621.9.014

工 具 の 刃 先 温 度 に つ い て*

奥 島 啓 式** 下 田 隆 二***

The Cutting Temperature

by Keiji OKUSHIMA and Ryūji SHIMODA

The cutting temperature is one of factors which exert a large influence upon tool-life. We measured the temperature distribution in the vicinity of tool-point by thermo-color method, using specially designed dividable orthogonal cutting tool, and the mean cutting temperature by thermo-couple method between tool and work. The present paper deals with the possibility of application of the theoretical equation by Loewen & Shaw (1954) to orthogonal cutting with discontinuous chip under the conditions contrary to the assumptions in case of the theoretical analysis, and also the rate at which the cutting heat diffuses to chip, tool and workpiece.

1. 緒 言

金属切削において切削部に発生する熱量，したがってその切削熱によって引き起される工具の刃先温度の上昇が，工具寿命に大きい影響を及ぼすことはよく知られている。そしてこの切削における重要な因子の一つである切削温度に関しては，Gottwein, Reichel, Herbert らの実験的研究，並びに Chao & Trigger, Loewen & Shaw らの理論的解析がある。

本論文においては，特に設計した割りバイトを用いてその合面に示温塗料を塗布することにより刃先近傍断面の温度分布を種々の条件の下において求め，同時に従来行われている工具・被削材熱電対法によって平均切削温度を測定して，比較検討してある。更にこの実験結果を用いて試みに，構成刃先を伴わない連続型切粉を生ずる場合について Loewen & Shaw が得た切削温度の理論式を検討してみた結果，この解析に際しておかれた重要な仮定である連続型切粉を生ずる場合以外に，不連続型切粉を生ずる場合においても，便宜上筆者らがくふうした切くず平均厚さを用いれば，Loewen-Shaw の理論式が実験値とよく一致することを認め得た。

2. 示温塗料による刃先近傍の温度分布の測定

切削温度の測定には従来工具と被削材を熱電対とする，いわゆる Herbert-Gottwein 法が最も多く用いられているが，この方法では切粉と工具の接触部の平

均温度しか求めることができないので，刃先近傍の温度分布並びに最高温度を知るために示温塗料による方法を用いた。

示温塗料による切削温度の測定については Lang の研究があるが，示温塗料を工具表面に塗布するため，刃先近傍では被削材・切粉と工具との接触によって最もたいせつな刃先部の塗料がはげてしまうので，精度は余り期待出来ないうらみがあった。

そこで本実験においては，工具を特別に設計して Lang の方法の欠点を取り除き，はるかに正確に温度分布並びに刃先最高温度を知ることができた。すなわち工具としては，第 1 図のごとく縦に二分したものを

第 1 図

用い，その合面を十分すり合せ仕上をした後示温塗料を塗布して密着させボルトで締めつける。このように装備した工具である時間切削した後バイトを分解し，塗料の変色域を万能顕微鏡で観察・記録する。示温塗料としては，科学研究所製非可逆性サーモカラーを用い，変色温度が異なる数種のものを採用したので，同一切削条件において実験を数回繰返すことにより刃先近傍の温度分布を知ることができるわけである。なお上述の二つ割りバイトの間に塗布した示温塗料の厚さは $\frac{1}{100} \sim \frac{2}{100}$ mm 程度でごく薄いので，切削中に切

* 昭和 31 年 3 月 20 日 関西支部定時総会講演会において講演，原稿受付 昭和 31 年 5 月 22 日。

** 正員，京都大学工学部。

*** 准員，酒井鉄工所。

粉が侵入する恐れはほとんどない。

この方法によると切削中切粉との接触によって塗料がはげることがなく、刃先近傍の温度分布を確実に求めることができるが、最高温度と考えられる刃先は点であるためその温度は、刃先のごく近くまで測定した温度分布から外そう法により決定することにした。すなわちすくい面における刃先からの距離と温度との関係を図表にプロットして、それらの点を結ぶ曲線をひいてそれが縦軸と交わる点を読むと、それが刃先温度を与えることになる(5. 実験結果の項参照)。

3. 熱電対法による平均温度の測定

平均切削温度を知るため並びに示温塗料による温度測定法と比較検討するために、従来の工具・被削材熱電対法(Herbert-Gottwein 法)を採用した。その装置の概略を第2図に示す。あらかじめ被削材と工具材料による接触部温度と発生電圧との関係を求めておけば、切削中にミリボルト計の読みをとることにより切削温度が推定されるわけである。

第2図

4. 実験要目

実験は、旋盤を用いて円筒の端面を削るいわゆる二

次元切削を行い、前述の方法による切削温度の測定とともに諸元を測定した。そのおもなる要目は次のとおりである。)

被削材……0.24%炭素鋼
引張強さ 46 kg/mm² 外
径 113 mm, 内径 107
mm (肉厚したがって切
削幅は 3 mm である。)

工具……高速度鋼第3種の
平刃むく割りバイト(バ
イトホルダに取付け、そ
れを傾斜させることによ
り、任意のすくい角や逃
げ角を与えるようにして
ある。)

工作機械……大阪機工製高
速精密旋盤。

(i) 切削力 切削力

は既報の抵抗線ひずみ計利用切削動力計⁽¹⁾により測定した。もちろん今の場合には主分力と背分力の測定で十分である。

(ii) 切削比(r)およびせん断角(ϕ) 切粉に銅めっきを施した後ウッド合金に鑄込み、切粉の縦断面が観察出来るように研磨およびバフ仕上し、読取り顕微鏡でその厚さ t_2 を測定する。その時、切込み t_1 ・すくい角 α が既知であるから、切削比 r およびせん断角 ϕ が次式で計算される。

$$r = t_1/t_2$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha}$$

ただし不連続型切粉に対しては、ある一定長さの切粉の断面を拡大撮影して、その面積をプランメータで測り、それから平均厚さを求めて t_2 とした。このような切粉平均厚さの導入は後述のごとく、連続型切粉を生ずるという仮定の下に得た Loewen-Shaw の理論式を、不連続型切粉を生ずる場合に適用するために必要なものである。

(iii) 切粉と刃物面の接触長さ 刃物面上に残る切粉の接触黒痕(こん)を万能顕微鏡で読み取る。

5. 実験結果

すくい角 0°, 逃げ角 10° の工具で6種の切削条件(削り速度……26, 52 m/mn; 切込み……0.015, 0.022, 0.030 mm)について実験を行った。示温塗料によって求めた刃先近傍温度分布並びにそれから外そう法によって求めた刃先最高温度の例を第3図に示す。また切削温度・切削力・切粉接触長さ等の測定結果とともに切粉の形状・構成刃先の有無を観察した結果を第1表(a)に、更に第3図から得た刃先最高温度と切込

第3図

第 1 表

(a)	削り速度 V , m/mn	52	52	52	26	26	26
	切込み t_1 , mm	0.015	0.022	0.030	0.015	0.022	0.030
	切削幅 b , mm	3	3	3	3	3	3
	切粉の形状	連続型	連続型	連続型	不連続型	不連続型	不連続型
	構成刃先	無	やや有	有	無	無	無
	切粉の厚さ t_2 , mm	0.031	0.070	0.122	0.089	0.128	0.178
	切粉接触長さ a , mm	0.86	1.08	1.20	0.57	0.81	1.03
	主分力 F_c , kg	32.9	35.1	42.0	34.6	49.0	60.3
	背分力 F_t , kg	40.7	49.0	50.8	34.8	54.2	70.2
	摩擦面平均温度測定値, °C	372	405	412	298	344	338
	摩擦面最高温度測定値, °C	400	450	485	393	405	435
(b)	切削比 r	0.490	0.315	0.246	0.162	0.172	0.158
	せん断角 ϕ	26°10'	17°30'	13°50'	9°40'	9°50'	9°0'
	切粉せん断ひずみ r	2.527	3.490	4.307	6.041	5.992	6.477
	せん断エネルギー $u_s, \times 10^7 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$	2.89	2.90	3.28	6.39	6.02	5.45
	摩擦エネルギー $u_f, \times 10^7 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$	4.43	2.34	1.39	1.30	1.41	1.23
	面積係数 $\bar{A}$	1.23	1.09	1.05	1.46	1.19	1.12
	面積係数 A_m	1.43	1.31	1.28	1.68	1.40	1.34
	R_1	0.308	0.314	0.327	0.169	0.200	1.219
	R_2	0.910	0.876	0.834	0.560	0.613	0.650
	R_2'	0.916	0.881	0.842	0.593	0.648	0.680
	せん断温度 $\bar{\theta}_s$, °C	236	249	281	283	311	310
	摩擦面温度上昇 $\Delta\bar{\theta}_f$, °C	130	108	89	35	50	59
	摩擦面平均温度 $\bar{\theta}_t$, °C	366	357	370	318	361	369
	摩擦面最高温度 $\bar{\theta}_m$, °C	430	409	430	338	386	402
(c)	H_c , %	67.4	56.1	48.0	23.5	27.8	29.9
	H_w , %	27.2	38.2	47.0	69.0	64.8	63.7
	H_T , %	5.4	5.7	5.0	7.5	7.4	6.4

第 4 図

みとの関係を第 4 図に示す。

6. Loewen-Shaw による切削温度理論式の検討

1954 年 Loewen & Shaw⁽²⁾は、構成刃先を伴わな

い連続型切粉を生ずる場合について理論的に切削温度の解析としているので、その理論式の正否を以上の実験結果から検討してみる。

Loewen-Shaw の理論は次の仮定に基いている (第 5 図参照)。

第 5 図

(i) 切削は構成刃先を伴わない連続型切粉を生ずる場合とする。

- (ii) 切削に費された機械的エネルギーはすべてせん断面 AB および摩擦面 AC で熱に変化する。
 (iii) 工具の逃げ面と被削材の間には摩擦はない。
 (iv) AB , AC 面におけるせん断エネルギーおよび摩擦エネルギーは均一に分布している。

この仮定の下で, 工具刃先の平均温度 $\bar{\theta}_t$ および最高温度 $\bar{\theta}_m$ は次式により与えられる。

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + 0.377 \frac{R_2 q_2 a}{k_2 \sqrt{L_2}}$$

$$\bar{\theta}_m = \bar{\theta}_s + 0.565 \frac{R_2' q_2 a}{k_2 \sqrt{L_2}}$$

ここに,

$$\bar{\theta}_s = \frac{R_1 u_s}{J \rho_1 c_1} + \bar{\theta}_0$$

$$R_1 = \frac{1}{1 + 1.328 \sqrt{\frac{K_1 \gamma}{V t_1}}}$$

$$R_2 = \frac{\frac{u_f V t_1 \bar{A}}{J k_3} - \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_0'}{\frac{u_f V t_1 \bar{A}}{J k_3} + \frac{0.754 u_f}{J \rho_2 c_2} \sqrt{\frac{V t}{a \cdot r} K_2}}$$

$$R_2' = \frac{\frac{u_f V t_1 A_m}{J k_3} - \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_0'}{\frac{u_f V t_1 A_m}{J k_3} - \frac{1.130 u_f}{J \rho_2 c_2} \sqrt{\frac{V t}{a \cdot r} K_2}}$$

$$u_s = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \cos \alpha}{t_1 b \cos(\phi - \alpha)}$$

$$u_f = \frac{(F_c \sin \phi + F_t \cos \alpha) r}{t_1 b}$$

$$q_2 = \frac{u_f V t_1}{J a}$$

$$L_1 = \frac{V \gamma t_1}{4 K_1} \quad L_2 = \frac{V r a}{4 K_2}$$

$$\bar{A} \approx \frac{2}{\pi} \left(\log \frac{b}{a} + \frac{b}{6a} + \frac{1}{2} \right)$$

$$A_m \approx \frac{2}{\pi} \left(\log \frac{b}{a} + 1 \right)$$

ただし,

- V : 削り速度, cm/s t_1 : 切込み, cm
 b : 切削幅, cm α : すくい角, 度
 ϕ : せん断角, 度
 r : 切削比 ($=t_1/t_2$, t_2 : 切粉厚さ, cm)
 a : 切粉と刃物面の接触長さ, cm
 γ : 切粉のせん断ひずみ
 F_c : 主分力, kg
 F_t : 背分力, kg
 J : 熱の仕事当量 (4.1852 ± 0.0006) 10^7 erg/cal
 $\bar{\theta}_0$: 被削材温度, $^{\circ}\text{C}$
 $\bar{\theta}_0'$: 工具周囲温度, $^{\circ}\text{C}$
 k_2 : 切粉の熱伝導率, cal/cm $\cdot$ s $\cdot^{\circ}\text{C}$
 k_3 : $\bar{\theta}_t$ における工具材料の熱伝導率, cal/cm $\cdot$ s $\cdot^{\circ}\text{C}$
 c : 被削材比熱, cal/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$

ρ : 被削材密度, kg/cm 3

K : 切粉の温度伝ば率, cm 2 /s

c , ρ および K については, 添字 1, 2 はそれぞれ温度 $\bar{\theta}_s$, $\bar{\theta}_t$ における値を示すものとする。

そこでこれらの式を用いて, 第1表(a)の諸量から切削温度を計算すると第1表(b)のようになる。ただし, Loewen-Shaw の理論においては切粉は構成刃先を伴わない連続型であるという大きい仮定があるが, 構成刃先を伴う連続型切粉についてはそれを無視し, また不連続型切粉については切粉厚さとして便宜上 4(ii)で述べた平均厚さを選んで, 上の理論式を適用することにした。構成刃先を伴わない連続型切粉の仮定に基いた理論式ではあるが, 仮定からはずれたような場合に対しても単に機械的に諸量を代入して値を求めることは可能であるからである。

このようにして求めた理論値と実験値とを比較することにより, 次のことがいえる。

(i) 理論的解析において仮定した条件と相等異なるような条件で切削を行った場合でも, 刃先温度の計算値は測定値とほぼ一致し, その偏差は約 10% 以内である。

(ii) 連続型切粉の場合は計算値が測定値より低くなるのに対し, 不連続型切粉の場合は, 逆に計算値の方が高くなる。これは仮定とは異なるためでもあろうが, 不連続型切粉の場合は切粉の変形に多くのエネルギーが費されるためではないかと考えられる。

(iii) 不連続型切粉の場合, 切粉の厚さは部分的に大きい範囲で変化するが, いちおう前述のごとく平均厚さをもつ連続型切粉として計算したものと実測値がかなりよく一致することは, Loewen-Shaw の理論式を近似的に不連続型切粉を生ずる場合に適用しうることを物語っている。

(iv) 示温塗料による最高温度の測定には, 塗料自身の誤差, 塗布剤の影響, 合せ目への切粉の進入, 雰囲気の影響等その精度の点においてなお多くの難点があるが, この測定結果が正しいものとすれば, 計算値は一つの例外を除いて測定値より低くなっている。これは, 理論式の誘導において均一な熱源がおかれたものとしているので, 温度分布曲線の傾斜が実際よりも小さくなっているためと考えれば, 理解される。

7. 切削熱の分散

切削に費されたエネルギー, したがってそれにより発生した熱量が, いかなる割合で切粉・被削材・工具に流れるかを調べる。その割合をそれぞれ $H_C \cdot H_W \cdot H_T$ とすれば, それらは次式で計算される。

$$H_C = \frac{u_s R_1 + u_f R_2}{u_s + u_f}$$

$$H_W = \frac{u_s (1 - R_1)}{u_s + u_f}$$

$$H_T = \frac{u_f (1 - R_2)}{u_s + u_f}$$

第 6 図

この計算結果を第 1 表 (c) に記してある。第 6 図は切削熱の分散割合を削り速度に対してプロットしたもので、参考のために点線で Schmidt⁽³⁾ がドウ・メタル

をきりもみした時に求めた熱の分散割合を示す。これよりわかることは、せん断角が小さいほど切粉に入る熱量の割合が少く被削材に入る割合が多いことである。そこでもしすくい角を有する工具で切削を行い、削り速度 26 m/mn で連続型切粉になるとすれば、おそらくせん断角は大となり、切粉に入る熱量は多くなるものと想像される。すなわち今の場合は、二つの削り速度において連続型と不連続型という二つの異なる状態を示すため、切込みは同一でも同じ曲線上にのらないのである。

文 献

- (1) 奥島・外 2 名, 機械学会論文集, 21 巻 110 号, 709 ページ (昭 30).
- (2) E.G. Loewen & M.C. Shaw, *Trans. ASME*, Vol. 76 (1954), p. 217.
- (3) A.O. Schmidt & J.R. Roubik, *Trans. ASME*, Vol. 71 (1949), p. 245.

621.822.74-751

ラジアル玉軸受の取付誤差*

青 木 三 策**

On the inclined Radial Ball Bearing

by Sansaku Aoki

Though the orbit of the race of radial ball bearing should be perpendicular to the rotating axis, actually the race is always more or less inclined on account of the inaccuracy of the housing, shaft and bearing. Denoting the inclined displacement of bearing race by ξ , the force generated on the race which can be analysed in consideration of Hertz's contact theory is proportional to ξ^3 , and the present paper deals with the effects of the inclined displacement on the bearing life, friction and static load capacity.

1. ま え が き

ラジアル玉軸受の内外輪の軌道は回転軸に対して正しく直角であることが本来の姿なのであるが、現実には軸受のみぞ横振れ または軸および軸受箱の精度不良のため内外輪の軌道は一般には傾いて用いられているであろう。この傾きをここで取付け誤差と呼ぶが、この量が大きくなれば軌道に好ましくない力が生じ、軸受の摩擦を大きくし、かつ寿命を短くするだろうということが当然考えられる。しかし、どの程度傾いたらどの程度の影響をうけるかという定量的な問題に関

しては従来扱われていなかったもので、筆者はこの問題の理論的解析を試みた。

第 1 図

心違いを小さく取付けることが困難なことは容易に想

* 昭和 29 年 11 月 28 日 東京秋期講演大会および昭和 30 年 10 月 15 日 東京秋期講演大会において講演。
原稿受付 昭和 31 年 8 月 9 日。

** 正員, 工業技術院機械試験所。