

無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察

新堂 正俊^{*1}, 松田 亮^{*2}, 古木 辰也^{*3}, 廣垣 俊樹^{*3}, 青山 栄一^{*3}

Investigation of tool internal temperature in end-milling process with a wireless holder system

Masatoshi SHINDOU ^{*1}, Ryo MATSUDA ^{*2}, Tatsuya FURUKI ^{*3},
Toshiki HIROGAKI ^{*3} and Eiichi AOYAMA ^{*3}^{*1,*2} Research and Development Group, Yamamoto Metal Technos Co., Ltd.

2-4-7 Setoguchi, Hirano-ku, Osaka 547-0034, Japan

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University

1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

Received 22 January 2015

Abstract

Nowadays, infrared thermographic technology has been attracting attention in various industrial fields. We therefore focus on it as a novel method for monitoring surface tool temperature to improve end-milling conditions for difficult-to-cut materials. However, a problem has emerged; it is difficult to measure the tool surface temperature when there is a coolant because the coolant prevents monitoring of the surface of the end-mill tool. Thus, we developed a wireless tool holder system equipped with a thermocouple in the end mill to monitor the tool internal temperature under coolant conditions. In the present report, we compared the temperature measured by infrared thermographic imagery with that measured by a wireless tool holder system when end milling the stainless steel under dry coolant conditions. The thermocouple, which has a diameter of 1.0 mm, was used to ensure stable measurement in the proposed wireless tool holder. We obtained the tool temperatures by infrared thermographic imagery and by wireless tool holder equipped with a thermocouple at a sampling time of 1/30 of a second. We confirmed that the tool internal temperature measured by the wireless tool holder agrees with one calculated by FEM model based on infrared thermographic imagery. As a result, we demonstrated that the developed method with a wireless system is effective to estimate the tool temperature in end-milling processes and makes it feasible to measure it under coolant conditions.

Key words : End-mill process, Tool temperature, Infrared imagery, Thermography, Process efficiency, Process monitoring

1. 緒 言

近年、日本の次世代の製造業を支える産業として航空機や医療などが注目されてきている。当該分野の部品は高い耐熱性や生体適合性などを達成するための難削材である場合が多い。したがって、それらの製造現場において、難削材のエンドミル加工およびその品質を保証するための技術開発のニーズが増大してきている。しかしながら、回転工具を用いるエンドミル加工において、現場で容易に切削温度のセンシングしながら加工条件を設定したり、さらに加工時の温度を保証することは難しい状況にある。

そこで著者らは、赤外線サーモグラフィを用いた赤外線画像による加工現象の診断手法を提案し、マイクロドリル加工において回転するドリル工具の温度(廣垣他, 2004)および工作物の穴周辺の温度(廣垣他, 2008)を解明し

No.15-00046 [DOI:10.1299/transjsme.15-00046], J-STAGE Advance Publication date : 22 May, 2015

^{*1} 正員, (株)山本金属製作所 (〒547-0034 大阪府大阪市平野区背戸口 2-4-7)^{*2} (株)山本金属製作所^{*3} 正員, 同志社大学理工学部 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

E-mail of corresponding author: shindou@yama-kin.co.jp

て、それらが現場における加工条件の設定に有効な手段になることを示した。さらに提案手法のエンドミル加工の状態診断への応用についても試み(Kodama, et al., 2012) (新堂他, 2014), その適用範囲を拡大してきた。しかしながら、赤外線サーモグラフィ熱画像では工具表面の温度のみの評価となり、工具内部への実際の入熱量を十分に検証できなかった。さらにクーラントなどの切削油を大量に使用する環境下においては、切削油の流れ等により工具表面の熱画像が取得できない課題も残っていた。エンドミル加工における切削温度のセンシングとしては、骨材を被削材として工具側を赤外線サーモグラフィ熱画像、被削材側の内部温度を熱電対で計測して評価した例(杉田, 光石, 2006)や、難削材を被削材として光ファイバ型 2 色温度計で被削材側から工具逃げ面の温度やすい面の表面近傍の温度を評価した例(岡田他, 2012)(Sato, et al., 2011)などがある。しかしながら、被削材の内部または工具の表面の温度であり、回転するエンドミル工具の内部温度を直接評価して、工具側へ入熱量を考察した例は殆どないようである。またクーラント条件などが変化する製造現場で、容易に加工時の回転する工具の内部の温度モニタを具現化する様な手法ではないようである。

そこで本報では、近年普及してきた細穴放電の加工技術を組み合わせることで、現場において切削油剤を使用する環境下でも回転工具側から工具の内部温度を計測可能とする無線式ホルダシステムを開発し、エンドミル加工時の工具の内部温度のモニタに適用した。特に各種クーラント条件の違いや強制対流熱伝達の影響による工具の内部温度の違いを検討した。また、赤外線サーモグラフィによる温度計測に基づく有限要素法による非定常熱解析の結果とモニタの結果を比較考察し、その妥当性および有用性も検討したので報告する。

2. 実験方法および蓄熱モデルの基本理論

2・1 無線式ツールホルダによる工具内部温度の計測

エンドミル工具の内部温度は熱電対を埋め込み計測する。そこで、回転中の工具から温度データを転送することが可能な無線式ツールホルダシステムを開発した。図 1 に無線式ツールホルダシステムの概略図を示す。まず、工具中心軸に沿って細穴放電加工によりシャンク部側から底刃近傍まで直径 1mm の穴をあけ、すきまばめの公差で熱電対先端(測温部)が所定の長さ(工具側の穴深さ)挿入(両者の間に残留空気がない状態)されたことを確認した後、工具のシャンク部をコレットで把持し固定した。熱電対は、K 型で線径 0.12mm および線径 1mm, 二種類の線径を使用して計測結果の比較を試みたが、結論として、少し応答性が低下しても微細穴径に近い径を用いる方が安定した計測系を構築できることがわかった。次に、工具ホルダ内に増幅器、A/D 変換器、マイクロコントローラ、発信機および電源を配置した。起電力の増幅・A/D 変換は冷接点補償熱電対-デジタルコンバータを使用。A/D 変換分解能は 14 ビットで通信規格は IEEE802.15.4 準拠 2.4GHz. CPU サンプルクロックは 16MHz. 電源はリチウム電池 3.6V を使用し回転中心軸上に配置した。S/N 向上のためキャパシタを回路に組み込んだ。工具温度の測定結果を無線で送信し、受信機に接続されたコンピュータにより計測結果をリアルタイムに表示・記録可能にした。サンプリングレートは、後述の赤外線サーモグラフィの連写速度と同等の最高毎秒 30 回まで設定可能にした。図 2 に無線式ホルダシステムの外観を示す(BT40 番の主軸に取り付け時)。内蔵されている温度計測ユニットは、外部温度の急激な変化に対する保護措置をとっており、予備実験において、エンドミル加工で想定される条件下では、冷接点部の温度変化の影響による誤差は十分小さいことを確認済みである。さらに、現場での取り扱いのし易さと ATC 交換を考慮し、小型化・軽量化しており市販されている通常のホルダと大きさや重量はほとんど変わらない。また、この無線式ホルダシステムを用いることによって、切削油剤使用環境下における加工およびドリル加工のように刃先が外部から見えない加工の場合でも、工具温度をモニタリングすることが可能である。従来、ラボレベルでは円筒研削で低速回転する工作物にサーミスター温度センサを貼り付け無線送信して計測した取り組み例(和多他, 2010)(Sakakura, et al., 2012)などの報告は存在している。従来は送受信機が回転体の外周に設置されている場合が大半であるが、本報ではホルダの中心部(半径 10mm 以内)に当該を集中配置できるように改良し、遠心力の影響を大幅に減少させた。さらに近年開発された高精度なツールバランス調整装置(Tool Dynamic TD 2009 Economic Plus, HAIMEER 製)を導入し、主軸回転数 20,000rpm での釣合い良さ上限 2.5G に調整したことにより、高速回転するエンドミル工具に対応できるようになった。さらにマシニングセンタ等の ATC にも対応する製造の過酷な現場でも容易に安定してモニタを可能とする点など、ラボレベルでなくメーカ現場の用途に対応する新たな設計を開発のコンセプトとした。図 3 に、放電加工用電極と実験に用いたエンド

ミルの外観を示す。エンドミル工具の全長は 50mm, 放電加工用電極の直径 d は 1mm である。図 3 に示したエンドミルの他に直径 6mm でシャンク部の長さが 50mm 以上ある工具を切断し, 直径 6mm 全長 50mm のシャンク部のみの刃部を持たない工具 (円柱バー) を製作した。このシャンク部のみの工具とエンドミルの母材はどちらも超硬合金で同じである。工具の中心軸上に細穴放電加工であけた穴の深さは 49mm ($L/d = 49$), すなわちその穴に挿入した熱電対の先端の軸方向の位置は, エンドミル先端 (底刃部) からシャンク側に 1mm である。近年の細穴放電加工機の発展により, 数十分程度の短時間で容易にエンドミル工具に安定して細穴の創成が可能となったものである。

図 4 に, 温度測定用工具の概略断面図を示す。左側は, 刃部を表し, 右側はシャンク部を表している。エンドミルの刃部はチップポケットを有するため, 刃部の体積はシャンク部よりも小さいため刃部の体積を考慮する際は, 等価 (熱容量) 直径 D_e を用いた (Kodama, et al., 2012)。熱電対挿入孔の直径は, 工具芯厚よりも小さい必要がある。すなわち本報では, 熱電対挿入孔の直径 d が 1mm で, 本システムで計測可能な工具直径 D の最小値は 2mm 程度となる。しかしながら, より小さな挿入孔に対応した熱電対を用いれば, さらに計測可能な工具直径は小さくすることが可能である。

2・2 実験方法

使用した工作機械は, 縦型マシニングセンタで, その主軸にスプリングコレットタイプのホルダにてエンドミルを保持した。エンドミル工具 (OSG 社製 WXL-EMS) は, 4 枚刃, ねじれ角 30°, TiAlN コートを用いた。工具直径は 6mm および 10mm である。工具直径に対する工具の突き出し長さの比は 3 とした。

工作物は材質 JIS SUS310S (寸法 100×100×50mm) とし, マシニングセンタのテーブルに設置した。工作物の 1 辺を 1 パスとして, 実験における工具中心の切削長は 100mm/パスである。ステンレスの中でも SUS310 はニッケルが 20%程度含まれるため, 耐熱鋼であるニッケル基合金に近くエンドミル加工における難削材の一種と考えられる。赤外線サーモグラフィによる工具表面温度の計測の際, クーラントは加工後の切りくずの再巻き込みを防ぐために圧縮空気を吹き付けるドライエア法を用いた。無線式ホルダシステムによる工具内部温度の計測の際, ドライエア法の他, 圧縮空気の吹き付けを行わないドライ加工, 被削材加工面に少量の不水溶性油剤を塗布してから加工する方法 (MQL 法), 水溶性切削油剤をクーラントノズルから噴射しながら加工する方法を用いた。主な加工条件は, 切削速度 45m/min, 送り量 0.05mm/tooth, 軸方向切込 12mm, 径方向切込 0.6mm である。

2・3 サーモグラフィによる赤外線熱画像の取得方法

図 5 は, エンドミル加工プロセスを赤外線サーモグラフィでモニタするための配置図である。実験時はドアを閉め, カバーの最小限の隙間窓から画像を取得するようにして安全性に配慮している。エンドミル加工の側面切削 (X-Y 平面内でダウンカット時) を対象とした。使用したマシニングセンタは X 軸, Y 軸テーブル移動型であるので, X-Y 平面内の運動による加工において, エンドミル工具は回転のみで移動していない。赤外線画像は工作物の進行方向の法線に対して 150°方向から赤外線サーモグラフィで撮影した。撮影の鉛直方向 (Z 方向) の高さは, エンドミルと同一 (真横) とした。

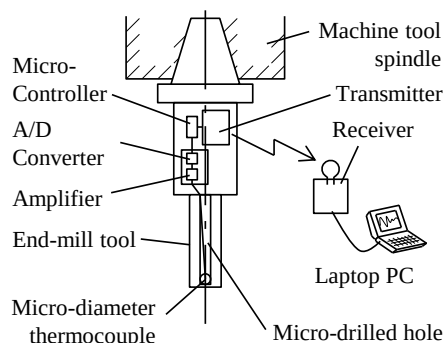


Fig. 1 Schematic diagram of wireless measurement tool holder system

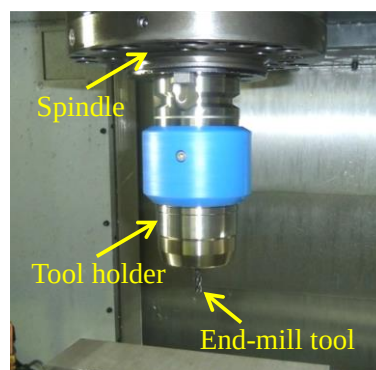


Fig. 2 Wireless measurement tool holder system

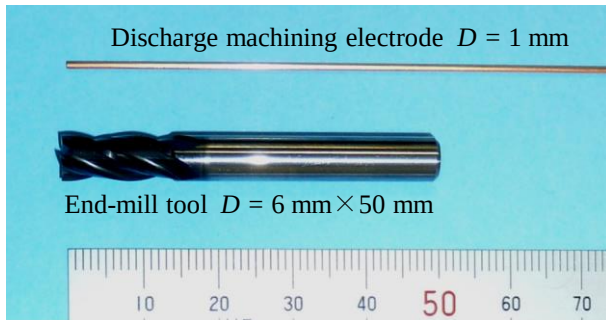


Fig. 3 Discharge machining electrode and end-mill tool

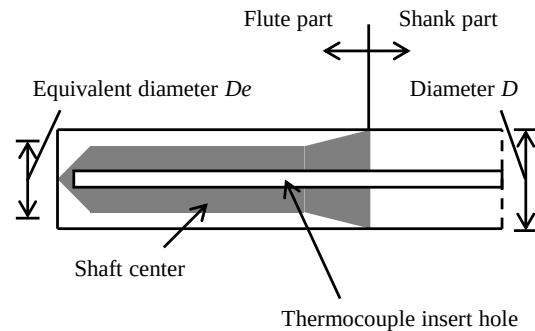


Fig. 4 Cross-sectional schematic view of temperature measurement tool

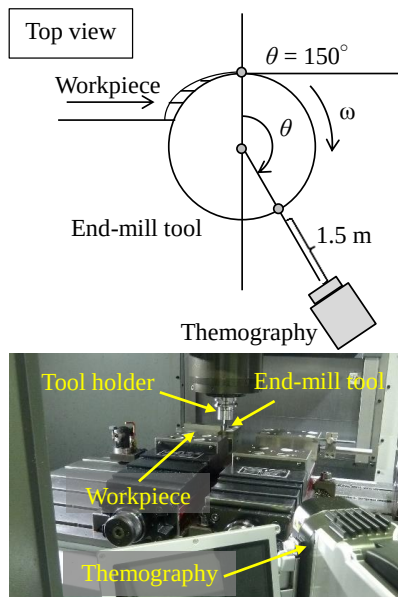
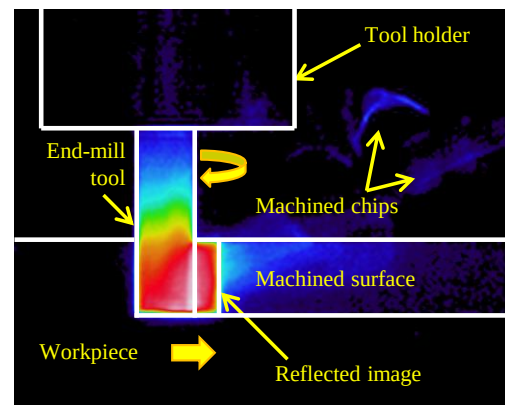


Fig. 5 Setup for monitoring end-mill process



Workpiece: JIS SUS310S
Cutting tool: OSG WXL-EMS $D = 10$ mm, 4 flute
Machining conditions:
 $V_c = 45$ m/min, $f_z = 0.05$ mm/tooth,
 $Ad = 12$ mm, $Rd = 0.6$ mm, dry air

Fig. 6 Infrared imagery of end-mill process

撮影に使用したサーモグラフィは NEC Avio 赤外線テクノロジー社製 H2640 で、温度分解能は 0.03°C 、2次元マイクロボロメータ 640×480 画素、検出波長 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 、最小空間分解能 0.18mm である。エンドミルから 1.5m の撮影距離における空間分解能は 0.9mm 程度で、30枚/sの連写にて1パス加工を記録した。

2・4 エネルギー的非定常熱伝導の蓄熱モデル

物体の伝熱問題の中でも、熱電対などの応答性を解析する場合など対象物体の内部における温度分布は無視できるもの（物体内部の非定常性は無視）として考える問題は熱エネルギー的非定常伝熱の蓄熱モデルである。小さな球や細い円柱が流体の中に入り、流体から加熱または冷却される場合などである(田川他, 1998)。

ここで単位長さの円柱を考える。その密度を ρ 、比熱を C 、外部との熱伝達率を α 、円柱の初期温度を T_0 、急激な変化を想定してステップ応答における外部ステップ温度 T_s 、流体にさらされた円柱の平均温度を T とする。

$$\rho C \left(\frac{\pi D}{4} \right) \left(\frac{dT}{dt} \right) = \pi D \alpha (T_s - T) \quad (1)$$

左辺は単位長さ当たりの単位時間の熱エネルギーの変化で、右辺は単位長さ当たりの表面からの伝熱量である。エンドミル加工は断続切削のため刃先すくい面等の局所的な温度変化（一般に 1000°C 前後になると考えられている）までを正確に表現するには当該モデルは十分ではないが、ここではその局所的な昇温とエンドミル中心部の温度勾配により生じるエンドミル軸方向切込部におけるマクロな入熱と放熱の熱平衡を考える。すなわち、切り

屑の熱容量は無視し、工具の熱容量だけを考え、加工現象より工具に入熱する熱量 Q_1 と各種の冷却により放熱される熱量 Q_2 による現象として 1 次遅れ（1 次近似）モデルとする。切り屑側との連成をモデル化すると 2 次遅れモデルになるが、本報では工具側のみに着目して単純化する。その現象において十分な時間が経過して熱平衡状態にある時の温度（ここではステップ応答における外部ステップ温度）を T_s とし、熱平衡状態に至る過程での温度 T は工具の平均温度として考えると、円柱モデルの円周方向においては一定の伝熱現象であると仮定して考察する。

式(1)の微分方程式を解き、初期条件 $t=0$ で T_0 は室温として、その後、加工現象による入熱が十分な時間継続されて、当該部の温度が熱平衡状態に達して一様な温度 T_s となると仮定するような場合も同様な 1 次遅れ要素でモデル化され、当該部の温度 T_s とその他の部分は室温 T_0 であるとモデル化でき、左辺を無次元温度として

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = \exp\left(-\frac{4\alpha}{\rho CD}t\right) \quad (2)$$

と表される。したがって、 $T_m = \rho CD/4\alpha$ とすると、

$$T = T_s + (T_0 - T_s)\exp(-t/T_m) \quad (3)$$

となる。ここで T_m は一次遅れ系の時定数で、この場合は工具直径 D または等価直径 D_e 、すなわち熱容量に比例する関係にある。すなわち、式(3)の T は軸対称モデルにおいて軸方向にも半径方向にも温度勾配を有さない一様温度であるが、入熱の度合いを検討するための 1 次近似モデルとしてはある程度有効であると考えられる。ただし、マクロなモデルにおける主な入熱源と考えられる工具のすくい面において、その局部の温度は極めて高い（一般に炭素鋼の A_1 変態温度を超える）ため、 T の変化に起因する入熱量の変化はないものとしたモデルである。

3. 実験および解析結果と考察

3・1 熱画像と工具の表面温度

撮影した熱画像の例を図 6 に示す。1 パスの加工の終了間近の画像で、切りくずの飛散を含め、エンドミル工具の表面および工作物面の情報も同時に取得可能であることがわかる。しかしながら、それぞれの放射率が異なるため、単純に画像から同時にそれぞれの温度解析をすることは難しい。たとえば、被削材 JIS SUS310S は熱伝導率が低く切削熱が被削材側へ伝わりにくいため、加工面の温度は上がりにくく(JSME Data Book: Heat Transfer, 2001)工具の温度が上がりやすいと考えられる。また、加工面は光沢があり一般的には放射率が 0.2 以下のため加工面からの輻射は極めて少なく、逆に反射率が 0.8 以上と高くなるため高温の工具からの輻射赤外光の反射が大きく影響していると考えられる。さらに 1/30 毎の画像で予想される回転角度相当に画像が変動しているなど、動画からも間違いのない事を確認しており、そのままの熱画像では十分な S/N 比を達成することはできない可能性が高い。すなわち、図中においても昇温したエンドミルからの高い赤外線エネルギーが、光沢の加工面に反射している様子がわかる。光沢面の放射率が極めて低い（一般に 0.2 以下）ことを考慮すると、当該部のほとんどはエンドミルの反射像に起因する熱画像である可能性が高い。逆に、加工面に写るエンドミルの反射像や加工面自体、切りくずなどにおいても、それぞれの放射率の変化を考慮しながら評価を遂行すればそれらに関する多くの情報が取得できることもわかる。特に工具に着目すると、切削現象に関与している軸方向切り込み部で温度が高い様子がわかる。しかしながら本報においては、工具の軸芯に埋め込んだ熱電対による温度計測値との関係を考察するために、図 6 中の四角で囲んだエンドミル工具部の下部に存在する刃底を基準にして、そこから軸方向に 1mm 上方の位置のエンドミル表面の温度を代表値として考察を遂行する。またエンドミル刃部を熱風を用いて 300℃ の熱平衡状態に加熱して、その温度との対応関係に基づき放射率 0.43 と校正して温度換算した。赤外線サーモグラフィの動画では、フレームレート（連続画像取得の周期）とシャッタースピード（素子の応答性：エネルギーの積分時間）が重要な性能であるが、後者は前者より短い時間に設定されている。一般に対象物が室温に近いレンジでは放出エネルギーが小さいため積分時間は長くなる。一方、100℃以上の高温帯では短くなる。そのため温度変

動の周期がフレームレートよりも速い場合であっても、各画像のシャッタースピードが十分に速ければ、画像を取得した瞬間の刃の回転角度の位置に依存して、刃数×回転数の周波数で画像における表面温度が周期的に僅かに変化する様子をとらえることが出来ることが判明している(新堂他, 2014).

3・2 無線式ホルダシステムの基本特性の評価と回転する工具の基本温度特性の解明

図7は、共に工具直径6mm、全長50mm、母材が超硬合金で、材質・寸法が同じ工具を無線式ホルダシステムに取り付け、工作機械内において火炎バーナーで急速加熱しその後の自然空冷中の温度変化を計測した結果である。一方は、通常の4枚刃エンドミル(刃長14mm)で、他方は、今回特別に製作した刃部を持たないシャンク部のみの形状のものである。両者の違いは、刃部のチップポケットの有無による工具の体積(熱容量)のみである。工具は無回転で圧縮空気の吹き付け等を行っていない。シャンクと比較しエンドミルは早く温度が下がることがわかる。この現象は式(3)に基づく一次遅れ系のモデルにおいて、時定数 T_m が工具直径 D (熱容量)に比例し増加することと傾向が一致している。この時の時定数をグラフから読み取ると、シャンクが13.1s、エンドミルが10.2sであり、 $De/D=0.77$ とほぼ一致した。したがってエンドミル工具の蓄熱現象は、刃部のチップポケットによる工具体積の減少を考慮する必要があることが示された。

図8は、徐々にエンドミルの回転数を上げて、上記と同じ要領で加熱後空冷中の温度変化を計測した結果から、時定数を読み取った結果である。比較のために、ここでは10mm工具の場合も示す。最初に無回転の時に着目すると、工具 $D=6\text{mm}$ 、シャンク $D=6\text{mm}$ 、工具 $D=10\text{mm}$ の順で時定数 T_m が小さな値を示すことがわかる。図7の結果とも合わせると、熱伝達率 α が一定なら時定数は工具の直径 D (熱容量)に比例して増大する結果が確認できる。

次に、エンドミルの回転数が速くなるに従い速く冷却される様子がわかる。無回転時は自然対流熱伝達であるが、回転数が増大すると強制対流熱伝達になるためである。熱伝達率 α と流速 V の関係はJurgesの式に基づき、

$$\alpha = \alpha_0 \cdot V^n \quad (4)$$

とする(萩島他, 2004)。ここで α_0 は定数である。一般に強制対流においては物体周囲の流速の0.5乗程度で熱伝達率 α が向上するとされている。しかしながら、エンドミル工具の当該について実測して考察した例は極めて少なく(笹原他, 2006)、さらにその結果と実加工時の結果とを比較した例はないようである。同一の回転数で比較すると、時定数は工具「 $D=10\text{mm} > \text{工具 } D=6\text{mm}$ 」の関係になることがわかる。工具径が増大すると比例して周速(流速)も増大して熱伝達率の増大による冷却効果が高まる。しかしながら、その効果は0.5乗程度であるために、工具径の増大による熱容量の増大効果より小さく、結果として時定数は増大することが示された。さらにどちらの工具径のエンドミルでも、回転数が上昇すると強制対流の流速も上昇して強制冷却の効果がみられるが、工具 $D=6\text{mm}$ の場合には回転数が6,000rpm(周速度100m/min)付近、工具 $D=10\text{mm}$ の場合でも回転数が3,600rpm(周速度100m/min)付近を超えると、無回転時に対して時定数が10%程度小さな値となり、その強制冷却の効果が無視できないレベルになることもわかる。当然、工具の形状(刃の形状)により当該の効果は異なると考えられるが、本システムを用いることで、各工具に対しての強制対流による冷却効果を実験的に確認でき、現場における加工条件の設定にも貴重な情報となることもわかる。

図9は、無線式ホルダシステムの再現性を確認するため、同条件でエンドミル側面切削加工を2回行った結果である。1回目と2回目の計測結果にバラツキはほとんどなく、非常に再現性よく計測できていることがわかる。また、この結果から昇温時と空冷時の時定数を読み取ると、それぞれ2.7s、4.9sであった。この現象は式(3)に基づく工具側のみで考え、そのマクロな温度に対する一次遅れ系のモデル(切削部の局所的な昇温とマクロな温度との差に起因する入熱)の外部との熱伝達率 α であらわされる熱の伝わりやすさの違いによる影響であると考えられる。すなわち、前者の現象は被削材と工具すくい面側(切り屑側)、逃げ面側(加工面側)間での伝熱現象、後者の現象は空冷中の空気と工具間での伝熱現象、両者の違いが影響しているものと考えられる。被削材および空気の熱伝導率は 16W/mK 、 $26 \times 10^{-3}\text{W/mK}$ で両者に大きな差があり、昇温時と冷却時での時定数の差が生じる一因と考えられる。

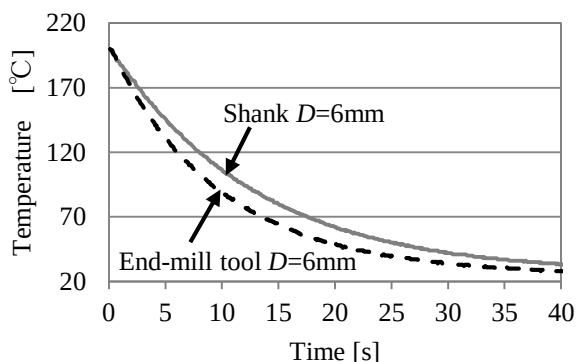


Fig. 7 Difference of the cooling rate by the difference in thermal capacity

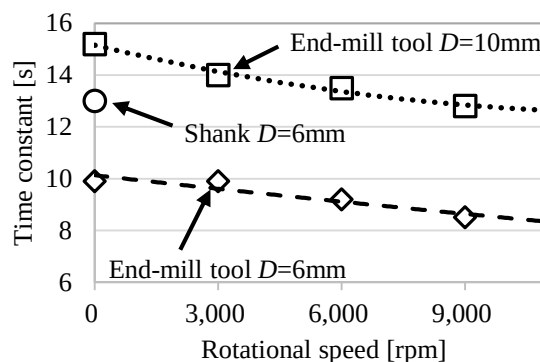
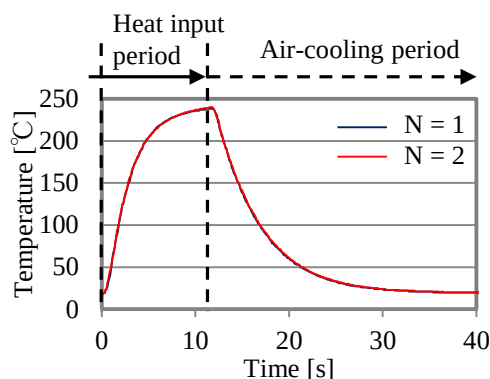
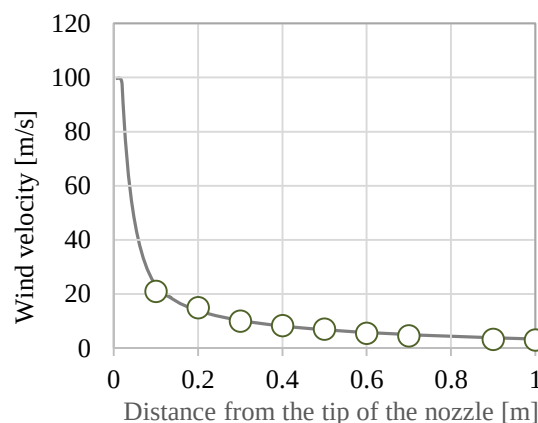


Fig. 8 Relations with spindle rotating speed and the time constant in the air-cooling time



Workpiece : SUS310S 100x100x50mm
 End-mill tool: OSG WXL-EMS
 $D = 6\text{mm}$, four-flute
 Machining conditions:
 $S = 1,450\text{rpm}$, $f = 0.05\text{mm/tooth}$
 $Ad = 12\text{mm}$, $Rd = 0.6\text{mm}$, MQL

Fig. 9 Confirm the reproducibility



Nozzle diameter : 3.175mm(1/8inch)
 Air flow quantity: 100L/min
 Air pressure : 0.8MPa

Fig. 10 Relations with distance from the tip part of the nozzle and wind velocity

図 10 は、ドライエアのノズル先端からの距離と流速の関係を、Nielsen-Kellerman 社製の風速計 Kestrel 1000 を用いて計測した結果である。自由空気噴流の流速は、ノズル噴出直後の微小区間では広がりほとんどなく、速度は一定であるが、その後は線形的に広がるモデルになり、そうすると距離に反比例して流速が下がることが判明している(宮城, 円能寺, 2011)。図 10 中のノズル先端からの距離 0.2m 以下の区間に着目すると、ノズル先端からの距離によって風速は大きく変化し 15~100m/s 程度になることがわかる。ここで図 8 中の工具回転数と時定数の関係に再度着目すると、 $D=6\text{mm}$, 工具回転数 9,000rpm, 工具周速にして 3m/s 程度でも十分に冷却効果が確認できるのに対し、ドライエアの風速はその数倍から数十倍であるためその冷却効果は非常に大きいことが示された。

3・3 クーラント条件の違いによる工具内部温度への影響

図 11 に、エンドミル側面切削加工時のクーラント条件のみを変化させた時の無線式ホルダシステムによる工具温度計測結果を示す。また加工終了後の冷却時間を十分に確保して、各条件における加工開始時の工具温度は一定にした場合である。また、各クーラント条件によって最高温度が異なり、また加工終了直後の冷却状態も異なることがわかる。そこで図 12 には、それぞれの昇温および冷却過程における時定数を示す。

ドライ加工 (図 11 中の A) の最高温度と比較すると、ドライエア法 (図 11 中の B) でも無視できないレベルの昇温抑制が見られることがわかる。さらに図 12 中の時定数でこれら (A と B) を比較すると、ドライエア法は昇温抑制だけでなく、加工後の冷却効果も非常に大きいことがわかる。さらに、水溶性油剤 (図 11 中の E) では顕著な昇温抑制および冷却効果がよくわかる。すなわち、エンドミルの内部・中央部付近における温度上昇は極

めて小さいことが示されている。図 12 中の時定数でこれら (A と E) を比較すると、昇温抑制でも加工後の冷却効果でも非常に小さな値であることもわかる。また、図 11 においてドライ加工と MQL (不水溶性油剤を被削材に塗布する) を比較 (図 11 中の A と C) する。図 12 において、両者を比較すると特に加工終了後の冷却過程においては時定数にほとんど差がない。しかしながら、ドライ加工と比較し最高温度は 100℃以上低いことから、工具すくい面および逃げ面での潤滑性の向上などによる発熱の低減による温度上昇の抑制効果は大きいこともわかる。最後に、図 11 においてドライ加工と MQL (不水溶性油剤を被削材に塗布する) とドライエア法を併用した場合を比較 (図中の A と D) する。MQL による発熱抑制と強制対流による冷却効果の両者により、ドライ加工と比較して最高温度は 120℃以上低いことがわかる。また図 12 より、後者は加工終了後の冷却過程における時定数も小さいことが確認できる。

上記内容は工具全体のマクロな視点からの考察であるが、その結果に基づきここからは、図 11 および図 12 について工具刃先部でのミクロ (すくい面上等の局所的な現象) な視点での考察を遂行する。エンドミル加工のような断続切削の場合、工具が一回転する間に刃先温度は急激に上下するためその温度差に起因する熱応力で刃先が損傷するヒートクラック現象が問題となるケースがある。すなわち、工具温度の冷却効果が裏目に出てしまうケースである。①加工点における発熱量、②工具刃先への入熱量、③工具刃先の冷却速度の 3 つの観点から整理すると、図 12 より E (水溶性クーラント使用) の場合、時定数が他の条件と比較し大幅に小さいことから③工具刃先の冷却速度が速いことがわかる。しかし、不水溶性剤と比較すると水溶性クーラントの潤滑性はそれほど期待できないため、工具すくい面、逃げ面での摩擦仕事、切りくずせん断面での摩擦仕事の低減にはそれほど寄与しないため①加工点における発熱量は大きいと考えられる。これらのことから刃先の温度変化量およびその速度は大きくヒートクラックが起りやすい状況と考えられる。一方、C・D (不水溶性油剤使用) の場合は潤滑効果による①加工点における発熱量の抑制に加え被削材および切りくずと工具刃先の境界面に油膜が介在することによる②工具刃先への入熱量の低減効果が期待できる (新堂他, 2012)。これらのことは図 11 における A (ドライ加工) と C (不水溶性油剤塗布エアブローなし) の最高温度の差となって表れている。③工具刃先の冷却速度については、図 12 の B (ドライエア) と D (不水溶性油塗布+ドライエア) の空冷時の時定数を比較すると、後者の時定数の方が大きいことがわかる。これは工具表面に付着した油膜が工具刃先と空気の間で介在することにより、対流熱伝達の影響を抑制するためと考えられる (寺内他, 1988)。以上のことから、不水溶性油剤を使用した場合、刃先の温度上昇を抑制しつつ急冷も抑制するため、急激な温度変化を抑制する効果があり断続切削においては優位にはたらく場合が多いことが今回の計測結果からわかる。

次にドライエア法の時定数と流速の関係について考察する。式(3)の時定数 T_m は熱伝達率 α に反比例することから、

$$\frac{T_{m1}}{T_{m2}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (5)$$

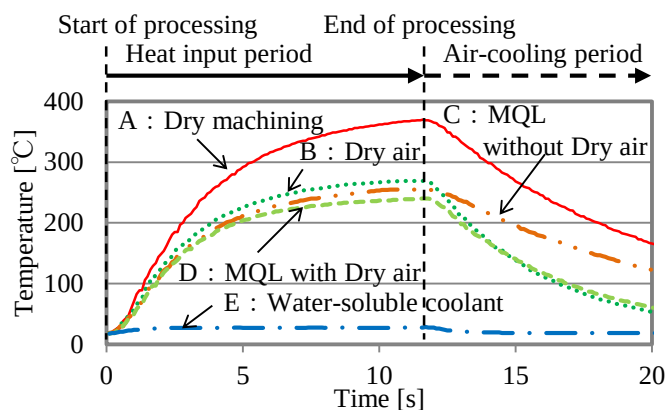
また、式(4)より

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \quad (6)$$

よって

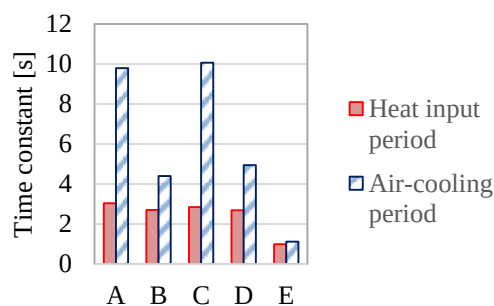
$$\frac{T_{m1}}{T_{m2}} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \quad (7)$$

ここで図 8 より $D=6\text{mm}$ エンドミル、工具回転数 $S=9,000\text{rpm}$ 、エアブローなしの時の時定数 $T_{m1}=8.8\text{s}$ 、流速を $V_1=3\text{m/s}$ とし、図 10 および図 12 より $D=6\text{mm}$ エンドミル、工具回転数 $S=1,450\text{rpm}$ 、エアブローありの時の時定数 $T_{m2}=4.4\text{s}$ 、流速を $V_2=15\text{m/s}$ とし、式(7)に代入すると $n=0.43$ となり、一般に強制対流においては物体周囲の流速の 0.5 乗程度で熱伝達率 α が向上するとされていることとほぼ一致していることがわかった。



Workpiece : SUS310S 100x100x50mm
 End-mill tool: OSG WXL-EMS
 $D = 6\text{mm}$, four-flute
 Machining conditions:
 $S = 1,450\text{rpm}$, $f = 0.05\text{mm/tooth}$
 $Ad = 12\text{mm}$, $Rd = 0.6\text{mm}$

Fig. 11 Effect of cooling and lubricating method for the tool temperature



Cooling and lubricating method
 A : Dry machining
 B : Dry air
 C : MQL without Dry air
 D : MQL with Dry air
 E : Water-soluble coolant

Fig. 12 Relations of the time constant and method for cooling and lubricating

3・4 昇温時の工具の表面と内部温度の差

前節までの考察ではエンドミル加工部（工具と工作物が接する軸方向部）の温度は一樣として近似していた。しかしながら図6の画像をより詳細に評価すると、軸方向に加工部との境界部に比べれば温度勾配はかなり小さいものの、厳密には当該部の半径方向にも僅かに温度勾配を有することがわかる。そこで本節以後は、さらに考察を深めるために加工部の半径方向の温度勾配についても検討する。すなわち、工具の半径方向の中心温度を内部の温度、工具の半径方向の最外周の平均温度（加工時の刃先各部のすくい面上等の局所的な昇温度でなく、主に加工現象時以外の逃げ面のサーモグラフィ等で観察可能な工具回転中の平均温度）を表面温度と定義する。図13に、切削速度 45m/min （工具直径 6mm ，4枚刃，工具突出し長さ $L/D=3$ ），送り量 0.05mm/tooth ，軸方向切込み 12mm ，径方向切込み 0.6mm とした時のモニタ温度（各時間の画像中で、エンドミル刃部における最高温度および熱電対によるエンドミル内部の温度計測結果）を示す。サーモグラフィの結果は、別途 FEM 解析の結果(新堂他, 2014)と比較して、その妥当性の検証を済ませてある。エンドミル刃部表面および内部の温度は加工開始直後から上昇し、最高温度はある一定値に収束する様子がわかる。またエンドミル刃部表面と比較し、内部の温度は加工熱源から少し遅れて熱が伝わるため急激な上昇は見られないが、収束温度はほぼ同程度まで上昇することが確認でき、妥当な結果であった。

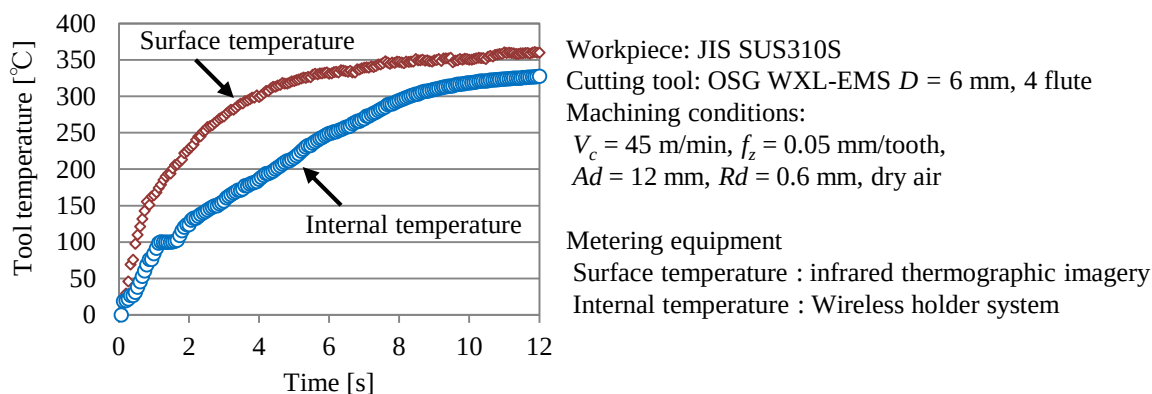


Fig. 13 Comparison between surface temperature and internal temperature

4. 有限要素法解析による考察

4・1 有限要素法 (FEM) 解析モデル

エンドミルの先端部の温度測定の結果および昇温時の蓄熱モデルの妥当性について FEM 解析を用いて検討する。図 9 の計測結果などからも示されているように、本論文では工具の各刃で生じるマイクロな温度変動を対象とするのではなく、主にマクロな蓄熱作用による当該部の一様な昇温に着目している。さらに 3.4 節では工具回転中の平均温度を表面温度と定義したので、エンドミルの円周方向においては一定の伝熱現象であると仮定し、軸対象モデルとして円筒形状で近似する。したがって、エンドミルの軸方向の先端から軸方向切込みの箇所までの表面に熱流束を与える。対流熱伝達の影響もトータルで加味した熱収支の平均を平均熱流束 ($=22.6\text{W}$, 一定) として与えるため、その他は断熱境界とする。図 6 からわかるように切削加工点で生じた発熱は、切りくず、ワークおよびエンドミル工具に伝わる。とくにエンドミルに着目すると、加工点からの入熱により、シャンク部からホルダ部に向けて昇温の現象が観察される。したがって、ホルダの一部までをモデル化する。用いた熱物性値は、エンドミルは超硬合金として、密度 $14,800\text{kg/m}^3$, 比熱 $0.21\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 熱伝導率 $80\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ホルダ部は鋼材として、密度 $7,860\text{kg/m}^3$, 比熱 $0.50\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 熱伝導率 $42\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ とした。図 3 からわかるように、エンドミルは刃部においてチップポケットを有するために体積が小さく、刃部からシャンク部に向けて次第にその軸直角断面形状が変化している。一方、蓄熱現象において熱容量の変化、また伝熱現象においては断面形状の変化が重要な要因になるものと考えられる。また図 7 の結果からもその差が確認できる。そこでシャンク部と刃部の熱容量 (体積) の違いを考慮するために、刃部 (刃の最大外径は D) を等価直径 (De) でモデル化した (新堂他, 2014)。

4・2 解析結果および考察

上述のモデルおよび図 13 における赤外線サーモグラフィによる工具表面温度の計測結果に相当する入熱量を 22.6W とし解析した結果の一例を図 14 および図 15 に示す。図 15 における工具表面温度に着目すると、図 13 における赤外線サーモグラフィによる工具表面温度が一致している様子がわかる。この時の軸対象モデル中心軸上の熱電対挿入位置付近 (エンドミル底面より 1mm 上方) の温度変化も解析を図 15 に破線で合わせて示す。この結果は、図 13 に示される無線式ホルダシステムによる内部温度の計測結果と一致することがわかる。

以上より、無線式ホルダシステムによる内部温度データの取得方法は、赤外線サーモグラフィの連写画像で取得した温度情報と同程度のサンプリング速度かつ信頼性を有していることが示された。さらに、赤外線サーモグラフィ画像の場合、MQL 加工時などは工具表面に付着する油分により放射率が変化し、計測の信頼性が低下したり、その校正に労力を要するが、本手法ではそのような条件でも安定して容易に加工状態のモニタが可能であることも示された。また、工具にクーラントが大量に供給された環境下 (例えば、図 11 の E 条件) や、穴加工など工具が被削材の中に入り加工点がサーモグラフィ画像で確認できないような場合には、本システムが極めて有効な工具温度のモニタ手法になることもわかった。

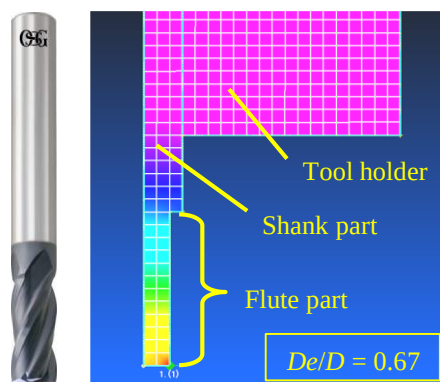


Fig. 14 FEM model with equivalent diameter

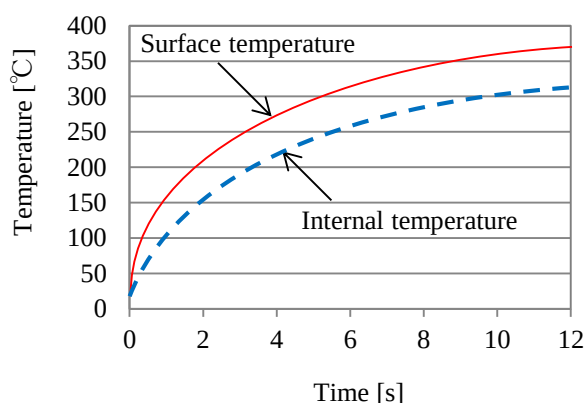


Fig. 15 FEM analysis result of temperature by axial symmetry model

5. 結 言

エンドミル工具の回転中の内部温度を直接評価するために、細穴放電加工を応用した熱電対の工具埋め込み技術と無線式ツールホルダシステムを開発し、その性能と有用性を考察した。その結果、以下の結果を得た。

- 1) 無線式ホルダシステムを用いた工具内部の温度計測の結果は、赤外線サーモグラフィの連写機能を用いて計測した工具表面の温度計測の結果と同程度の精度と信頼性を確保できていることがわかった。
- 2) エネルギ的非定常熱伝導の蓄熱モデルに基づき、工具直径の違いや各種クーラント条件の違いによる最高温度や応答性の違いを評価して、その有用性を確認できた。
- 3) 赤外線サーモグラフィ画像による診断では、MQL 加工時などは工具表面に付着する油分により放射率が変化し、計測の信頼性が低下したり、その校正に労力を要するが、本手法ではそのような条件でも安定して容易に加工状態のモニタが可能であることも示された。また工具にクーラントが大量に供給された環境下など、工具をサーモグラフィ画像で直接確認できないような場合には、本システムが極めて有効な工具温度モニタの手法になることもわかった。

文 献

- 萩島理, 谷本潤, 成田建一, 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー, 水文・水質源学会誌, Vol.17, No.5 (2004), pp.536-554.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 松村光孝, 住田誠太, プリント基板用 CAM システムに関する研究: 基板温度モニタリングに基づく穴あけ順の考察, 精密工学会誌, Vol.74, No.7 (2008), pp.713-718.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 片山傳生, 中川平三郎, 中村隆英, 下河洋平, 井上久弘, 赤外線サーモグラフィによるプリント基板のマイクロドリル加工現象のモニター: アラミド繊維強化基盤の加工時のドリル温度について, 日本材料学会誌, Vol.53, No.5 (2004), pp.553-559.
- 日本機械学会, 伝熱工学資料第 4 版 (2001), pp.6-7.
- Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E. and Ogawa, K., Investigation of end-milling condition decision methodology based on data mining for tool catalog database, Int. Journal of Automation Technology, Vol.6, No.1 (2012), pp.61-74.
- 宮城一樹, 円能寺久行, 軸対象空気噴流の流動特性, 東海大学紀要, Vol.51, No.2 (2011), pp.145-149.
- 岡田将人, 細川晃, 浅川直紀, 藤田祐介, 上田隆司, 低熱伝導率難削材のエンドミル加工における MQL の工具温度への影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.3093-3103.
- Sakakura, M., Ohnishi, T., Shinoda, T., Ohashi, K., Tsukamoto, S. and Inasaki, I., Temperature distribution in a workpiece during cylindrical plunge grinding, Production Engineering, Vol.6, No.2 (2012), pp.149-155.
- Sato, M., Tamura, N. and Tanaka, H., Temperature variation in the cutting tool in end milling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.133, No.2 (2011), p.021005_1-7.
- 新堂正俊, 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 赤外線画像に基づくエンドミル加工現象の診断技術の開発 (工具温度と加工能率の関係の考察), 同志社大学理工学研究報告, Vol.53, No.2 (2012), pp.77-83.
- 新堂正俊, 松田亮, 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 赤外線サーモグラフィ画像の解析に基づくエンドミル加工温度の解明, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.7 (2014), pp.39-44.
- 杉田直彦, 光石衛, 骨のエンドミル加工における切削温度と冷却効果, 精密工学会誌, Vol.72, No.2 (2006), pp.276-280.
- 田川正人, 下地敏央, 太田安彦, 二線式熱電対による変動温度測定法の精度評価と改良, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.64, No.625 (1998), pp.3077-3083.
- 寺内喜男, 永村和照, 呉昌林, 歯車装置における熱バランスに関する研究 (第 1 報), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.54, No.504 (1988), pp.1889-1896.
- 和多洋平, 大西孝, 坂倉守昭, 篠田崇幸, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒プランジ研削における工作物熱変形量の測定とシミュレーション解析 (第 1 報), 日本機械学会第 8 回生産加工・工作機械部門講演会論文集 (2010),

References

- Hagishima, A., Tanimoto, J. and Narita, K., Review of former researches on the convective heat transfer coefficient of urban surfaces, *Journal of the Japan Society of Hydrology and Water Resources*, Vol.17, No.5 (2004), pp.536-554 (in Japanese).
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., Matumura, M. and Sumida, S., Study on CAM systems for printed wiring boards : Investigation of drilling tool path considering PWBs temperature, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.74, No.7 (2008), pp.713-718 (in Japanese).
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Katayama, T., Nakagawa, H., Nakamura, T., Simokawa, Y. and Inoue, H., Monitoring of micro drilling of printed wiring boards by thermography : Drilling temperature of printed wiring boards reinforced by aramid fiber, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.53, No.5 (2004), pp.553-559 (in Japanese).
- JSME Data Book: Heat Transfer, 4th Edition (2001), pp.6-7 (in Japanese).
- Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E. and Ogawa, K., Investigation of end-milling condition decision methodology based on data mining for tool catalog database, *Int. Journal of Automation Technology*, Vol.6, No.1 (2012), pp.61-74.
- Miyagi, K. and Ennouji, H., Axisymmetric air jet flow characteristics, *The Bulletin of Tokai University*, Vol.51, No.2 (2011), pp.145-149 (in Japanese).
- Okada, M., Hosokawa, A., Asakawa, N., Fujita, Y. and Ueda, T., Influence of minimum quantity lubrication on tool temperature in end milling of difficult-to-cut materials having low thermal conductivity, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.78, No.792 (2012), pp.3093-3103 (in Japanese).
- Sakakura, M., Ohnishi, T., Shinoda, T., Ohashi, K., Tsukamoto, S. and Inasaki, I., Temperature distribution in a workpiece during cylindrical plunge grinding, *Production Engineering*, Vol.6, No.2 (2012), pp.149-155.
- Sato, M., Tamura, N. and Tanaka, H., Temperature variation in the cutting tool in end milling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.133, No.2 (2011), p.021005_1-7.
- Shindou, M., Kodama, H., Hirogaki, T. and Aoyama, E., Development of estimating method for end-mill processes by an infrared imagery (Investigation between tool temperature and process efficiency), *The Science and Engineering Review of Doshisha University*, Vol.53, No.2 (2012), pp.77-83 (in Japanese).
- Shindou, M., Matsuda, R., Kodama, H., Hirogaki, T. and Aoyama, E., Elucidation of end-mill temperature based on an infrared imagery with a thermography, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol.58, No.7 (2014), pp.39-44 (in Japanese).
- Sugita, N. and Mitsuishi, M., Cutting temperature and cooling effects in end milling of bone, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.72, No.2 (2006), pp.276-280 (in Japanese).
- Tagawa, M., Shimoji, T. and Ohta, Y., Improvement of a two-thermocouple probe technique for fluctuating temperature measurement, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.625 (1998), pp.3077-3083 (in Japanese).
- Terauchi, Y., Nagamura, K. and Wu, C., On heat-balance of gear meshing apparatus (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.54, No.504 (1988), pp.1889-1896 (in Japanese).
- Wada, Y., Onishi, T., Sakakura, M., Shinoda, T., Ohashi, K. and Tsukamoto, S., Simulation analysis and measurement of workpiece thermal deformation during cylindrical plunge grinding (1st Report), *Proceedings of the 8th industrial processing Conference* (2010), pp.189-190 (in Japanese).