金属切削における不安定現象（第1報）*

——その可能性と切りくず形態について——

那 須 康 雄**

Study on the Phenomenon of Instability in Metal Cutting (1st Report)

——On the Possibility and the Types of Chip——

Yasuo NASU

In this report, it is experimentally studied by observing the types of chip whether there is a possibility of the following phenomenon, that a change from a cutting process to the other cutting one takes place, which is due to a change in the friction mechanism at the tool-chip interface being affected with the temperature and the force system in the shear region and its interface. The experiments were performed cutting industrial pure iron (0.012%C) in the as-received condition with carbide tools (S2) under various cutting conditions; cutting speed of 10~150m/min, feed of 0.034~0.134mm/rev, and depth of cut of 0.1~0.5mm.

As the result, it is revealed that the phenomenon occurs with two kinds of cutting process appearing alternately and that it is affected by cutting conditions, especially by the cutting speed, as shown in the test performed at about the cutting speed of 30~70m/min, and also it is revealed that when it occurs, two new type chips are found, both of them are consisted of two part, one of which is a flow type chip and the other is either a flow type chip or one element of shear type chip.

1. 緒 言

金属切削において付随する刃先近傍での工具と切りくずおよび仕上面との摩擦はその切削過程を支配しているので切りくず生成機構をより正確に理解するためには摩擦の挙動を詳しく把握することが重要である。しかし切削における摩擦は通常のすべり摩擦に対して広い条件下で満足される¹⁾ Coulomb の摩擦法則を適用困難な特異な現象である。それは摩擦部が切りくず生成部と隣接していることにより通常のすべり摩擦に比べてきわめて高圧と高温となっているためである。この切削での摩擦の問題を説明するには接触面での摩擦機構を考慮することが好都合であり、摩擦機構の面からの検討が多くなされている。

一般にその摩擦機構（凹凸の機械的かみ合い、押しならしおよびせん断作用の複合機構）は同一切削条件下では定常的であり、せん断作用が主体であるとされているが、被削材の変形性質とか切削条件によってはそれは時間的に変動するような挙動を示す可能性もあり得るものと思われる。すなわちある時には接合点でのせん断が主体で、またある瞬間には接合点近傍のある層でのせん断

が主体となるようなこと。たとえば Kobayashi および Thomsen²⁾ は人工の逃げ面摩擦帯を設けた特殊工具を用いて快削鋼 (SAE 1112) を旋削した結果、その摩擦帯の長さがある値以上で切削すると切削中に切りくず厚さが突然に増加した元にもどるといふ瞬間的に不安定な切削状態に陥いる現象の存在を報告し、それは工具逃げ面での接触面が大きいために起こる熱的原因に基づく摩擦機構の変化によるものと考えられた。

筆者は上述のような刃先での摩擦機構の変化による切りくず生成機構の変化を Kobayashi らにならない不安定現象と呼ぶことにして、通常の工具による切削での不安定現象、すなわち主としてすくい面上での摩擦機構の変化による切りくず生成機構の変化の起こる可能性の探求を行なうことを通じて、刃先の摩擦機構の性質およびそれと切りくず生成機構との相互関係を検討する目的で本研究に着手した。

本報はまず種々の切削条件下で工業用純鉄を切削して得られた切りくずの形態を分類することにより上述現象の可能性とその時の切りくず形状を指摘し、さらにその発生条件域を明らかにした結果である。

2. 実験方法

無段変速機を有する高速精密旋盤〔島本鉄工所製 ML-40A型〕を用い、中実丸棒の外周旋削を乾式にて行なっ

*原稿受付 昭和43年7月18日、東北支部講演会（昭和42年3月11日）にて発表。

**正 会 員 山形大学工学部（米沢市城南4-3-16）

た。

被削材には軟かく、展延性に富み、凝着を起こしやすいこと、かつ顕微鏡による流れ線の観察の容易な一相の金属とみなせる工業用純鉄を選んだ。その化学成分は 0.012%C, 0.09%Si, 0.11%Mn, 0.009%P, 0.007%S であり、直径が 25mm の丸棒である。

工具には 19mm 角のシャンク部を有する超硬合金工具 (S2) を使用し、その形状は [0, 8, 8, 8, 8, var, 0] であり横切れ刃角 ϕ のみ $-10^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 45^\circ$ の 4 段階に変えた。切れ刃はダイヤモンド砥石 #200 で研削したのち、油砥石 (#400) によりハンドラッピングを施した。また工具の刃物台からの突出し長さは 30mm とした。

その他の切削条件は次のとおりである。

切込み深さ: $t=0.1, 0.2, 0.5\text{mm}$

送り: $f=0.034, 0.067, 0.134\text{mm/rev}$

切削速度: $V_c=10\sim 150\text{m/min}$

3. 実験結果と考察

3.1 切りくず形態

上述の条件下において工業用純鉄の乾式三次元旋削の結果得られた切りくずを図 1 に示す。これらから切りくず形状は切削条件の変化とともに敏感に変化することが明らかである。得られた切りくずは図 2 に示すとおり 5 種類に分類された。そのうち a), b) はそれぞれ流れ形とせん断形切りくずである。c) のは鋸歯状切りくずで、工具や工作機械の振動、被削材表面の波打ち等に起因するものである。d) と e) は特に変わった形状を呈するほとんど知られていない切りくずである。これらは比較的一様な厚さの流れ形切りくずとみなせる部分と、さらに

図 2 切りくず形状の分類

$t=0.5\text{mm}, f=0.034\text{mm/rev}, \phi=0^\circ, V_c=50\text{m/min}$

図 3 切削抵抗の変動状況

別の種類の切りくず片とから成り立っていて、その介在する切りくず片の厚さは流れ形切りくずとみなせる部分の 2~3 倍に達することがあり、かつその片は間欠的に発生し、ときには両者の混入したものも見られる。これらの切りくずが生成されときの切削抵抗の時間的変動状況の一例を図 3 に示す。

これらから切りくず生成機構がある一つの流れ形切削状態から、突然に別の瞬間的切削状態に陥いるものと判断される。

次に、これらの切りくず生成原因を検討する手掛りを得る目的で切りくず形状と切削条件との関係を図 4 にまとめてみた。その結果、切りくず形状に関して切削速度は次の 3 つの域に分けられた。

第1は、 $V_c \leq 30 \text{ m/min}$ で、短かく切離したせん断形切りくずが発生する。第2は、 $30 \leq V_c \leq 70 \text{ m/min}$ の中速域で d) または e)，または両者の混入したものが発生する（以後、これらの切りくずをそれぞれD形およびE形切りくずと呼ぶ）。この速度域は一般に構成刃先の発生しやすいところである点から注目すべきことと言える。すなわち切りくず裏面の金属が工具表面に凝着を起こしやすい状態にあるとみなせるからであり、これらの切りくずは摩擦部の状態が凝着を起こしやすく、かつその状態が不安定なために生成されるものと考えられる。

第3は、 $V_c \geq 70 \text{ m/min}$ の高速域であり、中速域でみられた切りくずの突起の高さが減じ、発生間隔が短くなり突起同志が連らなったような鋸歯状の切りくずになるか、あるいは突起が消滅した流れ形切りくずのいずれかが発生する。

以上、切りくず形状に関して切削速度は3段階に分けられ、とくに第2の速度域では、ある切削状態から突然にそれとまったく別の切削状態に陥いることを示す本研究の対象となる切りくずが見いだされた。

なお、その他の切削条件と上述の不安定な切削状態発生との関係は図4のとおりで、送り f が大きいほどその発生域は狭くなり発生しにくくなるようである。横切れ刃角 ψ の効果も送りに準じているようである。また切込み深さについては、この場合二次元切削の切削幅に相当するものであり本質的にその効果が期待されないはずであるが図4(e)(f)のような効果がみられた。

3.2 切りくずの変形度合

切りくずの変形度合を知る目安として、送り f に対する切りくず厚さ f_1 との比 $R = f_1/f$ [切削比の逆数] を求め、前述の不安定な切削状態での切りくずの厚さの変動

状況と切削条件との関係について述べる。なお横切れ刃角 ψ のときの変形度は $R = f_1/f \cos \psi$ として求めた。また不安定な切削状態では流れ形部と盛りり部とから成り立っているため、前者のを R_{min} 、後者のを R_{max} として共にプロットした。 f_1 の測定において切りくずは山型断面となることが多いがその最大厚さをもってそれに当てた。また切込み深さ方向への切りくずの変化は少なく、かつ切削条件の変化に対しても切りくず厚さのような変化は認められなかったためここでは無視した。

図5は切削条件と変形度の関係を示す。切削速度の影響についてみると、 R が最も大きな値を示すのはほとん

どの場合、第1の速度域においてである。 R が20程度に達するときもあり、鋼に比べてきわめて流動性の高いことを示している。第2の中速域におけるDまたはE形切りくずの変形度もかなり大きく、ほとんどの場合 $R_{\max}$ は10以上である。そしてこの間では切削速度と共に速やかに $R_{\max}$ は減少する傾向がある。それに対して流れ形部の変形度 $R_{\min}$ は5程度で低く、かつ切削速度の変化によってもそれが変化するのほとんど無視できる程度である。さらに第3の速度域に入ると R の減少も緩やかとなり、しだいに第2の域での $R_{\min}$ の値に近づく傾向がみられる。したがってDまたはE形切りくずの変形度の最高値は低速で得られるせん断形切りくずの値に近く、最小値は高速で得られる流れ形や鋸歯状切りくずの値に近く、最高値のみが切削速度に影響されているようである。

次に送りを変化させた場合の切りくず変形度と切削速度との関係は送りが大きくなるにつれて変形度は全般に減少する(図5a)。これは送りが大きい場合にはすくい面の温度が大きくなり、摩擦部は軟化または溶融状態になりやすくそのために高速で切削するのと同じように摩擦が改善されることによると考えられる。

その他の条件の影響については先に横切れ刃角および切込み深さが不安定な切削の起こる速度範囲に影響を及ぼすことを示したが、図5bのごとく横切れ刃角は比較的その効果も少ない(切込み深さについても同様であった)。このことは、これらの因子の変化が摩擦部の変動の切りくず生成機構へ及ぼす効果と直接の関係をはほとんど有していないものと思われる。

3.3 不安定な切削状態における切りくずの断面組織について

不安定な切削状態における切りくず生成機構を検討するために切りくず側断面内の流れ線の状態を顕微鏡観察した結果について述べる。

図6はD形切りくずの流れ線の一例を示す。説明を容易にするために、切りくず断面をトレースし主な流れ線の切りくず流出方向に対する傾き角 η を測定して付加した。図から切りくず厚さの小さい部分では $\eta=78\sim 80^\circ$ であるが、切りくずの盛上りの初期には流れ線が複雑に折れ曲り、切りくず表面に近い部分では $\eta=25^\circ$ ときわめて小さい値を示す。すなわちこの部分では切りくずは切りくず裏面に平行に近い方向にせん断を受けているように見られる。さらに切りくず厚さが増加するにつれて流れ線の折れ曲りは緩やかとなり、 $\eta=60^\circ$ 以上ではほとんど直線に近づき、最高部では $\eta=90^\circ$ にも達してその後は急激に初期の状態にもどっている。その直後に多

$t=0.5\text{mm}$, $f=0.067\text{mm/rev}$, $\phi=20^\circ$, $V_c=40\text{m/min}$

図6 D形切りくずの変形状況

図7 切りくず裏面の摩擦条こんの変化

少の厚さの変動を伴うがすぐに安定した流れ形の切削状態となっている。この流れ線の状況から判断するとD形切りくずの盛上り部分の一つのせん断形切りくず素片に類似しているようである。この形の切りくずのもう一つの特徴はその盛上り部分における工具すくい面との摩擦により生じる二次流れ線が他の部分より顕著に現われることである。この切りくず裏面を観察した結果、図7のごとく、盛上り部分では工具との摩擦により生じた条こんに乱れがあり、それは盛上りの前後の条こんが互いに交差し入組んでいるように見られる。

以上の観察結果から切りくずの盛上り時には切りくずと工具すくい面との摩擦状態がそれまでより一層厳しい状態に陥り、そのために一瞬間切りくずが凝着してその流出が停止するようになると思われる。そして顕著な二次流れ線は切りくずの工具からの離脱時に働いた大きなせん断作用の結果であろう。

$t=0.5\text{mm}$, $f=0.067\text{mm/rev}$, $\phi=0^\circ$, $V_c=40\text{m/min}$

図 8 E形切りくずの変形状況

次に、E形切りくずの断面写真を図8に示す。この切りくずの特徴はD形に比べて盛り部分の継続長さが2～3倍以上もあること、流れ線の複雑な折れ曲りがなく流れ線の方向は切りくず厚さに相応していること、二次流れ線に顕著な差がみられないことである。したがってこの盛り部も一種の流れ形切りくずとみなされる。この一瞬間の不安定な流れ形切削状態はその時の摩擦部の切りくずへの制動強さに相応して存在するもので、D形切りくずのような切りくず停止に至るほどの摩擦状態の変化は起こらないことはその盛り長さからも判断される。確かに、この種の切りくず裏面の観察でもD形のような明白な摩擦条こんの変化は認められなかった。

3.4 流れ線の方角についての検討と切りくず生成モデルについて

Hill²⁾によれば、単一面において r のせん断ひずみを受け切りくずが生成されたとすればせん断された方向に対する切りくず内の最大伸びの方向 θ と r との間には

$$2\cot 2\theta = r \quad (1)$$

の関係があり、この方向が流れ線の方角と一致することになる。したがってせん断角 ϕ 、すくい角 α 、流れ線の方角 η と最大伸びの方向 θ との間には

$$\phi + \theta + \eta - \alpha = \pi/2 \quad (2)$$

の関係が成り立つ。そこでDおよびE形切りくずの各所で測定された流れ線の方角について(2)式がどの程度成り立つかを検討するために、前項に示した切りくずの各所の厚さから計算して得られる $(\phi + \theta)$ を顕微鏡写真より実測した $(\eta - \alpha)$ に対してプロットしてみたのが図9である。どちらの切りくずについても厚さの薄い流れ形部分における $(\phi + \theta)$ と $(\eta - \alpha)$ との関係は(2)式をほとんど満足している。しかしD形切りくずの盛り部の初期からその大半に至る流れ線については(2)式とまったくかけ離れており、切りくず厚さが増加するにつれて急

激に(2)式に近づく。このかけ離れの原因は図10のごとく一次のせん断変形のみによって切りくずが生成されると仮定して計算したことと、流れ線の折れ曲りを無視して直線としたためである。しかし $\eta > 60^\circ$ の部分では流れ線がほとんど直線とみなせるのに η の値が(2)を満足しないのは、この切りくずの盛り部分の大半が図10bのように瞬間的に切りくず流出が停止して後続する被削材の圧力により一

たん切りくずとなった部分がさらに二次変形させられて生じたものであるためと考えられる。そして最高部の流れ線が(2)式を満足するのは、その部分はせん断角の減少による一次のせん断のみによって生成されたからと言え

図 9 $(\phi + \theta)$ と $(\eta - \alpha)$ との関係

図10 流れ線の生成モデル

図11 D形切りくずの生成モデル

る。

なおE形切りくずの場合には盛上り部も(2)式を満足しているので、切りくずは一次せん断のみによって生成され、切りくず厚さに相応した方向に流れ線が現われているものと解釈される。

以上のことから推定されるD形切りくずの生成模型を図11に示す。切りくずと工具とはOB間で接触しながら流れ形切りくずを生成している(a)が、突然OB部の摩擦状態が変化して切りくず流出が妨げられ、そのために被削材表面と切りくず表面の接合点A近傍でせん断領域が拡大されてすでに切りくずとなった部分へ二次せん断を起こさせていくと同時に、せん断角の減少が始まる(b)。それに伴い切削抵抗が急増しながらある大きさまで盛上りが進行する(c)。ついに切削抵抗がOB部の接合を破壊しうるまでに達して切りくずの流動が始まり、せん断角が元の状態へ急激に回復していく(d)。

4. ま と め

連続切削において工具すくい面と切りくずの摩擦機構が一瞬間それまでと別の状態に変化する不安定現象の可能性について切りくず形状分類の立場から検討した。その結果工業用純鉄の乾式三次元旋削において次のことがわかった。

1) 切りくず形状と切削速度との関係から3つの速度域に区分され、その第1は約30m/min以下の低速域で主にせん断形切りくずの生成が行なわれる。第2は30～70m/minの中速域で新しい形状の切りくずが見られる。

第3はそれ以上の高速域で流れ形または鋸歯状切りくずが見られる。

2) 第2の域でみられる切りくず形状は次のような複合形切りくずとみなされた。

D形＝〔流れ形〕＋〔せん断形素片〕

E形＝〔流れ形〕＋〔不安定な流れ形片〕

3) 複合形切りくずの変形度は盛上り部の最高値は第1の速度域の切りくずのそれに近く、流れ形部のそれは第3の速度域のそれに近く、前者は速度につれて変化するが、後者はほとんど一定である。

4) 複合形切りくずの流れ線および切りくず裏面からそれが本研究の対象である摩擦の変動によるものと言え、不安定現象の可能性が確認された。そしてD形切りくずは摩擦部に起こる異常により切りくず流出が一瞬間停止するために生成されるもので、E形のそれは摩擦の異常が単に摩擦抵抗にある別のレベルに変えるが、切りくず流出は停止に至るほどでない場合につくられる。

以上が工業用純鉄の結果であるが、純アルミニウムのパイプを二次元旋削した時も複合形切りくずが認められたことを付け加えたい。他の金属およびこの不安定現象の根本問題である摩擦変動の原因については検討中であり順次明らかにしていきたい。

終りにのぞみ、ご指導を賜った大阪大学田中義信教授ならびに津和秀夫教授に厚く感謝いたします。また本研究に多くのご援助をいただいた山形大学熊倉重典教授に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Kobayashi & Thomsen: The Role of Friction in Metal Cutting, Trans. ASME, 82, B (1960) 324～332.
- 2) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, 207.