621.9.14

高温切削における刃先温度とその因子⁽¹⁾村 中 利 吉⁽²⁾

Tool-edge Temperature and Some Influential Factors on Hot-Machining

by Rikichi MURANAKA

The tool-edge temperature, consists of both temperatures due to plastic deformation on the shearzone and due to tool-chip interface friction, varies by the work condition, heating temperature, energy on the shear zone and tool-chip interface, fraction of the heat to the chip or the work piece and physical properties of the work piece. The author measured cutting force, chip ratio, contact length of the tool-chip interface and also the edge temperature for various work conditions and heating temperatures with 0.26% C carbon steel under orthogonal cutting conditions.

More-over compared with both experimental and analytical results. These results may be as follows : —

1. The generated edge temperature would be lesser at elevated temperature than at the room temperature.
2. The edge temperature would have exponential relation with cutting area, cutting speed and depth of cut/feed., and exponent value would decrease according to an increase of the heating temperature.

1. 結 言

切削作業において刃先に生ずる温度は切りくずのせん断面に誘起されるせん断ひずみによる温度と切りくずと刃先面との摩擦による温度との総和である。これらの異なった二つの温度はそれぞれせん断面における仕事量および刃先接触面における仕事量に基づくものであって、この仕事量は切削速度、切込み、送りなどの作業条件およびこれに対応する切削力並びに被削材料の加熱温度によって変化するものである。また高温切削においては被削材の比熱、熱伝導率などの物理的特性もまたかなりの影響を与えるものである。また仕事量はこれを分析して見ると、切りくずせん断角および切りくずと刃先の接触長さに密接に関連するものであって、しかもこれらの仕事によって発生する熱量は全部刃先温度の上昇に寄与するものではなく、一部はふく射熱として消滅し、一部は被削材および刃物に伝導移行する。刃先温度は以上のごとく多種多様の因子によって左右されるものであるが、本論文においては次の三つの作業条件を対象として刃先温度並びにこれが因子を分析考究したものである。すなわち、

(1) 切込み切削速度を一定として送りを換えることによって切りくず面積を変化させた場合、各種の加

熱温度に対応する切削力、せん断角、せん断応力、摩擦係数、接触面積並びに分布率と発生温度との関係。

(2) 切込み、送り、切りくず面積を一定として切削速度を変化せしめた場合、各種の加熱温度に対応する切削力、せん断角、せん断応力、摩擦係数、接触面積並びに分布率と発生温度との関係。

(3) 切りくず面積および切削速度を一定として、切込み/送り= n を変化せしめた場合、各種の加熱温度に対応する切削力、せん断応力、せん断角、摩擦係数、接触面積並びに分布率と発生温度との関係。

1. 計算に必要な算式

(a) τ , ϕ , β の算出 第 1 図において切込み厚さ t_1 と切りくず厚さ t_2 との比 $t_1/t_2=r$ とし、せん断角を ϕ とすると r と ϕ との間には次の関係式が成立する。

$$r = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \dots\dots\dots (1)$$

上式中 α は工具のすくい角である。次に

β = 摩擦角, τ = せん断応力

A = 切りくず面積, F_c = 主分力

F_t = 背分力

とすれば第 1 図より

第1図 切削力, 切削速度解析図

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau A \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ F_t &= \tau A \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

更に (2) 式を変形すると (3) 式のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= A\tau [\tan(\phi + \beta - \alpha) + \cot \phi] \\ F_t &= A\tau [\cot \phi \tan(\phi + \beta - \alpha) - 1] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

いま r と F_c および F_t を実測すれば ϕ , τ , β は算出されるわけである。

(b) せん断ひずみ熱による温度 θ_s の算出

K. J. Trigger 等によるとふく射による熱損失を 12.5 % と述べている⁽³⁾。今 c =比熱 cal/g °C, ρ =密度 g/cm³, A =切込 cm×送り cm, V_c =切削速度 m/min, J =仕事当量, F_s , V_s =せん断面における切削力および切削速度 θ_0 =室温とし, δ_1 =せん断面に生ずる温度の母材への分布係数とするとせん断ひずみによる刃先平均温度は次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} \theta_s &= \frac{0.875 F_s V_s (1 - \delta_1)}{c \cdot \rho \cdot J \cdot A \cdot V_c \times 100} + \theta_0 \\ &= \frac{0.875 (F_c V_c - F_t V_f) (1 - \delta_1)}{c \cdot \rho \cdot J \cdot A \cdot V_c \times 100} + \theta_0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし第1図より明らかなごとく

$$V_f = V_c \cdot r \dots\dots\dots (5)^{(4)}$$

$$F = F_c^{(5)} \sin \alpha + F_t \cos \alpha \dots\dots\dots (6)$$

(c) 分布係数 δ_1 の算出 δ_1 の算式としては W. C. Leone によるものと B. T. Chao および K. J. Trigger の算出によるものとがある。前者に対しては次式のごとく示している。

$$\delta_1 = \frac{1}{1 + r \times 1.13 \sqrt{\frac{L \cdot V_c}{k}}} \dots\dots\dots (7)^{(6)}$$

上式中 $r = t_1/t_2$, L =切りくずせん断面長さの 1/2, $k = z/c \cdot \rho$, z =熱伝導率, V_c =切削速度。

(7) 式を用いて計算すると送り 0.05~0.07 mm のとき比較的細かい場合には, たとえば後述の送りを種々変化せしめた場合の実験について見るに室温の場合を考えると (7) 式によるときは

送り mm	δ_1	θ_s	δ_2	θ_f	$\theta_s + \theta_f$
0.05	0.55	133	0.75	102	235
0.07	0.46	139	0.79	132	271

となって実測刃先温度より著しく低くなる。すなわち δ_1 の値は, やや過大の傾向があると思われ。次に後者は δ_1 は単位せん断ひずみによって左右されるものであるという。今 ϵ =単位せん断ひずみ, τ =せん断応力, L =切りくずせん断面長さの 1/2, s =送り, ω =切込幅, Q =せん断面の発生熱源強さとする

$$Q = \frac{F_s V_s}{2L \cdot \omega \cdot J} = \frac{\tau \cdot \epsilon \cdot V_c \cdot s \cdot \omega}{2L \cdot \omega \cdot J}$$

$$\text{ゆえに } \epsilon = \frac{F_c - F_1 r}{\tau \cdot s \cdot \omega} = \frac{F_c - F \cdot r}{\tau \cdot A} \dots\dots\dots (8)$$

B. T. Chao および K. J. Trigger は δ_1 を ϵ のある関数で次式のごとく示している。

$$\delta_1 = \frac{1}{1 + (c_1/\epsilon)} \dots\dots\dots (9)^{(6)}$$

上式中 c_1 は材料の熱特性および熱源の強さによって異なる係数であるが概略 $c_1 = 5.35$ と見なす。(9) 式を用いた場合の刃先温度は実測温度により近くなるゆえに本実験においては (9) 式によって求めた数値を適用したものである。

(d) 摩擦熱による温度上昇 θ_f の算出 今刃先面に作用する単位面積単位時間当りの熱源の強さを求めると次のごとくなる。

$$q = \frac{F \cdot V_f}{J \cdot A_0} \dots\dots\dots (10)$$

上式中 F =刃先面に沿う切削力 kg, V_f =同様切削速度 m/s, A_0 =刃先と切りくずとの接触面積 cm² である。

今接触面に生ずる温度の切りくずへの分布係数を δ_2 とすると刃先と切りくずとの接触面に生ずる接触摩擦によって生ずる平均温度上昇は $\delta_2 q$ なる熱源によって生ずるものであって, これは Jaeger の半無限体平面上における移動熱源の理論より次式のごとく示されるという。

$$\theta_f = \frac{4}{3(\pi)^{1/2}} \frac{\delta_2 q}{z} \left[\frac{km}{V_f} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (11)^{(9)}$$

上式中 z =被削材の熱伝導率 cal/cm·s·°C, $k = \frac{z}{c \cdot \rho}$ cm²/s, m =切りくずの接触長さ cm, V_f =刃先面に沿う切削速度 cm/s である。

(e) 分布係数 δ_2 の算出 切りくず底部すなわち刃先面と接する部分に発生する切りくず温度は (4) 式と (11) 式とによって算出された値の和である。一方 $(1 - \delta_2)q$ なる熱量は刃面に伝達され刃先温度を上昇せしめるわけであって, この両者は相接触しているゆえに同値である。(1 - δ_2) q なる熱源によって誘起される刃面温度の算出については Blok や Jaeger 等によって提示された次式がある。

$$\theta_t - \theta_0 = \frac{4(1-\delta_2)ql}{\pi\alpha_t} \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{m}{l} \right)^2 + \frac{1}{6} \frac{\left[\left(\frac{m}{l} \right)^2 + 1 \right]^{3/2}}{m/l} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{m}{l} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{l}{m} \right) - \frac{1}{6} \left(\frac{l}{m} \right) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{l} \right) \left[1 + \left(\frac{m}{l} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \dots (12)^{(10)} \\ = \frac{4(1-\delta_2)ql}{\pi\alpha_t} \times C \dots (12)^{(11)}$$

上式中 θ_t = 刃先温度 °C, l = 切りくず接触幅, θ_0 = 室温 °C, m = 切りくず接触長さ, α_t = 刃物材の熱伝導率, $C = l/m$ に関する係数であって第 2 図の点線をもって示したものである。上述の理由より数式を求めると

$$\frac{0.875(F_c V_c - F V_f)(1-\delta_1)}{c \cdot \rho \cdot J \cdot A \cdot V_c \times 100} \\ + \frac{4}{3(\pi)^{1/2}} \frac{\delta_2 q}{\alpha} \left[\frac{k \cdot m}{V_f} \right]^{1/2} = \frac{4(1-\delta_2)}{\pi\alpha_t} C \dots (13)$$

(13) 式より δ_2 の値を算出することが出来る。

以上の諸算式より刃先温度算式を求めると次式のごとくなる。

$$\theta_T = \theta_s + \theta_f + \theta_w \dots (14)$$

上式中 θ_T = 刃先温度 °C, θ_w = 加熱温度 °C である。

2. 実験の概要

外径 33 mm, 0.26% C の炭素鋼円筒を種々の加熱温度および作業条件の下で端面切削を行い、それぞれの場合について切りくず厚さ、切りくず接触長さ、主分力、背分力、並びに刃先温度を測定し、刃先温度に及ぼす種々の因子が加熱温度および作業条件によっていかに変化を来し、かつ計算値による刃先温度と実測値と、いかなる相違があるかを究明したものである。接触長さ m の測定については K. J. Trigger 等

の行った⁽¹²⁾と同様に切削時間 30 秒の後 3% の稀硝酸液に約 2 分間ぐらい浸し、続いてアルコール液中に漬け乾燥し、接触面を明瞭にしてから工具顕微鏡に移し、接触面積および接触幅を観測し、これより接触長さを求めたものである。加熱温度は室温 300°C, 400°C, 600°C とし、また作業条件には次の三つの場合を選んだ。すなわち

1. 試片円筒の肉厚を 2 mm とし、切込みは肉厚一杯にとり、切削速度 (円筒内外平均値) を一定値とし、送りを 0.05, 0.07, 0.12, 0.16 mm にそれぞれ変化せしめた場合。

2. (1) と同一試片をもって切削面積、今の場合は円筒肉厚すなわち切込み幅 × 送り = $2 \times 0.07 = 0.14 \text{ mm}^2$ を一定として切削速度を 24, 34, 48, 66 m/mn と変化せしめた場合。

3. 切削速度を 34 m/mn の一定値とし、更に切削面積を 0.4 mm^2 の一定値になるように円筒試片の肉厚を 2.45, 3.3, 5.7 mm, またこれに対応する送りをそれぞれ 0.16, 0.12, 0.07 mm に選び、切込み/送りを $t/s = n$ を 15, 27.7, 82 とそれぞれ変化せしめた場合。

使用刃物は S₂ 種の超硬バイトであって、すくい角 10°, 前逃げ角 4° である。加熱方法は酸素アセチレン炎により、また切削力試験機は海老原式弾性環液柱測微計付きバイト切味試験機であった。刃先温度の測定は一本バイト法によったもので、この時のミリボルトと温度との校正曲線は第 2 図実線のとおりである。

3. 実験結果

(a) 切込み 2 mm, 切削速度 34 m/mn の一定値とし、送りを 0.05, 0.07, 0.12, 0.16 mm に変化せしめた場合の $t_1/t_2 = r$ の値および切りくず接触長さ m を実測したものが第 3 図上部に示す。図によると r ,

第 2 図 C の値および校正曲線

m の値は送りが大きくなるといづれも減少し、かつ加熱温度が上昇するに伴って低下して来ることを知る。更に主分力 F_c , 背分力 F_t の測定結果並びに $F_s V_s$ および $F V_f$ の計算値を求めると第 3 図下部に示すごとくなる。第 3 図の実験並びに計算値を算式 (1) お

よび (3) に代入してせん断角 ϕ , せん断応力 τ , 摩擦係数 μ を求め図示すると第 4 図上部に示すごとくなる。図によると摩擦係数 μ は送りが大きくなると減少する傾向があるが加熱温度によってはさほどの影響が見られない。またせん断角は送りが大きくなると

第3図 送りの変化に対する r, m 曲線および $F_c, F_t, F_{svs}, F_{Vf}$ 曲線
(回転数 350 rpm, 切込み 2 mm)

第4図 送りの変化に対する μ, τ, ϕ 曲線および δ_1, δ_2 曲線
(回転数 350 rpm, 切込み 2 mm)

増大し、せん断応力は送りが大きくなると減少し、この両者はいずれも加熱温度が上昇するに伴って低下することを知らる。次いでせん断ひずみによる温度分布係数 δ_1 および接触摩擦による温度分布係数 δ_2 をそれぞれ算出し図示すると第4図の下部に示すごとくである。図によると δ_1 は送りが大きくなるとやや低下するが δ_2 は逆に送りが大きくなるとはなはだしく増加の傾向に示す。しかも加熱温度の影響は少ない。次にせん断ひずみによる刃先温度および接触摩擦による刃先温度をそれぞれ算式より求めて図示すると第5図のごとくなる。図によるとこの2種の発生温度は送りの変化に対しては逆の現象を示す。すなわちせん断ひ

第5図 送りの変化に対する発生温度曲線

ずみによる温度は送りが大きくなると増大するが摩擦熱による温度は送りが大きくなると低下するものである。しかしこれら総合結果は加熱温度が上昇するに伴って発生温度は低くなることを知る。更に切りくず面積と刃先温度との関係に対数座標上に求めると第6図のごとくそれぞれ直線をもって表わされ、この両

第6図 送りの変化に対応する切りくず面積と刃先温度曲線

者の間にはある指数関数関係があることがわかる。しかもその直線のこう配は加熱温度の上昇と共に緩慢となることを知る。第6図には刃先温度の実測値も併記し計算値と実測値の相違を示す。

(b) 切込み 2 mm, 送り 0.07 mm の一定値とし、切削速度をそれぞれ 24, 34, 48, 66 m/min と変化せしめた場合。

(a) の場合と同様に r, m, F_c, F_t の実測値並びに F_{svs}, F_{Vf} の計算値を図示すると第7図のごとくで

第7図 切削速度変化に対する r, m 曲線
および $F_c, F_t, F_{svs}, F_{Vf}$ 曲線

ある。図によると r の値は切削速度が増すに従って大きくなるが、 m の値は逆に切削速度が増すに従って減少して来る。しかも加熱温度の上昇に伴って低下することを知る。第7図の下部は F_c, F_t の実測値および F_{svs}, F_{Vf} の計算値を示す。これらの値より μ, ϕ, τ の値並びに δ_1, δ_2 の値を算出すると第8図に示すごとくなる。図によると摩擦係数 μ の値は切削速度が

第8図 速度変化に対する μ, τ, ϕ 曲線
および δ_1, δ_2 曲線

増すとやや減少するが加熱温度の影響はほとんど認められない。またせん断応力では切削速度が増すとやや減少するがせん断角は逆に切削速度の増大と共に増加を来し、この両者はいずれも加熱温度の上昇と共に低下して来ることを知る。更に分布係数 δ_1, δ_2 を算出し図示すると第8図の下部のごとくなる。図によると δ_1 は切削速度の増すに伴ってやや減少するが δ_2 は切削速度が増すと著しく増して来る。しかしてこの両者は加熱温度の上昇に対してはやや増大の傾向がある。次にせん断ひずみによる刃先温度並びに接触摩擦による刃先温度をそれぞれ算出し図示すると第9図のごとくなる。図によるとせん断ひずみによる温度は切削速度

第9図 速度変化に対する発生温度曲線

が増すと低下して来るが接触摩擦による温度は切削速度が増すと逆に著しく増大して来る。しかもこの両者は加熱温度の上昇に伴って逐次低下して来るものである。更に切削速度と刃先温度との関係に対数座標上に求めると第10図のごとくなる。図において実線は計算値を示し、点線は一本バイト法による実測値を示す。図を見るとこの両者の関係はいずれも直線をもって表わされる。すなわちこの両者の間にはある指数関

第10図 速度変化に対する切削速度、
刃先温度曲線

数関係があることが知られる。しかもその指数は高温に移るに従って減少して来る。

(c) 切削速度 34 m/min, 切りくず面積 0.4 mm^2 の一定値として、切込み/送り = $t/s = n$ をそれぞれ 15, 27.7, 82 と変化せしめた場合。

(a) (b) の場合同様に r, m をそれぞれ実測すると

第 11 図上部曲線のごとくなる。図によるとこの両者は n の増大に伴っていずれも減少し、しかもその値は加熱温度の上昇するにつれて次第に低下して来ることを知る。同図下部曲線は $F_s V_s$, $F V_f$ の計算値 F_c , F_t の実測値を示すものであって図によるとせん断面および接触面における仕事量は n が減少するに従って低下し、しかも高温に移るに従って次第に低下して来ることを知る。次で主分力 F_c 、背分力 F_t および切りくず厚さ比 r の実測結果よりせん断角、せん断応力、摩擦係数並びに温度分布係数 δ_1, δ_2 を算出し、図示すると

第 11 図 $t/s=n$ の変化に対する r , m 曲線
および F_c , F_t , $F_s V_s$, $F V_f$ 曲線
(切りくず面積 0.4 mm^2 , 切削速度 350 rpm)

第 12 図のごとくなる。図によると摩擦係数 μ は n が増して来ると大きくなるが加熱温度にはさほど影響されない。またせん断角は n が減少すると増大し、せん断応力は逆に n が大きくなると増大して来、しかもこの両者はいずれも加熱温度が上昇すると次第に低下して来る。また温度分布係数 δ_1, δ_2 について見るに δ_1 は n が増すとやや増加するが δ_2 は逆に著しく減少する。しかも両者共加熱温度による影響は少ない。更にせん断ひずみ並びに接触摩擦による刃先温度を算出し図示すると第 13 図のごとくなる。図によるとこの両者はやはり逆の関係があり、 θ_s は n が大きくなるとやや増大するが、 θ_f は n が大きくなると著しく減少

第 12 図 $t/s=n$ の変化に対する μ , τ , ϕ 曲線
および δ_1, δ_2 曲線
(切りくず面積 0.4 mm^2 , 切削速度 350 rpm)

第 13 図 n の変化に対する発生温度曲線

第 14 図 n の変化に対する刃先温度曲線

する。しかも両者共加熱温度の上昇と共に次第に低下することを知る。次いで n と刃先温度と関係を対数座標上に求めると第 14 図のごとくなる。図の実線は計算値を示し、点線は一本バイト法による実測値を示す。

図によると n と刃先温度との間にはやはりある指数関数関係があることが知られる。しかも指数は負の値を取り、その値は高温に移るにしたがって小となることを知る。

4. 結 言

以上の実験によって明らかなごとく刃先温度はある特定の被削材および特定の刃物をもってしても作業条件および加熱温度によって著しく異った結果を生ずるものである。作業条件とし刃先温度に最も深い関連を有するものは切削速度と送りであって、これらがせん

断面および刃先切りくず接触面の仕事量、せん断角、切りくず接触長さおよび温度分布係数と密接に関連して来る。しかして送りや切削速度等の作業条件と刃先温度との間にはある指数関数関係があつて、いずれも高温に移るに従つてその指数は減少する。これは加熱温度の上昇に伴つてせん断面および切りくず接触面における仕事量は減少し、しかも作業条件の変化に対応するこれらの仕事量の変化が高温においては比較的狭小であるからである。また刃先に生ずる発生温度は高温に移るにつれてその割合が小さくなる。今第6図、第10図および第14図における各曲線に対する数式を

第 1 表

曲 線 種 別	計算, 実測別	加 熱 温 度			
		室 温	300°C	400°C	600°C
切削面積 A と刃先温度との関係	計 算	$470 A^{0.203}$	$660 A^{0.075}$	$760 A^{0.055}$	$880 A^{0.03}$
	実 測	$540 A^{0.250}$	$700 A^{0.075}$	$790 A^{0.055}$	$885 A^{0.03}$
切削速度 V と刃先温度との関係	計 算	$245 V^{0.130}$	—	$560 V^{0.088}$	$750 V^{0.041}$
	実 測	$230 V^{0.158}$	—	$600 V^{0.083}$	$755 V^{0.041}$
$t/s=n$ と刃先温度との関係	計 算	$415 n^{-0.08}$	—	$710 n^{-0.03}$	$830 n^{-0.013}$
	実 測	$450 n^{-0.08}$	—	$760 n^{-0.03}$	$840 n^{-0.013}$

求めて見ると第1表のごとくなる。

この数式を見ると上述の事柄がより明瞭となる。刃先温度の実測値が計算値よりいずれも高く現われるのは計算値においては刃先温度はせん断ひずみと接触摩擦とのみによって発生するという仮定に基づいて算出した結果であつて、実際には更に、刃先の圧縮、引裂き、加工面の変形等による温度が加算される。ゆえに実測値が計算値より高く表われるのは当然である。また高温に移るに伴つて両者の値が接近して来るのは高温における被削材の軟化のため比較的完全な塑性変形を起すためである。更に高温において各数式の指数が

計算値と実測値とおおむね一致する点より見ると引用した数式が当を得たものと考えられる。

注：—

- (1) 昭和 29 年 5 月 13 日 北陸地方講演会において講演、原稿受付昭和 29 年 5 月 21 日。
- (2) 正員、富山大学工学部。
- (3) K.J. Trigger & B.T. Chao, Trans. ASME., Jan. 1951, p. 58.
- (4) W.C. Leone, Trans. ASME., Jan. 1954, p. 123.
- (5)(6) B.S. Hahn, Trans. ASME., May 1953, p. 587~588.
- (7)(8)(9)(10) K.J. Trigger & B.T. Chao, Trans. ASME., Jan. 1951, p. 60~62.