しいことをのべた。さらに本形式の流量計の精度、感度とテーパ管の内径との関係を理論式を示して論じ、テーパ管の精度が如何に基本的問題を含んでいるかを明らかにした。

終りにのぞみ 本研究を終始御指導下さった東京工業大学谷口修教授に感謝致します。(1956, 11月8日受付)

文 献

- 1) 塚原; 空気マイクロメータ (科学技術社).
- 2) E.M.Schoenlorn and A.P.Colburn: A.I.C.

- E., Trans, Vol. 35 (1939).
- 3) M.R. Shafer, E.F.Flock, H.L.Bovey and R.B.Van Lone: Res.Nat.Bur.Stand., Jour., Vol. 47, No.4 (1951).
- 4) 相川: 計測, 第6巻, 9号 (昭31年).
- 5) K. Fisher, S. Blechman and E. Lipstein: Instruments, Vol. 14 (1941).
- 6) J.J.Martin; Chem.Eng.Prog., Vol.45, No. 5 (1949).
- 7) 本間仁訳, ミューラ; 粘性流体の力学.
- 8) 富田: 日本機械学会論文集, 第1巻 (昭10年).

構成刃先の研究 (第2報)*

正 会 員 中 山 一 雄**

Studies on the Built-up Edge (Part 2)

Kazuo NAKAYAMA

In the previous report, the fact that the built-up edge disappears when the cutting temperature rises above the annealing temperature of workpiece material was shown in the case of SAE 1040 Steel. In this report, this fact was confirmed by varying the workpiece material and tool material and by using cutting fluids. Considerations were made on the formation and the fracture of the built-up edge.

1. 緒 言

切削加工面の粗さを支配する要因としては

i) 工具刃先の形状及び工具の加工物に対する運動軌跡によつて幾何学的にきまるもの。

ii) 工具が加工物に対して理想通りに運動しないことによるもの。

iii) 加工物からの切屑の分離が工具の刃先で行われないことによるもの。

の三つをあげることができる。i) は刃先丸味半径を増したり送りを小さくすることによつて簡単に解決できる。

ii) は工作機械や工具の剛性を増すことによつて撓みや振動を防止し、又流れ型切屑を得ることによつて切削抵抗の変動を避ければ解決できる。流れ型切屑を得る為には切削速度の増加、送りの減少、すくい角の増加等の他に、被削材の展延性増加の為の熱処理、高温切削等を行

えばよいことが知られている。iii) はラックが加工面以下に入るような亀裂型や捲れ型の切屑の生成を避けて流れ型の切屑を得るようにし、且つ構成刃先の発生を防げばよい。この構成刃先の発生条件について筆者は前報¹⁾において、構成刃先ができるのは切屑が流れ型であつてしかも刃先温度がある一定値 (略々被削材の再結晶温度附近) 以下である場合に限ることを、0.4%炭素鋼について示した。本報告はこの結論を普遍化する為に、被削材及び工具材を変えた場合並びに切削液を用いた場合について実験を行い、更に之等の実験結果に基づいて構成刃先の生成消失の機構について考察を行ったものである。

2. 被削材質の影響

炭素鋼と並んで構成刃先の最も出来易いものとして18—8 不銹鋼及びアルミニウムを撰び、之等について前報と同様の方法で構成刃先の生成消失の条件を調べた。

(a) 18—8 不銹鋼

外径 49mm, 肉厚 1.5mm の 18—8 不銹鋼パイプを 0.1mm/rev. の送りで S1 超硬バイトで二次元旋削した

* 昭和31年春季精機学会講演会にて発表

**横浜国立大学工学部

場合、切削速度による刃先温度及び構成刃先の生成状況の変化を、常温切削及び高温切削（ $250 \pm 30^\circ\text{C}$ 及び $450 \pm 30^\circ\text{C}$ ）の場合について調べた。その結果は、すくい角 0° の場合が図 1、 20° の場合が図 2 の如くであつた。

図 1 切削速度と刃先温度及び構成刃先との関係（不銹鋼， $\alpha = 0^\circ$ ）

図 2 同前（不銹鋼， $\alpha = 20^\circ$ ）

図中の符号は前報と同じく 構成刃先の生成状況を示すもので、下記のとおりである。×：剪断型切屑，構成刃先無し。●：流れ型切屑（以下総て同じ）。かなり安定した構成刃先が全面に存在。▲：構成刃先の生成，完全脱落を全面で周期的に繰返す。△：切屑の中央部で構成刃先完全消失，両側は▲と同じ。○：全面で構成刃先完全消失。

之等を見ると，刃先温度が或る一定値をこえると構成刃先が消失すること前報の炭素鋼の場合と全く同様であることがわかる。一般に構成刃先ができると刃先温度が低下し*，消失すると上昇するが，不銹鋼ではその変化が特に著しい。図中，同一速度に対し点が二つ示してあるのは削り始めにおける刃先温度の変化過程を示すものである。この為に，構成刃先の消失温度を厳密に云うことは困難であるが，大体に於て $\alpha = 0^\circ$ で約 650°C ， $\alpha = 20^\circ$ で約 700°C を示し，矢張りすくい角が大きい方が幾分高温である。

(b) アルミニウム

外径 76 mm，肉厚 2.5 mm のアルミパイプを室温で

* これは，構成刃先ができると切屑が工具面上を直接に摩擦せずに構成刃先の上を摩擦する為と，真のすくい角が増して切削仕事が減る為とである。

$\alpha = 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$ の 4 種の HSS バイトで 0.1 mm/rev. の送りで二次元旋削した結果は図 3 の如くであつた。この場合にも高速側で構成刃先が消失するのは刃先温度が略々一定値になつた時であることが認められる。（その値はすくい角の大きい方が幾分高いようであるが，余り明確ではなく，大体 230°C である。）

図 3 同前（アルミニウム，室温）

尚，従来の発表によると構成刃先は切削速度が約 10 m/min. 以下になると出来なくなると云われているが，筆者の実験では前報にも記した如く，切屑が流れ型である限りもつと低速でも構成刃先が認められた。このアルミニウムの場合には，例えば $\alpha = 10^\circ$ のバイトで 0.1 m/min. という低速で削つても巨大な構成刃先が認められた。この場合には勿論刃先温度の上昇は極めて少く，測定できなかった。

3. 工具材質の影響

構成刃先の出来方が工具材質によつて変化するかどうかを調べる為に，上記アルミニウムを $\alpha = 10^\circ$ の S1 超硬バイトで切削した結果は図 3 の中に点線で示した如くで，構成刃先の生成状況は HSS バイトの場合と全く同様であり，刃先温度も測定誤差以上の差は認められなかった。この他に炭素工具鋼バイトについても実験を行ったが（刃先温度は測定しなかった），構成刃先の生成状況には矢張り差は認められなかった。

4. 切削液の影響

切削液が構成刃先の生成状況に如何なる影響を及ぼすかを調べる為に，種油，乳化油及び水の三種の切削液を流量約 800cc/min. で注いで実験を行った。被削材は前報に使用した 0.4%炭素鋼，丸棒の三次元旋削を切込 2.0 mm，送り 0.1mm/rev. で行い，バイトはすくい角 0° 逃げ角 5° の SI 超硬バイトを用いた。

切削速度の変化による刃先温度及び構成刃先の生成状況の変化は図 4 に示す如くであつた。之を見ると，高速

図 4 同前 (切削液の影響, 炭素鋼, $\alpha = 0^\circ$)

側での構成刃先の完全消失は、切削液の有無、種類に関係なく、刃先温度が一定値 (約 540°C) に達した時に起ることがわかる。即ちこの領域では切削液の潤滑性による構成刃先の除去ということは全然認められない。一方、切削液の冷却性は高速側では僅かしか認められないが、冷却性の高い切削液を使う程構成刃先を無くす為に切削速度を増さねばならず、その意味では切削液は却って構成刃先の生成を助けることになる。

一方、低速側では図からわかるように、一般に刃先温度が約 200°C 以下になると切屑は剪断型になり、構成刃先は消失する。然し種油を用いた場合のみは速度従って刃先温度の低下に伴って、再び構成刃先のない薄い完全な流れ型切屑を生ずるようになる。之は種油が工具すくい面と切屑との間を潤滑して凝着を妨げ、その結果摩擦力が減って剪断角が増し、剪断歪が減る為に切屑が破断を起さずに流れ型になるものと考えられる。切削液の潤滑効果はここに於て始めて明確に認められる。

5. 考 察

以上の諸実験 (第 1 報を含めて) の結果から、構成刃先についての次のような事柄を結論又は推論できる。

(1) 凝着：構成刃先が出来る為には、先づ切屑物質が工具のすくい面に凝着することが必要である。然しこの凝着は、少くとも金属質の工具を用いて ductile な材料を削る場合には、室温に於ても容易に起り得る。之は、i) 切屑の背面は新しく作られた完全な処女面であり、工具のすくい面も切屑のはげしい摩擦によつて表面の汚れを完全に持去られていること、ii) 切屑と工具の間に働く圧力は切屑の降伏応力附近で非常に高いこと、iii) 接線

力 (摩擦力) も働くこと等によるものと考えられる。Bowden 等の最近の実験²⁾は、表面を完全に清浄にした金属は室温でも容易に凝着すること、特に法線力以外に接線力も加わると凝着は著しくなることを示しているが、之は上の説明のよい裏付けになるものである。

(2) 成長：構成刃先とは、工具面に凝着した切屑物質が成長して、工具自身と異つた形状の刃先を構成したものを云うのであつて、工具面に薄く一様に凝着しただけでは構成刃先とは云い得ない。しかして、この凝着層が構成刃先に成長する為には、切屑が工具面に沿つて流れる際に、迂りが工具面上ではなしに切屑の内部で起らねばならぬ。その機構を説明する為には、工具面近傍の切屑材質の強度分布と応力状態とを考へなければならぬ。

一般に ductile な材料は変形によつて加工硬化するから、はげしい変形を受けた所程以後の変形に対する抵抗が大きくなり、その意味では最初工具面で起つていた迂りが次第に切屑内部に移行し、その結果として構成刃先が出来る筈である。然し一方、変形には必ず発熱を伴うものであり、その意味では変形のはげしい部分程軟化して変形抵抗が減少する筈であり、上記加工硬化の影響を打消す方向に働く。この両者の何れの影響の方が大きいかは被削材質や切削条件によつて変り、一概に断定できない。然し実際の切屑の断面を調べると所謂 secondary flow が認められ、迂りは一つの面ではなしにかなりの幅をもつた領域で起つているという事実は、これら二つの影響が略々打消合つて、すくい面近傍では切屑材質の強度の変化はあまりないであろうことがわかる。

次に応力状態について考えると、図 5 に於て、剪断面

図 5

が一つの最大剪断応力面であるとする、之と直角方向にも最大剪断応力面がある筈で、一般には図のように剪断角 ϕ はすくい角 α より大きいから、切屑がこの第二の最大剪断応力面に沿つて流れれば、構成刃先が形成されることになる。鋼の切削では構成刃先が認められないのは、鋼の場合には一般に剪断角が非常に小さく、 $\phi < \alpha$ である為であろうと思われる。

結局構成刃先が成長する為には、切屑材質が上記の温

度上昇による軟化を打消すだけの加工硬化を起し、しかも $\phi > \alpha$ でなければならない。

(3) 部分分裂：構成刃先は、全体としてかなり安定している場合（上記諸実験中の●印）でも、部分的に分裂脱落、成長を絶えず繰返して、仕上面及び切屑裏面にむしれ痕を残す。然しそれには従来云われたような明確な周期性は認められず、脱落の起こる場所、大きさ、時間等はかなり不規則なものである。このような不規則な部分分裂を起すのは、構成刃先は元来被削材と同一材質であるから強度的に非常に不安定なものであり、而も金属材料は顕微鏡的には不均質なものであるから構成刃先に加わる力は部分的に不規則に変動するであろうことを考えれば、うなづけることである。

(4) 周期的生成脱落：刃先温度が構成刃先の消失温度に近づくと、構成刃先は完全脱落と発生成長とを明確な周期性をもつて繰返す。（▲印及び△印）図 6 はかかる

図 6

図 7

場合の切屑の断面写真である。ここで注目すべきことは、切屑に附いて持去られた構成刃先は工具の刃先に附着していた時と逆向きの形になっていることである。之は図 7 の如く、構成刃先は先づその先端から変形した後に工具から持去られるとしか考えられない。この事から、構成刃先の周期的生成脱落の理由は次のように説明できる。工具の刃先温度が消失温度より少し低い場合には構成刃先ができて、成長する。所が構成刃先の先端は丸味を持つて居り、その丸味は構成刃先の成長と共に増大するから、その部分での摩擦による温度上昇も増大し、遂には加工硬化が失われて軟化、変形し、切屑及び加工物に持去られようとする。一度先端が変形すれば抵抗が増大するから、構成刃先内部は未だ加工硬化が少し

残っているに拘らず変形して、構成刃先全体が持去られる。この時工具の刃先は消失温度以下であるから、再び先端に構成刃先が出来成長し、以下同様のことを繰返す。

尚、この脱落の間隔は切屑面上で 2～8 mm 程度（時間にすると $1/30 \sim 1/200$ sec 程度）で、間隔が狭い時程脱落粒は小さい。そしてこの間隔は同一条件では切削速度が高い程狭く、又切削開始時の切屑を見ると刃先の温度上昇に伴つて次第に間隔が狭くなっている。之等の事実は上記の温度による説明の裏付けとなるものである。

(5) 高速側における消失：刃先温度が或値を越えると構成刃先が消えるのは、その温度が略々被削材の再結晶温度に相当することから、その温度では被削材が変形を受けても加工硬化しなくなるのであろうことは容易にうなづける。但し、再結晶温度というのは歪を受けた結晶を元に戻す為の温度で、歪の程度と時間とによつて変化するものであるが、ここで云う構成刃先の消失温度は、歪を生じて硬化（転位の固着）を起さぬだけの熱振動を与えるような温度を意味するものであるから、少しく異なる。然し実際問題として、各材料に対するこの温度は明確には分っていないし、一方刃先温度も接触面内の平均しか測れないから、余り厳密に云うことは意味がない。よつてここでは構成刃先の消失温度は略々再結晶温度附近であると云うに止める。

次に、この消失温度が工具のすくい角が増すと上昇する理由を考える。構成刃先は先づ工具先端に出来て之が成長する。（かりに先端以外に出来たとしても、之はすくい角を減らすことになり、切屑によつて直ちに押流されてしまう）。よつて、もし先端の一部のみが消失温度以下であればここに小さい構成刃先が出来、之が前記の理由で工具温度を下げるから、大きな構成刃先に成長でき

図 8 工具—切屑接触面の温度分布
実線：低速の場合
点線：高速の場合

る。従つて構成刃先が出来るか否かは工具の先端温度で決まる。所が刃先温度の測定は工具と切屑を熱電対とする方法で行つたから、工具と切屑の接触面内の平均温度を示すものである。この接触面内の温度分布については実験³⁾や計算⁴⁾による

推定が発表されているが、定性的には図 8 に示すように、最高温度は先端よりかなり後方にあり、先端の温度は平均温度より低いことは一致した結論である。この分

布において、切屑の速度が増しても、工具の楔角が減つても温度分布の不均一性が増し、平均温度と先端温度との差が増すことは容易に推定できる。

そこで、工具先端が消失温度に達した時を考えると、上記諸実験からも明らかなように、その時の切削速度も切屑速度も工具のすくい角が大きい程大であり、又楔角はすくい角が大きい程小さい。故に先端温度は同じであつても測られる平均温度はすくい角が大きい時の方が高くなる筈である。即ち見掛けの消失温度はすくい角大なる程高くなる。

又、以上の考察から、真の消失温度（構成刃先が加工硬化を失う温度）は測定した消失温度より低いことがわかる。

(6) 低速側に於ける消失：少くとも金属性の工具材料を使用する場合には、室温近傍でも切屑材質の工具面への凝着は容易に起り、切屑が流れ型で、上記(2)の成長条件を充せば、如何に低速でも構成刃先ができる。唯、一般には低速になると切屑が剪断型になり、切削抵抗の大きさと方向が常に変動する為に、構成刃先が出来る暇がない。又、切削液によつて切屑工具間の潤滑が充分に行われると、之が凝着を阻止して構成刃先の発生を妨げる。

6. 結 語

以上、構成刃先の生成、消失について主に温度の面から調べた。その結果、構成刃先が出来るのは

1. 切屑が流れ型であること
2. 刃先温度がある値（略々被削材の再結晶温度）以下であること
3. 切削液によつて工具面が潤滑されないこと
4. 剪断角がすくい角より大きいこと

の4条件が充たされた時に限ることが明らかになった。

終りに臨み、本研究に有益な御助言を賜つた大越諄東大教授並びに三原金吾横浜国立大教授に深く謝意を表すると共に、実験に終始協力された井口和文氏、一部に協力された田中衛、長見至の両氏に厚く御礼申上げる次第である。尚、本研究の一部は文部省科学研究費によるものである。

補記 前報¹⁾に於て、構成刃先ができると真のすくい角が増すから切削抵抗が減ることを示した。所が一方では構成刃先が出来ると切込深さが増す為に切削抵抗が増す筈である。然し之は唯一回切削する場合にのみ起ることで、実際には本実験のように繰返し切削が行われるから、前回の切削で既に深く削られた上を削ることになり、この影響は現れない。(1956, 11月8日受付)

文 献

- 1) 中山・井口：精密機械，Vol.22，No.3.(1956).
- 2) F. P. Bowden & G. W. Rowe : Proc. Roy. Soc. A, Jan. 10 (1956).
- 3) H. Opitz : Microtecnic, No. 4, 1954.
- 4) B. T. Chao & K. J. Trigger : Trans. ASME, Oct. (1955).

ピストンリングの形状測定について

正 会 員 隈 部 淳 一 郎*

Measuring Method of the Profile of Piston Rings

Junichiro KUMABE

The piston rings easily make elastic-deformation with a very small measuring pressure. Usually, the flatness and roundness can be measured by optical method. But this method is very complex and the measuring time is very long. Now, it is found that the profile of the piston ring can be easily measured by using the grid circuit of vacuum tubes and the ordinary micrometer. When the micrometer spindle is contacted to the piston ring, the grid circuit is closed by the piston ring and spindle. The contact point is exactly indicated by the red lamp which is inserted in the plate circuit, and the length is measured by the division of the thimble. Therefore, the grid circuit has very high resistance and its current is negligible small. So the spindle and the works are not consumed by the contact current and have no error caused by the spark current before contact. And this method is applicable