研削焼けの基礎的研究 (第2報)*

—仕上面温度の変化—

河 村 末 久** 岩 尾 幸 博** 西 口 重 雄**

Studies on the Fundamental of Grinding Burn (2nd Report)

—Surface Temperature in Process of Oxidation—

Suehisa KAWAMURA, Yukihiro IWAQ, Shigeo NISHIGUCHI

The thickness of the metal oxide layer formed on the ground surface is related to the oxidation rate law of the workpiece and the surface temperature in the grinding process. In the present research, the influences of the thermal characteristics of the workpiece and the grinding conditions on the surface temperature of the growing layer after get out of contact with the grinding wheel are studied. The results are as follows.

(1) Theoretical temperature distributions which are calculated by assuming a linear heat source strength with a maximum at the front of the contact zone and zero at the rear, agree with the experimental results.

(2) The relation between the exit temperature θ_r at the rear end of the contact zone and the maximum temperature θ_m is given by $\theta_r = 0.693\theta_m$, and the subsequent surface temperature θ_a is expressed as $\theta_a = \theta_r(v\tau/l)^{-\alpha}$, where l , v and τ are the semilength of the heat source, the table speed and the lapse of time, respectively.

(3) The value of the cooling coefficient α is about 0.454 and it is almost independent on the thermal characteristics of the workpiece and the grinding conditions.

1. ま え が き

研削焼けは仕上面表層に生成された酸化皮膜によって入射光が干渉を起こすための変色現象とされている。このような皮膜は研削された表面が接触域から出た瞬間から生成が開始され、仕上面温度の冷却過程において成長するものと考えられる。

そこで本研究は皮膜の成長に焦点をあてて研削焼けの機構を解明しようとするもので、前報¹⁾では表面酸化実験によって皮膜の成長則を検討し、膜厚は加熱時間の1/3乗に比例すること、その比例定数は加熱温度の影響を受け、アレニウスの関係式を満足することなどを明らかにした。そしてまた冷却過程での仕上面温度を上記の皮膜成長則と関連づけることによって仕上面の色調をかなりの確に推定できることを示し、研削焼けの機構を皮膜の成長と結びつけてきた。

ところでこのようなメカニズムのもとでは次の二つの事項が研削焼けに重要な意義を持つことになる。まずその第1は工作物の熱的性質や研削条件が冷却過程の温度

変化に及ぼす影響であり、その第2は各種工作物における皮膜の構造や皮膜の成長則などである。

研削面の温度についてはこれまで多数の研究がなされてきたが、冷却過程を対象としたものはほとんどなく、熱源の分布形状についても不十分な仮定のものが多い。

そこで本報ではより適切な熱源分布モデルについて研削面温度を求め、冷却過程の温度変化に及ぼす被削材の熱的性質や研削条件の影響を検討した結果を報告する。

2. 研削面温度の計算

半無限固体の表面を長さ $2l$ の無限幅スライダが単位時間、単位面積当たり q なる熱量を発生しながら速度 v で移動する場合について、Jaeger²⁾は摩擦面の温度上昇 θ を次のように与えている。

$$\theta = \frac{q}{\pi k} \int_{-l}^l e^{-v(x-x')/2K} K_0 \left\{ \frac{v|x-x'|}{2K} \right\} f(x') dx' \quad (1)$$

ただし、 q : 熱源強さ (cal/cm²・s), k : 熱伝導率 (cal/cm²・s・°C), K : 温度伝導率 (cm²/s), l : 熱源長の1/2 (cm), v : 熱源速度 (cm/s), x : 求める点の座標, x' : 熱源中心点の座標, K_0 : 0次の第2種変形ベッセル関数, $f(x')$: 熱源の形状関数。

研削温度に関するこれまでの研究は、上式における

* 原稿受付 昭和53年1月9日。昭和52年度精機学会春季大会学術講演会(昭和52年4月4日)にて発表。

** 正 会 員 防衛大学校(横須賀市走水1-10-20)

図1 研削面の温度分布

$f(x')$ を1とした矩形形状の熱源分布を取扱ったものがほとんどであった。ところが砥粒による切りくず断面積は図1に示す砥石軸直下の点Aからの距離に比例するので、熱源の分布形状を前端Bで最大、後端Aで0となる直角三角形で表すのがより合理的と考えられる。この場合、熱源の形状関数は $f(x') = (x' + l)/l$ となり、 $v \cdot (x - x')/2K = u$, $v \cdot l/2K = L$, $v \cdot x/2K = X$ などの変数変換を行うと、研削面の温度上昇 θ は次式によって求められる。

$$\theta = \frac{2Kq}{\pi kv} \int_{x-l}^{x+l} e^{-u} \left(1 + \frac{X}{L} - \frac{u}{L}\right) K_0(|u|) du \quad (2)$$

ただし熱源の強度は前端Bで $2q$ 、後端Aで0なる直角三角形形状の分布をもつ場合で、研削熱の工作物への流入割合を R_w 、接線研削抵抗を $F_t(g)$ 、砥石周速を $V(\text{cm/s})$ 、研削幅を $B(\text{cm})$ 、熱の仕事当量を $J(\text{g} \cdot \text{cm}/\text{cal})$ で表すとき、 q は次式のようになる。

$$q = \frac{R_w F_t V}{2JB l} \quad (3)$$

図1は式(2)について数値計算した結果の一例を示したもので、縦軸には無次元化した温度 $\pi kv\theta/2Kq$ を、また横軸には接触域の中心を原点とする無次元化した工作物の位置 x/l を示している。研削焼けには接触域を出たのちの冷却過程、すなわち $x/l < -1$ での温度 θ_a が関係すると考えられるので、 θ_a に及ぼす各種要因の影響をより詳細な計算結果をもとに検討しておくことが必要となる。そこでまず図2には接触面での最高温度 θ_m と接触域出口での温度 θ_r の関係を示す。 θ_m と θ_r の計算値は共に L の増大に従って増大していくが、両者の比はほぼ一定値を示し、式(4)のように表される。

$$\theta_r = 0.693\theta_m \quad (4)$$

次に図3には冷却過程の温度 θ_a の変化を示す。これから θ_a と x/l は両対数紙上で直線関係にあるといえるので、両者の関係は式(5)のように表せる。

図2 研削面最高温度 θ_m と接触域出口温度 θ_r の関係 図3 冷却過程の温度 θ_a の変化 図4 θ_m , α に及ぼす L の影響

$$\theta_a = \theta_r \cdot (-x/l)^{-\alpha} \quad (5)$$

ただし、 $x < -l$ 。

ここで直線の勾配 α (冷却係数とよぶ) に注目してみると、 L が大きくなるに従ってやや急になる傾向が認められる。図4は冷却過程の温度 θ_a の整理が容易となるように θ_m と α に及ぼす L の影響を示した。両対数紙上でこ

れらは共に直線上に並んでいるが、 $\log \alpha$ の勾配は 0.018 程度で極めて小さく、実用的な研削条件のもとではほぼ一定値 (0.454) をとり、被削材の熱的性質や加工条件にほとんど影響されないといえる。

以上から α , θ_m と L の関係として式 (6) が得られる。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.454 L^{0.018} \approx 0.454 \\ \theta_m &= 3.24 \frac{2Kq}{\pi kv} \cdot L^{0.515} \\ &= 0.722 \frac{R_w}{J} \cdot \frac{K^{0.485}}{k} \cdot \frac{F_t}{B} \cdot V(vL)^{-0.485} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $1 \leq L \leq 10$ 。

ここで接触域の中心が通過する瞬間を時間 τ の基準にとり $x = -v\tau$ に留意すると式 (3), (4), (6) の関係から式 (5) の θ_a は最終的に式 (7) のようになる。

$$\begin{aligned} \theta_a &= 0.693 \theta_m (v\tau/l)^{-\alpha} \\ &= 0.693 \times 3.24 \times \frac{2Kq}{\pi kv} \cdot L^{0.515} \left(\frac{v\tau}{l} \right)^{-0.454 L^{0.018}} \\ &= 0.500 \cdot \frac{R_w}{J} \cdot \frac{K^{0.485}}{k} \cdot \frac{F_t}{B} \cdot V \cdot (vL)^{-0.485} \cdot \left(\frac{v\tau}{l} \right)^{-0.454} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $1 \leq L \leq 10$, $\tau \geq l/v$ 。

すなわち、 θ_m は研削条件や被削材の熱的性質に影響されるが、 α がほぼ一定とみなせることから、冷却過程の温度は単調な減衰挙動をたどるものと推定される。

3. 実験の方法と条件

実験には横軸平面研削盤を用い、砥石及び砥石周速を一定としてテーブル速度と切込みを変化させる実験を行った。被削材には熱的性質、ことに K が広範囲となるように S25C, S55C, SK2, SUJ2, SUS304 など5種類の鋼を選んだ。また工作物の側面には断熱材を当て、側面からの熱の放散を妨げるようにした。

研削面の温度測定は前報で述べたように工作物中に異種金属の細線 ($\phi 0.04$ のコンスタンタン線で絶縁物には厚さ $10 \mu\text{m}$ の雲母箔) をはさんだ測定片を作り、これを研削したときの熱起電力信号から求めた。表1には実験の条件と被削材の熱的性質を示す。

4. 実験の結果

4.1 出力からみた熱源の分布形状

研削加工における切れ刃と工作物の干渉状態は上すべり領域、塑性流動領域を経て切削領域に移行し³⁾、各々の領域の長短には刃先の鋭利さが関係するものと考えられている。そしてこれら3領域の長短は熱源の分布形状に直接的な影響を及ぼし、切れ刃が鋭利な場合には前節の仮定に用いた直角三角形に、切れ刃が摩耗するにつれ

表1 実験の条件と被削材の熱的性質

項目	条件
砥石	A46 KmV
工作物	S25C, S55C, SK2, SUJ2, SUS304
	$60 \times 25 \times 5 \text{ mm}$
砥石周速度	1840 m/min
工作物速度	5, 7.5, 10 m/min
設定切込み	4~32 μm
ドレッシング	送り: 120 mm/min
	切込み: $8 \mu\text{m} \times 5 \text{ 回}$, $4 \mu\text{m} \times 4 \text{ 回}$ $0 \mu\text{m} \times 2 \text{ 回}$
方式	乾式, 上向き, 1パス

材料の熱的性質

項目	ρ (g/cm^3)	k ($\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)	C ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$)	K (cm^2/s)
材種				
S25C	7.82	0.12	0.12	0.128
S55C	7.85	0.10	0.12	0.106
SK2	7.83	0.076	0.12	0.080
SUJ2	7.81	0.065	0.12	0.069
SUS304	8.0	0.038	0.12	0.040

(但し $0 \sim 100^\circ\text{C}$)

図5 研削面温度の計算値と実測値の比較

て台形、矩形へと移行すると考えられる。そこで本研究では目なおし直後の鋭利な切れ刃について実験することとし、まず出力信号の形状をもとに、仮定した熱源分布の妥当性を検討してみよう。

図5はS25Cにおける研削面温度の実測値と式(2)による計算結果を比較した一例である。ただし計算に必要な v, l, F_t, V などとはそれぞれの実測値を用いており、 R_w については実験曲線に計算曲線の最大値が一致するように適当な数値 ($R_w = 0.83, 0.77, 0.60$) を選んだものである。熱源の分布形状を種々変えた場合の温度分布については後述するが、図における温度分布曲線の全体傾向はよく一致しており、鋭利な切れ刃では熱源の分布形状を前節で仮定した三角分布とするのが妥当である。

図6 研削面最高温度と仕上面の色, 推定膜厚 D の関係

図7 S55Cにおける θ_m と θ_r の関係

4.2 θ_m と θ_r の関係

これまでの研究によると研削焼けの発生には研削面最高温度 θ_m が重要な意味を持つとされている⁴⁾。図6は各種被削材について得られた $\theta_m + \theta_0$ (θ_0 は室温で27°C)と仕上面の色との関係を示したもので、これによって仕上面の変色は $(\theta_m + \theta_0)$ がほぼ500°C以上で生じ、温度が高くなるに従って黄色、黄褐色、褐色、……紫色、青色、青白色と変化することがわかる。しかし同じ色調でも材料によって $(\theta_m + \theta_0)$ にはかなりの相違が認められる。この理由はまず式(7)に示されているように皮膜が成長する冷却過程の温度は $(v\tau/l)^{-\alpha}$ に比例し、 v/l が異なれば膜厚に変化が生ずること、次に θ_m や v/l が同じでも材料によって酸化則が異なれば膜厚も異なるため、 θ_m

図8 冷却過程の温度変化

だけで研削焼けの現象が完全に規定されるものではないことがわかる。しかし式(4)の示すように θ_m は冷却過程の初期温度 θ_r に直接的な影響を及ぼすため、皮膜の成長に深いかかわりをもっている。そこで次に被削材の熱的性質や研削条件に応じて θ_m と θ_r がどのような関係になっているかについて実験的な検討を試みた。

図7はS55Cについて θ_m と θ_r の関係を示すもので両者は切込みやテーブル速度の相違にもかかわらずほぼ比例し、その比は約0.73になっている。同様の関係をその他の材料について調べた結果によると θ_r/θ_m は材料によって若干異なっている(0.65~0.78)が式(4)の0.693に近く、研削条件や被削材の熱的性質の影響をほとんど受けないといえる。

4.3 冷却過程の温度変化

式(6)によれば冷却過程の仕上面温度は経過時間 τ に対して $\tau^{-0.454}$ の関係で減衰し、被削材の熱的性質や研削条件にはほとんど影響されない。しかし、皮膜がこの冷却過程で成長することを考えれば、わずかな冷却係数の相違も膜厚に影響を及ぼすこととなるので、被削材の熱的性質や研削条件との関係が重視される。

図8はS25Cについて仕上面が冷却過程に移行したのちの温度上昇 θ_a と経過時間 τ の関係を示すものである。ここで $v\tau/l=1$ における温度は θ_r に相当し、実線は実験値を、点線は式(6)を用いて計算した減衰の挙動を示している。図からわかるように $\log \theta_a$ と $\log(v\tau/l)$ の間に直線関係が認められるが、 α の計算値と実験値との関係は接触域出口温度 θ_r に影響され、おおむね $\theta_r > 400^\circ\text{C}$ では計算値より高く、 $\theta_r < 400^\circ\text{C}$ では低くなっている。これらの関係は他の被削材でも同様で、図9には各種被削材に対する L と α の関係を、図10には θ_r と α の関係を示す。図9における実線は α の計算値で、実験値はほぼこれに一致している。しかし α の実測値は図10のよう

図9 各種被削材における α と L の関係 図10 各種被削材における α と θ_r の関係表2 α, β の値

材料	項目	α	β
S 25 C		0.072	0.31
S 55 C		0.134	0.20
SK 2		0.076	0.30
SUJ 2		0.121	0.22
SUS 304		0.174	0.17

に θ_r と関連づけるとその特性がよく把握され、これらを実験式としてまとめると式(8)のようになる。

$$\alpha = a(\theta_r)^\beta \quad (8)$$

表2には各材料について α, β を示した。

ところで、 θ_r が高くなるほど α の測定値が高くなっている理由については実際の研削作業では砥石の回転によって仕上面が空冷され、かつこの冷却効果は表面温度が

図11 α に及ぼす断熱材の影響 図12 膜厚に及ぼす α の影響

高いほど著しいためと考えられる。

5. 考 察

本研究では目づまりや摩耗の無視できる正常研削の場合について帯状熱源と見なし得る場合の仕上面温度の変化を検討してきたが、温度の分布状態には熱源の分布形状が、また冷却過程の温度変化には熱源の幅や側面からの熱の放散が影響を及ぼすことに留意しなければならない。本実験では工作物の側面に断熱材を当てて工作物の全幅をいっきに研削したため、得られた結果は無限幅熱源のそれに該当している。断熱材が α に及ぼす影響の一例を示すと図11のようで、その効果が極めて明瞭である。いま材料の酸化則の諸定数にS45Cの値を用いて膜厚 D に及ぼす上記断熱材の影響を求めてみると図12のとおりで、(a)は断熱材のある場合に、(b)はそれがない場合に該当しており、同じ θ_r では v によっても膜厚が変化することがわかる。テーブルに送りを加える通常の研削方法では熱は表面のごく一部分に加えられるに過ぎないため α はさらに高くなって焼けにくく、また冷却を目的とする研削液の投与は焼けの防止に顕著な効果を発揮する。

次に図13には熱源の分布形状の相違による温度分布

図13 熱源の分布形状と研削面温度の関係

表3 熱源の分布形状と研削面温度の関係

L	b	$\frac{\pi k v \theta_m}{2 K q}$	θ_m の位置 (x/l)	$\frac{\pi k v \theta_r}{2 K q}$	θ_r/θ_m
1	0	3.24	0.2	2.14	0.66
	0.2	3.10	0.1	2.28	0.73
	0.4	3.00	0	2.41	0.80
	0.6	2.98	-0.3	2.54	0.85
	0.8	3.03	-0.5	2.67	0.88
	1.0	3.12	-0.7	2.80	0.90
2	0	4.69	0.1	3.16	0.67
	0.2	4.48	0	3.38	0.75
	0.4	4.34	-0.2	3.60	0.83
	0.6	4.32	-0.5	3.82	0.88
	0.8	4.46	-0.7	4.05	0.91
	1.0	4.65	-0.8	4.27	0.92
4	0	6.68	0.1	4.57	0.69
	0.2	6.38	-0.1	4.94	0.78
	0.4	6.17	-0.2	5.31	0.86
	0.6	6.18	-0.6	5.68	0.92
	0.8	6.46	-0.8	6.05	0.94
	1.0	6.78	-0.9	6.42	0.95

の変化の一例を示す。研削では切れ刃の摩耗が上すべりに影響を及ぼし、これに伴って熱源の分布形状も変化する。曲線(I)は鋭利な切れ刃、(III)は摩擦作用が主体となるような摩耗切れ刃による研削状態に該当し、切れ刃が若干摩耗している場合は両者の中間状態で曲線(II)がこれに該当している。表3は熱源の分布形状に伴う

θ_m , θ_m の発生位置, θ_r , θ_r/θ_m などの変化をまとめたものである。これからわかるように熱源の分布形状が矩形に近づくほど θ_m を生ずる位置は接触域の後端に移動し、これによって θ_r/θ_m も大きくなり焼けを生じやすくなる。

6. 結 論

本研究は仕上面表層における皮膜の成長に強く影響を及ぼすと考えられる研削領域の温度とその時間的変化の挙動を追究したもので、結果を要約すると以下のようになる。

- (1) J. C. Jaeger の摩擦面温度の解を研削の場合に適応するに当たって、切れ味の良好な条件下ではその熱源分布形状をくさび形とするのが適切で、温度分布の測定結果は計算値とよく対応していることが認められた。
- (2) 研削面最高温度を θ_m 、接触域出口温度を θ_r で表すとき、 θ_r は θ_m の0.65~0.78倍となり、被削材の種類や研削条件にはほぼ無関係であることが理論と実験の両面から確かめられた。
- (3) 仕上面が冷却過程に移行したのちの温度 θ_a と接触域の中心通過後の経過時間 τ との間に $\theta_a = \theta_r (v\tau/l)^{-\alpha}$ の関係が成立する。ただし v は工作物速度、 l は接触長の1/2。冷却係数 α は理論的には $\alpha = 0.454 L^{0.018}$ で与えられ、実験でもほぼ同様の結果が得られた。従って研削焼けに影響する主要な因子は θ_m と v/l の値で、これらの等しい研削条件での色の違いは基本的には酸化則の相違によると考えられる。

文 献

- 1) 河村末久, 西口重雄, 岩尾幸博: 研削焼けの基礎的研究(第1報), 精密機械, 43, 6 (1977) 702.
- 2) J. C. Jaeger: Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts, Proc. Roy. Soc. New South Wales, 76, (1949) 203.
- 3) 田中義信, 津和秀夫, 河村末久: 研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について(第2報), 精密機械, 30, 12 (1964) 908.
- 4) 小野浩二: 研削仕上, 槇書店 (1962) 136.