621.914.1.014 : 536.532.08

フライスの刃先温度に関する研究*

(第1報, 刃先温度測定法について)

津 枝 正 介**, 長谷川嘉雄**, 村 橋 照 善***

相 沢 弘****, 新 池 悟*****

A Research on the Cutting Temperature of a Milling Cutter

(1st Report, The Measuring Method of Cutting Temperature)

by Masasuke TUEDA, Yosio HASEGAWA, Teruyosi MURAHASI,
Hirosi AIZAWA, and Satoru SINIKE

The carbide milling cutter reveals the heat crack due to heating and cooling action during the cutting process. In order to explain this phenomenon clearly, it is necessary to know exactly the variation of the temperature of a cutter.

In the present research, we employed the cutter-constantan thermocouple method, and estimated the temperature rise on the cutting edge. With this method, we could obtain the temperature distribution on the cutting edge, as well as the range of the temperature variation.

1. 緒 言

フライス削りでは, カッタの刃先は切削期間には加熱され, それに続く非切削期間には冷却され, 加熱と冷却を繰返して受ける. このため超硬フライスでは, 熱き裂が発生し, 工具の破損を招くと報告されている⁽¹⁾. この現象を解明するためには, フライス刃先が実際に受ける温度変化を正確に知る必要があると思われる.

さて, フライスの刃先温度を実測したものには, バイトの場合と同様なカッタ-被削材熱電対法によるもの⁽²⁾, 赤外線高温計を用いたもの⁽³⁾などがある. カッタ-被削材熱電対法では切削時の刃先の平均温度を直接測定できる利点があるが, 非切削時の温度を測定することができない欠点がある. また赤外線高温計を用いる方法は, 切削を終った直後のカッタすくい面の温度を測定するものであって, 物体に直接触れることなく温度を測定することができるが, 刃先が切削を行なっている間とか, 切りくずがすくい面上に付着している場合などには, すくい面の温度を測定することができない.

本研究ではカッタの逃げ面上にコンスタンタン線を溶着したカッタ-コンスタンタン熱電対法を用いて, カッタの逃げ面上の種々な点の温度を測定し, この溶着点温度をもとにして刃先温度を推定しようとするものである.

すでに発表した研究⁽⁴⁾と同様に溶着点を逃げ面上にとったのは, すくい面上では刃先に近接した溶着線が切りくずによって切断されて測定ができなくなるからである.

2. 実験の方法および装置

カッタ-コンスタンタン熱電対を形成するには, ガラス細管で絶縁した直径0.1 mmのコンスタンタン線の前端を刃先近くの逃げ面上に溶着した.

実験には旋盤を用い, 第1図に示すカッタ取付用軸を主軸に取付け, その先端にカッタを固定した. 実験に使用したSKH3の1枚刃カッタ(切削直径110 mm)の諸角を第2図に示す. 被削材としては幅75 mmの軟鋼を用い, カッタのエンゲージアングルおよびディ

第1図 カッタ取付用軸

* 昭和38年3月20日 関西支部第38期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和38年10月7日.

** 正員, 大阪大学工学部(大阪市都島区東野田町9).

*** 准員, 東海製鉄会社.

**** 鳴門工業高等学校.

***** 東洋紡績会社.

スエングージアングルの大きさが等しくなるように往復台上に取付けた。

逃げ面上の溶着点で発生した熱起電力は、主軸後部軸受の背後に取付けた第 1 図に示すスリップリングとブラシを介して電磁オシログラフに導き、D 形振動子で記録させて測定した。

カッター-コンスタンタン熱電対法の温度較正には温度定点測定による方法⁽⁵⁾を用いた。すなわちカッタ材料から採取し、カッタと同一の熱処理を施した長さ約

第 2 図 実験用カッタ

第 3 図 カッター-コンスタンタン熱電対の温度較正曲線の一例

200 mm の細い棒の先端にコンスタンタン線を溶着してカッター-コンスタンタン熱電対を形成し、温度定点としては水の沸点ならびにすず、鉛、亜鉛の各金属の融点を利用した。上記の較正曲線はオシログラフの各エレメントごとに作成した。第 3 図はそのうちの一例である。

実験はすべて乾切削で行ない、切込みは 2 mm と一定にして、周切刃と正面切刃の逃げ面上にそれぞれ第 4 図に示すような位置に温度測定点(溶着点)をとり、図の Y の値としては 0.55, 1, 2.8 mm の 3 種、X の値としては 0.75, 1.4 mm の 2 種を選んだ。

3. 溶着点温度の時間的経過

第 5 図に実験で得られたオシログラムの一例を示す。図において a, b, c はそれぞれ刃先から 0.4, 1.5, 2.6 mm 離れた溶着点の温度を示す。図からわかるように、a 曲線では毎回の切削に基く急激な加熱と空転時の冷却の温度変化がめいりょうに認められるが、溶着点が刃先から遠い b, c 曲線ではその温度振幅が小さくなっている。また a, b, c 曲線の順に最高値があらわれる時刻におくれがあることが認められる。さらに a, b 両曲線では 1 回の切削が終わって次の切削が開始される直前の温度に変動がみられるが、これは切りくずの着脱の影響である。すなわち特に行なった数回の実験結果によれば切削開始直前の温度が高い場合には、カッタが 1 回の切削を終った瞬間に切りくずがカッタから離脱することなく、次の切削開始ま

第 4 図 温度測定位置

回転数 73 rpm, 送り 0.15 mm/rev, Y=0.55 mm

第 5 図 オシログラムの一例

ですくい面上に付着している。この場合にはカッタが切削を終った後も切りくずによってすくい面の熱源部がおおわれているため、空気により冷却される程度が少なく、切りくずが切削後ただちに離脱する場合にくらべてすくい面の熱源部が高温に保たれているものと推察される。

4. 刃先温度の推定法

第6図は直交する3軸の上にカッタ1回の切削に基づく温度上昇 θ 、カッタが切削を開始する時刻を基準とする時間 T および逃げ面に沿った刃先から溶着点までの距離 Z をとって各溶着点の温度変化を記入した模型図である。図中の曲線aは本測定法では実測することができない刃先温度曲線であるが、カッタが切削を始めると同時に急激に温度上昇して切削を終る瞬間に最高値を示し、以後は刃先からの放熱とカッタ内部への熱伝導により下降するものと考えられる。AE曲線は各温度曲線の最高値を結んだ曲線である。曲線AEを θ - T 平面に投影すると曲線ECが得られ、 θ - Z 平面に投影すると曲線FBが得られる。したがって刃先から溶着点までの距離と溶着点で得られた最高温度値とを実測すると、刃先温度を補外して求めることができる。この場合刃先近傍においては温度こう配が相当急となり、刃先温度の推定ではこの最も傾斜の急な部分を推定することになって推定の精度にやや不安があるので、おもに切削を行なう周切刃側について次に述べるような熱伝導の近似解析法によって刃先温度を推算し、他の断面上においてはこの曲線を参考にして補外した。

第7図に示すように、刃先を1/8無限体の一部と考えてそのりょう線上の周切刃に沿って Y 軸を置き、すくい面を XY 面に、周切刃の逃げ面を YZ 面におく。すくい面上において切りくずと接触する接触面の幅を m 、接触長さを l とする。またこの接触面をとおしてすくい面のほうへ単位面積当たり、単位時間中に流れる熱量を q とする。 YZ 面および XZ 面が熱的に絶縁されているとすれば、バイト内部の温度分布は幅

第6図 溶着点の温度変化の模型図

第7図 熱源の図

$2m$ 、長さ $2l$ の熱源をもった半無限体の場合と同じである。実際には YZ 面および XZ 面から熱の放散があり、熱的に絶縁されているという条件は満足されないが、ただ1回の切削に基づくすくい面ならびに逃げ面上の温度上昇を考える際には、このように仮定してもたいした誤差は生じないものと考えられる。

幅 $2m$ 、長さ $2l$ の熱源内の任意の一点 P' の座標を $(X', Y', Z'=0)$ とすれば、任意の瞬間 t' に P' 点において発生する $qdX'dY'dt'$ の瞬間点熱源による他の任意の点 (X, Y, Z) の時間 $(t-t')$ 秒後の温度上昇は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$\delta\theta = \frac{qdX'dY'dt'}{4c\rho(\pi\kappa)^{3/2}(t-t')^{3/2}} \exp\left\{-\frac{(X-X')^2+(Y-Y')^2+(Z-Z')^2}{4\kappa(t-t')}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし c : 工具材の比熱

ρ : 工具材の密度

κ : 工具材の温度伝導率

熱源の持続時間(1回の正味切削時間)を T とし、 t' について0から T 、 X' について $-l$ から l 、 Y' について $-m$ から m まで積分を行なえば、時間 t 秒後の温度上昇は次式のようなになる。

$$\Delta\theta = \frac{q}{2c\rho(\pi\kappa)^{1/2}} f(v) \quad \left. \begin{aligned} f(v) &= \int_{\sqrt{t-T}}^{\sqrt{t}} \exp\left\{-\frac{Z^2}{4\kappa v^2}\right\} \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{X+l}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{X-l}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{Y+m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{Y-m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] dv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $v^2 = t - t'$ であって $\operatorname{erf}(\gamma)$ は誤差関数を表わす。

周切刃側逃げ面上の任意の点の温度上昇 $\Delta\theta_e$ は (2) 式において $X=0$ とおけば求まる。すなわち

$$\Delta\theta_e = \frac{q}{2c\rho(\pi\kappa)^{1/2}} f_e(v) \quad \left. \begin{aligned} f_e(v) &= 2 \int_{\sqrt{t-T}}^{\sqrt{t}} \exp\left\{-\frac{Z^2}{4\kappa v^2}\right\} \operatorname{erf}\left\{\frac{l}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{Y+m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{Y-m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] dv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

またすくい面上の任意の点の温度上昇 $\Delta\theta_r$ は (2) 式において $Z=0$ とおけば求まる。すなわち

$$\Delta\theta_r = \frac{q}{2c\rho(\pi\kappa)^{1/2}} f_r(v) \quad \left. \begin{aligned} f_r(v) &= \int_{\sqrt{t-T}}^{\sqrt{t}} \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{X+l}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{X-l}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{Y+m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{Y-m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] dv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

溶着点温度が最大値に達する時間を t_m とすると、周切刃側逃げ面上の一点 (O, Y, Z) の最高温度 $\theta_{e\max}$ は次式で与えられる。

$$\theta_{e\max} = \Delta\theta_{e\max} + \Delta\theta_{ea} + \theta_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $\Delta\theta_{e\max}$ は (3) 式の t に t_m を置いたものであり、 $\Delta\theta_{ea}$ は切削に基く熱の蓄積による温度上昇、 θ_0 は工具初期温度である。

特定の点 (O, Y, Z) における温度の最高値と最低値との差すなわち ($\theta_{e\max} - \Delta\theta_{ea} - \theta_0$) を実測すれば (5) 式から q を定めることができる。この q を用いると、いま考えている断面上における切りくず接触面の平均温度は次式で与えられる。

$$\bar{\theta}_{r\max} = \frac{q}{2c\rho(\pi\kappa)^{1/2}} \frac{1}{l} \int_0^l f_{r\max}(v) dX + \Delta\theta_{ra} + \theta_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 $f_{r\max}(v)$ は (4) 式の $f_r(v)$ において t の代りに T を置けばよろしい。

$\Delta\theta_{ra}$ は切削熱の蓄積によるすくい面上切りくず接触面の温度上昇であって、溶着点温度の最低値から補外して求めることにする。溶着点温度の最低値の逃げ面上の分布は最高値の分布にくらべて傾斜は非常にゆるやかであるので、補外による誤差は少ないものと思われる。

(6) 式の積分を行なえば $\bar{\theta}_{r\max}$ は次式のようになる。

$$\bar{\theta}_{r\max} = \frac{q}{lc\rho(\pi)^{1/2}} \int_0^{\sqrt{T}} g(v) dv + \Delta\theta_{ra} + \theta_0 \quad \left. \begin{aligned} g(v) &= \left[\frac{l}{\sqrt{\kappa}} \operatorname{erf}\left\{\frac{l}{v\sqrt{\kappa}}\right\} - \frac{v}{\sqrt{\pi}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{l^2}{\kappa v^2}\right) \right\} \right] \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{Y+m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} - \exp\left\{\frac{Y-m}{2v\sqrt{\kappa}}\right\} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

第 8 図に溶着点温度の最高値から刃先温度を求めた結果を示す。図において縦軸上の黒丸の点は上述の近似解析法による刃先温度の推算値である。図から認められるように、回転数が高くなれば刃先近傍の温度こう配が急になっている。

5. 切刃に沿った刃先温度の分布

前章のようにして推定した刃先温度の切刃に沿っての分布を示したのが第 9 図である。図からわかるように、いずれも切刃が最高温度になる点は周切刃上にあつて、その点はいずれも $Y=0.5$ mm の近傍にある。また回転数が早くなるにつれて山形の形状がとがってくるのが認められる。図において温度分布曲線を切る垂直な 2 本の直線の間が切削にあずかる切刃の部分である。

いまこの温度分布曲線の最高値とカット周速との関係を両対数座標で示すと第 10 図のように、1 本の直線で表わされ、送りが増加するとほぼ平行な直線となる。これらの結果はバイト切削の場合と同様な傾向である。

第8図 溶着点温度から刃先温度の補外図

第10図 最高温度とカット周速との関係

第11図 温度振幅に及ぼす回転数, 送りの影響

第9図 切刃に沿った刃先温度の分布

6. 温度振幅に及ぼす回転数, 送りの影響

最高温度と最低温度の差すなわち温度振幅と回転数, 送りとの関係の一例を示したのが第11図(a), (b)である。(a)は $Y=0.55$ mm の断面上, (b)は $Y=1.0$ mm の断面上の温度振幅である。これから逃げ面上の点の温度振幅は回転数にはあまり影響されず, 送りの影響を強くうけることが認められる。これに対してすくい面上切りくず接触面の温度振幅のほうは回転数と送りの両方の影響をうける。

7. 結 論

以上の結果より, カッター-コンスタント

熱電対法の特質と考えられるおもな点は次のとおりである。

(1) 刃先近傍の逃げ面上の点の温度を正確に測定することができる。またこの逃げ面上の点の温度から補外法によって刃先温度を推定することができる。

(2) 従来の方法では知ることができない刃先に沿っての温度分布を求めることができる。

(3) 刃先ならびに逃げ面上の点の温度振幅を求めることができる。

本研究は昭和 37 年度文部省科学研究費(各個研究)によって行なったものである。

文 献

- (1) 奥島・星, 機械学会論文集, 27-178 (昭 36-6), 843.
- (2) D.E. McFeron & B.T. Chao, *Trans. ASME*, 80-2 (1958-2), 321.
- (3) 篠崎・原田, 理化学研究所報告, 36-6 (昭 35-11), 679.
- (4) 津枝・ほか 2 名, 機械学会論文集, 27-181 (昭 36-9), 1 423.
- (5) 大石, 温度及びその測定法, (昭 21), 211, 産業図書.
- (6) Carslaw & Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, (1950), 216, Oxford.

ホテルに電子冷凍技術を導入

ヒルトンホテル会社系のホテルでは、熱、光、動力にかかる費用の割合が 1957 年の 4.32% から 1963 年には 5.25% と増大している。この増加分は空気調和、照明およびオートメーションに費されている。そこでこの費用を下げるのが望まれるが、ここに電子冷凍技術の導入が考えられている。

ニューヨークのヒルトンホテルには 2 153 室あるが、各部室には普通の自動製氷機が備付けられている。これを電子冷凍機に取換えれば、可動部分がないので保守費が、ほとんどいらぬという点が注目されている。

また現在電子冷凍機は小形のものしかないが、将来はいままでの蒸発サイクルによる冷凍システムよりも

大形のものが開発されて、中央冷凍システムが行なわれるようになると期待されている。この電子冷凍の応用面として製氷機、空気調和装置および空気冷却装置の三つが考えられている。

この装置の大要は、P 形と N 形の半導体の接合面にフィンを取付けてこの間に冷却または加熱(電流を逆に流せば発熱するので)すべき空気を流すものである。

電子空気調和装置は他の方式のものと比べて格段に精密な温度と湿度の調整ができる。多くの場合、四季を通じて普通の空調設備よりも運転費が少なくてすむであろう。

(Elec. Rev., 1964-3-13, Vol. 174, No. 11, p. 401)

(日本科学技術情報センター提供)

チタンの輝かしい将来

10 年前にはチタンは「驚異の金属」であった。鋼よりも強いのに重さはその半分に過ぎない。その上地球上で第 4 番めに豊富な金属である一銅や亜鉛の 50 倍の量である。航空産業界は将来長期にわたりこの原料の不足を心配しないでもよい。

チタンの値段は最近やや低下したが、それでも特殊鋼よりも高い。それにもかかわらずチタンに対する航空産業および宇宙産業からの需要は上昇線をたどっている。今後超音速機の研究が進んでその生産が盛んになれば、チタンに対する需要は著しく増加する見通しである。

アメリカでは超音速機ブームを期待して、チタン製品メーカーたちは設備拡張を行なっている。48 in 幅までのストリップを造る計画を立てたメーカーもある。しかしギリシのメーカーたちは超音速の TSR-2 形機および Concord 機に使用するチタンを自分たちが供給す

ることになるものと楽観している。

アメリカ筋の推定によれば、マッハ 2.5~3 の飛行機の必要とするチタンの量は機体用材の 90% である。ごく内輪に見積もっても 75% であって、この場合チタン約 40 t を必要とするのである。

飛行機がマッハ 3 で飛ぶときは、表面温度が空気との摩擦で 260°C に上るのであるから、このことを設計にあたって考慮に入れなければならない。ところがチタンは 760°C までの温度に耐えることができるのである。また超音速機のスピードは機重によって左右される。ところがチタンは競争相手の合金鋼や超合金よりも 42% 軽いのである。このようにチタンの将来は希望に満ちている。

(New Scientist, 1964, Vol. 21, No. 372, p. 10)

(日本科学技術情報センター提供)