き、この間は図の領域内で任意に曲線をひくことができる。この誤差を少くするために上下端での ΔE を小さくしている。

図7は加工法の異なる2種のアラサ曲線についての実測例で、図では f_1, f_2 とも正規分布に近い形を示している。

4. 結 言

Abbott の負荷曲線すなわち分布曲線を、表面のトレース操作のみで簡単に測定できる電気的触針アラサ計を比較的簡単な回路で構成し、実用上満足すべき結果を得た。またアラサ曲線の記録を用いなくて $H_{\max}$ を求め

得ることも本計器の特長の一つである。大きさ重量とも容易に持ち運びできる程度であり、操作も簡単であるから期待できるのではないかと思う。またアラサ以外の現象に対しても有効に用いられるであろう。

(1959, 5月6日受付)

参 考 文 献

- 1) 甲藤好郎：日本機械学会論文集，Vol. 22, No. 122, p. 93.
- 2) Weingraber：Microtecnic Vol. 9, No. 1, p. 6.
- 3) 電気通信学会：最新のパルス技術
- 4) MIT. Radiation Laboratory Series. Wave Forms.

切くず流れ速度分布

竹 山 秀 彦* 糟 谷 梅 太 郎*

Velocity Distribution of Chip Flow

Hidehiko TAKEYAMA & Umetaro KASUYA

The conventional macroscopic treatments of machining theories seem to have reached a deadlock, because many contradictions or discrepancies encountered are considered to be due to the rather rough assumptions in the conventional machining theories. Typical examples are the so-called shear plane and chip-flow velocity. According to the experiment, shearing slips in metal machining would not occur in a simple shear plane, but does in a rather wide zone ahead of the tool. As to chip-flow velocity, it is not uniform along the rake face, but it is very slow near the cutting edge and it increases gradually to reach a definite constant velocity. This paper describes the results of the close investigations of chip flow or chip deformation by means of a special technique.

1. 緒 論

従来の切削理論，工具摩耗，切削温度に関する研究においては一般に切くず流れ速度は切くず内の各点においては勿論，すくい面上においても一様であるとしている。いわばマクロ的取扱い方をしているのである。しかし日常我々が遭遇する諸現象に徴して上記の仮定が必ずしも厳密な意味において正しくないのではないかと考えられる節が多々ある。工具すくい面摩耗（クレータ）の断面形状が弧状となり切刃りよう部はほとんど摩耗が進行せず取り残されること，切削温度の実測結果¹⁾からすれば切刃りよう部の温度が意外にも低いこと，構成刃先

は常に切刃りよう部から成長する傾向であることなどがそれである。

切くず流れ速度分布に関する正しい情報は切削理論近似の向上，構成刃先およびすくい面摩耗発生機構および切くずカール機構の解明などに寄与するところが多いであろうと考えて行つた実験の方法と結果について以下に報告する。

2. 切くず流れ速度の分布の測定方法

切くず流れ速度分布を測定するためには工具すくい面近傍の被削材および切くず内各点の時間的変位を知る必要がある。これに対して当然考えられる方法は所定の被削材試料板側方表面に細かい座標目盛を施し，これを2

* 工業技術院機械試験所 正会員

次元切削して 上記座標の時間的変化を観測するという方法である。

いま被削面あるいは 切削方向に対し 直角に一定間隔 D mm で座標目盛を刻んだ被削試料を $|V|$ mpm なる切削速度で 2 次元切削した場合、切くず側面上のある部分の目盛線間隔が切くず流線上で測つて d mm に変化したとすれば、切くず内各点の切くず流線上の速度 $|V_c|$ mpm は次式をもつて表わされる。

$$|V_c| = \frac{d}{D} = \frac{|V| \cdot d}{D} \dots\dots\dots (1)$$

従つて切くず流線上の変形後の目盛間隔 d を測定してやれば $|V|$ および D は既知量であるから切くず内各点の速度はわかる訳である。しかし上記切くず内流線は前記のパターンからは直接知ることができないので、これを求めるためには被削面あるいは 切削方向に対し 平行に前記目盛線よりは さらに細かい座標目盛線を刻んでその変形模様を観測しなければならない。

上記流線上速度の工具すくい面と 平行方向の速度成分を求め、各流線上における速度変化を工具すくい面上に外挿すれば 工具すくい面上の切くず流れ速度分布も一応知れる訳である。ただし此の場合工具すくい面は上記流線群の一つの極限としなければならない。しかしこの方法ですくい面上の切くず流れ速度分布を求めるのは後で詳述するように無理があり、従つてこれがためには別の方法をとつた。

なお切削方向に対し 直角及び平行の目盛を同時に刻んでおいて切削し、一度にそのパターンを観測する方法も当然考えられるが、この場合格子目のパターンが極度に乱れて信頼のおける観測ができないので、それぞれのパターンを別別に観測し、これを後で重ね合わせる方法をとつた。

被削材としては純銅を選んだ。これは銅がいかなる切削条件においても 構成双先を生じがたくそれに基づく誤差あるいは混乱を防ぎうるからである。被削試料の寸法は長さ150mm×幅60mm×厚さ5mm とし、これを平面フライス盤のアーム部に取り付け、切削工具（高速度鋼工具、双部形状は 20, 0, 6, 0, 0, 0, 0, 寸法は $\frac{3}{8}$ "）は上記フライス盤テーブル上に適当な取付具をもつて固定し、テーブルの長手送りによつて前記工具をもつて 2 次元切削せしめる。ただしこの場合の切削幅は 5mm、切込みは 0.5mm で切削速度は 0.09mpm とし、切削中被削試料を急停止して切くず変形パターンを観測する。なおこの場合切削剤は用いない。

被削試料の側表面 すなわち前記細線を目盛つた面は自

由表面であるから そのまま切削すれば切くず側面は目盛面に対し直角方向にはみ出し、2 次元の切削でなくなるばかりでなく目盛線が乱れてすくい面前方の被削材及び切くず内の自然な変形模様を観察できなくなる。これを防ぐために被削試料と同一材料、同一寸法のもう 1 枚の板を用意し、これらを 2 枚合せし、しかも観測用被削試料板の目盛を刻んである面が直接 もう 1 つの板と接するようにしてやれば、観測面の切削方向に対して直角方向の自由度は拘束され、その面上の変形はあたかも被削材内部と同じように振る舞うであろう。

被削試料面上の目盛は 平面直線目盛機をもつて行い、目盛工具は頂角 60deg のダイヤモンドコーンを用いた。この目盛機の精度は 0.005mm 程度であり、本観測の目的には十分である。被削面に直角方向の目盛線の間隔は 0.20mm とし、かなり深く刻んだ。何となれば切くずとなつたとき目盛線が消失してしまうおそれが多分にあるからである。一方被削面に平行方向の目盛線間隔は 0.04mm とし、しかも深さは前者に比べればずっと浅くした。

一般に切削開始時はすくい面切くず接触面積は小さく、剪断角は大きいものである。これはいわゆる過渡現象であり、工具の進行につれやがて定常状態に落ちつくのでこの時期を見計つて観測を行つた。

以上の方法によつて 切くず各部の流れ速度分布および変形の模様が観測できる。しかしながらすくい面上の切くず流れ速度分布は前述のように外挿法では無理である。というのはすくい面に接した切くず部は変形が著しくあらかじめ目盛つた座標線の判別が非常に難しく、従つて相当の誤差がまぬがれないこと、さらにはすくい面を切くず内流線の 1 つの極限と考えるという 仮定が含まれているからである。そこですくい面上の切くず流れ分布測定のためには 別のもつと直接的方法をとらなければならないであろう。

Fig.1 はすくい面上の切くず流れ速度分布測定の原理を示す模形図である。同図において右図は側面図、左図

Fig.1 Principle for obtaining velocity distribution of chip flow on rake face.

は正面図を示している。工具は2次元切削用とし、今の場合簡単のためにすくい角は 0 deg としている。工具は側面図でみられるように左方に切削速度 $|V| \text{ mpm}$ で進行し、切くずはそれに伴って工具のすくい面に沿って $|V_c| \text{ mpm}$ なる速度で上方に流れている。この際切削方向を含む水平面内にあつてしかも切削方向と直角に $|V_t| \text{ mpm}$ なる速度で工具を走行せしめたならばどうであろうか。これを正面図について説明しよう。正面図では便宜上切くずは描かれておらず、現われているのはすくい面である。いますくい面上の一点 P (勿論すくい面切くず接触面内に) をとつてこの点における本来の切くず流れ速度ベクトルを V_c とすれば、これと前述の切削方向と直角方向の工具走行速度ベクトル V_t との合成速度ベクトル V_r をもつて P 点に相対する切くず面上の点が移動することになる。この場合勿論次の関係が成立つ

$$V_r = V_t + V_c \quad (2)$$

$$|V_c| = r_c |V| \quad (3)$$

ただし r_c は切くず比 (chip-thickness ratio) であり、 V_c は見掛けのあるいは定常状態に達したときの本来の切くず速度ベクトルである。

(2)式において V_t の方向と絶対値は既知であり、 V_c の方向も既知であるから V_r の方向さえわかれば V_c の絶対値が求められるはずである。さて本実験においてすくい面切くず接触面上の各点においては (2)式の関係をもつて切くずが工具すくい面上をこすつて行くわけで、そのときすくい面上には傷なり被削材の溶片なりを (2)式を満足する曲線に従つて残し、明瞭な切くず走行軌跡がしるされる。従つてこれから合成ベクトル V_r の各点における方向が求められるので 前述の論法で各点における本来の切くず流れ速度 $|V_c|$ が求まり、結局その速度分布が観測できることになる。

さてこれを実現するための方法について説明しよう。切削方向と直角方向にも工具と被削材間の相対運動をさせるためには、フライス盤テーブル上に工具を固定し、同フライス盤のアーム部に被削材試料板を取付けてテーブルの長手送りと前後送りを同時にかけて2次元切削せしめればよい。この場合テーブルの長手送り速度は切削速度に、前後送り速度は前記切削方向と直角な運動速度に相等し、実際これらを等しく 0.09 mpm とした。こうすることによつて、切くず速度は切削速度より、小さい値をとるがすくい面上にえがかれる合成ベクトル模様はその2成分に対し適当な傾きをもつようになり観測は都合よく行われる。

この実験のセットアップの概観を示したのが Fig. 2 で

Fig. 2 Setup of experiment.

ある。同写真でも示されているように、実際には切くずが正常な方向すなわち工具切刃のように直角上方に流出するような切くず案内(chip guide)が必要である。何となれば切削方向に直角な切削材～工具間の相対運動のために切くずはその運動方向と反対方向に摩擦力を受け、その結果切くずは曲げられて被削試料板の側方にはみ出てくるからである。上述切くず案内は切くずが側方にはみ出すのを阻止し、しかも工具と一緒に進行する仕掛けのものである。この条件を満足させるためには、被削試料板両側面に水平にすべり溝を設け、切くず案内板内側の水平凸出部が丁度上記すべり溝にかん合して案内板自体が被削試料について水平かつなめらかにしゅう動できるようにし、しかも案内板の一端が工具すくい面に接するようにしておけばよい。この際案内板と切くず間の摩擦、案内板と被削試料面との摩擦は、測定の対象が切削力ではないので何ら妨げとはならない。

3. 切くず内の流れ速度分布

Fig. 3 は切削方向に直角に一定間隔 (0.20 mm) に座標目盛をつけて 0.09 mpm の切削速度、 0.5 mm の切込みで2次元切削した場合の切くず各部変形の位相を示したものであり、Fig. 4 は同一被削材である銅板側面に、切削方向に平行に一定間隔 (0.04 mm) に座標目盛をつけて Fig. 3 と同一切削条件で2次元切削した場合のいわば切くず内流線を示したものである。Fig. 3 及び Fig. 4 のパターンを重ね合せてトレースした総合パターンが

Fig.3 Equi-phase lines inside chip.

Fig.4 Flow lines inside chip.

Fig.5 に示してある。このパターンの写しかえ操作のとき溝のどの部分に着目したにせよ 溝間の相対間隔さえ見失わなければ大した問題ではない。

Fig.5 において二〜三の流線（中太実線）に沿って切削方向およびすくい面に 平行方向の速度分布を検討して

Fig.5 Velocity distribution inside chip.

みよう。切削方向の速度成分は被削面に直角な目盛線間隔の水平成分を求めればよく、これを上記流線に沿って各点で求めてプロットしたのが点線 $|V|$ である。ただしこのプロットのし方は、各流線上において、被削面に直角な相隣つた目盛線間の midpoint よりその流線に対して法線を上方に引き、その法線上に流線上で測つた直角目盛線間の距離の水平成分（あるいは切削方向の成分）に比例した長さをとり、これを結び合せてある。またすくい面に平行方向の速度分布曲線 $|V_c|$ は直角目盛線間隔のすくい面方向に平行方向成分を測り、これを前と同一操作で流線を基線として求めてあり、太い実線で示してある。ここに注意すべきことは切削方向およびすくい面に平行方向の速度成分はきょう角が $(90^\circ + \text{すくい角}) \text{ deg}$ をなす斜交座標に関して求めてあることである。

従来の切削理論で考えられているような切削模形、すなわちいわゆるせん断面においてひずみ $r = \tan(\phi - \alpha) + \cot\phi$ (ϕ : せん断角, α : すくい角) が完了されるとする模形からすれば、 V なる切削速度に等しい水平速度でせん断面に向つた材料はせん断面に到達するやたちまち水平軸方向成分はゼロになり、同時 $r_c|V|$ なる縦軸方向速度成分をもつて切くずとなつて進行するはずである。しかるに実際の切削では Fig.5 でもわかるように、そのような急激な速度変化を起さず連続かつかなりなだらかな速度変化を示す。換言すればいわゆるせん断面のような面は実は非常に理想化されたものであるともいえる。しかしながらすくい面に近い流線ほどこの速度変化が急になる。すなわち刃先近傍においては前述の理想化されたせん断面の状態に近い、あるいは応力集中し易いことを示す。さらにいいかえるならば、実際展延性に富む材料の切削においてはいわゆるせん断面ではなく刃先近くで狭く、刃先から遠ざかるにつれて広いせん断領域において連続的なせん断ひずみが完成される。

さて各流線の、すくい面方向の速度成分をもう一度検討してみよう。同方向の速度成分が現れ始める点（線）を結んで得られる線（面）は Fig.5 でせん断開始面（Starting plane of shear）として記載されており、これは工具刃先を起点としていると考えられる。Fig.5 でわかるようにせん断開始面は逆 S 字状曲面を有し、被削材自由表面近くでは早くから変形を開始していることがわかる。

4. すくい面上の切くず流れ速度分布

上述のせん断開始面上ではすくい面方向の速度成分はゼロであることを考慮し、しかもせん断開始面は前述の

如く刃先を通過すること、および工具すくい面は一方の境界流線に一致するものと仮定すれば刃先においては切くず流れ速度はゼロということが考えられ、しかも Fig.5 におけるすくい面方向速度成分分布曲線を外押すれば一応すくい面上の切くず流れ速度分布は求められると考えられる。しかしながらこれのためにすくい面にごく近い流線上の速度分布がはつきりしていなければならないが実際上この部分は変形が極端で目盛線の判別に苦しみことと前述の仮定のために本外挿法は適当でないことが結論される。

この故に2の後半で述べたような“ベクトル法”によつて直接的にすくい面上の切くず流れ速度分布を求めた結果について説明しよう。

Fig.6 Vector patterns of chip flow on rake face for varying rake angles.

Fig.6 は切削速度 0.09mpm, これに対し真横に 0.09 mpm の速度をもつて、工具と被削材間に 2 次元的相対

Fig.7 Velocity distribution of chip flow for varying rake angles.

Note : C.L. = tool-chip contact length, L = distance from cutting edge.

運動をさせながら純銅を切削した場合、工具すくい面上に描かれたベクトルパターンを示す。同図において上より順次すくい角は 20deg, 6 deg, 0 deg に対応し(すくい角 20deg のものは便宜上倍率を大きく示してある), 2 次元切削切込みはどれも 0.5mm であり乾式切削である。これらすくい面に断続的の細線をもつて描かれた切くず流れのベクトルパターンの方向に着眼して切くず上の一点の連続した走行軌跡を示したのが Fig.7 である。

Fig.1 よりすくい面上の任意の点における切くず速度 $|V_c|$ は

$$|V_c| = |V_t| \tan \theta \quad (4)$$

ただし θ は切削方向と直角な工具横送り速度ベクトルの方向と切くずの合成速度ベクトルの方向となす角である。さて本実験においては切削速度と横送り速度は等しくとつてあるから

$$|V_t| = |V| \quad (5)$$

従つて(4)と(5)より

$$|V_c|/|V| = \tan \theta \quad (6)$$

Fig.7 においてすくい面上で切刃りようから測つた距離を L で表わし、それに沿つた各点におけるすくい面上の切くず流れ速度を単位切削速度に対して、すなわち $|V_c|/|V|$ をもつて表示してある。ここに $|V_c|/|V|$ は(6)より明瞭のように切くずの合成走行軌跡 (Fig.7 における斜行曲線)・上各点の接線方向係数から直接求められる。

Fig.7 よりいえることは、第1にすくい角が大きくなるほど切くず流れ速度は増すということである。これはすくい角が大きくなれば切くず比 (chip-thickness ra-

tio) r_c が大となり(3)より当然のことである。

第2はすくい面上の切くず流れ速度は刃先において急激に低下し、この傾向はすくい角が小さいほど大である。すなわち切くずは刃先近傍ではすくい面上である程度停滞気味であることで、これは丁度流体が広い流路に出るとよんだり、また鋭い曲り角で滞る現象とよく似ている。このことは切削機構上及び實際上極めて重要な意味をもつものである。すなわちミクロ的に切削機構を考究する際にはある程度上述の現象を考慮しなければならないであろうし、また刃先近傍における切くずとすくい面間の相対速度が低いことは弧状断面をもつた工具すくい面摩耗(クレータ)発生の大きな原因となると考えられ、また切削温度が刃先より少し離れた所で最高になる事実も説明がつくであろう。またこのように刃先近傍で切くずがよどみ勝ちな傾向は明らかに構成刃先附着のきつかけとなると考えてよからう。何となればここでは金属溶着に都合のよい条件を備えているからである。すなわちここでは圧力溶着(pressure welding)²⁾のための適当な温度とかなりの金属的接触時間が得られる条件下にある。

前にも報告³⁾したように、刃先におけるすくい面法線応力は非常に大きくなり切削力からみた場合工具刃先は特異点(singular point)であると同時に切くずとの相対速度においても刃先が特異点的性格をもつということは非常に興味深いことである。

5. 結 論

(1) 展延性に富む材料の切削において、切くずとなるべき材料部分の切削方向の切削速度成分はいわゆるせん断面通過以前より減少し始め、それを通過した後もゼロとはならず切くず流線が定常流に達してゼロとなる。

(2) (1)に対応し、切くず内流線のすくい面方向速度成

分はいわゆるせん断面以前より発生し(この速度成分発生点をつらねた曲面をせん断面開始面と命名)、漸次増加して流線の定常流に達したとき(切削速度)×(切くず比)の値をとる。

(3) 展延性に富む材料の切削における工具すくい面前面における変形は、いわゆるせん断面においてすべるといような模形からはかなり遠く、相当広いせん断領域にわたって連続的な変形を行うものである。

(4) すくい面前方の切くずせん断変形は刃先に近い側で早く完了し、刃先から遠ざかるに従って遅れる。すなわち刃先に近い程応力集中が行われ易い。

(5) すくい面上の切くず流れ速度分布は、刃先より離れた所で定常速度となるが刃先に近づくにつれて急激に低下する。この傾向はすくい角の減少とともに大となる。

(6) すくい面上の切くず流れ速度分布が(5)でのべたように一様でなく刃先において低下することは断面形状が弧状をなす一般のすくい面摩耗(クレータ)および構成刃先発生に直接的関係を持ち、かつ切削温度が刃先から少しはずれた所で最高になるという事実を説明しうる。

終りに御指導を賜つた大越諒先生に感謝し、さらに種々助言して下さつた機械試験所技官村井照水、臼井英治の両氏に謝意を表わす。

(1959, 5月7日受付)

参 考 文 献

- 1) H. Opitz : Temperature Field of a Turning Tool and the Relation in the Zone of Contact, Microtecnic, VIII, 4.
- 2) Milton Shaw : Metal Cutting Principles, M. I. T., 1952, —11—17—.
- 3) 竹山秀彦 : 高速切削の研究(第7報), 精密機械, Vol. 22, No. 3, p. 108.

正 誤

巻	号	頁	欄	行	誤	正
23	12	574	右	下から8	$P = \pi \left(\frac{\rho \sigma}{6} \right)^{1/2} D^2 v^2$	$P = \pi \left(\frac{\rho \sigma}{6} \right)^{1/2} D^2 v$