

〈12回連載 ショートレクチャー〉

若手技術者のための研削工学

(第6回) 研削温度の解析と測定

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

砥粒切れ刃は大きな負のすくい角を有し、研削初期に逃げ面摩耗も発生するにもかかわらず、砥粒の切込み深さは極めて小さいため、弾性的・塑性的に上滑りする切れ刃も多い。このため、比研削抵抗(砥粒切削断面積あたりの接線研削抵抗)は比切削抵抗(切削断面積あたりの切削主分力)の数十倍に達する。さらに、砥石周速度は通常切削速度の数十倍であるから、大きな加工熱が発生する。結果、砥石と工作物の接触域は高温になり、工作物の熱膨張による寸法・形状精度の低下、熱損傷による仕上面品質の低下などの問題を生じやすい。

本稿では、研削温度の分類と意義をご理解頂いた上で、前回のレクチャーで求めた接線研削抵抗を用いて研削温度の解析を行うとともに、研削中における工作物表面温度の測定例について紹介する。

2. 研削温度の分類と意義

研削温度と言っても図1に示すように、どの部分に注目するかによって、その意味は大きく異なる。

(1) 工作物の平均温度上昇

工作物に流入した熱は、次第にその全体に行き渡って、平均温度を上昇させる。平均温度上昇 θ_w と工作物の線膨張係数との積に比例して工作物寸法は増加するから、高い寸法精度を得るには θ_w をできるだけ低く抑える必要がある。

(2) 砥石と工作物の接触面の温度上昇

砥石と工作物の接触面で発生した熱の多くは工作物に流入して、工作物表面の温度を急上昇させる。ただし接触面温度は一様ではないので、接触面の平均温度上昇 $\bar{\theta}$ と最高温度上昇 θ_m によって評価する。接触面温度が高くなると、研削焼け、研削割れ、熱変態な

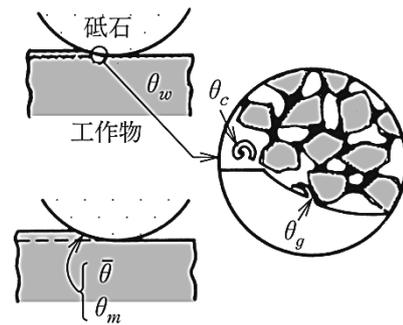


図1 研削温度の分類

どが生じ、仕上面の品質を低下させる。

(3) 砥粒切れ刃の温度上昇

砥粒切れ刃の温度上昇とは、切れ刃が工作物または切りくずと接触している微小領域の温度上昇 θ_g を指す。 θ_g は、熱衝撃による切れ刃の自生作用の発現や、切れ刃の摩耗に直接関係する。また、研削熱が発生しその工作物、砥石、切りくずへの配分が決まるのはまさにこの領域である。しかし、 θ_g はごく微小な領域での現象であるため、実態はほとんど知られていない。

(4) 切りくずの平均温度上昇

鋼の切りくずは、空中に放出されると激しく酸化して火花となって飛び散り、その過程で温度は大きく変化する。そこで、切りくずが工作物から分離・排出される瞬間における温度上昇を考え、これを θ_c で表す。余談であるが、火花の形や色は鋼中の炭素量や添加元素によって変わるので、鋼種の簡易判定(火花試験)に用いられることがある。

(1)~(3)に挙げた温度の中では、 θ_w 、 $\bar{\theta}$ 、 θ_m 、 θ_g の順に微小な領域の温度であり、この順に温度は高くなる。なお後述のように、各温度に及ぼす加工条件の影響のしかたは異なるので注意が必要である。

3. 研削温度の解析

ここでは、工作物の寸法精度や仕上面の品質に大きな影響を及ぼす工作物の平均温度上昇と砥石と工作物の接触面の温度上昇について検討する。

3.1 工作物の平均温度上昇

研削によって発生した全熱量を Q_0 (J) とし、工作物、砥石、切りくずに流入する熱量をそれぞれ Q_w, Q_s, Q_c とすると、輻射による放熱や流体による冷却の影響がないとき、次式の関係が成り立つ。

$$Q_0 = Q_w + Q_s + Q_c \quad (1)$$

Q_0 のうち工作物に流入する割合を $R_w (=Q_w/Q_0)$ 、工作物の比熱を c [J/(kg·K)]、質量を M (kg) とすると、工作物の平均温度上昇 θ_w (K) は次式で与えられる。

$$\theta_w = \frac{R_w Q_0}{cM} \quad (2)$$

研削で消費されるエネルギーは、全て熱に変換されるものとする、研削時間 τ (s) 中に発生する Q_0 は接線研削抵抗 F_t (N) に比例し、次式で与えられる。

$$Q_0 = F_t(V \pm v)\tau \doteq F_t V \tau \quad (3)$$

なお、 V (m/s) は砥石周速度、 v (m/s) は工作物速度であり、 v の符号は正が上向き、負が下向き研削を示す。式(3)を式(2)に代入すると次式が得られる。

$$\theta_w = \frac{R_w F_t V \tau}{cM} \quad (4)$$

つぎに、**図 2** に示す円筒トラバース研削の場合について、 θ_w を求めてみよう。工作物の直径を d (m)、長さを L_w (m)、回転数を n (s⁻¹)、1 回転あたりの送り量を s (m/rev)、工作物の密度を ρ (kg/m³) とすれば、工作物の質量 $M = \pi d^2 L_w \rho / 4$ (kg)、工作物の周速度 $v = \pi d n$ (m/s) であり、1 工程の研削時間 $\tau = L_w / (s \cdot n)$ であるから、これらを式(4)に代入すると、1 工程終了時の平均温度上昇 θ_w は次式で与えられる。

$$\theta_w = \frac{4R_w F_t V}{c \rho v s d} \quad (5)$$

なお、前回のレクチャーで求めた接線研削抵抗 F_t は次式で与えられた。

$$F_t = k_0 b \left(\frac{v}{V} \right)^{0.6} t^{0.8} \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d} \right)^{-0.2} \omega^{-0.8} \quad (6)$$

ここで、 k_0 は比研削抵抗定数、 b (m) は研削幅、 ω (m) は平均切れ刃間隔、 D (m) は砥石径、 d (m) は工作物径であり、 $1/d$ の符号は正が円筒外面研削を、負が内面研削を示す。上式を式(5)に代入すると次の関係が

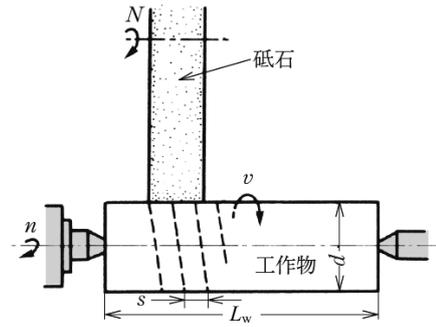


図 2 円筒外面のトラバース研削

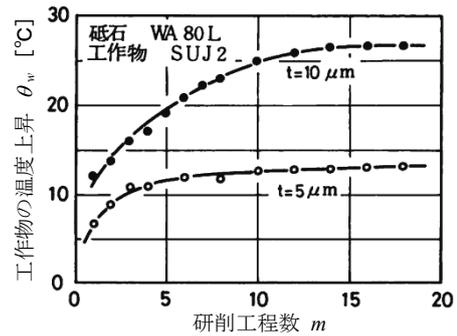


図 3 研削時間の経過に伴う工作物温度の変化 ($V=1660$ m/min, $v=13.5$ m/min, $d=54$ mm, $s=8$ mm/rev, $L=320$ mm)

得られる。

$$\theta_w \propto t^{0.8} V^{0.4} v^{-0.4} \quad (7)$$

すなわち、工作物の平均温度上昇を抑制するには、砥石切込み深さ t および砥石周速度 V を小さくし、工作物速度 v を大きくすれば良い。 v を大きくすると研削抵抗が大きくなるのに θ_w が低下するのは、工作物表面の加熱時間が短くなるからである。

さて、式(5)で与えられるのは 1 回のトラバース研削終了時における平均温度上昇である。トラバース研削を繰り返す場合には、研削工程数が増えるほど θ_w は上昇するが、 θ_w に比例して工作物表面から熱が放散されやすくなるから、温度の上昇速度は次第に減少して、ある一定値に近づく。導出過程は省くが、研削工程数 m による θ_w の変化は、次式で与えられる。

$$\theta_w = \frac{R_w F_t V \tau}{\alpha A \tau_\gamma} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{m \alpha A \tau_\gamma}{cM}\right) \right\} \quad (8)$$

ここで、 τ (s) は 1 工程中の研削時間、 α [W/(m²K)] は工作物表面の熱伝達率、 A (m²) は工作物の表面積、 τ_γ (s) は 1 工程中の放熱時間である。なお式(8)は、1 次遅

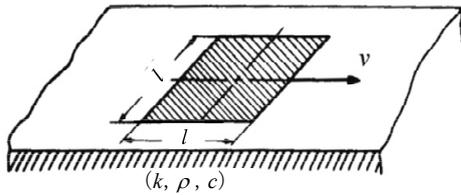


図4 正方形移動熱源モデル

れ系の応答と同じ形をしており、最終的な温度上昇 θ_w は、次式で与えられる。

$$\theta_w = \frac{R_w F_t V \tau}{\alpha A \tau_y} \quad (9)$$

図3は、円筒トラバース研削における m と θ_w の関係を小野らが測定した結果である。 θ_w は、砥石切込み深さ $t=5\mu\text{m}$ では5工程後に、 $t=10\mu\text{m}$ では10工程後にほぼ一定になっており、式(8)の傾向と一致している。

3.2 砥石と工作物の接触面の温度上昇

砥石と工作物の接触面では、ランダムに存在する砥粒研削点で局所的に発熱することや、砥粒切込み深さは切削距離に応じて変化するから、発熱の状態は一様ではない。しかし便宜上、接触面全体を一様な強度をもつ熱源と仮定し、これが工作物速度 v で移動する場合について、接触面の平均温度上昇 $\bar{\theta}$ と最高温度上昇 θ_m を求めることにする。

この際、接触面の形状は砥石の外周に沿った曲面であるが、砥石切込み深さは砥石の直径に比べて十分小さいので、これを平面と見なす。また、砥石と工作物の接触長さ l は、通常工作物寸法に比べて小さいので、工作物を半無限体(三次元空間に無限に広がる固体を水平面で切り取ったもの)と考える。

つまり、砥石と工作物の接触域における工作物の加熱状態を図4に示すように、半無限体の表面上を正方形熱源が移動するモデルに置き換える。このような場合の固体表面の温度分布については Jaeger が詳細に解析しているので、ここではその結果を利用する。

ところで、移動熱源による加熱(非定常加熱)においては、加熱現象に工作物の熱伝導率 k [W/(m·K)]、密度 ρ (kg/m³)、比熱 c [J/(kg·K)] が影響するのは当然であるが、工作物の温度伝導率(熱拡散率とも言う) K [= $k/(\rho \cdot c)$, (m²/s)] が主な支配因子になること、また温度の分布形状は、無次元長さ L (= $vl/4K$) によって変化することが知られている。

図5に、工作物表層温度の分布形状に及ぼす L の

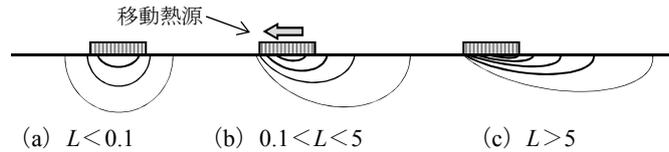


図5 移動熱源による半無限体の加熱において、無次元長さ L が温度の分布形状に及ぼす影響(模式図)

影響を模式的に示す。 $L < 0.1$ の場合には、静止熱源による加熱状態に近いが、 $L > 5$ の場合には接触域内において工作物はごく表層だけが加熱されている。

さて、図4のモデルで $L > 5$ の場合、接触域の平均温度上昇 $\bar{\theta}$ と最高温度上昇 θ_m は次式で与えられる。

$$\bar{\theta} = 0.752 \frac{ql}{2k\sqrt{L}} \quad (10)$$

$$\theta_m = 1.5\bar{\theta} \quad (11)$$

ここで、 q (W/m²) は単位時間・単位接触面積あたり工作物に流入する熱量で、 $q = R_w F_t V / (b \cdot l)$ (b : 研削幅) で与えられる。これを式(10)に代入すると次式が得られる。

$$\bar{\theta} = 0.752 \frac{R_w F_t V}{b\sqrt{k\rho c}\sqrt{vl}} \quad (12)$$

さらに、式(6)を式(12)に代入すると次式が得られる。

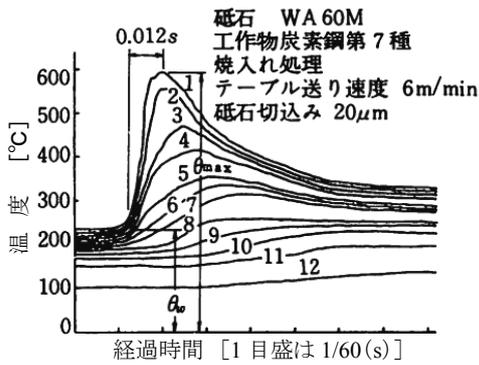
$$\bar{\theta} = \frac{0.752 R_w k_0}{\sqrt{k\rho c}} t^{0.55} V^{0.4} v^{0.1} \omega^{-0.8} \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d} \right)^{0.05} \quad (13)$$

研削熱の工作物への流入割合 R_w を一定とすれば、 $\bar{\theta}$ は平均切れ刃間隔 ω が小さいほど、砥石切込み深さ t と砥石周速度 V が大きいほど高くなると言える。これに対して物速度 v 、砥石径 D および工作物径 d の影響は小さい。先に述べた工作物の平均温度上昇 θ_w への影響とは異なるのでご注意願いたい。

一方、式(13)からわかるように砥石と工作物の接触面温度は、 $\sqrt{k\rho c}$ の値が小さいほど高くなる。例えば、ステンレス鋼や焼入れした高速度工具鋼の場合には、一般の炭素鋼よりも熱伝導率 k が小さいので、 $\bar{\theta}$ は高くなりやすい。

[※本稿では無次元長さ $L = vl/4K$ とおいたが、一般には $L = vl/2K$ としており、違っているように見える。しかし、後者は砥石と工作物の接触長さを $2l$ としたときの定義であって、いずれも正しい。

一方、図4では熱源形状を正方形と仮定しているが、接触長さ l よりも研削幅 b の方がずっと大きい場合には、帯状熱源 ($b = \infty$) と考えた方がより妥当な場合もある。しかし $L > 5$ の場合には、接触域のごく表層だけが加熱されるから、正方形



番号	研削表面からの深さ (μm)	番号	研削表面からの深さ (μm)
1	0	7	270
2	20	8	380
3	40	9	440
4	60	10	580
5	120	11	680
6	180	12	980

図6 砥石と工作物の接触面近傍の温度分布の測定結果(高沢)

熱源の場合も帯状熱源の場合も、接触域内の $\bar{\theta}$ の値はほとんど変わらない]

4. 工作物表面温度の測定例

図6は、平面研削において工作物表面の温度分布を高沢らが測定した結果である。この図では、 θ_w は砥石と工作物の接触域(熱源)が到達する直前の工作物表面温度を示している。この実験では、深さ方向の温度分布を求めるために、連続した50パス程度の研削を行っているから、最高温度 θ_{max} が非常に高くなっているが、最終パスでの最高温度上昇は $(\theta_{max}-\theta_w)$ で与えられるので、約370℃の温度上昇と言える。図6に付記した加工条件はとりわけ過酷とは言えないにもかかわらず、ワンパスで相当な高温に達するのが注目される。

図6に示した温度の測定結果は、図7に示すように工作物の裏側から細穴をあけておき、ここに先端半径約10μmのコンスタンタン線を板ばねを介して軽く押しつけ、工作物との間に熱電対を構成させて測定したものである。工作物を上面から順次切込むことで、図6に付記した深さの温度分布を得ている。

図8は、図6に示した温度分布をもとに、工作物表面の等温線を引いたものである。縦軸が10倍に拡大され

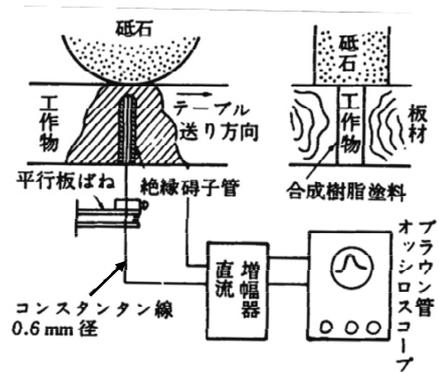


図7 工作物表面の温度分布の測定方法(高沢)

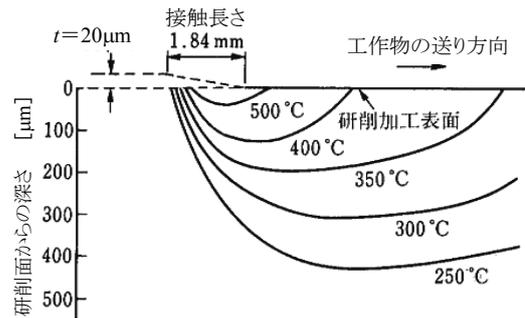


図8 工作物表面の温度分布の測定結果(高沢)

ていることを考慮すると、砥石との接触域内において、工作物はごく表面層だけ加熱されることがわかる。

5. おわりに

研削加工を湿式で行った場合、研削による加熱と研削液による冷却との相互作用が重要になる。しかし、筆者は湿式研削における工作物表面温度を測定した例を知らない。また冷却作用を考慮した研削温度の解析例もほとんどない。読者諸兄には、湿式研削における研削温度の問題にチャレンジして頂きたい。

一方、今回のレクチャーで紹介した式の多くに、研削熱の工作物への流入割合 R_w が使われている。本稿の段階では R_w は未知数であって、これがわからないと研削温度を解析・予測できない。そこで次回は、 R_w について検討することから始め、研削熱の影響について論ずることとする。

なお、筆者らが著した「機械加工学の基礎(コロナ社)第1刷」では、本稿の式(6)、式(7)、式(13)にあたる式で、 $\epsilon=0.25$ と仮定した結果を示している。これは、先達の例を踏襲したもので誤りではないが、本稿の式の方がより妥当と考えられるので、第1刷の教科書をお持ちの方は、式を修正して頂ければ幸いです。