研削面表層温度分布の理論とその測定法*

——研削温度に関する理論的解析 (第1報)——

高 沢 孝 哉**

Theory and Measuring Method of the Temperature Distribution
in Ground Surface Layer

——Theoretical Analyses on the Grinding Temperature (1st Report)——

Koya TAKAZAWA

Theoretical analyses of the grinding temperature have been attempted by many investigators, but are not sufficient.

In this report, first, the technical problems on measuring method of the temperature distribution in ground surface layer are explained and the measured results are shown.

And then, the theory of its temperature distribution is explained and the problems to be considered when applying this are pointed out.

Theoretical equation of the temperature distribution in ground surface, obtained by applying Jaeger's heat transfer theory involving a moving heat source, in as follows.

$$\theta_{z\max} \cdot \frac{\pi k v}{2 \alpha q K} = 3.1 L^{0.53} e^{-0.69 L^{-0.37} Z}$$

where

$\theta_{z\max}$: the peak temperature at any point in ground surface layer

v : the work speed

k : the thermal conductivity of the workpiece

K : the thermal diffusivity of the workpiece

α : the flowing rate into the work of the heat capacity generated by grinding

q : the heat capacity per unit area generated by grinding

$L = v l / 2 K$, $Z = v z / 2 K$

l : the contact arc length between the grinding wheel and the work

z : the depth from the ground surface.

When numerical values are used, they are always in c. g. s. units.

By this equation, the influence of the grinding conditions on the temperature distribution in ground surface layer is able to be investigated.

1. 結 言

研削温度の理論的解析は、従来砥粒研削点温度（砥粒切れ刃と加工物との接触点における温度）、砥石研削点温度（砥石と加工物との接触面における温度であり、研削表面温度の一部とも言える）および研削面表層温度分布の3つの場合について行なわれている。M. C. Shaw¹⁾は、まず砥粒研削点温度を論じ、研削作用を理解する上に重要な結論を出し、佐藤²⁾は、砥石研削点温度について詳細な解析を行ない、さらに研削面表層温度分布につい

ても種々の考察を加えた。また、W. E. Littmann³⁾は研削面表層温度分布を実測し、研削エネルギーと研削面表層温度分布との関連について論じている。С. Г. Редько⁴⁾は砥粒切れ刃の作動の中に摩擦項を導入して砥石研削点温度について論じている。このように、研削温度の理論的解析は次第に進められてきたが、研削機構の複雑性のゆえにその解析には種々の困難をともない、未解決の点がなお多く残されている。

研削温度の理論的解析を進めるには、まず、研削熱の加工物への流入割合などの熱分配について考察することが必要であり、このためには、砥粒切れ刃の作動について基本的な究明を行ない、研削エネルギーの中に当然、切削および摩擦に消費される割合を考慮して解析を進める必要がある。また、一たん加工物へ流入した熱が研削表

* 昭和34年4月精機学会春季大会学術講演会、昭和35年11月機械・精機学会連合仙台地方講演会にて発表

** 正会員 金沢大学工学部

面から空中への放散あるいは研削液による冷却効果によってどの程度うばわれるかを明らかにすることは、理論を設定するためにも、研削液の効果を明らかにするためにも必要である。

これらの問題点を明らかにするためには、まず、信頼性のある研削温度の測定法を確立し、実測を行なった結果について理論値と比較検討を行ない、理論に対し実用的な修正を行なう方法をとるのが良いと思われる。

本報では、まず、研削面表層温度分布の測定法について説明し、つぎに研削面表層温度分布について理論的考察を行なった結果を述べ、さらにその理論を適用するにあたって考慮しなければならない問題点にふれることにする。なお、論述の都合上、研削熱の加工物への流入割合については第2報において述べることにする。

2. 研削面表層温度分布の測定法

2.1 従来試みられた研削温度の測定法

研削温度には、その測定対象として4種類あってそれぞれ意義を異にする。

2.1.1 加工物全体の平均温度

これは、加工物の熱膨張に直接関係し、製品の加工寸法精度に直接影響を与えるものである。O. W. Boston⁹⁾は、表面温度計を用いて測定したが、簡便ではあるが精度を期待できない。

2.1.2 砥粒研削点温度

もっとも基本的なものであり、砥粒切れ刃の作動状態を説明し、研削理論上重要な意義をもつものである。M. C. Shaw⁶⁾、佐藤⁷⁾は、砥石(C系)と加工物とによって熱電対を形成させ、砥粒切れ刃と加工物との接触部の温度上昇により生じた熱起電力を増幅して、砥粒研削点温度を測定した。この種の温度を求める方法としては原理的にすぐれているが、温度校正に難点があり、またA系砥石では測定できない欠点がある。

2.1.3 砥石研削点温度(あるいは研削表面温度)

これは、研削焼けや割れと関係があるものである。J. E. Meyer⁸⁾は、研削表面からの放射線を光電池にうけることにより測定したが、やはり温度校正に難点がある。

2.1.4 研削面表層温度分布

これは、研削加工変質層の生成機構、研削割れや製品の反りの問題などに関係がある。G. Kritzer⁹⁾は、プランジカット研削における定常伝熱状態の場合について加工物に等間隔に埋めこんだ多数の熱電対により測定した。正野崎¹⁰⁾は、平面研削の場合について研削表面下0.5mmの位置に埋めこんだ熱電対により測定した。し

かし、熱電対の先端の熱容量のため、温度の急激な変化に追従しにくく、また表層部の平均温度が測定されるものである。W. E. Littmann¹¹⁾は、平面研削の場合について研削表面の近傍まで裏から穴をあけ、その穴の底にコンスタンタン線を溶接し、加工物材料と熱電対を構成させ、連続研削により接点の温度変化をブラウン管オシロスコープにて記録し、研削面表層の温度分布の測定を行なった。

2.2 筆者による研削面表層温度分布の測定法

原理的にはW. E. Littmannの方法にしたがったが、できるかぎり理想的な温度測定を行なうために、改良工夫を加え測定条件を厳密化した。

図1は、研削面表層温度分布の測定装置説明図である。研削作業方式は横軸左右往復形平面研削盤によるもので、加工物の研削表面近傍(表面から約2mm)まで裏面から径1.5mmの穴をあけ、その穴の底にコンスタンタン線(0.6mm径で絶縁碍管をかぶせる)の先端を約10μmの半径にとがらし、板ばねを利用して一定の接触圧力により軽く接触させ、測定点になるべく点に近い状態における温度測定をねらった。このような考慮は、研削面表層温度分布の理論値と比較するために必要である。このようにして、加工物材料とコンスタンタン線により熱電対回路*を形成せしめ、研削時の接点の加熱により生じた熱起電力を直流増幅した後、ブラウン管オシロスコープにいて記録する。連続研削により順次砥石切込みを加えれば、砥石は次第に接点に近づき、ついには接点を切断するまで研削を続けて、その記録から研削面表層部の温度分布が求められる。記録される温度は、厳密には接点の大きさが関係し、その接触部分の平均温度で

図1 研削面表層温度分布の測定装置説明図

* この場合、加工物からこれと同一材料の導線を引き出し、冷接点を加工物から遠ざけることにより、加工物温度上昇の影響のないようにした。

図5 熱起電力-温度校正曲線および校正装置説明図

が、大和久¹²⁾の熱起電力の測定による材料鑑別法に関する研究によれば、その影響は 0.2mV くらいのちがいであり、あまり問題にならないものと考えられる。しかし、研削面表層の温度分布の理論値と実測側とを比較検討する場合には、このような影響を考慮して焼ならし状態の試料を用いた。

3. 研削面表層温度分布の理論

3.1 従来の考え方

佐藤¹³⁾は、半無限体の表面に与えられた瞬間熱源の考え方と、表面温度一定と考えた場合の熱伝導による内部温度の上昇の考え方の2つの場合について解析を行なった。

すなわち、前者の考え方による理論式はつぎに示すようである。

$$\theta_x = \frac{q'}{nc\rho \sum_{n=1}^{\infty}} \exp\left[-\frac{x^2}{4K\{t_m + 2(n-1)\tau_o'\}}\right] / \sqrt{\pi K\{t_m + 2(n-1)\tau_o'\}}$$

ここで

$q' (= \alpha q)$: 研削熱の単位面積あたりの加工物への流入熱量, α : 研削熱の加工物への流入割合, q : 研削熱の単位面積あたりの発生熱量, c, ρ, K : 加工物材料の比熱, 比重および温度伝導率, x : 研削表面からの深さ, $n = \tau_o/\tau_o', \tau_o = l/v, \tau_o' = l/V, l$: 砥石と加工物との接触弧長さ, v : テーブル送り速度, V : 砥石周速度

この考え方はすぐれたものであるが、計算がかなり面倒である。

なお、後者の考え方は、半無限体の表面が θ の温度

にさらされたとき、時間 t の後における研削表面から x の深さの点の温度 $\theta_{x,t}$ をつぎの式によって与えている。

$$\theta_{(x,t)}/\theta = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Kt}}} e^{-\beta^2} d\beta$$

この理論式は、ごく表面近くの温度分布によく合うようであるが、 θ の考え方に問題がある。

3.2 筆者の考え方

筆者は、Jaeger¹⁴⁾の移動熱源の考え方を基本として研削面表層温度分布の理論式を誘導し、さらにこの理論式を解析して温度分布の数値を計算によらないで、簡単に求めることのできるグラフを作成した。

いま、研削面表層における任意の点の温度を $\theta_{(z,x)}$ とすれば、Jaeger の理論を応用してつぎのように表わすことができる。

$$\theta_{(z,x)} = \frac{2}{\pi} \alpha \left(\frac{TV}{2JlB} \right) \cdot \frac{K}{k} \cdot \frac{1}{v} \int_{X-L}^{X+L} e^{-u} K_0(u^2 + Z^2)^{1/2} du \quad (1)$$

ここで

z : 研削表面からの深さ, x : 砥石と加工物との接触弧の中心を原点とした場合の研削方向への距離, T : 水平研削抵抗分力, B : 加工物試料の幅, J : ジュールの仕事当量, k : 加工物材料の熱伝導率, $X = vx/2K, L = vl/2K, Z = vz/2K, K_0$: 零次の第2種変形ベッセル関数, その他の記号は前述どおり。

図6は、 $L=1$ の場合について Z をパラメータとする $\frac{\pi kv}{2\alpha q K} \cdot \theta_{(z,x)}$ と x/l との関係を示すグラフである。 L の種々の値の場合について、このようなグラフを作成しておけば、研削面表層における温度変化の様子を理論的に解析することができる。

図7は、式(1)中の積分項について数値積分*を行な

図6 $\frac{\pi kv}{2\alpha q K} \cdot \theta_{(z,x)}$ と x/l との関係 ($L=1$ の場合)

図7 $\frac{\pi kv}{2\alpha qK} \cdot \theta_{zmax}$ と Z との関係

い、 L の種々の値の場合について、 $\frac{\pi kv}{2\alpha qK} \cdot \theta_{zmax}$ (研削面表層のピーク温度に関する無次元量) と Z との関係を示したものである。このようにして求めたグラフから、理論的に研削面表層のピーク温度分布を求めることができる。

なお、図7のグラフは縦軸を対数目盛とする半対数グラフ上で、両者の関係を求めるとほぼ直線的となり、これから関係式を求めるとつぎのようである。

$$\theta_{zmax} \cdot \frac{\pi kv}{2\alpha qK} = 3.1L^{0.53}e^{-0.69L^{-0.37}Z} \quad (2)$$

この式(2)について、テーブル送り v を変えた場合、 θ_{zmax} が研削表面からの深さ z に対してどのように変化するかを考察する。

いま、 v および z 以外のすべての条件を一定とすれば、 $q \propto v^{0.76}$ ¹⁵⁾、 $Z(=vz/2K) \propto v$ 、 $L(=vl/2K) \propto v$ であり、 α は v によってほとんど影響されないものと考えれば

$$\theta_{zmax} \propto v^{0.29}e^{-Av^{0.63}z} \quad (3)$$

ここで、 A : 定数

この式において、 $z=0$ とすれば、 $\theta_{(z=0,max)} \propto v^{0.29}$ となり、砥石研削点温度についての佐藤¹⁶⁾の結論と一致する。なお、式(3)の右辺の第1項は v に対する増加関数であり、第2項は v に対する減少関数である。 $z=0$ あるいは z が小さい範囲 (研削表面に近い部分) では第1項

図8 研削面表層温度分布におよぼすテーブル送り速度の影響

が支配的となり、 v が大きいほど θ_{zmax} は高いが、 z が大きくなる (研削表面からより深い部分) と第2項の方が支配的となり、 v が大きいほど θ_{zmax} が低くなり、図8に示すような傾向となるものである。

なお、砥石切込み Δ については、 $q \propto \Delta^{0.38}$ ¹⁷⁾、 $L \propto \Delta^{0.5}$ であるから

$$\theta_{zmax} \propto \Delta^{0.64}e^{-B\Delta^{-0.18}z} \quad (4)$$

ここで、 B : 定数

となり、 θ_{zmax} は Δ に対し第1項、第2項ともに増加関数である。

砥石周速度 V については、 $q \propto V^{0.24}$ ¹⁸⁾ であるから

$$\theta_{zmax} \propto V^{0.24}e^{-Cz} \quad (5)$$

ここで、 C : 定数

となり、 θ_{zmax} は V に対して単調な増加関数である。

4. 上記理論を適用するにあたって考慮すべき事柄

研削面表層温度分布の実測値と上記理論による計算値とを比較検討する場合、以下述べるような種々の考慮すべき問題点がある。

4.1 研削面表層の温度分布におよぼす加工物温度上昇の影響

すでに、図3について説明したように、前回の研削により到達したピーク温度より冷却を始めて室温まで下りきらないうちに、つぎの研削が行なわれる。この研削直前の温度は、それまでの研削により加工物へ流入し、なお加工物に残留する研削熱による温度上昇と考えてよい。この加工物の温度上昇が実測された研削面表層の温度分布に影響することは当然であって、実測値と理論値との比較を行なう場合、考慮しなければならない点である。また、研削液の冷却性能が加工物の温度上昇を支配するものであり、したがって研削液の冷却効果を論ずる場合にも見のがすことのできない問題点である。

研削面表層の温度分布におよぼす加工物の温度上昇の

* まず、 $f(u, Z) = e^{-uK_0(u^2 + Z^2)^{1/2}}$ とおき、 $Z(=0 \sim 5)$ をパラメータとして $\{f(u, Z), u\}$ のグラフを求める。つぎに $L(=1 \sim 10)$ の場合について、種々の $X/L = x/l$ を与えて、Simpson の法則を適用し数値積分を行なう。

影響を考えると、常識的には実測された温度分布は、それまでの研削にもとづく加工物の温度上昇に最後の研削による温度上昇を加算したものとほぼ考えてよい。

このような考え方にもとづいて、つぎのような実験を試みた。すなわち、連続研削を行なって研削面表層の温度分布を実測した結果から、加工物の温度上昇を差し引いて求め得た温度分布（以下、これをA分布と称する）と一回の研削ごとに水道水を注加して加工物を室温にまで十分冷却しながら実測した温度分布（以下、これをB分布と称する）との比較を行ない、これらが一致するかどうかを検討するわけである。

加工物として焼ならし状態の炭素工具鋼第7種、四六黄銅を用いて、各種砥石切込みにて乾研削を行なった場合の実験結果の一例が図9である。

図中に示された加工物温度は、研削表面からの深さに応じてプロットされているが、研削を開始した直後急激な温度上昇を示し、その後ほとんど定常な状態に達す

(a)

(b)

図9 研削面表層温度分布におよぼす加工物温度上昇の影響

図10 鋼の比熱および熱伝導率の温度変化

る。図に示されるように、A分布とB分布とは実験誤差をとまなげて多少のくいちがいはあるが、ほぼ一致するものと考えてよい。ただし、図10*に示されるように、加工物材料の熱常数は温度によって変化するため、厳密にはこのような補正を行わなければならない。すなわち、とくに研削表面近く温度の高いところでは、A分布とB分布との間に多少のくいちがいがみられるはずで、実験結果についてもそのような傾向がみられる。

以上の実験から、研削面表層温度分布の理論値と比較する場合には、A分布を対象として扱えばよく、ただしこの場合加工物材料の熱常数の温度補正を必要とするが、このような補正は実際上むずかしい。

4.2 Jaeger の理論を適用する場合の問題点

前述の研削面表層温度分布の理論では、熱源の強さは砥石と加工物との接触面内において一様であるという仮定をおいた。しかし、実際にはこれと異なり多くの砥粒切れ刃が作用しているため、厳密には接触面内においてアランダムに分布する多数熱源を考えなければならない。したがって、研削面表層の温度分布を論ずる場合、研削表面から比較的はなれたところについては一様熱源として考えてもよいが、表面にごく近くなると厳密には多数熱源としての影響を考慮しなければならない。この点については、実験的検討**の結果、一様熱源と考えて

* このグラフはASM: Metal Hand Book (1948) 203に掲載されているものである。ここでは鋼の一例を示したが、黄銅についても同様である。

理論としてほぼ十分であることが明らかにされた。

つぎに、本研究に適用した Jaeger の理論は、移動方向にある幅をもった無限に長い帯状熱源が半無限体の表面を移動する場合を仮定している。研削状態では、熱源の長さは有限であり、加工物も半無限体ではない。しかし、試料の側面は一応熱絶縁を施してあり、加工物の幅を一度に研削するので、無限に長い帯状熱源と考えてよい。また、研削の開始される加工物の端から接点までの移動距離中に定常な温度分布状態に達するかどうかについては、Jaeger の理論で述べられているところの有限距離から走りきった熱源による温度上昇の考え方により検討した結果、実験条件の範囲では、無限距離から走りきった熱源として扱ってよいことが明らかにされた。

さらに、研削の場合、研削熱の加工物への流入割合や研削表面からの空中あるいは研削液へうばわれる熱量を考慮しなければならない点が複雑である。この問題については、第 2 報以下において述べることにする。

4.3 研削面表層温度分布の実測値に対する検討

本研究で用いた測定法では、加工物試料の裏側から研削表面へ向って、コンスタンタン線を挿入するための約 1.5 mm 径の穴をあける必要があるが、この穴の存在のため熱の伝導がさまたげられて温度が高目となる可能性があることである。これについては、絶縁導管として銅の熱伝導率にほぼ近い値をもつ酸化ベリウムを用いることにより、幾分解決されるであろう。

さらに、コンスタンタン線と加工物との接点の大きさが約 20 μ 径の円であり、測定される温度は厳密にはこの接点内の平均温度であるから、理論によって表現される温度よりもやや低目になるはずであるが、実際にはほとんど問題とならない程度である。

なお、理論値と実測値との比較検討を行なう場合には、試料としてなるべく熱変態をもたないものが望ましい。とくに焼入れ処理を施した炭素鋼は、焼きもどしにより熱伝導率にかなりの変化を生じ、また変態にともなう発熱、吸熱反応を考慮するとすれば、理論上きわめて取り扱いにくく、その解析は単純なものではない。

5. 結 言

本報では、まず、研削面表層温度分布の測定法についての技術的な問題点について説明し、つぎに研削面表層の温度分布について理論的考察を行なった結果を述べ、さらにその理論を適用するにあたって考慮しなければならない種々の問題点にふれた。

このような測定法による実測値と理論値との比較検討を行なった結果については、第 2 報において研削熱の加工物への流入割合について理論的考察を行なった後、触れることにする。

最後に、本研究に対しご指導戴いた東北大学教授佐藤健児博士、小坂研究所長小坂誠市郎博士、また、研削面表層温度分布の測定法の問題点の解決に協力された金沢大学助教授横山恭男博士に対し、厚くお礼申し上げます。

(1964, 5 月 9 日受付)

参 考 文 献

- 1) I. O. Outwater and M. C. Shaw : Surface Temperatures in Grinding., Trans. ASME, Vol. 74, No. 1 (1952) 73.
- 2) 佐藤健児：研削理論（第 6 報）研削切り屑の温度と研削面の温度，精密機械，19 卷 4 号 (1953) 154.
佐藤健児：研削温度の理論に関する諸問題，機械の研究，8 卷 11 号 (1956) 1107，同 8 卷 12 号 (1956) 1217.
- 3) W. E. Littmann and J. Wulff : Influence of the Grinding Process on the Structure of Hardened Steel, Trans. ASM, Vol. 47 (1955) 692.
- 4) С.Г.Редько : Расчёт Температуры Шлифующей Поверхности, Станки и Инструмент, 2 (1959) 26. (邦訳 機械の研究，12 卷 8 号 (1960) 1123.)
- 5) R. E. McKee, R. S. Moore and O. W. Boston : A Study of Heat Developed in Cylindrical Grinding, Trans. ASME, Vol. 73, No. 1 (1951) 21.
- 6) 前掲文献 1)
- 7) 佐藤健児：研削理論（第 7 報）真空管電位計による研削点温度の測定，精密機械，20 卷 2 号 (1954) 55.
- 8) J. E. Meyer and M. C. Shaw : Grinding Temperatures, Lubric. Engg., Jan. (1957) 21.
- 9) G. Kritzer : Wärmemessungen bei der Anfertigung von Metal-schleifen, Die Giesserei, 25 (1938) 14 (邦訳 工作機械に関する資料，7 卷 5 号，40)
- 10) 正野崎友信：機械工作油，小峰工業出版 (1952) 103.
- 11) 前掲文献 3)
- 12) 吉沢武男他：機械材料の試験と検査，日本機械学会編 (1956) 249.
- 13) 前掲文献 2)
- 14) J. C. Jaeger : Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contacts, Proc. Roy. Soc. New South Wales, Vol. 76 (1942) 203.
- 15) 佐藤健児：研削理論（第 4 報）研削抵抗の測定法と比研削抵抗，精密機械，17 卷 6 号 (1953) 173.
- 16) 前掲文献 13)
- 17) 前掲文献 15)
- 18) 前掲文献 15)

** (前頁の注) 第 2 報—研削熱の加工物への流入割合—において述べる。