熱輻射線による加工温度計測技術の開発

Development of Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber/Takashi UEDA

名古屋大学大学院 上田隆司

1. はじめに

切削や研削において、加工温度は工具寿命や加工面の物性に大きな影響を及ぼすだけでなく、レーザ加工では加工そのものを支配する重要な要因である。このため、これまで加工温度を測定するためにさまざまな方法が工夫されてきている¹⁾。著者らは光ファイバーと光電変換素子を組み合わせた赤外線輻射温度計を開発し、さまざまな加工温度の測定に適用してきた。この温度測定法は、微小領域の温度の測定、測定領域の特定、高速で変化する温度の測定など、これまでの温度測定法にない特長をもっている²⁾³⁾。また、この温度計を改良した2色温度計では、これらの特長に加えて、輻射率の影響を受けずに温度を測定できる、測定領域内の最高温度を計測できるなどの特長をもっている。これらの特性を生かして、例えば2000 rpmで回転する研削砥石作業面上の砥粒切れ刃温度や、40000 rpmで高速回転する直径0.6 mmのボールエンドミル刃先温度を測定している。ここでは1980年ごろからスタートした温度計の開発について順を追って解説していくことにする。

2. 単色温度計

本温度計は光ファイバー型赤外線輻射温度計の基本になっている温度計であり、5年程度をかけて1985年ごろに完成している⁴⁾。

2.1 基本構造

図1に基本的な構造を示す⁵⁾。単色温度計の“単色”とは1個の光電変換素子で計測している意味で用いている。測定対象物から輻射された赤外線は、コア径50 μm の1本の石英光ファイバーで受光し、光電変換素子InAsセルに伝送して電気信号に変換する。OPアンプを用いた回路

により電流を電圧に変換して増幅し、記憶装置に記録する。

図2は光ファイバーが測定対象物(Object)から輻射される赤外線を受光する状態を表している。図は感温面積(Target area)が測定対象物の内側に入っている状況を示している。このとき、光ファイバーが受光する赤外線エネルギー $E_{\lambda m}$ を表す式には、光ファイバーの受光面と対象物の距離を表す測定距離(Measuring distance) t が含まれておらず、感温面が対象物内にある限り、測定距離に関係なく正確な温度測定が可能である。

図3は図1に示す増幅回路の周波数特性であり、100 kHzまでフラットな特性をもっている。また、InAs素子の応答速度が1 μs であることから、本温度計が十分な応答速度を有していることがわかる。

2.2 研削温度の測定

本温度計を平面研削中の砥粒切れ刃温度の測定に適用し

図2 光ファイバーの受光モデル

図1 温度計の基本構造

た⁵⁾。図4に実験装置を示す。図において、光ファイバーは研削点から $\theta=45^\circ$ の位置にセットされており、受光面と砥石作業面との距離は $100\mu\text{m}$ に設定している。研削点において加工物を研削し高温になった砥粒が回転して、光

図3 周波数特性

図4 研削温度測定装置

図5 出力波形

ファイバー直下を通過するとき、砥粒から輻射された赤外線光ファイバーで受光している。受光した赤外線エネルギーを光電変換素子で電気信号に変換し、温度に換算する。

図5に測定波形を示す。各パルスが個々の砥粒切れ刃からの出力である。パルスの高さ h が温度、パルスの幅 b が砥粒の大きさ、パルス間隔 l が砥粒切れ刃間隔に対応している。図6は測定した砥粒切れ刃温度を表している。標準の研削条件は、研削速度 v_s : 1600 m/min, 切り込み a : $20\mu\text{m}$, テーブル送り速度 v_w : 10 m/min, 加工材料: 炭素鋼であり、個々の研削条件を変化させている。測定された最高温度は炭素鋼の融点に近い 1400°C の高温に達している。一方、研削速度が上がるにつれて切れ刃温度は低

図7 連続10回転中の砥粒切れ刃の切削作用

図6 砥粒切れ刃温度に及ぼす研削条件の影響

(a) 光カプラーを用いた温度計

(b) 2色素子を用いた温度計

図8 2色温度計の基本構造

下している。“砥粒最大切り込み深さ”が減少すること、および単位時間に作用する“砥粒切れ刃数”が増えるためであり、高速研削が有利な点である。

図7は研削中の砥石が10回転するときの出力波形を連続的に測定し、1回転分ごとに切り分けて示している⁵⁾。横軸が砥石1周分に相当し、下から1周目、2周目……10周目の出力波形である。図より、砥粒の切削作用が1回転ごとに変化する様子を知ることができる。例えば、砥粒aは1回転～3回転までは現れているが、4回転目から消えており、9回転目に再び現れている。砥粒bは1回転目、および7～10回転目に現れている。砥粒cは常に現れており、絶えず切削していることがわかる。このように、個々の砥粒切れ刃の切削作用を詳細に知ることができる。

3. 2色温度計

レーザ照射部の温度を計測する目的で、1995年ごろに開発した温度計である。単色温度計に比べて、計測精度、使いやすさの点で飛躍的に改善されている。

3.1 基本構造

光カプラーを用いる構造⁶⁾と、2色素子を用いる構造⁷⁾の2種類があり、それぞれ特徴がある。いずれの温度計も1本の光ファイバーで受光した赤外線を2つの素子で計測しているところが重要なポイントである。図8に温度計の基本構造を示す。図8(a)では、測定対象物から輻射された赤外線を1本の光ファイバーで受光したのち、光カ

図9 2色素子の分光感度特性

プラーを用いて2チャンネルに分岐し、片方のチャンネルをInSbセルにつなぎ、他のチャンネルをGeセルにつないで、セルに赤外線エネルギーを伝送する。電気信号に変換した後、それぞれの素子からの出力の比をとり、温度に換算する。図8(b)では、2色素子を使っている。測定対象物から輻射された赤外線を1本の光ファイバーで受光したのち、2色素子に伝送する。2色素子は前面にInAs、後面にInSbのサンドイッチ状の2層構造となっている。2色素子の分光感度特性を図9に示す。1～3μmの短波長をInAs素子で計測し、3～6μmの長波長をInSb素子が計測する。それぞれの素子からの出力電圧の比をとり、温度に換算する。

図 10 2色温度計と単色温度計の測定温度

図 11 切削速度が接触面温度に及ぼす影響

このように、2つの素子からの出力電圧の比をとるとき、輻射率がキャンセルされてしまう。すなわち、2色温度計では輻射率の影響を考慮する必要がなくなる。また、図 10 は単色温度計と2色温度計を、2000°Cの測定対象物に適用したときの測定温度を計算している。測定距離 t が大きくなり、感温面積が測定対象物より大きくなると単色温度計では測定温度は急激に低下していくが、2色温度計では常に2000°Cが測定されている。すなわち、2色温度計は、測定距離に影響されることなく、正確な温度計測が可能である。いい換えれば、測定対象物が感温面積より小さい場合でも、正確に温度を測定することができる。

3.2 工具-工作物接触面温度の測定

透光性のあるアルミナ円錐工具を用いて、工具内を透過してきた赤外線を工具内に挿入した光ファイバーで受光することにより温度を測定している⁶⁾。切削速度を2300 m/minまで変化させたときの測定結果を図 11 に示す。切削速度が上がるに従い温度が上昇し、加工材料の炭素鋼の融点(約1500°C)に近づいていく。

3.3 3次元光造形におけるレーザ照射部の温度測定

金属粉末光造形において、金属粉末にレーザを照射したときの温度を2色温度計で測定した⁸⁾。図 12 はレーザの照射エネルギーと金属粉体上の照射部温度の関係を示して

図 12 レーザ照射時の金属粉体の温度

図 13 3色素子の分光感度特性

おり、1500°Cでは金属粉体は焼結状態にあり、1800°Cを超えると熔融状態にあると判断することができる。

4. 3色温度計

測定できる温度範囲を広げる目的で2000年以降に開発した温度計である。それまで、高温域の測定にInAs-InSbを組み合わせた温度計、低温域の測定にInSb-MCTを組み合わせた温度計を製作していたが、これらの素子を合わせた3色素子を用いて、低温から高温の広い温度範囲での計測が可能な3色温度計を製作した。

4.1 基本構造

InAs-InSb2色素子に長波長の赤外線に感度をもつMCT素子を加えて3種類の素子をサンドイッチ状に積層している⁹⁾。3色素子の分光感度特性を図 13 に示す。MCTを加えることで、長波長の赤外線に対して感度をもつことができ、より低温の測定が可能となっている。高温はInAs-InSbの組み合わせ、低温に対してはInSb-MCTの組み合わせによって測定することができる。

4.2 ボールエンドミルの切れ刃温度測定

図 14 に径が0.6 mm~6 mmの小径ボールエンドミルで加工したときの切れ刃温度を測定した結果を示す⁹⁾。同一径の場合、切削速度が速くなれば切れ刃温度は急激に上昇している。ところが、回転数が同じであれば、径の異なるエンドミルでも切れ刃温度に大きな差を生じない。径が異

図 14 ポールエンドミルの切れ刃温度

なれば切削速度が大きく変化するにもかかわらず、温度に差が現れていない。いろいろ原因は考えられているが、詳細は今後の検討課題である。

5. コンパクト 2 色温度計

これまで液体窒素によって素子を冷却して光電変換素子の感度を上げてきたが、液体窒素の取り扱いが煩雑である。そこで、ペルチェ素子による電子冷却によって素子を冷却する光電変換素子を使った温度計を製作した。

5.1 基本構造

図 15 にコンパクト温度計の概略図を示す¹⁰⁾。電子冷却タイプの 2 色素子を用いることにより、液体窒素が必要なくなり、さらに、集光レンズを介さず光ファイバーを直接 2 色素子に連結するシンプルな構造の温度計を製作した。

6. お わ り に

光ファイバー型赤外線輻射温度計の開発について述べてきたが、温度計の測定原理や構造については紙面の関係で十分に述べることはできなかった。また、温度計の製作に主眼をおいたため、わずかな実測例しか示すことができなかった。旋削加工、ドリル加工、タップ加工をはじめ、ダイヤモンドバイトによる超精密加工、高速切削加工、スピニングツールを用いた加工、ミストを用いた加工や湿式加工、さらにレーザによる切断加工、レーザフォーミング加工、レーザ矯正加工などにおいても温度計測を行っている。また、レーザによる歯科治療の研究において、歯質の温度測定にも用いている。これらについては文献を参照していただければと思う。

図 15 コンパクト 2 色温度計

加工現場にはアナログ信号の計測に大敵なノイズ源が多数あり、また、切りくず・加工液・油などは光計測にとって致命的ともいえる妨害要因である。そのような厳しい環境で、加工温度を正確に計測することはたいへんむずかしい。可能な限り加工の原型を保ちながら、いかに精度よく加工温度を測定するかがこの研究の醍醐味であり、これからも温度計の開発に取り組んでいきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) M.A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany and A.L. Cooke: On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes, *Annals of the CIRP*, **56**, 2 (2007) 581.
- 2) 上田隆司, 細川晃: 光ファイバを用いた赤外線輻射温度計の開発, *材料*, **36**, 403 (1987) 404.
- 3) 上田隆司, 金田泰幸, 佐藤昌彦, 杉田忠彰: 光ファイバ型赤外線輻射温度計による加工温度の測定 (温度計の特性), *日本機械学会論文集, C 編*, **58**, 545 (1992) 302.
- 4) T. Ueda, A. Hosokawa and A. Yamamoto: Studies on Temperature of Abrasive Grains in Grinding (Application of Infrared Radiation Pyrometer), *ASME, Journal of Engineering for Industry*, **107**, 5 (1985) 127.
- 5) T. Ueda, H. Tanaka, A. Torii and T. Sugita: Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber, *Annals of the CIRP*, **42**, 1 (1993) 405.
- 6) T. Ueda, M. Sato, T. Sugita and K. Nakayama: Thermal Behaviour of Cutting Grain in Grinding, *Annals of the CIRP*, **44**, 1 (1995) 325.
- 7) T. Ueda and M. Sato, K. Nakayama: The Temperature of a Single Crystal Diamond Tool in Turning, *Annals of the CIRP*, **47**, 1 (1998) 41.
- 8) T. Furumoto, T. Ueda, M.R. Alkahari and A. Hosokawa: Investigation of Laser Consolidation Process for Metal Powder by Two-color Pyrometer and High-speed Video Camera, *Annals of the CIRP*, **62**, 1 (2013) 223.
- 9) A. Yassin, T. Ueda, T. Furumoto, A. Hosokawa, R. Tanaka and S. Abe: Experimental Investigation on Cutting Mechanism of Sintered Material Using Small Ball End Mill, *Journal of Materials, Processing Technology*, **209**, 10 (2009) 5680.
- 10) 細川 晃, 岡田将人, 上田隆司: エンドミル加工における工具温度モニタリング用小型 2 色温度計, *日本設備管理学会誌*, **18**, 1 (2006) 42.