3次元温度数値解析による研削エネルギー分配率の検討 (第2報)*

—— 研削温度分布に及ぼす測定法の影響とエネルギー分配率 ——

帯 川 利 之** 鹿 子 木 修*** 白 樫 高 洋**

Energy Flowing Rate into Workpiece in Surface Grinding Based on 3-D Temperature Analysis (2nd Report)
—Effect of Measuring Method on Temperature Distribution and Energy Flowing Rate into Workpiece—

Toshiyuki OBIKAWA, Osamu KAKOKI and Takahiro SHIRAKASHI

An estimation method of energy flowing rate into a workpiece in surface grinding was discussed. The temperature and its change in a workpiece were measured by a thermocouple insertion method. On the other hand, 3D temperature distribution and its change with grinding wheel travel were numerically analyzed by considering the thermocouple and hole for temperature measurement. Through the analysis the effects of hole diameter / depth on the temperature distribution and its change were precisely discussed. The larger hole diameter causes the higher temperature at the measuring point on the hole bottom. The deeper hole, in which a measuring position is near the ground surface, also causes the higher temperature. Thus the careless measurement and analysis of temperature cause the wide scatter of temperature. The energy flowing rates which were estimated based on the analyzed temperature without considering a measuring hole were widely scattered and increased with hole diameter. The rates exceeded 100% for the large diameter hole. The estimated rate using the precise temperature analysis considering the effect of hole size / depth on temperature was little affected by the hole size, and the rate was estimated about fifty percent irrespective of hole size.

Key words: grinding, energy flowing rate, 3D temperature analysis, thermocouple insertion method

1. は じ め に

研削加工は比研削エネルギーが大きく、この大部分は熱となり、加工される製品は熱による影響を受けやすい。研削エネルギーの製品への熱の影響を検討するためには、研削時に発生した熱エネルギーの製品への流入量を見積もることが不可欠である。研削エネルギーの総量は研削力を測定することで容易に見積もれるが、そのうち製品への流入量を見積もることは必ずしも容易ではない。事実、その見積を理論的、実験的に検討した報告では流入割合が20～90%の広範囲に分散しているが^{1)～5)}、その原因は工作物内の温度測定法にあるものと思われる。すなわち温度測定のため工作物内に微小孔を設け、これに熱電対を挿入する、あるいは孔底部からの赤外線放射を計測する、等のため工作物内の温度分布が孔の深さ、直径によって乱されることが予想される。それにもかかわらず、これを無視し、測定された温度分布をそのまま孔のない工作物内のものと見なして、以後の議論を行っている⁶⁾。

前報⁷⁾では、研削エネルギー分配率を求めるための予備段階として、測定法を考慮した3次元温度解析により、測定部分の温度は孔の直径、深さ、熱電対の有無によって大きな影響を受けることを指摘した。したがって細孔を利用した温度分布の測定はそのままでは孔のない場合のものと一致しないこと、また測定孔の直径・深さによりエネルギー分配率が大きく変化し、従来報告されている結果の正当性が疑わしいこと等を報告した。

本報告では細孔を利用した熱電対挿入法により、孔径、深さを種々に変えて、温度測定を行い、同時にこの状況に対応する3次元温度分布の数値解析を実行し、測定点周辺の詳細な温度分布とその推移を求めた。ついでこれらの結果と実測した研削力を基礎

データとし、研削エネルギー分配率を求めた。さらにこれを、測定法の影響を無視し解析した温度分布を基礎とする従来法によるエネルギー分配率と比較検討した。

2. 研削温度分布の測定法と解析モデル

研削時の工作物内の温度分布とその推移は研削点における工作物内への熱エネルギーの流入量、その移動速度、工作物の熱物性値、および周辺の熱環境によって定まる。したがって工作物内の任意点の温度やその推移が測定されれば、これを実現するのに必要な研削点に加えるべきエネルギー量は温度解析結果と比較することにより逆算される。

研削エネルギーの総量は研削力を直接測定することができるから、工作物内の温度を実現するのに必要なエネルギーとの比を求めれば工作物への流入エネルギー割合、すなわち研削エネルギー分配率が求まることとなる。

測定方法をも考慮して工作物内の温度分布を求めるためには、2次元的な平面研削を対象とする場合にも、測定系の詳細をモデル化した3次元温度解析を行う必要がある。温度分布の支配方程式は次式となる。

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) + \dot{S} \quad (1)$$

ここで θ は温度、 ρ は密度、 c は比熱、 κ は熱伝導率、 x は位置、 $\dot{S}$ は単位体積あたりの仕事率である。この方程式を数値解析する方法はいくつかあるが、本報告では Patankar の提案したコントロール・ボリュームを用いる方法を利用した⁸⁾。

温度測定は図1に示すように工作物内に細孔（直径0.5～1.5 mm）を設け、その底面に石英管で絶縁した直径0.2 mmのコンスタンタン線を溶接し、工作物・コンスタンタンで熱電対を形成する方法を用いた。これに対応する温度数値解析モデルと境界条件

* 原稿受付 平成9年6月27日

** 正 会 員 東京工業大学工学部（東京都目黒区大岡山2-12-1）

*** 学生会員 東京工業大学大学院（現、（株）東芝；川崎市川崎区浮島町2-1）

Fig. 1 Temperature measuring setup

Fig. 2 Calculation model for temperature distribution

を図2に示す。

境界条件は図2に示すように、研削面を3角形状に分布する帯状熱源が移動するものと想定し、その底辺の長さは研削条件から定まる砥石と工作物の接触長さとして一致させた。工作物表面は空冷（熱伝達係数は $200 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ）とし、細孔の内面については、孔内の空気は静止しているの、そこでの熱伝達係数を工作物表面での値の $1/20$ ($10 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$) とした。さらに熱電対に対しても熱伝導を考慮して温度分布を計算した。

なお熱源の形状は台形、矩形、指数関数としても工作物内の温度分布の差はほとんど認められなかった。使用砥石は WA80K7V、工作物はパーライト組織とした共析鋼 SK5 (0.8%C-steel) を用い、熱物性値は、前報で示したように温度の関数として示されたものを用いた⁹⁾。また総研削仕事 E は次式より求めた。

$$E = F_t(V_w + V_s) \quad (2)$$

ここで F_t は接線研削抵抗、 V_w は工作物速度、 V_s は砥石外周速度である。研削抵抗については図3の単位研削幅当たりの実測値を添図に示す $g = 2dV_w/V_s$ で整理し、次式で近似し用いた。単位は N/m である。また d は砥石の実切込み深さで、単位は m である。

$$\begin{aligned} F_t &= 2.2828 \times 10^3 + 1.3807 \times 10^{10} \times \left(\frac{2dV_w}{V_s} \right) \\ F_n &= 4.6071 \times 10^3 + 3.4051 \times 10^{10} \times \left(\frac{2dV_w}{V_s} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

 Fig. 3 Relation between $g = 2dV_w/V_s$ and grinding forces
Grinding conditions: workpiece, SK5 (annealed); wheel, WA80K7

3. 温度分布に及ぼす測定法の影響

まず温度測定法が温度分布に与える影響を定量的に把握するために、表1の研削条件と70%のエネルギー分配率を想定し、図3の研削力データを基礎に、測定孔のある場合とない場合の双方について温度分布の解析を行った。なお測定孔は直径1.5 mm、研削面からの深さは $100 \mu\text{m}$ を想定した。

Table 1 Calculating conditions

Hole diameter	1.5 mm
Depth of measuring point	$100 \mu\text{m}$
Table speed, V_w	10 m/min
Wheel depth of cut, d	$10 \mu\text{m}$
Room temperature	298 K
Energy flowing rate, R_w	70%
Heat source	Triangular heat source

図4は1パス研削の開始から終了に至る間の工作物表面、工作物中央断面のそれぞれの温度分布とその推移を測定孔の有無に対して示したものである。測定孔から離れた位置を研削しているときには、同図(a)に見るように工作物表面および内部の温度分布には孔の有無による差異は認められない。しかし測定孔がある場合には、研削点が測定孔の上にかかる、孔の上部の温度は孔のない場合に比して高温となり、最高温度は孔のない場合より50%も大となる。また同図(c), (d)に見られるように、孔の上部の研削が終了した後も、研削により生じた高温はしばらくの間残留する。この理由は孔を設けることにより、その点の工作物が薄くなり、見かけ上の体積が減少すると同時に、孔底が空気に接しているため冷却速度が極端に小さくなるためである。したがって見かけ上の体積を決定する孔の大きさ、孔から研削点までの距離（孔の深さ）はこの部分の温度上昇と温度分布およびその推移に大きな影響を与える。その結果として、熱電対挿入法により測定された孔の底部の温度は、同図の孔のある場合に対応するから、孔のない

Fig. 4 Effect of measuring hole on temperature distributions and their change

温度とは全く異なったものとなる。

図5は孔底に最高温度（熱電対法で測定される最高温度）が生じた瞬間における孔底と同一深さ(100 μm)での温度分布と孔径による分布の変化を示したものである。同図より明らかなように、孔底の温度は孔以外の部分の温度に比して高く、それらの温度差は孔径が大になるにしたがって著しく大きくなる。

図4, 5の結果からわかるように、工作物内に不用意に細孔を設けてその底部の温度を測定し、これまでの多数の報告のように、

これをそのまま孔のない工作物の温度と見なすことは大きな誤りを引き起こすこととなる。

4. 研削エネルギーの工作物内への分配率

研削時に与えられるエネルギーのうち工作物を加熱し、これに影響を与えるエネルギーの割合、すなわち工作物へのエネルギー分配率を知るためには工作物内の任意の点の温度を測定し、これ

Fig. 5 Effect of hole size on maximum temperature

を実現するに必要なエネルギー量を求めればよい。

温度測定は熱電対挿入法により行った。すなわち図1に示したように工作物に底面から細孔（直径0.5, 1.0, 1.5 mm）を設け、その中に石英管で絶縁した直径0.2 mmのコンスタンタン線を挿入し、孔の底部にスポット溶接し、工作物（SK5 パーライト組織）とコンスタンタンの熱電対を構成した。孔の底部から工作物表面までの距離（研削面からの測定点深さ）は、温度測定後、工作物を切断して工具顕微鏡により測定した。

まず多くの報告と同様に測定法が温度分布に影響を与えないものと想定した。そこで測定用の孔を無視した研削モデルで温度解析を行い、解析による測定点の最高温度と実測された最高温度とを比較することにより工作物へのエネルギー分配率を求めた。なお総研削仕事は砥石切込み深さ d を実測し、式(2), (3)より求めた。

図6はこれにより求めたエネルギー分配率と温度測定時の孔の直径との関係を示す。温度測定時の砥石切込み深さ、測定点の深さ等の条件を同一にそろえることが困難なため、同一の孔直径に対して分配率の分散が見られるものの、一般に孔径が増大するにしたがって分配率は大きくなる。特に注目すべきは孔直径が1 mmでは平均分配率が100%、さらに直径が1.5 mmに増大すると平均分配率が100%を大きく越えることである。これらの結果は研削エネルギーバランスの点からも明らかに誤りである。またばらつきは大きい、測定点深さとエネルギー分配率との関係を求める

と図示の曲線が得られる。測定点が研削表面に近づく程、エネルギー分配率は大きくなる傾向がある。

研削エネルギー分配率は測定法や測定点深さによって変化することは考えられない。したがって実測された温度が正しいとすれば、図6に示された結果は、測定孔がないものと想定した解析結果と測定された温度とを対応させたことに問題があることとなる。そこで測定孔の直径、深さ、コンスタンタン線の存在を考慮し、詳細に解析した図4の温度分布と実測値とを比較することにより、エネルギー分配率を求めた。

図7の●印は、測定法を考慮して解析した温度分布とこれと同一方法で測定した温度とに基づいて求めたエネルギー分配率と測定孔直径の関係を示す。なお図中の△印は測定孔の存在を無視した図6の結果を再掲したものである。同図より明らかなように、エネルギー分配率は、多少の分散はあるものの、測定孔の大きさにかかわらず、ほぼ一定の45~55%となっている。なお測定点深さによる分配率の変化はほとんど見られなかった。

間接的ではあるが、図7に示した分配率の妥当性を確認するための方法として、測定点の温度の時間推移を検討した。すなわち図7によって得られた分配率を基礎とし、図4に示したように測定孔の直径、測定点の深さを考慮した温度解析を行い、2, 3の研削条件における、温度測定点での計算温度と実測温度の推移を比

Fig. 6 Energy flowing rate without considering hole effect

 Fig. 7 Energy flowing rate with considering hole effect
 △ 2-dimensional model without considering a hole
 ● 3-dimensional model with a hole and a constantan wire

hole diameter, 1.0 mm; depth of measuring point, 88 μm ;
wheel depth of cut, 22 μm ; workpiece velocity, 10 m/min

hole diameter, 1.5 mm; depth of measuring point, 117 μm ;
wheel depth of cut, 29 μm ; workpiece velocity, 20 m/min

Fig. 8 Change of temperature at measured point

較した。その結果を図8に示す。

温度解析結果と実測値の最高温度が一致することは当然であるが、いずれの条件でも実測結果と解析結果の温度の時間推移はほぼ同一となっており、温度解析の妥当性を示している。なお熱源分布形状については、本報告で想定した3角形分布以外に台形分布と矩形分布を検討し、それらの結果を図示しているが、熱源分布による差異は小さい。

以上の議論は、測定温度に及ぼす測定孔の直接的な（一次的な）影響を考慮するため、エネルギー分配率の決定に際して3次元温度解析を用いる方法を検討したものである。しかし温度測定孔の影響は測定温度の上昇だけにとどまらず、温度測定点近傍の温度場を変化させるため、二次的な効果として、孔の上部での局所的なエネルギー分配率を低下させる。そこで測定温度の上昇による局所的なエネルギー分配率の低下について簡単に見積もっておくことにする。

図6の2次元モデルを用いた結果では、ばらつきは大きくても、測定深さが浅くなると見かけのエネルギー分配率が増大した。これは測定深さが浅いほど測定温度が上昇するという温度測定孔の一次的な影響が直接的に現れたからである。一方、3次元モデルでは測定温度の上昇という孔による一次的な影響がエネルギー分配率に現れないように考慮されているから、図7においては測定深さの違いが局所的なエネルギー分配率の変化という二次的な効果として現れるはずである。ところが図7では測定深さとエネルギー分配率の間にはほとんど相関がなかった。このことから図7

の値のばらつきは孔以外の要因によって生ずる測定誤差の影響によるものであると考えられる。したがって本論文の測定条件の範囲では、測定孔による局所的なエネルギー分配率の相対的な減少は、孔以外の要因によって生ずる相対的な測定誤差より小さいものと推察される。

5. 結 論

本報告ではエネルギー分配率が広く分散している理由、および妥当と考えられる分配率の測定法について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 工作物内部の温度測定に多用される工作物に細孔を設ける方法では、孔の直径、深さ、熱電対の有無等が温度分布に大きく影響するため、これらの存在を無視した温度解析と実測された温度とを基礎として、エネルギー分配率を決定することは誤りであり、その結果、この方法により決定した分配率は大きく分散する。
- (2) 正しい分配率を決定するためには、少なくとも熱電対挿入法にあつては、孔の大きさ、研削面から測定点までの距離、熱電対の直径等を十分に考慮した温度解析が必要である。
- (3) 測定孔サイズが砥石と工作物間の接触面積に対し充分小さいときは、熱電対挿入法を考慮した解析モデルによる温度分布結果と実測温度を基礎とすれば、測定孔のサイズ、測定位置によらずほぼ同一のエネルギー分配率が求まる。

本研削条件（WA80K7V~SK5、乾式、 $V_w=10, 20$ m/min）ではエネルギー分配率は大略50%となった。

エネルギー分配率は工作物内の温度分布とその推移を予測するために必要な量である。本報告の手法では、3次元温度解析と温度測定から分配率をより正確に決定できるが、温度測定をせずにエネルギー分配率が予測できれば実用的意味はさらに大きくなる。今後、砥石、工作物の熱物性と研削条件のみを基礎にエネルギー分配率を決定する手法を確立すべく研究が行われる必要があろう。

参 考 文 献

- 1) L. O. Outwater and M. C. Shaw: Surface Temperatures in Grinding, Trans. ASME, 74, (1952) 73.
- 2) 佐藤健児：研削による熱の発生と放散について，精密機械，19, 1 (1953) 7.
- 3) 高沢孝哉：研削熱の加工物への流入割合，精密機械，30, 12 (1964) 914.
- 4) 鍵和田忠男，斎藤勝政：研削における発生熱の配分割合，日本機械学会論文集，43, 373 (1977) 3500.
- 5) 上田隆司，鳥居明人，山田啓司：鋼の平面研削における熱流入割合，精密工学会誌，60, 11 (1994) 1616.
- 6) 例えば，江田 弘，貴志浩三，大久保昌典，上野秀雄：有限要素法による研削加工層の残留応力のシミュレーション解析，精密機械，47, 3 (1981) 314.
- 7) 帯川利之，高畑博之，白樫高洋：3次元温度数値解析による研削エネルギー分配率の検討（第1報），精密工学会誌，62, 1 (1996) 90.
- 8) スハス・V・パタンカ：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版，(1985).
- 9) Y. S. Touloukian and C. Y. Ho ed.: Thermophysical Properties of Matter, Vol. 1 (Thermal Conductivity - Metallic Elements and Alloys) and Vol. 4 (Specific Heat - Metallic Elements and Alloys), IFI / Plenum, New York, (1970).