研 究

平面研削における砥石温度の測定*

齊 藤 勝 政** 鍵 和 田 忠 男**

Determination of Temperatures in the Grinding Wheel in Surface Grinding

Katsumasa SAITO, Tadao KAGIWADA

Several ways to find the temperature in the grinding wheel in process of grinding have been attempted. In this paper, the temperature distributions in the grinding wheel and the heat flux flowing into the grinding wheel are obtained in surface grinding, by a new method consisting of an experiment and a numerical analysis by means of finite difference equation. That method is characterized by follows: the temperature measurement during only one pass of grinding is required to obtain the temperature distribution in the grinding wheel, the error of temperature caused by existence of a thermocouple is cancelled, and the temperature in the thinner layer below the peripheral surface of grinding wheel is obtained by the finer grid system. And the examination with the numerical analysis explains that a thermometer has unnegligible influence on measured temperature in the grinding wheel.

1. 緒 言

研削点で発生する熱は、被削材、砥石、切りくずへと伝導分配される。砥石へ伝導する熱により砥石内部には温度分布が生じ、これによって砥石に生じる熱変形や熱応力は研削過程に対して、たとえば被削材の仕上寸法精度を低下させたり、砥石を破壊させるなどの種々の影響を及ぼすものと考えられる。これら研削加工中における砥石の熱的挙動を定量的に検討するためには、砥石に流入する熱量を定量的に求める必要があり、また同時に研削点における砥石の温度を知る必要がある。従来の研究において砥石に流入する熱量や砥石内の温度を具体的に求めた例は見あたらないようである。本研究では砥石への供給熱量と砥石内の温度分布(砥石研削面温度も含む)を、特に考案した、測定実験と数値解析を併用する方法によって求めた。

なお本研究の数値解析においては、砥石は等方均一性でその物質定数は温度によらず一定であると仮定した。

2. 供給熱量と温度分布の測定法

本研究においては、研削中の砥石内の1点の温度の測定実験と、この実験過程を再現した数値解析を併用する方法を用いた。砥石の内部の1点に熱電対高温接合部を埋設し、研削中における熱電対高温接合部の平均温度

(測定温度 T_m と呼ぶことにする)の時間的变化を記録する。一方、この実験過程を有限階差式を用いた数値解析模型によって熱電対の存在も考慮して再現し、任意の設定供給熱量 q' に対する熱電対高温接合部に相当する箇所の平均温度(測定相当点温度 T_m' と呼ぶことにする)を含めた各点の温度の時間的变化を計算する。いま、ある q' の値に対して得られた T_m' が、実験によって得られた T_m に一致したとき、このときの q' の値が実際の砥石への供給熱量 q_s に一致し、また同時に計算された温度分布も実際の温度分布であると判断した。

ただし数値解析においては、設定供給熱量 q' とこれに対応する各点の温度上昇は完全に比例するから、実際にはかならずしも $T_m' = T_m$ とする必要はなく、任意の q' とそれによる T_m' を用いて、 q_s を

$$q_s = \frac{T_m - T_0}{T_m' - T_0} \cdot q'$$

として求めることができる。ただし T_0 は室温で同時に砥石の初期温度である。また、測定実験においては室温からの上昇分を測定し、数値解析において $T_0 = 0$ とすれば、上の式のかわりに

$$q_s = \frac{T_m}{T_m'} \cdot q' \quad (1)$$

を用いることができる。

3. 実験方法

図1(a)は実験装置の構成の説明図である。実験は平面研削盤によるテーブル送りプランジ研削で行った。砥石の表面近くに銅-コンスタンタン熱電対の高温接合部を埋め込み、砥石から出た銅線およびコンスタンタン線

* 原稿受付 昭和50年11月19日。昭和47年度精機学会春季大会学術講演会(昭和47年4月6日)および昭和48年度精機学会春季大会学術講演会(昭和48年4月6日)にて発表。

** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

図1 温度測定実験装置の説明図

図2 実験装置の外観

は、フランジ締付けナットを兼ねたアダプタに導く。ここでコンスタンタン線は別の銅線と低温接合部を形成し、2本の銅線はスリップリングを介して記録計に導いた。記録は電磁オシログラフで行った。砥石の温度は室温からの上昇分を測定するため、熱電対低温接合部をアダプタの穴から空气中に露出させた。被削材の幅は、砥石の幅18mmよりもわずかに小さく16mmとし、砥石の幅の中央部分では2次元的な温度分布が期待できるようにした。

図1(b)は温度測定部の説明図である。砥石の外周から1.5mmの位置に、直径1mm、深さ13mmの円柱形の穴を超音波加工によってあけ、そこに直径1mm、長さ10mmの熱電対高温接合部を圧入して、穴の入口部分を接着剤で充てんした。熱電対高温接合部は、直径0.3mmの直線状のコンスタンタン線に、直径0.3mmの銅線を密着するようにコイル状に巻きつけ、さらに銅電鍍加工したものを直径1mmの円柱形に仕上げた。また砥石に圧入する際には、砥石との密着性をよくするため、砥石を炉内において200°C前後に加熱しておき、はんだで表面を覆った高温接合部を手早く圧入した。熱電対高温接合部の長さは、砥石外周面からの距離に比べて十分長いため、この位置における砥石内の温度分布も2次元的であるといえる。

この実験装置の外観を図2に示す。

熱電対の較正は、砥石に埋め込む前の銅-コンスタンタン熱電対を用いて、0~70°Cの範囲で行った。

4. 実験過程の数値解析模型による再現

4.1 数値解析模型

前節に述べた実験過程を、有限階差式を用いた数値解析模型によって再現した。前節の実験過程においては、熱電対高温接合部の近傍を含めた砥石内の温度分布は2次元的であると考えることができる。そこで図3(a)に

示すように、熱電対高温接合部を含めた砥石の外周側の一部を、半径方向の長さ Δr 、円周方向の角度 $\Delta\theta$ をもつ($m \times n_{\text{total}}$)個の環形の一部の形状の有限要素に分割して2次元模型で表した。砥石軸に平行な方向の長さはすべて単位長さとして、要素 (i, j) の外側の境界面の面積を $S_o(i)$ 、内側のそれを $S_r(i)$ 、体積を $V(i)$ とした。

熱電対高温接合部は、銅とコンスタンタンから構成されるが、銅の部分の体積が接合部の91%を占めることから、砥石の物質定数に比べて銅とコンスタンタンの物質定数が近い値をもっていることから、熱電対高温接合部は銅のみから成るとして扱った。また熱電対高温接合部の断面は面積0.785mm²の円形であるが、これを面積0.737mm²の環形の一部の形状として扱った。熱源にさらされていない砥石の表面は、空気によって冷却されているものとした。

各要素内の温度は一樣であり、時間 Δt ごとに温度が変化するものとし、熱伝導および熱伝達はいずれも境界を通して行われるものとした。

以上の数値解析模型において境界条件を考えると、各要素は図3(b)に番号で示した10種類のグループに分けることができる。

4.2 各要素の温度の計算法

グループ③に属する、砥石内の一般的な要素 (i, j) と、これに隣接する4つの要素の温度をそれぞれ $T(i, j)$ 、 $T(i, j-1)$ 、 $T(i, j+1)$ 、 $T(i-1, j)$ 、 $T(i+1, j)$ とすると、時間 Δt 後における要素 (i, j) の温度 $T'(i, j)$ は、砥石の温度伝導率 a_s (a は温度伝導率を、サフィックス s は砥石のものであることを表す)を用いて、

$$T'(i, j) = T(i, j) + \frac{a_s \cdot \Delta t}{V(i)} \left[\frac{\Delta r}{r(i) \cdot \Delta \theta} \{T(i, j-1) - T(i, j)\} + \frac{\Delta r}{r(i) \cdot \Delta \theta} \{T(i, j+1) - T(i, j)\} \right]$$

図3 砥石の数値解析模型

$$+ \frac{S_o(i)}{\Delta r} \{T(i-1, j) - T(i, j)\} \\ + \frac{S_I(i)}{\Delta r} \{T(i+1, j) - T(i, j)\},$$

$$i=2 \sim n-1, j=1 \sim n_{\text{total}}$$

ただし $(i=I_{m1} \sim I_{m2}$ かつ $j=n-1 \sim n+1)$ のぞく (2)

となる。グループ⑨の要素については式(2)のサフィックスを銅のサフィックス m で置きかえることによって求められる。

グループ①の要素は外側の面が空気によって冷却されているから、

$$T'(1, j) = T(1, j) + \frac{a_s \cdot \Delta t}{V(1)} \left[\frac{T(1, j-1) - T(1, j)}{r(1) \cdot \Delta \theta} \cdot \frac{\Delta r}{2} \right. \\ + \frac{T(1, j+1) - T(1, j)}{r(1) \cdot \Delta \theta} \cdot \frac{\Delta r}{2} + \frac{T(2, j) - T(1, j)}{\Delta r} \cdot S_I(i) \\ \left. + \frac{h_s}{k_s} \{T_0 - T(1, j)\} \cdot S_o(1) \right], \quad j=1 \sim n_{\text{total}} \quad (3)$$

となる。ただし k は熱伝導率, h_s は砥石に対する空気の熱伝達率である。

グループ②の要素は、空気による冷却のかわりに設定供給熱量 q' の強さの熱源にさらされているから、式(3)の最後の項 $(h_s/k_s) \{T_0 - T(1, j)\} \cdot S_o(1)$ を、 $(q'/k_s) \cdot S_o(1)$ によって置きかえることによって求められる。

グループ④の要素は、要素の右下(左下)が銅の部分

で、残りが砥石から成る要素であるから、

$$T'(i, j) = T(i, j) + \Delta t \left\{ \frac{T(i, j+1) - T(i, j)}{r(i) \cdot \Delta \theta} \cdot k_s \cdot \Delta r \right. \\ + \frac{T(i, j-1) - T(i, j)}{r(i) \cdot \Delta \theta} \cdot \frac{k_s + k_m}{2} \cdot \Delta r \\ + \frac{T(i-1, j) - T(i, j)}{\Delta r} \cdot k_s \cdot S_o(i) \\ + \frac{T(i+1, j) - T(i, j)}{\Delta r} \cdot \frac{k_s + k_m}{2} \cdot S_I(i) \left. \right\} \\ \left/ \left[\frac{k_s \left\{ V(i) - \frac{V_I(i)}{2} \right\}}{a_s} + \frac{k_m \cdot \frac{V_I(i)}{2}}{a_m} \right] \right., \\ i=I_{m1}, j=n-1 \text{ または } n+1 \quad (4)$$

となる。ただし $V_I(i)$ は、要素 (i, j) をその中心を通る円周で2分したときの内側の体積である。グループ⑤、グループ⑥、グループ⑦、グループ⑧の要素については、銅の含まれる位置とその体積を考慮して式(4)に準じた形で求められる。

グループ⑩の要素は、砥石の内部に任意に設定した境界上の要素であり、これらの要素の温度は先に計算した外側の要素の温度 $T'(m-1, j)$, $T'(m-2, j)$ から外挿によって

$$T'(m, j) = \frac{\{T'(m-1, j) - T_0\}^2}{T'(m-2, j) - T_0} + T_0, \quad j=1 \sim n_{\text{total}} \quad (5)$$

として求めた。

図4 $q' = 1 \times 10^{-3} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{s}$ とした場合の砥石の2次元的温度分布

測定相当点温度 T_m' は, 熱電対高温接合部の中央部の温度であるから,

$$T_m' = T' \left(\frac{I_{m1} + I_{m2}}{2}, n \right) \quad (6)$$

で求められる。

以上のようにして得られた各要素の時間 Δt 後の温度 $T'(i, j)$ を新たに $T(i, j)$ として計算を繰返すことにより, 各時刻における各点の温度が得られる。

砥石内での熱の伝導に比べて研削速度が大きいため, 砥石内での熱の流れはほぼ半径方向に限られて砥石内の等温線がほぼ同心円になることは, 熱源の移動を考慮した数値解析の結果(図4)から明らかである。そこで, ここの数値解析においては熱源を考える際に, 円周方向での時間の差は考慮に入れないで, 表面上の全要素はすべて同時に加熱され, 続いてまた同時に冷却されるものとした。

5. 砥石への供給熱量と砥石温度分布

表1に示す研削条件の下で砥石温度の測定を行った。被削材はMnを0.90%含んだS15Cに近い鋼である。被削材の長さを303mmとし, テーブル送り速度を1m/minから5m/minまでの5段階に変化させたので, 研削時間は18sから3.6sまでの5段階に変化している。一方, 表1の実験条件に対応して, 表2に示す設定条件の下で数値解析を行った。砥石に関する熱定数 k_s および a_s は, WA80II砥石について, 高沢¹⁾にしたがって計算した。 k_s については, 砥石の外周に等しい長さの平板上を研削速度にほぼ等しい速度の空気流が存在する場合の乱流熱伝達率²⁾を用いた。熱電対高温接合部は, 4.1節で述べたように銅のみから成るとし, その断面積は 0.737 mm^2 とした。設定供給熱量は一律に $q' = 1 \times 10^{-3} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{s}$ とおいた。表2中の t_{cut} は切削時間(砥石の外周上の1点が被削材と接触する時間)であり, t_{ime} は砥石の回転周期である。

表1 実験条件

(a) 研削条件

砥石	WA 80 II
砥石直径	172 mm
砥石回転数	2 000 rpm
研削速度	1 080 m/min
砥石切込み深さ	14 μm
被削材	低炭素鋼 ((b) 参照)
被削材幅	16 mm
被削材長さ	303 mm
テーブル送り速度	1, 2, 3, 4, 5 m/min
研削時間	18.18, 9.09, 6.06, 4.545, 3.636 s
研削方式	上向き研削
研削液	乾式研削

(b) 被削材

化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
	0.16	0.28	0.90	0.011	0.013	0.14	0.07	0.19	0.03	tr
熱処理	焼きならし					焼きもどし				
	910°C 1 h 空冷					650°C 1 h 空冷				
機械的性質	引張試験 (4号試験片)						かたさ (H_V)			
	降伏点 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	伸び (%)	絞り (%)	絞り (%)	絞り (%)				
	A	30.0	51.6	37.9	68.0	68.0	156			
	B	31.5	51.8	36.5	69.2	69.2				

図5 は測定記録結果の

例 (表3中に*印で示した)

を。 $v=3, 4, 5 \text{ m/min}$ の

場合の測定においては安定した測定結果が得られた。

$v=1, 2 \text{ m/min}$ の場合には研削過程が不安定

(過大な切込みが生じたり, 切りくずが生成され

ないなどの現象がみられた)で, 安定した測定結果

はおのおの1例しか得られなかった。図5に示

されるように研削中は測定温度 T_m が研削時間

とともに上昇するが, 研削が終了した後は T_m が下がりはじめる。

図6は実験過程を再現した数値解析によって得られた測定相当点温度 T_m' の時間

的变化の例を示したものである。

測定温度 T_m と測定相当点温度 T_m' とから, 式(1)を用いて砥石への供給熱量 q_s を求めた。 T_m と T_m' はお

おの時間的に変化しているため式(1)の適用に際しては,

表2 数値解析における設定条件

$m=20, n_{\text{total}}=2\,000$
$I_{m1}=6, I_{m2}=10$
$D=172 \text{ mm}$
$k_s=6.5 \times 10^{-1} \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
$k_m=3.32 \times 10^2 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
$a_s=1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$
$a_m=4.04 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{h}$
$h_s=6.55 \times 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
$\Delta r=0.2 \text{ mm}$
$\Delta \theta=0.18^\circ$
$\Delta t=8.605 \times 10^{-5} \text{ s}$
$t_{\text{cut}}=8.605 \times 10^{-5} \text{ s}$
$t_{\text{ime}}=3 \times 10^{-2} \text{ s}$
$T_0=0^\circ\text{C}$
$q'=1 \times 10^{-3} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{s}$

図5 砥石温度の測定記録結果

$$q' = 1 \times 10^{-3} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{s}$$

図6 砥石温度の数値解析結果

$v=4, 5 \text{ m/min}$ ではその最高値を用い、 $v=1, 2, 3 \text{ m/min}$ では計算時間の都合から途中の特定時刻における値を用いた。表3はこれらの数値を示したものである。こうして得られた砥石への供給熱量 q_s のテーブル送り速度 v に対する変化を表したのが図7である。砥石への供給熱量 q_w は、テーブル送り速度の増加にともなってほぼ直線的に増加することがわかる。

ここで得られた砥石への供給熱量を用いて、4節で述

表3 砥石への供給熱量の算出

v ($\frac{\text{m}}{\text{min}}$)	判定時刻 (s)	判定時刻における T_m ($^{\circ}\text{C}$)	判定時刻における T_m' ($^{\circ}\text{C}$)	$\frac{T_m}{T_m'}$	$q_s = q' \cdot \frac{T_m}{T_m'}$ ($\frac{\text{kcal}}{\text{mm}^2 \cdot \text{s}}$)	q_s 平均 ($\frac{\text{kcal}}{\text{mm}^2 \cdot \text{s}}$)
1	6.3	*2.17	11.94	0.18	0.18×10^{-3}	
2	6.3	*9.23	11.94	0.77	0.77×10^{-3}	
3	6.6	*13.0	12.13	1.07	1.07×10^{-3}	1.16×10^{-3}
	6.6	13.6	12.13	1.12	1.12×10^{-3}	
	6.6	14.1	12.13	1.16	1.16×10^{-3}	
	6.6	16.8	12.13	1.38	1.38×10^{-3}	
	6.6	13.0	12.13	1.07	1.07×10^{-3}	
4	5.4	*15.7	9.55	1.64	1.64×10^{-3}	1.45×10^{-3}
	5.4	14.65	9.55	1.53	1.53×10^{-3}	
	5.4	11.4	9.55	1.19	1.19×10^{-3}	
5	4.5	*13.6	7.87	1.73	1.73×10^{-3}	1.73×10^{-3}
	4.5	13.6	7.87	1.73	1.73×10^{-3}

図7 テーブル送り速度と砥石への供給熱量

べた数値解析を行うと、各時刻における砥石内の温度分布が得られる。こうして得られた $v=5 \text{ m/min}$ の場合の砥石内の温度分布を、室温を基準として横軸に砥石外周からの半径方向の深さをとり、研削時間をパラメータとして表したのが図8である。

一方、研削点近傍における砥石の温度分布を求めるためには、砥石の外周上を熱源が移動する模型を考えなければならない。図9はこうして得られた $v=5 \text{ m/min}$ の場合の研削開始後 $9.4 \times 10^{-5} \text{ s}$ (砥石 3.13×10^{-3} 回転、熱源の移動距離 1.69 mm)における研削点近傍の砥石の温度分布を、横軸に砥石外周上の位置をとり、半径方向の深さをパラメータとして表したものである。この時刻において研削点近傍の砥石の温度分布は、砥石の1回転以内における定常状態となっている。この場合の砥石研削面温度の最高値は 71.9°C である。1回転後の各時刻における温度分布は図9の値に、図8に示した砥石外周上の温度を加算することによって知ることができる。

図8 砥石の温度分布

図9 研削点近傍の砥石の温度分布

6. 熱電対の存在による測定温度への影響

温度勾配があり、しかもそれが時間的に変化する場合の温度を測定する際には、温度計の存在が測定結果に及ぼす影響は小さくないと思われる。そこで実際には存在する熱電対を無視することによる影響と、4.1節において断面積 0.785 mm^2 の熱電対高温接合部を断面積 0.737 mm^2 として扱ったことによる影響を、 $v = 5 \text{ m/min}$ の場合について検討した。表4は、断面積 0.737 mm^2 の高温接合部が存在するものと、存在しないものについての測定相当点温度 T_m' の時間的変化を示したものである。

仮に高温接合部の存在による T_m' の値の低下が高温接合部の断面積に比例するものと考えて、高温接合部を無視した場合、 0.737 mm^2 とした場合、 0.785 mm^2 とした場合の T_m' をそれぞれ、 T_{m0}' 、 T_{m1}' 、 T_{m2}' とおくと、 p を比例定数として

$$T_{m1}' = T_{m0}' - 0.737p, \quad T_{m2}' = T_{m0}' - 0.785p \quad (7)$$

と考えることができる。表4に基づいて $T_{m0}' = 8.887$ 、 $T_{m1}' = 7.865$ を式(7)に代入すると、 $T_{m2}' = 7.798$ を得る。これらに対応して q_s を計算すると、 $q_{s0} = 1.53 \times 10^{-3}$ 、 $q_{s1} = 1.73 \times 10^{-3}$ 、 $q_{s2} = 1.74 \times 10^{-3}$ となる。 q_{s2} がここで考えられる最も正しい q_s の値である。これに対する q_{s0} の誤差 e_0 と、 q_{s1} の誤差 e_1 を求めると、 $e_0 = -0.121$ 、 $e_1 = -0.006$ を得る。すなわち、高温接合部の存在を無

表4 T_m' の比較

時間 (s)	T_m' (°C)	
	熱電対高温接合部のあるもの	熱電対高温接合部のないもの
0.3	6.977×10^{-2}	4.581×10^{-2}
0.6	4.087×10^{-1}	3.945×10^{-1}
0.9	9.357×10^{-1}	1.002
1.2	1.558	1.731
1.5	2.226	2.508
1.8	2.911	3.298
2.1	3.598	4.084
2.4	4.279	4.857
2.7	4.950	5.612
3.0	5.607	6.349
3.3	6.250	7.066
3.6	6.879	7.764
3.9	7.460	8.425
4.2	7.776	8.810
4.5	*7.865	*8.887
4.8	7.830	8.803

*は最高値

$q' = 1 \times 10^{-3} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{s}$
 $v = 5 \text{ m/min}$

視すると q_s の値に -12.1% の誤差が生じ、これは無視できない。また4.1節の数値計算の結果による q_s の誤差は -0.6% であり、砥石への供給熱量の精度としては十分である。

7. 結 論

本研究の結果、次のことが結論として得られた。

- (1) 測定実験と数値解析とを併用する方法によって砥石への供給熱量と砥石の温度分布（砥石研削面温度を含む）を求めることができた。
- (2) ここで用いた方法の利点は次の通りである。
 - a) 1回の研削による測定で砥石の温度分布が求められる。
 - b) 熱電対の存在による誤差を改善することができる。
 - c) 要素の細分化により、砥石表層の温度が求められる。
- (3) 熱電対を用いた砥石の温度の測定においては、温度計の検出部の存在が測定結果に与える影響は無視できない。

参 考 文 献

- 1) 高沢孝哉：研削熱の加工物への流入割合——研削温度に関する理論解析（第2報），精密機械，30，12（1964）914。
- 2) 日本機械学会編：機械工学便覧，改訂第4版（1960）11-24。