微小領域における高速温度センシング* (研削砥石表面温度の測定波形の特性について)

磯 部 佳 成^{*1}, 加 藤 泰 生^{*2}
田 戸 保^{*3}, 香 川 正 信^{*1}

High-speed Temperature Sensing in Microscopic Area (Characteristics of Measured Signals on the Grinding Wheel Surface Temperature)

Yoshinari ISOBE, Yasuo KATOH,
Tamotsu TADO and Masanobu KAGAWA

A new type of infrared radiation thermometer with optical fiber that has quick response time (3 μ s) and microscopically measurable area ($\phi 110 \mu$ m) was developed for thermal analysis of the grinding phenomenon. The temperature obtained depended on the heat flow rate during grinding operation and heat of oxidation of removed chips. The measured signal also indicated two parts; the base part and the impulse part. The former seemed to indicate the average temperature of grinding wheel surface, while the latter seemed to indicate the temperature of chips. The heat energy generated by oxidation was larger than the total amount of energy released by the grinding operation. When the grinding point came above the embedded optical fiber, the measured value indicated only the temperature of grinding wheel surface.

Key Words: Optical Measurement, Temperature Sensing, Microscopic Area, High-speed Sensing, Infrared Fiber Sensor, Grinding Wheel Surface, Measured Signals

1. 緒言

研削加工時の研削温度は、製品の表面品位や機械強度などに大きく影響する¹⁾。したがって、研削温度を測定し解析することは、製品の材質的高品位を実現するために特に重要であると言える。

従来、研削温度測定で多く応用されている被加工物を測定対象とした熱電対法^{2),3)}とは異なり、著者らは、新しく光ファイバを用いた赤外線センサ放射温度測定システム（以下測定システムという）を試作改良し、これまであまり行われなかった被加工物に相対する研削点砥石表面に着目して高速に変化する研削点砥石表面の微小領域温度の測定を試みた。その結果、従前の熱電対法あるいは上田ら⁴⁾の結果とは異なるインパルス部と基部を有する特徴ある波形が得られた⁵⁾。

上田らは、研削点砥石表面に混在する砥粒や切屑の物質から放射される赤外線が赤外線センサに同時に感知されるため、測定波形はこれらの情報を含んで示されると考察している。このことは、測定波形中のこれら放射強度を分解して各放射要素別に温度に換算する

ことが、きわめて困難であることを意味しており、いままで測定波形の特性について十分に検討されていない。したがって前報⁵⁾の特徴ある波形の特性についてはさらに詳細に検討する必要がある。

本報告は、この特徴的な測定波形をインパルス部、基部に分けてそれぞれの特性を詳細に解明するため、一つの砥粒の作用に特定した単粒研削時の温度測定さらに被加工物材種、研削雰囲気を変化させた研削砥石表面温度測定を行い検討した。

2. 実験装置とその方法

2.1 測定システム

本報告で用いられた測定システムを図1に示す。被測定物から放射される赤外線は、光ファイバ（フッ化ガラス・ステップインデックスファイバ、コア径 $\phi 70 \mu$ m、透過波長 0.4μ m $\sim 4.3 \mu$ m、N.A.0.2）先端で受光され、さらに赤外線センサ（InAs光起電力素子、時定数100ns、ピーク波長 3.2μ m、帯域波長 1μ m $\sim 3.8 \mu$ m）に導かれたのち、電気信号に変換される。この電気信号は、増幅器（直流増幅器、応答速度3 μ s）で増幅後、パーソナルコンピュータへGP-IBを介して伝送され、記録解析される。

本測定システムは、直流増幅器の応答速度が最も遅

* 平成5年3月9日 中国四国支部第31期総会講演会において講演、原稿受付 平成5年11月1日。

*1 正員、山口県工業技術センター（〒753 山口市大字朝田湯垣585-1）。

*2 正員、山口大学工学部（〒755 宇部市常盤台2557）。

*3 正員、宇部工業高校専門学校（〒755 宇部市常盤台）。

く、応答速度 $3\mu s$ でこれを本測定システムの律速応答速度とした。また測定精度は、温度校正器に用いた赤外線映像装置（日本アビオニクス、TVS-5000、測定精度0.4%）と比較した結果、指示温度の2%であった。

2.2 実験方法

単粒研削時の温度測定は、測定波形のインパルス部が研削加工時における砥石接触に起因する信号であるか、あるいはノイズ信号であるかについて同定するた

め、一砥粒が発生する信号を単粒を用いて確認した。図2は単粒研削装置の概略図、表1は加工条件を示す。実験方法は、被加工物にS45Cを用い、乾式のワンプラス単粒研削とした。本装置は、単粒切れ刃に導電性セラミックスを用いアルミホイールに固定して回転することにより、被加工物と単粒が接触し、装置上に電気回路が形成されるように工夫したものである。この電気回路の出力（以下通電出力という）と測定システムの測定出力の時間的因果関係が比較検討できる。

図1 測定システム概略

図2 単粒研削装置

Grinding point

S_d, S_u : Start point (D:down cutting U:up cutting)

O : Optical fiber point

E_d, E_u : End point (D:down cutting U:up cutting)

図3 研削砥石表面温度測定部

表1 図2の加工条件

Machine	Precision surface grinding machine (OKAMOTO;PSG-52AN)
Cutting manner	Tetragonal pyramidal single point, Down cutting, Dry
Wheel	Aluminum, $\phi 200\text{mm}$
Tool	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, Rake angle - 60°
Wheel speed	1320m/min
Table speed	15m/min
Depth of cut	$20\mu\text{m}$
Workpiece	S45C; Hv (50) 616~623 Dimension: L22 $\times$ t15 $\times$ W11mm

表2 図3の加工条件

Machine	Precision surface grinding machine (OKAMOTO;PSG-52AN)
Grinding manner	Surface grinding, Down cutting, Dry
Grinding wheel	WA80JV Dimension: $\phi 205 \times t19 \times \phi 50.8$
Grinding atmosphere	Air, N_2
Wheel speed	1500m/min
Table speed	15m/min
Depth of cut	$20\mu\text{m}$
Workpiece	S45C; Hv (50) 616~623 SUS304; Hv (10) 170~180 Dimension: L22 $\times$ t15 $\times$ W11mm

また、研削砥石表面温度測定は、測定波形の基部相当分を解析するため、上述と同一砥石使用時の被加工物材種、研削雰囲気パラメータとして、これらの変化による測定波形の相違を確認した。図3に研削砥石表面温度測定部概要、表2に加工条件を示す。実験方法は、乾式のワンパス平面プランジ研削方式を採用し、被加工物はS45C, SUS304の二種を使用した。研削雰囲気は、研削盤上に覆いを設け、空気または不活性ガス（窒素ガス）を充填して作りだした。なお、測定波形と測定位置との関係については、動力計の出力をトリガとして用いて対応させている。

各実験装置において光ファイバは、それぞれ被加工物中央に直径0.8mmの貫通孔を設け、マイクロメータヘッドを用いて被加工物表面から100 μ mの位置に固定し埋め込まれている。テーブルの移動によりこの光ファイバ位置Oの測定可能範囲内に研削点が位置したとき、この赤外線センサにより研削熱で放射される赤外線が測定される。測定距離100 μ mの位置で測定システムの測定可能直径は110 μ mとなり、これは、研削砥石WA80の平均切れ刃間隔390 μ m⁶⁾より小さく、熱源を空間的に分離できる。また、光ファイバからみた砥石表面速度は24.75m/sで測定可能径を4.4 μ sで通過する。これは本測定システムの律速応答速度以内である。したがって本測定システムは、本実験の加工現象に十分対応できる空間的・時間的分解能を有する。

A: Measuring system B: Single point cutting system
Grinding point
S_D: Start point (Down cutting)
O: Optical fiber point
E_D: End point (Down cutting)

図4 単粒砥石による測定波形

3. 結果と考察

3・1 単粒研削時の測定波形について

図4に単粒研削時の温度測定の結果を示す。このように測定システムの測定波形は、単粒研削装置の通電出力時に示すインパルス状の出力が得られた。図中Bのインパルス状の波形は、単粒研削加工での工具と被加工物の接触で発生した電気信号であり、工具と被加工物の接触位置を示している。インパルス状の波形の発生間隔は、単粒研削装置のアルミホイールの回転周期と一致している。図中Aは、同実験において光ファイバで単粒研削加工での工具と被加工物の接触で発生した熱を測定した結果であるが、図中Bの測定位置Oと一致したインパルス状の波形を確認することができる。このことから単粒が被加工物と接触し、光ファイバを通過したときの測定波形がインパルス状に発生していると言える。また、研削方法が下向き削りであることから図中のO位置以降においてのみインパルス状の波形を確認することができ、その発生間隔はアルミホイールの回転周期と一致している。このようにインパルス状の測定波形は通電出力の発生間隔に対応していることから、インパルス状の測定波形はノイズではなく、砥粒もしくは砥粒により生成された切屑の温度に対応した出力と考察される。さらに、上田らの研削面表層温度測定実験⁷⁾において、砥粒が直接作用する加工面下で測定された測定波形には顕著なインパルス状の波形が見られないことから、本実験のインパルス状の波形は切屑からの出力と考えられる。これは、図5の研削加工後の砥粒切れ刃の観察写真において、砥粒に付着した切屑が見られることからインパルス

図5 砥粒に凝着した切屑

状の波形は、切削時の砥粒切れ刃に切屑が凝着しながら排出されるため、光ファイバに切れ刃を覆い隠す状態で測定されたと考えられる。

3・2 研削砥石表面温度測定時の被加工物材種と測定波形について

SUS304およびS45Cを下向き削りした場合の測定波形を図6(a), 図6(b)にそれぞれ示す。SUS304の出力は、光ファイバ位置O近傍より始まっているが、研削終了点E_Dに達することなくすぐに出力は終わっている。これとは異なりS45Cの出力は、同じく光ファイバ位置O近傍より始まり、研削終了点E_Dまで徐々に増加し最大値を示した後急激に低下し、出力は終わっている。S45Cの測定波形は、光ファイバ位置O以後においてSUS304と異なり広範囲で出力している。同一加工条件下での測定波形の相違は、明らかに被加工物材種による影響が大きいと考えられる。本実験に使用した被加工物の化学成分を表2に示す。ここでニッケル、クロム、炭素の含有量が大きく異なり、波形の相違はこれら含有量の差異に起因すると考えられる。S45CがSUS304より多く、強い火花の発生をみせ火花の量、色の相違が確認されたこと、またJIS G 0566の鋼の火花試験方法においても特に炭素含有量が火花の発生に大きく影響することを示している⁸⁾。

3・3 研削砥石表面温度測定時の研削雰囲気と測定波形について

前項によりS45Cの下向き削りでの測定波形は、そ

Grinding point
S_D: Start point (Down cutting)
O: Optical fiber point
E_D: End point (Down cutting)

図6(a) SUS304下向き削りの測定波形
(空気雰囲気)

の含有元素である炭素の影響を強く受けたことが考えられることから、次に異なる雰囲気状態での測定波形の基部相当について調べた。

3・3・1 空気雰囲気

S45C上向き削りの測定波形を図7に示す。図7の出力は、研削開始点S_Uで最大値を示したのち、徐々に低下して研削終了点E_Uで終えた。図6(b)の下向き削りと比較すると加工方向の相違により、測定波形は光ファイバ位置Oを中心とした対称的波形を示すことがわかる。

そして、砥石研削点に着目した目視観察⁹⁾によると、切屑は排出直後では目立たず、ある距離を飛行後、強く酸化発光すると述べられている。このように下向き削り、上向き削りの光ファイバ位置Oを中心とした左右対称な測定波形は、下向き削りの場合、光ファイバは切屑の発熱冷却の過程を順に追うこととなり、他方、上向き削りの場合、光ファイバは切屑の発熱冷却の過程を逆に追うことになるため、このような左右対称の波形が生じるものと考えられる。

次にS45Cを空気雰囲気で加工した場合の切屑の電

図6(b) S45C下向き削りの測定波形 (空気雰囲気)

表2 被加工物の化学成分

Metal	Chemical composition (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S45C	0.45	0.23	0.71	0.05	0.008	-	-
SUS304	0.05	0.50	0.99	0.018	<0.001	8.41	18.36

顕(SEM)写真を図8に示す。図8には球状および流れ型の切屑、破碎および脱落砥粒が散見される。図8の球状切屑は、切屑形状を球状に変化させるに足る溶融温度までこの切屑温度が到達したため形成されたものと考えられる。しかし、測定波形では温度上昇の傾向は伺えるが、その波形に鋼の融点と考えられるような高い値は見られなかった。したがってこの球状切屑は、測定範囲以降の切屑飛散中にその温度上昇が進行し、溶融温度に達したためにこのような球状が形成されたと推察する。

3・3・2 不活性ガス雰囲気

切屑が球状切屑に変化する溶融温度とは、研削熱による温度（砥粒が被加工物を削るとき生じる切屑と砥粒すくい面の摩擦熱、被加工物と砥粒逃げ面の摩擦熱そして切屑生成時のせん断すべりによる加工熱）または、切屑が空中で火花を生じる酸化燃焼の発熱温度⁹⁾などが考えられる。そこで後者すなわち切屑が空中

図7 S45C上向き削りの測定波形（空気雰囲気）

図8 S45Cの切屑（空気雰囲気）

で火花を生じる酸化燃焼の発熱温度の影響を取り除くため、不活性ガス雰囲気中でのS45Cの研削温度の測定を行なった。

図9は不活性ガス雰囲気中のS45C下向き削りの測定波形例である。また、採取した切屑の電顕(SEM)写真を図10に示す。測定波形は、光ファイバ位置Oを出力の最大値とする三角形状の基部とその上にインパルス部が載っており、空気雰囲気中の研削と異なり光ファイバ位置Oより後方において基部の大きい測定波形が現われなかった。なお基部の出力開始点から最高出力点までの測定時間は、0.008sで、テーブル速度15m/minより基部の長さ2.0mmと換算され、これは、研削砥石の幾何的接触弦長さの二分の一である1.99mmにほぼ一致している。これより不活性ガス雰囲気中での

A: Measuring system B: Single point cutting system
 Grinding point
 S_D : Start point (Down cutting)
 O: Optical fiber point
 E_D : End point (Down cutting)

図9 S45C下向き削りの測定波形
（不活性ガス雰囲気）

図10 S45Cの切屑（不活性ガス雰囲気）

測定波形基部は、砥石研削点の研削熱に対応した出力と考える。また、一つのインパルスの出力時間はほぼ $10\mu\text{s}$ であり、砥石速度 1500m/min から長さ $250\mu\text{m}$ と換算される。これは図10で見られる切屑塊の寸法 $100\sim 300\mu\text{m}$ に相当している。実際被加工物に作用する砥粒の接触面積が、砥粒断面積より小さいことから同測定波形のインパルス部は、研削熱による切屑温度に対応する出力と考察される。また図9において、測定波形のピーク位置と動力計出力で示される光ファイバ位置が一致していることで、一回転前の砥粒研削点の研削熱の影響がないと確認された。このことは、砥石表面温度が研削点通過後1回転する間に測定システムの適用範囲温度以下まで冷却されセンサの感知不能な温度まで下がったものと考えられる。

図10の電顕(SEM)写真では、流れ型切屑と破碎および脱落砥粒が見られたのみで、図8のような空気雰囲気中の切屑に見られた球状切屑は観察されなかった。このことは、砥石研削点の研削熱だけでは切屑を溶融させるだけの温度に達し得なかったことがわかる。したがって、空気雰囲気中の測定波形(基部およびインパルス部)には主にS45C切屑の研削熱以外の熱すなわち二次的な切屑の酸化燃焼反応による発熱が、広い範囲で付加、影響しているものと考察される。またこれは炭素含有量が、S45Cより少なく酸化燃焼を起こしにくいと考えられるSUS304の測定波形(図6(a))の結果からも理解できる。ところで、雰囲気異なる図6(b)と図9の二つの測定波形を同一時間軸で重ね合わせると、光ファイバ位置O近傍においては不活性ガス雰囲気中の測定波形と空気雰囲気中の測定波形の出力値は、同レベルで類似の波形を出力していることが確認される。すなわち、光ファイバ位置Oにおいて測定される測定波形は、砥粒切削開始直後の酸化未反応状態にあるものと考えられ、雰囲気の影響(酸化)を受けていないことが考えられる。光ファイバ位置Oでの温度が、測定波形の温度変算より約 500°C に達しており、青色酸化物(Fe_3O_4)が生じる約 250°C には十分な温度にもかかわらず不活性ガス雰囲気中の出力レベルと同じであったことから推察できる¹⁰⁾。このように本実験条件において砥石研削点が光ファイバ位置Oに位置する場合、空気中における測定波形も砥石表面温度に対応した出力と考えられる。

4. 結言

砥石表面温度の測定波形を解析することにより以下のことがわかった。

- (1)本測定システムによる砥石表面温度の測定波形は、本実験条件において砥石研削点が光ファイバ位置Oに位置する場合、雰囲気に影響されず表面温度に応じた出力を示すことを確認した。
- (2)この測定波形の基部は砥石表面温度を表し、インパルス部は砥粒もしくは砥粒に付着した切屑の温度を示し、それに対応した出力波形であることを確認した。
- (3)空気雰囲気中での測定波形は、特に被加工物材料に含まれる炭素の影響を受け、研削熱と切屑の酸化燃焼反応による発熱が加味された波形を示す。
- (4)光ファイバ位置O近傍を除き、波形は切屑の酸化燃焼反応による出力である。研削熱以外の酸化燃焼反応による発熱は、研削熱に比較してはるかに大きい熱量を発生し無視できない。

参考文献

- 1)小野浩二:研削仕上,槇書店,(1972),121.
- 2)J.Peklenik:Ind.Anz.,1,3(1959),10.
- 3)W.E.Littmann and J.Wulff:Trans.ASME,47(1955),692.
- 4)上田隆司,細川晃,山本明:精密機械,51,9(1985),1732.
- 5)磯部佳成,加藤泰生,香川正信:機論,60-570,C(1994),544.
- 6)河村末久,矢野章成,樋口誠宏,杉田忠彰:研削加工と砥粒加工,共立出版,(1988),26.
- 7)上田隆司,細川晃,山本明:精密機械,50,12(1984),1896.
- 8)財日本規格協会編:JISハンドブック鉄鋼,財日本規格協会,(1988).
- 9)I.O.Outwater and M.C.Shaw:Tans.ASME,74(1952),73.
- 10)H.H.ユーリック:腐食とその制御(第2版),産業図書(株),(1974),185.