切削抵抗における寸法効果*

—軽切削の研究—

中山 一雄** 田村 清**

Size Effect in Metal Cutting Force

Kazuo NAKAYAMA, Kiyoshi TAMURA

The theoretical consideration of energies consumed in metal cutting and the experimental observations on orthogonal light cutting of 4-6 brass lead to the conclusion that the size effect in cutting force can be explained as follows: with the decrease in depth of cut, the specific cutting force increases because of

- (1) decrease in magnitude of shear angle
- (2) the work consumed in the plastic flow of surface layer which is not proportional to depth of cut
- (3) decrease in magnitude of real rake angle due to roundness of cutting edge

Considering these facts, the calculated shear stress on the shear plane shows no appreciable variation due to the decrease of depth of cut.

1. ま え が き

最近鑄造、鍛造、プレス加工などにおける加工精度が向上したために、それらの仕上加工としての切削加工では削りしろが減少し、軽切削の重要性が増してきた。

一方、研削加工も加工機構の点からみれば切削加工の一部であるとの認識は、“研摩”が“研削”と改称された事実でも明らかのように、今日すでに一般化されているが、それにもかかわらず、切削理論と研削理論との間にはまだかなりのギャップが存在することは否定できない。その主な理由の一つは、研削砥石の切れ刃の形状や分布が単純でないことであるが、他の理由として、研削における個々の切れ刃による切削は切込みのきわめて浅い軽切削であることがあげられる。

このような軽切削も、本質的には従来の切削の研究で扱われてきた普通の切削となら異なるものではないが、普通の切削では十分無視できたような小さな事項が、軽切削では相対的に重要性をまして無視できなくなる可能性がある。

そこで、本報告ではまず切削に際してなされる仕事全

般について再検討してみた。その結果、切込みが減少するにしたがってまず第1に無視できなくなるのが切削面表層に塑性流動を起こさせるための仕事であることがわかった。本研究では2次元切削のみを扱ったが、一般の切削で起こる“かえり”や砥粒加工で問題になる“もり上り”の現象は、いずれもこの切削面表層の流動が拘束のない方向に進行した結果と考えられるから、これらの間には密接な関係があるはずである。

この検討の結果にもとづいて行なった軽切削機構の研究は、切削抵抗における寸法効果の問題を中心にして行なった。この寸法効果、すなわち切込みが浅くなるほど比切削抵抗が増大するという事実は、軽切削の特異性が最も端的に現われたものと考えられ、その原因の解明はきわめて興味ある問題であるが、これについてはすでにいくつかの独立した説明が発表されている。

すなわち、M. C. Shaw¹⁾は転位論に基づいて、切込みが小さくなるとせん断面上のせん断変形応力が増加するという材料の強度自体の寸法効果のためであるとした。E. G. Thomsen²⁾は、切削中には切りくずの生成以外に切削面表層に塑性流動を起こさせる仕事もなされており、これに要する力が切込みと無関係に一定であると仮定すると（事実はそうでないことは彼ら自身も認めている）、切削抵抗の寸法効果がよく説明されることを示した。そしてこの力は工具の逃げ面と切削面との間の

* 昭和37年4月および39年4月、精機学会春季大会学術講演会にて発表

** 正会員 横浜国立大学工学部

摩擦力であろうと推定した。益子³⁾は、切削抵抗には切りくずをせん断変形させるに要する力以外に、刃先を被削材内に押し込むための押込力も含まれており、この押込力が切込みと無関係に一定であることから寸法効果を生ずるとした。

中山⁴⁾は、切込みが 40μ 以上の炭素鋼の切削実験から、切込みが減少すると比切削抵抗が増大するのはせん断角が減少するからであって、せん断面上のせん断応力はほとんど変化しないことを見出した。そして、切込みが減るとせん断角が小さくなるのは、刃先温度が低下してすくい面上の摩擦応力が増加することによって説明した。

鋼の切削では構成刃先が発生しやすく、これが発生すれば刃先形状が不明確かつ不安定になるから、解析は困難になる。切削速度を上げてその発生を避けようとする刃先温度は 500°C 以上になり、当然温度の影響を著しく受ける。そこで本研究では、構成刃先の発生しにくい被削材として黄銅を用い、温度上昇やひずみ速度の影響を無視できるような低い切削速度で、切込みが $2\sim 40\mu$ 程度の 2 次元切削を行なって、寸法効果について検討した。

2. 切削に際してなされる仕事

一般の切削においてなされる仕事として、つぎのようなものが考えられる。

2.1 表面エネルギー W_1

切削加工の目的は、所望の形状寸法をもった新しい表面を作ることであるから、もし切削を完全に理想的に行なうことができたとしても、その際消費される仕事量はその表面積の増大に伴って増加する表面エネルギーだけであるはずである。そしてこの表面積の増大は切込み (2 次元切削における) とは無関係である。

金属の表面エネルギーは大体 10^8 erg/cm^2 程度であるから⁵⁾、 1 cm^2 の切削面を得るためには、切りくずにも同じ面積の表面ができると仮定すると、約 $2 \text{ gr}\cdot\text{cm}$ の仕事が必要になる。したがって、切削幅 1 cm で 2 次元切削する場合には、表面エネルギーを与えるために約 2 gr の切削抵抗を生ずることになる。ところが、切削抵抗を実測してみると、たとえば黄銅をすくい角 0° のバイトで 5μ という浅い切込みで削る場合でも、切削幅 1 cm につき 20 kg 程度であるから、新表面を作るといふ本来の目的に費されているのはわずか 1 万分の 1 程度にすぎないことになる。

したがって、実際の表面積は見掛けの表面積よりかなり大きいことを考慮に入れても、本研究で扱うような切込みが 2μ 程度までの黄銅の切削では、これが全切削

事の 1% をこえることはまずないものと思われる。ただし、切込みがもっと浅い場合や、粉末状の切りくずを生ずる場合などには、この比率はもっと増す可能性がある。

2.2 せん断領域におけるせん断仕事 W_2

流れ形切りくずを生ずる切削でなされる仕事の中で最も主なもの、よく知られているように、工具の刃先より上にある被削材がせん断領域を通る際にせん断変形を与えて、切りくずを作る仕事である。この変形を単純せん断とみなせば、これに費される単位時間当りの仕事量 W_{21} は次式で表わされる。

$$W_{21} = \tau_s \gamma b t_1 V \quad (1)$$

ただし、 τ_s : せん断領域でのせん断変形応力、 γ : 切りくずが受けたせん断ひずみ、 b : 切削幅、 t_1 : 切込み、 V : 切削速度。

実際のせん断領域における変形状況を観察しても、図 1 に例示した写真からわかるように、刃先近傍のせまい領域を除けば、単純せん断が起こっているとみなしうることがわかる。

この写真で注目すべきことは、せん断領域が切削予定面より下方にまでひろがっており、切削面表層の塑性流動は刃先が通過する以前に、すでにその前方で起こっているという事実である。これは、切りくず生成時のせん断変形は、従来単純化のために考えてきた厚さのない一つの面 (せん断面) で起こるのではなく、厚さのある領域 (せん断領域) で起こるという事実から必然的に起こることと考えられる。切削面表層に塑性流動を起こさせる原因として、従来は工具の逃げ面の摩擦や、刃先に丸味があることなどがあげられてきたが、このせん断領域の切削予定面以下への拡がりも、少なくとも重要な原因

被削材：黄銅，すくい角： 20° ，切削速度： 25 mm/min ，格子間隔： $0.1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$

図 1 切削時の変形

図 2 切削時の変形と仕事

の一つとなっていることは明らかである。

このせん断領域の広がり方が切削面表層に塑性流動を起こさせるための仕事 W_{22} は、図 2 のように、切削前に垂直だった直線が、せん断領域の通過後には切削方向への単純せん断によって $\delta_s = f(y)$ なる曲線になったものとする、

$$W_{22} = \int_0^{\infty} \tau \frac{d\delta_s}{dy} b V dy \quad (2)$$

ただし τ はせん断変形応力で、これはせん断ひずみ $d\delta_s/dy$ によって変化するはずのものであるが、簡単のために一定値 τ_s' であるとすれば

$$W_{22} = \tau_s' \delta_{s0} b V \quad (3)$$

ただし δ_{s0} は切削面における δ_s の値。実際に観察される流動量 δ_{s0} には、これ以外の原因として逃げ面の摩擦によるものも加わっているはずであるが、これは 2.4 節に記すようにわずかな量であろうと推測される。

2.3 すくい面上における摩擦仕事 W_3^*

切りくずが工具すくい面上をすべて流出する際の摩擦仕事 W_3 は、従来のマクロ的な見方からすると

$$W_3 = R \sin \beta V_c = \tau_c l_c b V_c \quad (4)$$

ただし τ_c : 工具—切りくず接触面上の平均摩擦応力, l_c : 工具—切りくず間の接触長さ, V_c : 切りくず速度 ($= V t_1/t_2$), t_2 : 切りくず厚さ, 他の符号は図 2 参照。

しかしこの摩擦仕事は工具と切りくずとの接触面だけ

* すくい面上における摩擦仕事 W_3 とせん断領域におけるせん断仕事 W_{21} との比は、図 2 の符号を使うと

$$\frac{W_3}{W_{21}} = \frac{\sin \beta \sin \phi}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \cos \alpha}$$

で表わされる。発表された多くの実験データを調べると、すくい角が 40° 以上の極端な場合にはこの比は 1 以上にもなるが、すくい角 10° 程度までの普通の切削では 0.3 以下で、 W_3 は W_{21} よりかなり小さいといえる。

で全部が消費されるのではなく、一部は切りくず内部に 2 次流れ (secondary flow) と呼ばれる塑性流動を起こさせるのに費されていることに注意しなければならぬ。そしてこの 2 次流れの結果、実際の接触面での摩擦速度は切りくず本体の速度 V_c より低下している⁶⁾。いま図 2 のように、2 次流れによって切りくず表面は切りくず本体に対して δ_c だけ流動したとすると、接触面上では切りくずが l_c だけ動く間に、切りくず本体は $(l_c + \delta_c)$ だけ動くはずであるから、接触面上の切りくずの平均速度 V_c' は

$$V_c' = \frac{l_c}{l_c + \delta_c} V_c \quad (5)$$

したがって本当にすくい面上で消費される摩擦仕事 W_{31} は

$$W_{31} = \frac{l_c}{l_c + \delta_c} W_3 \quad (6)$$

であり、切りくず内部での 2 次流れに消費される仕事 W_{32} はその残りで、

$$W_{32} = W_3 - W_{31} = \frac{\delta_c}{l_c + \delta_c} W_3 \quad (7)$$

このように、摩擦が接触面だけでなく切りくず内部でも行なわれていれば、G. Boothroyd⁷⁾ も指摘しているように、接触面だけに熱源があると仮定した従来の切削温度の計算法には当然修正が加えられるべきである。また実際の接触面における摩擦速度が低下していることは、当然工具すくい面の摩耗にも影響するはずである⁸⁾、切りくずの彎曲の原因にもなる⁹⁾。

被削材: 黄銅, 切削速度: 0.1 m/min

図 3 工具—切りくず接触長さ l_c と切りくずの 2 次流れ量 δ_c との切込みによる変化

式(5)で明らかなように、この速度低下の目安としては δ_c/l_c を考えると便利である。この比は当然被削材質や切削条件によって変化し、極限としては構成刃先が発生した場合の $\delta_c/l_c = \infty$ 、したがって $V_c' = 0$ が考えられる。しかし種々の実験で、構成刃先が発生しない場合にはその値は割合に小さく、しかもあまり変化しないことが認められる。

図3は黄銅を後に記す本実験と同様の切削条件で削って、工具すくい面上の凝着痕から l_c を、切りくず断面の顕微鏡写真における結晶粒の流れから δ_c を測定した結果である。これらにはかなりのばらつきはあるが、両者ともほぼ切込みに比例し、近似的に

$$\delta_c/l_c \doteq 0.1 \quad (8)$$

が成立する。このほか、黄銅をもっと高速で削った場合にも、また銅の切削でも、この比は大体同じであった。すなわち、2次流れに消費される仕事量は全摩擦仕事の中の10%程度にすぎない。

2.4 工具逃げ面における摩擦仕事 W_4

切削中にはせん断領域に大きな圧縮力が加わり、刃先の通過後には切削面は弾性的に盛り上ろうとする。その結果、たとえ逃げ角をつけて鋭利にといだ工具でも、切れ刃付近の逃げ面は切削面と摩擦するであろう。この摩擦に消費される単位時間当りの仕事量 W_4 は、逃げ面と切削面との接触長さを l_f 、この接触部における平均摩擦応力を τ_f とすれば

$$W_4 = \tau_f l_f b V \quad (9)$$

大越・佐田の研究⁹⁾によると、逃げ面に逃げ角 0° のランドをつけたバイトで削るときには、このランドの部分での摩擦応力はすくい面上のそれ (τ_c) に等しいことが認められ、ほぼ全面にわたって凝着を起こしてせん断状態になっていることが示された。しかし逃げ角のついた普通の鋭利なバイトでは、逃げ面の見掛けの接触面上で全面凝着を起こすとは考えられず、平均摩擦応力 τ_f は当然 τ_c より低いものと予想される。

逃げ面と切削面との接触長さ l_f については、上記図3と同様に、黄銅を鋭利なバイトで低速切削し、切削後に逃げ面に認められる凝着痕を測微顕微鏡で測った結果、図4のごとくであった。この図には、被削材の断面の顕微鏡写真における結晶粒の変形から求めた切削面の流動量 δ_{so} も併記してある。これからつぎのことがいえる。

a) $\alpha = 0^\circ$ の場合、 l_f の値を図3の l_c の値と比較してみると、約 $1/15$ で、かなり小さい。逃げ角のついた鋭利なバイトでは、 τ_f は τ_c より小さいことを考慮すると、逃げ面での摩擦力はすくい面でのその5%以下で

図4 逃げ面—切削面接触長さ l_f と切削面の流動量 δ_{so} との切込みによる変化 (切削条件は図3と同じ)

あろうと推定される。ただし、切りくず速度 V_c は切削速度 V よりかなり小さい (t_1/t_2 倍) のが普通だから、摩擦仕事量としてはこれより高い比率になろう。

b) 逃げ面での摩擦仕事 W_4 も、すくい面上でのそれと同様に、一部 W_{41} が実際の接触面で費され、残部 W_{42} は切削面表層の流動に費されるものと考えられる。いまかりに W_{41}/W_{42} の比率が W_{31}/W_{32} と同じだと仮定すると

$$\delta_{so}/l_f = \delta_c/l_c \doteq 0.1 \quad (10)$$

ところが図4の実測結果では δ_{so} がこの関係よりずっと大きく、

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0^\circ \text{ で } \delta_{so}/l_f \doteq 2 \\ \alpha = -40^\circ \text{ で } \delta_{so}/l_f \doteq 1 \end{array} \right\} \quad (11)$$

ここで測定した流動量 δ_{so} には、逃げ面摩擦によるものの以外に2.2に記したせん断領域の拡がりによるものも含んでいることを考えると、この実験事実、切削面表層の塑性流動の主原因はせん断領域が切削面以下にまで拡がっていることであり、逃げ面の摩擦によるものは、この実験の範囲内では、全体のせいぜい5~10%にすぎないことを意味する。

2.5 切りくずの運動エネルギー W_5

静止している被削材を切削速度 V で削ると、切りくずはせん断面方向に

$$V_s = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} V \quad (12)$$

なる速度を得て流出する。単位時間に発生する切りくずの重量は $\rho b t_1 V$ (ρ は被削材の密度) であるから、これに V_s なる速度を与えるに要するエネルギー W_5 は、重力の加速度を g とすると

$$W_5 = \frac{1}{2} \frac{\rho b t_1 V^3}{g} \left[\frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \right]^2 \quad (13)$$

この式に具体的な数値例を入れて計算してみると、切削速度が 5000 m/min 以上になったときに、ようやく全切削動力の 1% に達する程度の小さな量であり、普通の切削ではもちろん、研削においても、まず無視してさしつかえないことがわかる。

2.6 まとめ

以上、切削に際してなされる仕事について検討した結果をまとめると

a) 新しい表面の生成および切りくずに運動を与えるための仕事 (W_1 と W_2) は一般には十分無視できるほど小さい。

b) 従来の解析で無視されていた仕事の中で、第 1 に取り上げるべきものは、切削面表層に塑性流動を起こさせるに要する仕事であるが、この流動を起こす主原因はせん断領域が切削予定面以下にまでひろがることであり、逃げ面の摩擦は、刃先がよほど鈍化していない限り、ごく一部の原因をなすにすぎない。

3. 実 験

3.1 切れ刃近傍の形状の測定

切削工具の切れ刃を幾何学的に完全なくさび形にとぐことは実際上不可能で、多少の丸味や欠けなどの不完全な部分を生ずることは避けられない。この部分の大きさに比べて十分大きな切込みで削るときにはその存在は無視できるが、切込みが小さくなると当然切削機構に影響をおよぼすことが予想される。

本研究では切込みが $2\ \mu$ 程度までの軽切削を行なうから、切れ刃の断面形状を少なくともその 1 桁下の精度で測定しておくことが必要である。その測定は G. Schmerwitz¹⁰⁾ が用いたと同じ原理の、つぎの方法を用いた。すなわち図 5 のように、測ろうとする切れ刃を水平にし、これを軸として回転するようにバイトを割出台に取付ける。この切れ刃の上には、接触部に平面ガラスをはりつけたヤジロー式の振子をのせる。割出台によってバイトを一定角度 $\Delta\theta$ ずつ静かに回転させると、切れ刃の曲率半径に応じて接触点が移動するから、振子の傾角 φ が変化する。これを振子にはりつけた平面鏡とオートコリメータとで測定する。

いま図 6 のように切れ刃が半径 r なる円筒形であると、最初は実線で示すように水平に対して φ_1 だけ傾いて P_1 点で接触していた振子が、切れ刃を $\Delta\theta$ だけ回転した結果、点線で示すように、振子の傾角は $\Delta\varphi$ だけ増して φ_2 となり、接触点は P_2 に移動したものとす。また最初 P_1 にあった点は回転後には切れ刃側では P_1' に、振子側では P_1'' に移動したとし、回転の際に切れ刃と振

図 5 切れ刃の形状の測定法

図 6 切れ刃の形状の測定原理

子の接触部ではすべりの全くないころがり接触が行なわれたとすると

$$\overline{P_2 P_1'} = \overline{P_2 P_1''}$$

が成立するはずで、これに振子の重心 G は常に接触点の直下にあるとの条件を入れると

$$r(\Delta\theta - \Delta\varphi) = h(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1) \quad (14)$$

したがって

$$r = \frac{h(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1)}{\Delta\theta - \Delta\varphi} \quad (15)$$

本実験に使った振子は $h=4.3\text{ mm}$ で、 $h \gg r$ であり、水平に近いところで測定したので φ_1 も φ_2 も小さいので、つぎの近似式が使える。

$$r = h\Delta\varphi / \Delta\theta \quad (16)$$

実際の切れ刃は θ とともに r が変化するから、 $\Delta\theta$ を小さく (2°) とり、順次それに応ずる $\Delta\varphi$ を測って、図

図 7 切れ刃近傍の形状の測定結果の 1 例

6 の下側に記したように作図すれば、切れ刃付近の断面の拡大図が得られる。オートコリメータは NPL 形でマイクロメータの 1 目盛が 1 秒のものをを用いた。図 7 には実測例を示す。

この測定では切れ刃に振子の重量が加わって変形させるおそれがあるが、振子の重量 20 gr、切れ刃方向の接触長さ（平面ガラスの幅）10mm の本測定の場合について、Hertz の式を使って計算してみると、切れ刃の曲率半径 4μ の鋼製バイトの場合でも接触幅は約 0.09μ にすぎず、この変形による曲率半径の測定誤差はまず無視してよいことがわかる。一方、この接触での最大圧力を計算すると約 29 kg/mm^2 となる。実際の切れ刃にはあらさがあることを考えると、真の最大圧力はこれよりかなり高くなって、降伏点をこえる場合も予想される。しかし、同じ切れ刃を繰り返して測定した結果は再現性がかなりよく、また振子につけたガラスの表面には傷が全然認められないことなどからして、まず問題はないものと思う。

なお、この方法で測って得られる形状は、切れ刃の幅 10mm の間で最も突出した部分を結んだものであるが、本実験に用いたバイトをとく際には砥石を切れ刃と平行に動かしたので、その方向のあらさはきわめて小さいから、この測定結果をもって切れ刃の断面形状の目安としても大過ないと思う。

3.2 切削実験の方法

切削には図 8 のように卓上フライス盤を改造して使用した。すなわち、コラムの上に固定した 2 成分工具動力計に取付けたバイトで、テーブル上に取付けた板状被削材を、テーブルを下降させることによって 2 次元切削する。切込みはテーブルを左に移動して与えるが、ミクロン単位の微量を厳密に与える困難は避けて、ハンドルの目盛やダイヤルゲージの指示を一応の目安として切削し、切削後に切りくずの重量を測定して実際の切込みを

図 8 切削実験装置

求めた。

テーブルの下降には減速モータを用い、その速度すなわち切削速度は 0.1 m/min に一定した。

被削材には市販の 4-6 黄銅板（厚さ 6.1 mm ）を 700°C に 30 分間保持した 後水冷したものを用いた。切削幅は 6.1 mm を標準としたが、一部の実験では 3.0 mm に減らして削った。また被削材表面には図 9 のように溝をほっておき、切削距離を一定（7 ないし 9 mm ）にした。

バイトは高速度鋼第 4 種の完成バイトを用い、すくい角は 0° 、 -20° 、 -40° の 3 種類、逃げ角はすべて 7° とした。刃先の最終仕上にはアルカンサスの油砥石を用い、ダレを防ぐよう注意しつつできるだけ鋭利にといだ。その場合の切れ刃の形状は図 7 に例示したように、多少のダレの部分を除くと、いずれのバイトも曲率半径 $3 \sim 4 \mu$ の円弧状であった。またこれらのほかに、この曲率半径の影響を調べるために、すくい角 0° のバイトに故意に丸味をつけたバイト（以下では鈍化バイトと呼び、R の符号をつける）を用いたが、その切れ刃は半径約 17μ の円弧であった*。

切削面表層の流動状態を調べるには、切削後に被削材を合成樹脂の中に埋めこみ、切削面に直角で切削方向に平行な断面の顕微鏡写真を取り、結晶の変形状態を観察した。その際、前回の切削（予備切削）による流動が残っていて付加される場合があるので、図 9 に示すように本切削は溝の部分までにとどめ、それより上側には本切削前の状態を残しておき、流動量は単純に加算されるものと仮定して算出した。すなわち、表面での真の流動量 δ_{s0} は図中の δ_{t1} と δ_0 を実測して

$$\delta_{s0} = \delta_0 - \delta_{t1}$$

* ちなみに、超硬バイト (S3) を #80 GC 砥石で研削したときの丸味半径を測ったら約 8μ 、これをさらに #220 ダイヤモンド砥石で研削したら約 3μ であった。

図9 切削面表層の流動

被削材：黄銅，切削速度：0.1 m/min，切削幅：6.1 mm

図10 切削抵抗の2成分の切込みによる変化

で求めた。

切りくずの厚さは，切りくずを合成樹脂中に埋めこん

図11 比切削抵抗の2成分の切込みによる変化
(切削条件は図10と同じ)

でその断面をみがき，測微顕微鏡で測定した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 切削抵抗

上記4種類のバイトで切込みを変化させて削ったときの切削抵抗の主成分と背成分は図10に示すごとくで， $\alpha = 0^\circ$ の鋭利なバイトの場合のみは切削抵抗は切込みにほぼ比例するが，他の三つの場合には，従来の多くの実験で示されたと同様に，原点の上側を通る直線で近似的に現わされる（ただし切込み30 μ 以上ではその勾配が変化するのが認められる）。したがって比切削抵抗は図11に示すようになり，後の三つの場合には明確な寸法効果が認められる。

3.3.2 切削面表層の流動

図12は切削面の流動量 $\delta_{s,0}$ の切込みによる変化を示すもので，いずれの場合にも切込みとともに増すことがわかる。この $\delta_{s,0} - t_1$ 曲線は，鈍化バイトの場合を除くと大体座標の原点付近を通るが，比例関係からは外れている。もしこれが比例すれば，表層の流動に要する仕事や力も切込みに比例するであろうから，表層の流動が切削抵抗の寸法効果の原因ではありえないことになるが，この図を見ると，特に $\alpha = -40^\circ$ のバイトや 0° の鈍化バイトの場合，表層の流動が寸法効果の少なくとも一部の原因となっているのがわかる。

図12 切削面の流動量 δ_{s0} の切込みによる変化
(切削条件は図10と同じ)

図13 せん断角の切込みによる変化
(切削条件は図10と同じ)

3.3.3 せん断角

切込み t_1 と切りくず厚さ t_2 の測定値およびバイトのすくい角 α から、よく知られている次の幾何学的関係式

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \quad (17)$$

を使って求めたせん断角 ϕ を図13に示す。ここで明らかなのは、切込みが小さくなるとせん断角が減少することである。その傾向は鈍化バイトで特に著しい。せん断角が減少すれば当然比切削抵抗は増すから、これが切削抵抗の寸法効果の少なくとも一つの原因をなしていることは明らかである。

なお、切込みが切れ刃の丸味半径と同程度にまで小さくなると、実際のすくい角は減少して負角になるから、式(17)中の α を修正すべきで、その結果 ϕ の値はもっと小さくなるはずである。これについては後(図15)に記す。

3.3.4 せん断面上のせん断応力

つぎに、以上の実験結果からせん断面上のせん断応力

を算出し、これに Shaw のような寸法効果があるかどうかを調べてみる。第2章の考察から、切削仕事の中で表面エネルギーの増加 W_1 と切りくずの運動エネルギー W_3 は小さいから無視するものとし、逃げ面における摩擦仕事も第1近似として無視すると、全切削仕事 W は

$$W = W_{21} + W_{22} + W_3 \quad (18)$$

すなわち従来から考えられているせん断領域におけるせん断仕事 W_{21} とすくい面における摩擦仕事 W_3 のほかに、せん断領域が切削面以下にまでおよんで切削面表層に塑性流動を起こさせる仕事 W_{22} を加えたものに等しいものとする。この W_{21} と W_{22} には式(1)および(3)を入れ、他には図2からすぐ誘導される $W = RV \cos(\beta - \alpha)$, $W_3 = RV_c \sin \beta = RV \sin \phi \sin \beta / \cos(\phi - \alpha)$ を入れ、切りくずのせん断ひずみ $\gamma = \cos \alpha / \sin \phi \cos(\phi - \alpha)$ なる関係も使って整理すると

$$\tau_s = \frac{R \cos(\phi + \beta - 2) \sin \phi}{b t_1 \left[1 + \frac{k \delta_{s0}}{\gamma t_1} \right]} \quad (19)$$

ただし $k = \tau_s' / \tau_s \ll 1$

この式で、 $\delta_{s0} = 0$ 、すなわち表層に流動がないとすれば、当然のことながら、従来から使われている式と一致する。

図14の黒丸印は、上記実験結果と式(19)を使い、 $k=1$ と仮定して計算したせん断応力 τ_s であり、白丸印は $\delta_{s0} = 0$ 、すなわち表層の流動仕事を無視した場合のせん断応力で τ_{s0} ある。この図で、切込みによるせん断応力の変化が比切削抵抗の変化(図11)に比べて少ないのは、切込みが小さくなるとせん断角が減る(図13)ことの結果である。また τ_s は τ_{s0} より約20%小さく、かつ切込みによる変化が少ない(とくに鈍化バイトの場合)のは、表層の流動仕事を考慮に入れた結果である。

このように、式(19)を使って求めたせん断応力は切込みによる変化はかなり少ないが、 $\alpha=0^\circ$ の鋭利なバイトの場合以外では、切込みの小さいところでまだせん断応力が増すのが認められる。これは $\alpha=0^\circ$ の鈍化バイトで最も顕著である。しかしこのように切込みの小さい場合には、切込みが切れ刃の丸味半径と同程度になっているのであるから、当然すくい角が変化しており、その影響を考慮して修正する必要がある。

このようにすくい面が平面でない場合には、有効なすくい角としてどこかの値をとるべきかは面倒な問題を含んでいるが、いまここでは簡単に定性的な傾向を調べるために、図15の右側に示すように、切削前の加工物表面の延長線と工具すくい面との交点におけるすくい面の傾斜 α_t をもって代表させてみた。 $\alpha=0^\circ$ の鈍化バイトにつ

図14 せん断応力 τ_s および τ_{s0} と切込みとの関係
(切削条件は図10と同じ)

図15 切れ刃の丸味のために有効なすくい角が α_e になったと仮定して計算したせん断角とせん断応力
(鈍化バイトの場合)

いての実験結果をこの α_e を使って計算しなおしたら、図15のようになった。これを図13および図14と比較すると、切込みの浅いところでせん断角はずっと小さくなり、せん断応力は切込みと無関係にほぼ一定値になり、寸法効果は認められない。

結局、せん断応力に寸法効果があるように見えたの

図16 すくい面上の摩擦角の切込みによる変化

は、切削面表層の流動仕事と、切れ刃の丸味による有効すくい角の減少とを考慮しなかったためであるといえよう。

3.3.5 摩擦角

切削抵抗はすべてすくい面上に作用すると仮定して、切削抵抗の2分力からすくい面上の摩擦角を普通の方法で計算すると図16のようになり、切込みが浅くなるほど摩擦角が大きくなることがわかる。これは図11に示した比切削抵抗で、切込みが小さくなると主分力よりも背分力の方が増加の程度が著しいという事実と対応する。

切削抵抗の背分力は仕事をしないから、切削仕事の面から行なった前記の検討からは、この事実の説明はできない。考えられる一つの理由として、切込みが浅くなると切れ刃の丸味の影響で、有効なすくい角が減少し、見掛けのすくい角を使って計算した摩擦角は増大して見えるということがあげられる。しかし、丸味半径よりはるかに大きい切込みでも摩擦角が変化していることから見て、これはごく一部の理由にすぎないと考えられる。

図4および図11のデータを検討すると、逃げ面の摩擦でこの事実を説明することは無理のように思われる。この問題については今後さらに検討したいと思う。

4. 結 論

軽切削における寸法効果についての以上の検討と実験の結果を要約すると、つぎの2点となる。

- 1) 切削に際してなされる仕事を再検討した結果、従来無視されていたものの中で最も大きいのは切削面表層に塑性流動を起こさせるのに費される仕事である。この流動の主原因は、せん断領域が切削予定面以下に

まで拡がっていることであって、逃げ面の摩擦はごく一部の原因をなすにすぎない。

2) 切込みが浅くなるとともに比切削抵抗が増大する、いわゆる切削抵抗における寸法効果の原因は

i) セン断角の減少

ii) 切削面表層の流動に要する仕事は切込みに比例しないこと

iii) 切れ刃が完全に鋭利でなく丸味があるため、有効なすくい角が減少すること

の3者であり、すくなくとも本実験の範囲では、被削材のせん断強度自体には寸法効果は認められない。

せん断領域が切削面以下にまで拡がるのを防ぐことは、加工変質層を減らすことであり、切削抵抗を減らすことにもなるわけであるが、このためには

i) セン断領域の厚さを減らし

ii) セン断角を大きくする

ことが必要であろう。しかしせん断領域の厚さについての理論的検討は今後の問題であり、せん断角についてすらいまだ問題が残されている。ただ、従来の実験や経験によれば、このための具体的手段として、すくい角や切削速度の増加、切れ刃を鋭利にとぐこと、切込みの減少などがあげられる。

終わりに、本研究中の多くの実験を担当された笠間啓市（現在東京ガス K. K.）岸正彦（現在三井造船 K. K.）の両君に厚くお礼申し上げるしだいである。なお、本研究の研究費の一部は文部省科学研究費によるものである。

(1964, 9月14日受付)

文 献

- 1) M. C. Shaw: A Quantitized Theory of Strain Hardening as Applied to the Cutting of Metals, J. Appl. Phys., Vol. 21 No. 6 (1950) 599.
W. R. Backer, E. R. Marshall and M. C. Shaw: The Size Effect in Metal Cutting, Trans. ASM E, Vol. 74 No. 1 (1952) 61.
- 2) E. G. Thomsen, J. T. Lapsley and R. C. Grassi: Deformation Work Absorbed by the Workpiece during Metal Cutting, Trans. ASME, Vol. 75 (1953) 591.
- 3) 益子正己: 金属切削に関する基礎的研究(第2報), 機械学会論文集, 22巻118号 (1956) 371.
- 4) 中山一雄: 切削機構に関する研究 (第4報), 精密機械, 24巻12号 (1958) 674.
- 5) たとえば R. A. Swalin: Thermodynamics of Solid, J. Wiley, N. Y. (1962) 192.
- 6) 中山一雄, 上野山勝, 田村清: 切りくずの彎曲について, 精密機械, 27巻10号 (1961) 681.
- 7) G. Boothroyd: Temperatures in Orthogonal Metal Cutting, Proc. Inst. Mech. Engr., Vol. 177 No. 29 (1963) 789.
- 8) 竹山秀彦, 槽谷梅太郎: 切くずの流れ速度分布, 精密機械, 25巻9号 (1957) 534.
- 9) 大越諄, 佐田登志夫: 切削工具逃げ面における摩擦現象, 23巻8号 (1957) 404.
- 10) G. Schmerwitz: Messung von Schneidenkrümmungsradien, Z. für Instrumentenkunde, 52 Jahrgang, Erstes Heft (1932) 1.