本論で取り上げるところの切りくず内の金属組織が逆折れを起こしている場合である^{8, 9)}。写真から分かるように、切りくず厚さのすくい面側の一定の範囲の層内の金属組織が、図1の場合とは逆の方向に折れ曲がっている。そして、すくい面との摩擦によると思われる2次塑性流れはすくい面側近傍の極く薄い層にわずかに生じているのみである。そして、これらの写真の工具刃先にはいずれも、図1(b)の鼻形ではなく、刃先が鋭い楔形の構成刃先が形成されているのが特徴である。

このような楔形構成刃先は、鉄鋼の構成刃先発生切削速度域において、切削部分に気体酸素を噴射した場合に発生する⁸⁻¹¹⁾。また、四六黄銅の極低速切削においても発生する⁸⁾。この楔形構成刃先はいずれも脱落・成長がほとんどなく、非常に安定している。その結果仕上げ面粗さは高速切削時のように良好になる。

また、気体酸素の噴射を工具が被削材に接触する切削前から行うか、切削途中から行うかによって少し様子が異なる⁹⁻¹¹⁾。すなわち、工具刃先が被削材に接触する前から気体酸素を噴射してやると図2(a)～(d)のようなすくい角の鋭い小さな形状の楔形構成刃先が工具の刃先部分だけに生じる。そして、このような場合切りくずは楔形構成刃先のすくい面を通過した後、激しく工具すくい面に衝突するように当たって、切りくずの排出方向が強制的に曲げられている。このため、切削力は必ずしも低くならず、鼻形構成刃先が生じている場合よりもむしろ高くなる場合がある¹⁰⁾。しかし、切削力の変動は少なくなる¹⁰⁾。

他方、図3は切削途中から気体酸素を噴射した場合の例で、図1(b)のようにすでに鼻形構成刃先が生じ

ている状態に気体酸素を噴射する。そうすると、鼻形構成刃先の先端の上に楔形構成刃先が生じ、全体として大きな楔形の構成刃先が生成され、この大きな楔形構成刃先のすくい面に沿って切りくずは排出されるので、工具のすくい面に接触しないか、たとえ接触しても十分刃先から離れた位置になる¹⁰⁾。このため、切りくずは工具すくい面に衝撃的に当たることはなく、切削力は鼻形構成刃先が生じていた場合よりもさらに低くなり、かつ変動も少なく安定し、仕上げ面粗さも非常に良好になる。そして、切りくず内の金属組織は図3の写真から分かるように逆折れは生じない。

図4は四六黄銅の例を示す。四六黄銅を低速で切削すると、この写真のように小さな楔形構成刃先が生じる。そして、前述したのと同様に切りくず内の金属組織は逆折れを起こしている。四六黄銅に生じる楔形構成刃先については、星ら^{12, 13)}もその著書の中で述べ、切削急停止写真を掲載している。その写真を見ると明らかに切りくず内で金属組織が逆折れを起こしているのが認められるが、星らはこの金属組織の逆折れについては特に言及していない。

図5は二段すくい角(すくい面拘束工具: すくい角0°, 30°)の工具を用いて、四六黄銅を低速切削した場合である。この場合にも鋭利な楔形構成刃先が生じるが、工具の二段目の大きな30°のすくい角のため、切りくずは構成刃先終端から強制的に曲げられることなく排出される。このため、切りくず内の金属組織の流れに逆折れは生じていない。

以上のようにこれらの一連の切削急停止写真から、切りくず内の金属組織に逆折れが生じる原因は次のようにいえる。すなわち、鋭いすくい角をもった小さな

Fig. 3 The large wedge-type BUE when cutting 0.45% C steel with gaseous oxygen jet

Fig. 4 The wedge-type BUE when cutting β -brass at -5° rake angle

Fig. 5 The wedge-type BUE when cutting β -Brass at -5° and 30° rake angle

(a) inverse double rake tool

(b) chip

(c) chip

Fig. 6 Double rake angle tool and back-bending in the primary flow of chip

楔形構成刃先が生じる条件で切削すると、切りくずはまず、この楔形構成刃先によって生成され、構成刃先のすくい面に沿って流出するが、工具すくい面が近接しているため、切りくずはすくい面に激しく衝突するように接して、再び変形させられる。この変形の際に、すくい面側の方が自由面側より変形が大きくなるため、金属組織に逆折れが生じる。

これを実証するため、逆2段すくい角工具とも言える図6(a)に示す刃先形状をした工具を研削して製作し、この工具により構造用炭素鋼S45Cを切削した。切削速度は100 m/minで、構成刃先が発生しない速度域を選んだ。この場合、速度が速いため十分な急停止操作ができなかったことと、刃先の破損が頻繁に起こり、完全な急停止試料が得られなかった。そこで、定常切削時に得られた切りくずの縦断面の金属組織写真を図6(b)および(c)に示す。これらの切りくず内の金属組織には明らかに逆折れが認められる。

3. 切りくず内の金属組織の逆折れ生成機構模型

上述のように切りくずがせん断面で1次塑性変形を受けた後、工具すくい面によって切りくずの排出方向が強制的に変えられ、その際に再び変形を受けるものとして図2の各々の写真を詳細に観察すると、以下に述べる現象が起こっていることが認められる。

図2の各写真に注目する。被削材はまず楔形構成刃先によって単一せん断面とみなせる面で切りくずに変

形されている。このせん断面を通過した直後では、切りくずの金属組織の流れは一樣で構成刃先すくい面に近い層でも未だ逆折れは生じていなくて、切りくずは楔形構成刃先のすくい面に沿って上昇している。また、切りくずの自由面は楔形構成刃先のすくい面に平行になっている。さらに切りくずが上昇すると楔形構成刃先のすくい面長さのほぼ中央に当たる付近から切りくずの裏面が構成刃先すくい面から離れ始めている。この分離点から切りくず内に向かう境界で金属組織の逆折れが若干生じている。そして切りくずが構成刃先すくい面から離れ工具すくい面に再接触するまでの空隙の形状はほぼ二等辺三角形とみなせる。

つづいて切りくず裏面が工具すくい面に再び接触する点から、同じく切りくず内に向かって金属組織の逆折れが再び大きく生じている。そして、この時点以後の切りくずの自由面は工具すくい面に平行になっている。また、切りくずの自由面側の層の金属組織の流れ角に注目すると、切りくずが構成刃先すくい面上から工具すくい面上に曲がり移る際に再せん断され、金属組織の流れは少し変化している。これらの観察結果から次のような切削機構模型が考えられる。

図7(a)は工具刃先に楔形構成刃先が生じて、切りくず内の金属組織が逆折れを起こす場合の切削機構模型である。工具すくい面KN上に楔形構成刃先ADNがあり、単一せん断面を四つ(AB, EC, EF, EG)組合せた模型で、以下これについて述べる。

まず、図2のいずれの写真でも切りくず裏面が構成

Fig. 7 Cutting mechanism for generation of back-bending in the primary flow of chip

刃先すくい面長さのほぼ中央において離れていること、そして、計算の簡単化も含めて前述の空隙 D F G を二等辺三角形と仮定する。したがって、構成刃先すくい面 A D の中点を F とし、構成刃先の終端 D から D F = D G となる点 G を工具すくい面上にとる。そして、切りくずの裏面が A F G K の順に移動して切削圏外に排出されるとする。

せん断面 A B の自由面側の B から構成刃先すくい面 A D に平行に上に向けて線を引き、同じく切りくず自由面 I から工具すくい面 K D に平行に下に向けて線を引き、これら平行線の交点を C とする。そして、C D を結ぶ線を第 2 のせん断面とする。ただし、このせん断面 C D の E C 部分のみが切りくずの自由面側の層に関係し、D E 部分は切りくず下層部には関与しない。

切りくず内の二点鎖線は逆折れを起こしている層の境界線であり、同じ比率の厚さで構成刃先上の切りくず内、さらに被削材内まで延長して描いている。すなわち、この二点鎖線は、工具すくい面 D K に平行で C D との交点を E とする。E 点から構成刃先すくい面 A D に平行線を引き、せん断面 A B との交点を H とする。H から切込み線 A M に平行線を引く。この線から下の切込み t_{1u} の下層 t_{1L} は逆折れを生じる被削材の層である。そして、E F および E G を結び、これら 2 面を切りくずのすくい面側の層に逆折れを生じさせる二つのせん断面とする。

このように仮定し、切りくずは次に述べるように生じるとする。まず最初に、切込み t_1 の被削材は構成刃先のすくい面 A D によってせん断面 A B を生じて切削され切りくず A B C E F になる。つぎに工具すくい面によって切りくずは強制的に変形せられるが、切りくずの上層部である自由面側の H B C E 領域は第 2 のせん断面 C E (C D) により再度せん断され、工具すくい面に平行に変形され、C E J I となる。一方、切りくず裏面(すくい面)側の A H E F 領域はせん断面 E F により再せん断され、F G に平行に進み、さらにせん断面 G E によって再々せん断されて工具と平行になり、G E J K と変形する。すなわち、せん断面 A B

で形成された金属組織の流れ角が、これら一連のせん断変形により順次再配列されて、自由面側とすくい面側とで差が生じ、すくい面側の方が大きな角度を取る場合に図 7 (c) で示すような逆折れとなる。

4. 金属組織の逆折れ角の算出

切りくず内の金属組織の流れ角をはじめとして、被削材側面に描いた格子および被削材が繊維状組織をもつ場合の切りくず内での組織の流れ角などはすくい角とせん断角によって定まることを以前に報告した⁸⁾。図 7 (b) はその角度関係を示している。

図 7 (b) において、すくい角 γ でせん断角 ϕ の切削が行われている場合を考える。いま、図 8 (a), (b) に圧延によるフェライトバンドなどによる繊維状の組織が残っている被削材の切削急停止写真例を示す。この繊維状組織の方向と切削方向とのなす角を ϕ として、図 7 (b) の工具刃先 A から図のように ϕ をとる。図 7 (b) において、被削材 A B X U はせん断面 A B によって単純せん断されて切りくず A B Y Z となる。そして、被削材中の繊維状組織 A X は切りくず内で A Y と引伸ばされ再配列され、せん断面となす角 $\angle B A Y = \eta$ をとるとする。これらは単純な幾何学関係から、

$$\begin{aligned}\tan \eta &= AV/VY = AV/(VZ + YZ) \\ &= AV/\{AV \tan(\phi - \gamma) + t_1/\sin \phi\}\end{aligned}$$

となり、A V は

$$\begin{aligned}AV &= WX = WB \tan \phi = (AB - AW) \tan \phi \\ &= \{t_1/\sin \phi - AV \cot(\phi - \phi)\} \tan \phi \\ \therefore AV &= t_1/\{\cos \phi + \cot(\phi - \phi) \sin \phi\}\end{aligned}$$

となり、これを上式に代入して、整理すると

$$\cot \eta = \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi + \cot(\phi - \phi) \cdots \cdots (1)$$

Fig. 8 The Abrupt-cutting-stop photographs when cutting the fibrous structure 0.45%C steel

となる。

繊維状組織でない通常の金属組織の被削材では、せん断面と $\pi/4$ の方向の被削材が最も引き延ばされ、切りくず内で A Y の方向に再配列されることを以前に実証した⁸⁾。したがって、式(1)を $\phi = \phi + \pi/4$ として、

$$\cot \eta = \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi + 1 \cdots \cdots (2)$$

とすればよい。また、被削材側面に格子線を描きその縦線が切りくず内でなす角は、同様に $\phi = \pi/2$ とすればよいことも以前に確認しており⁸⁾、

$$\cot \eta = \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi + \tan \phi \cdots \cdots (3)$$

となる。本論に關与するのは(1)式および(2)式である。そして、図7(b)のように金属組織の切りくず内での流れ角は η よりも、切りくず裏面とのなす角 ε の方が測定しやすいから、

$$\varepsilon = \pi/2 - \eta - (\phi - \gamma)$$

から、式(1)および(2)を書き改めると、

$$\varepsilon = \tan^{-1} \{ \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi + \cot(\phi - \phi) \} - (\phi - \gamma) \cdots \cdots (4)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \{ \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi + 1 \} - (\phi - \gamma) \cdots \cdots (5)$$

となる。本現象においては、まず、図7(a)の A B C E F 域の金属組織の流れ角 ε_1 は通常の金属組織の被削材によるものであり、切りくず内における組織の流れ角は式(5)にもとづき、

$$\varepsilon_1 = \tan^{-1} \{ \tan(\phi_1 - \gamma_B) + \cot \phi_1 + 1 \} - (\phi_1 - \gamma_B) \cdots \cdots (6)$$

となる。

つぎに、C E I J 領域の流れ角 ε_2 は、H E と進んできた被削材が、あたかも E J をすくい面とする工具

によって切削され、せん断面 C E によって切りくず C E J I を生じたごとく変形されると考え、式(4)の

$$\text{すくい角 } \gamma = \gamma_2 = \pi/2 - (\gamma_B - \gamma_T),$$

$$\text{せん断角 } \phi = \phi_2,$$

とし、すでに繊維状組織が形成されているから、その組織が切削方向となす角 $\phi = \pi - \varepsilon_1$ として代入し、

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 = & \tan^{-1} [-\cot(\phi_2 + \gamma_B - \gamma_T) + \cot \phi_2 \\ & - \cot(\varepsilon_1 + \phi_2)] - [\phi_2 + \gamma_B - \gamma_T - \pi/2] \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

となる。

切りくず下層部においても同様であり、E F G 領域での流れ角 ε_{21} は

$$\gamma = \gamma_{21} = \pi/2 - 1/2(\gamma_B - \gamma_T), \quad \phi = \phi_{21}, \quad \phi = \pi - \varepsilon_1$$

から

$$\begin{aligned} \varepsilon_{21} = & \tan^{-1} [-\cot\{\phi_{21} + 1/2(\gamma_B - \gamma_T)\} + \cot \phi_{21} \\ & - \cot(\varepsilon_1 + \phi_{21})] - \{\phi_{21} + 1/2(\gamma_B - \gamma_T) - \pi/2\} \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

となり、さらに、E G K J 領域での流れ角 ε_{22} は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{22} = & \tan^{-1} [-\cot\{\phi_{22} + 1/2(\gamma_B - \gamma_T)\} + \cot \phi_{22} \\ & - \cot(\varepsilon_{21} + \phi_{22})] - \{\phi_{22} + 1/2(\gamma_B - \gamma_T) - \pi/2\} \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

になるとする。

5. 計算結果のまとめ

前項にもとづいて図2(a)の切削急停止写真について調べた。同図写真から

Fig. 9 Comparison of the calculated values with measured values on the back-bending angle in the primary flow of chip

切りくず内逆折れ層厚さ比:	$t_{2L}/t_2 = 0.27$
工具すくい角:	$\gamma_T = 11^\circ$
楔形構成刃先のすくい角:	$\gamma_B = 37^\circ$
第1せん断角:	$\phi_1 = 22^\circ$
自由面側第2せん断角:	$\phi_2 = 66^\circ$
すくい面側第2せん断角:	$\phi_{21} = 115^\circ$
すくい面側第3せん断角:	$\phi_{22} = 43^\circ$

と測定できるので、これらから前項の諸式により流れ角を計算し、実測値と比較すると、

自由面側流れ角 ε_2 : 計算値 66.2° , 実測値 64°
 すくい面側流れ角 ε_{22} : 計算値 79.6° , 実測値 82°

となった。同様に、急停止試料の22例の写真について計算値と実測値を比較した。その結果を図9に示す。

図9は切りくず内の金属組織の流れがすくい面側で逆折れを起こしている場合に、前項で述べた四つの単一せん断面によって生じるとした模型にもとづく計算値と実測値の比較を示している。すなわち、22例の急停止写真のそれぞれについて上記の例と同様に前項の諸式によって自由面側の流れ角 ε_2 を計算し、実測値の ε_2 との差を求め図9に○として打点した。同じようにすくい面側流れ角 ε_{22} についても計算値と実測値との差を●として、各切削急停止写真例ごとに示した。

図9に示すように、おおむね実測値と計算値の差はすくい面側で±3度、自由面側で±8度以内であり、提案した切削機構模型が妥当なものと考えられる。全体的

にすくい面側の流れ角の実測値と計算値の差 ε_{22} ●よりも自由面側のそれらの差 ε_2 ○の方が±8度と大きい。これは図7(a)の切削機構模型において、せん断面CEが状況によっては模型に示した位置ではなく、たとえば、自由面上のC点が少し変動し、その結果第2のせん断角 ϕ_2 が模型の角度で作用していない場合があることを意味すると考えられる。

以上総合して、切りくず内の金属組織の流れの逆折れについて、単一せん断面を四つ合わせた切削機構模型を提案し、切削急停止写真からその妥当性を検証した。

結 論

切りくず内の金属組織の流れがすくい面側で2次塑性流れとは逆の方向に折れ曲がる現象について、四つの単一せん断面をもつ切削機構模型を提案し、それにもとづいて計算検討した結果つぎのことが分かった。

- 1) 切りくず内の金属組織が逆折れを起こすのは、工具刃先に小さな楔形の構成刃先が生じ、切りくずがその構成刃先によって生じた後、工具すくい面に衝撃的に当たり再度せん断変形を受けるからである。
- 2) 提案した模型にもとづいて、切りくず内の金属組織の流れ角を自由面側、すくい面側の各々について計算し、実測値と比較したところほぼ合致し、この切削機構模型が妥当であることがわかった。

参 考 文 献

- (1) Opitz, H. und Hucks, H., Werkstattstechnik, 43-6 (1953), 253.
- (2) 奥島・人見, 機論, 26-163 (昭 35), 423.
- (3) Saffer, B., Trans. ASME, 77 (1955), 331.
- (4) 谷口, 精密機械, 29-2 (昭 38), 129.
- (5) Розенберг, А. М. и Еремин, А. Н. (長谷川訳), 金属切削理論, (昭 40), 37. 東京図書.
- (6) Hill, Plasticity, (1950), 206~229, 325~327, Oxford.
- (7) Heginbotham, W. B., Proc. Inst. Mech. Eng., 175-18 (1961).
- (8) 上神・玉村, 機論, 48-432 (昭 57), 1254.
- (9) 上神・ほか2名, 機論, 40-332 (昭 49), 1231.
- (10) 上神・ほか2名, 精密機械, 40-10, (昭 49) 858.
- (11) 上神・玉村, 機論, 57-535 (1991-3), 996.
- (12) 星, 金属切削, (1960), 工業調査会.
- (13) 星・星, 金属切削技術, (1969), 工業調査会, 19.