

Monitoring of End-mill Process with a Wireless Multifunctional Tool Holder System

正 〇新堂 正俊 (山本金属製作所) 正 松田 亮 (山本金属製作所)

正 古木 辰也 (同志社大)

正 廣垣 俊樹 (同志社大)

正 青山 栄一 (同志社大)

Masatoshi SHINDOU, Yamamoto Metal Technos Co., Ltd., 4-7, Setoguti 2-chome, Hirano-ku, 547-0034 Osaka Japan

Ryo MATSUDA, Yamamoto Metal Technos Co., Ltd.,

Tatsuya HURUKI, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, Doshisha University

We developed a wireless multifunctional tool holder system equipped with a thermocouple in the end mill to monitor the tool internal temperature. We compared the temperature measured by high performance infrared thermographic imagery with that measured by a wireless tool holder system when end milling the stainless steel under dry coolant conditions. 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.

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することや、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¹⁾および工作物の穴周辺の温度²⁾を解明して、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^{3,4)}、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⁵⁾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表面温度を評価した例⁶⁾などがある。しかしながら、被削材の内部または工具表面の温度であり、回転するエンドミル工具の内部の温度を直接評価して、工具側への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ー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複数個所同時計測可能とする無線式多機能ホルダーシステムを開発し、エンドミル加工時の工具の内部温度のモニターに適用した。また、高速度赤外線サーモグラフィによる工具刃先温度や工具中心軸の温度分布の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ー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 実験方法および提案する手法

2.1 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ーにてエンドミルを保持した。エンドミル工具 (OSG社製 WXL-2D-DE) は、2枚刃、ねじれ角 30° 、TiAlNコーティングを用いた。工具直径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 $25 \times 50 \times 100$ mm)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 JIS SUS310S 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。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。主な加工条件は、切削速度27m/min、送り量0.05mm/tooth、軸方向切込12mm、径方向切込0.6mmである。

2.2 高速ビデオ赤外線サーモグラフィによる工具表面温度計測

図1は、エンドミル加工プロセスを高速ビデオ型赤外線サーモグラフィでモニターするための配置図である。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。撮影に

使用したサーモグラフィは FLIR Systems 社製 SC7000 で、温度分解能は 0.02℃、インジウムアンチモン (InSb) 640 x 512 画素、検出波長 1.5~5.1 μm である。露光時間 190 μs、500 枚/s の連写にて 1 パス加工を記録した。

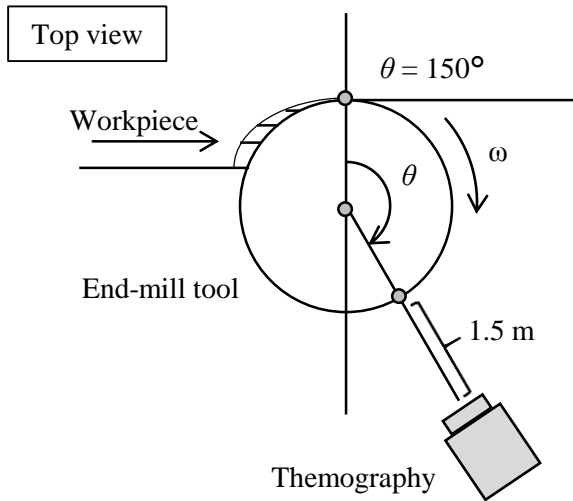


Fig.1 Setup for monitoring end-mill process

2.3 無線ホルダーによる工具内部多点温度の計測

ホルダー内部にマイコンを配置し、加工中工具から得られる情報をワイヤレスでデータ収集用 PC へ送信 (1/30s サンプルング) できる無線式温度計測ツールを開発した。図 2 にその外観を示す。エンドミル中心軸付近にシャンク部側から放電加工によりそれぞれ深さの異なる熱電対挿入用の穴 3 箇所を穿孔を行ったのち、熱電対をそれぞれの穴に挿入して加工中の工具内部温度を多点同時計測した。

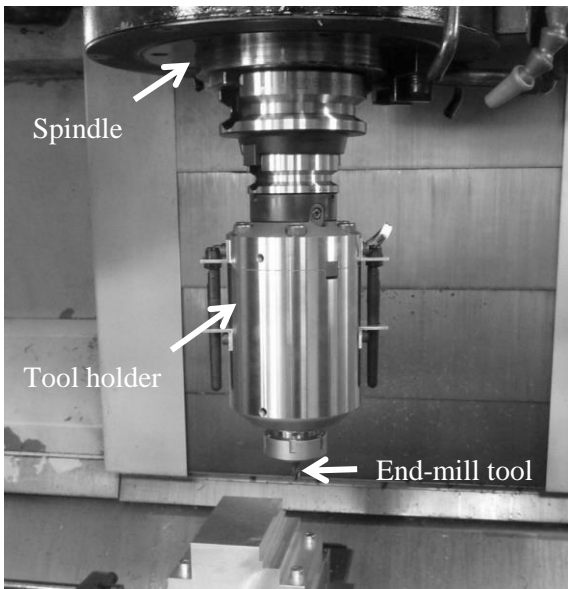


Fig.2 Wireless multifunctional measurement tool holder system

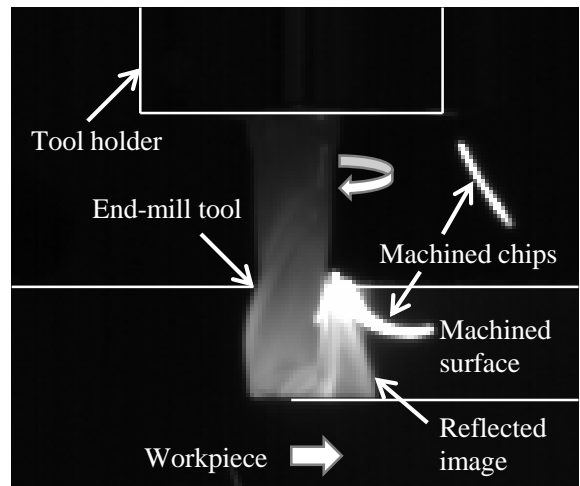
3 モニター結果および考察

3.1 モニター画像の解析

工具直径 10mm、切削速度 27m/min、送り量 0.05mm/tooth、軸方向切込み 12mm、径方向切込み 0.6mm、被削材 SUS310 (寸法 25×50×100mm)、クーラント dry air の条件におけるモ

ニター画像を図 3 に示す。工具 (OSG 製 WXL-2D-DE) は、2 枚刃、ねじれ角 30°、TiAlN コートである。図 3 より、エンドミルすくい面の温度や切り取られた直後の切りくずの温度および光沢のある加工面に反射した工具逃げ側面の温度などが鮮明に映し出されており、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詳細な温度解析が可能であることがわかる。

図 4 は、加工パスの後半 (蓄熱が十分に進んだ時) にサーモグラフィの連射機能により撮影した一刃が切り始めてから切り終わるまでの一連の様子である。最も明るく見えているのが切りくずで刃のねじれ角に沿って、下方から上方へ排出されていく様子がよくわかる。切りくずの放射率はざらざらした表面と光沢のある裏面では大きな差があり、表面の放射率が高いと考えられるが、仮に工具の赤外線放射率 0.6 と同程度であるとすれば、この時の切りくずの温度は 210℃程度を示した。一方、エンドミル底刃付近のすくい面の温度は 100℃前後を示し、切りくずの温度とエンドミルのすくい面の温度を容易に切り分けて考察することが可能であることがわかる。



Workpiece: JIS SUS310S

Cutting tool: OSG WXL-2D-DE

$D = 10 \text{ mm}$, 2 flute

Machining conditions:

$V_c = 27 \text{ m/min}$, $f_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$,

$Ad = 12 \text{ mm}$, $Rd = 0.6 \text{ mm}$, dry air

Fig.3 Infrared imagery of end-mill process

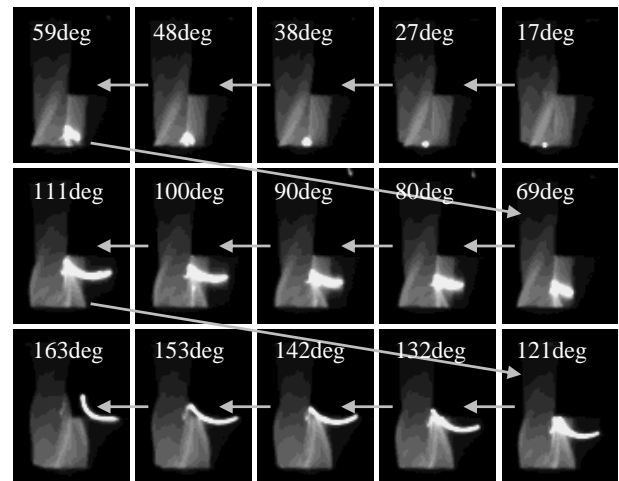


Fig.4 Consecutive infrared images

図5に連続画像から取得したエンドミルが一回転する間の刃先温度変化を示す。底刃から上方へ2mmおよび8mmはどちらも切削に関与している箇所温度差はあまり見られないが、切削に関与していない14mmの温度は極端に温度が低いことがわかる。図6にエンドミル中心軸の表面温度分布を示す。径方向と軸方向の温度勾配を比較すると、径方向の温度勾配が1.0°C/mmに対し軸方向の温度勾配が1.9°C/mmとおおよそ2倍程度あり、刃先から伝わった熱が中心軸を通りシャンク側へ流れていく様子がよくわかる。

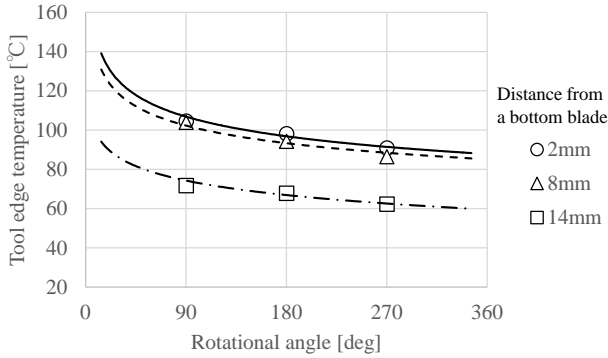


Fig.5 Tool edge temperature variations for one cycle

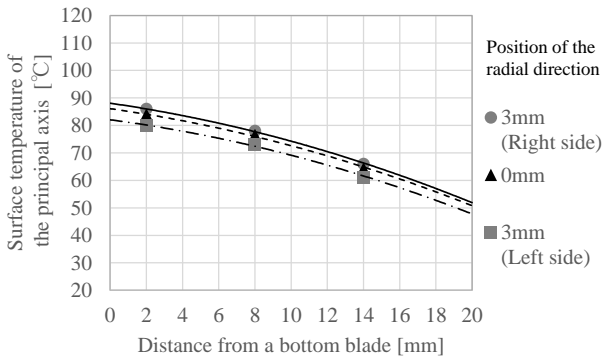


Fig.6 Surface temperature distribution of principal axis

3.2 工具内部温度の考察

無線式多機能ホルダーシステムによる工具内部温度の計測は、切削条件、クーラント条件を高速ビデオ型赤外線サーモグラフィの時と同じにして、1パス(100mm)加工中の工具中心軸の温度を底刃より2mm, 8mm, 14mm位置の3点同時計測した。その結果を図7に示す。次にドライエアの冷却効果を確認するため、エアノズル先端と工具の距離を種々変更し、加工パスの後半(蓄熱が十分に進んだ時)の工具温度の違いを整理した結果を図8に示す。図8より、ノズル先端と工具間の距離の違いによって工具温度が大きく異なる様子がよくわかる。距離を60mm程度まで近づけると距離180mmの時と比較しおおよそ3割程度も温度上昇を抑制できており、強制対流熱伝達による冷却効果が大きいことがわかる。また、工具温度は異なるが、軸方向の温度勾配はノズルの距離に関わらず概ね2.0°C/mmで一定であることがわかる。これは図6の高速赤外線サーモグラフィによるエンドミル中心軸の表面温度分布の計測結果とも非常によく一致していることがわかる。

図9は、ドライエアのノズル先端からの距離と流速の関係を示す。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

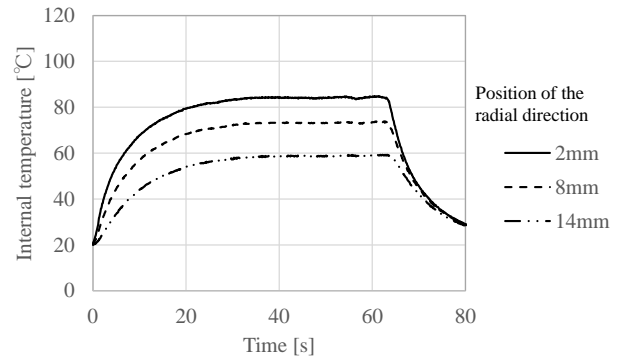
であるが、その後は線形的に広がるモデルになり、そうなると距離に反比例して流速が下がることが判明している⁷⁾。図9のノズル先端からの距離0.2m以下の区間に着目すると、ノズル先端からの距離によって風速は大きく変化し15~100m/s程度になることがわかる。ここで熱伝達率 α と流速 V の関係はJürgesの式に基づき、

$$\alpha = \alpha_0 \cdot V^n \quad (1)$$

とする⁸⁾。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。また、エンドミルの昇温を熱エネルギー的非定常伝熱の蓄熱モデルで考えるとき、その時定数 T_m は熱伝達率 α に反比例する⁴⁾。よって時定数 T_m と流速 V の関係は、

$$\frac{T_{m1}}{T_{m2}} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \quad (2)$$

となる。図7および図9より時定数 T_m と流速 V と読み取ることができ、ノズル先端と工具の距離がそれぞれ60mm, 120mmのとき温度計測位置が底刃から2mmの計測結果を整理して $T_{m60}=4.9s$, $V_{60}=36m/s$, $T_{m120}=7.1s$, $V_{120}=19m/s$ を求め、式(2)に代入すると $n=0.5$ 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一致していることがわかった。



Workpiece: JIS SUS310S
Cutting tool: OSG WXL-2D-DE
 $D = 10 \text{ mm}$, 2 flute
Machining conditions:
 $V_c = 27 \text{ m/min}$, $f_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$,
 $A_d = 12 \text{ mm}$, $R_d = 0.6 \text{ mm}$, dry air
Nozzle diameter : 3.175mm(1/8inch)
Air flow quantity : 100L/min
Air pressure : 0.8MPa
Distance from the tip part of the nozzle : 120mm

Fig.7 Measurement result of the internal temperature at a plurality of measurement points

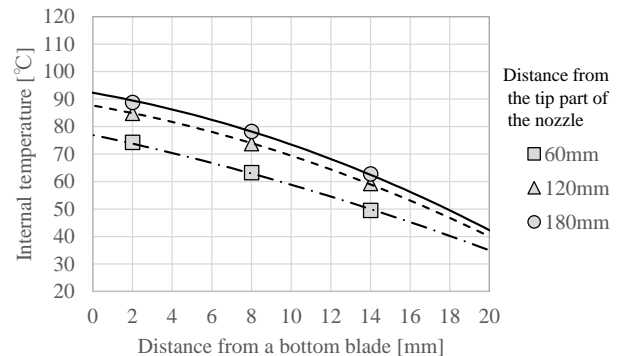
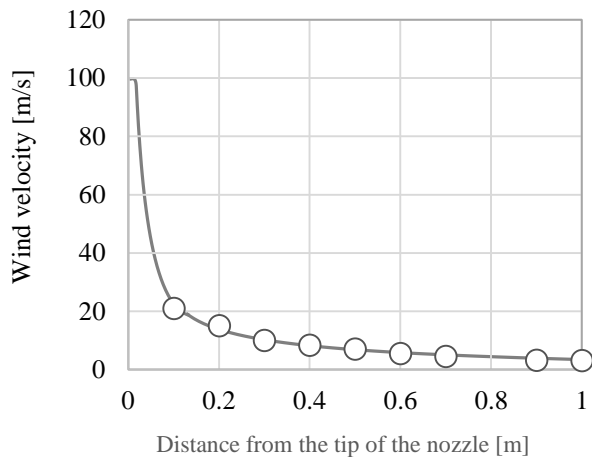


Fig.8 Relations with tool internal temperature and wind velocity



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

Fig. 9 Relations with distance from the tip part of the nozzle and wind velocity

3.3 FEM 解析に基づく工具内部温度の考察

エンドミルの温度測定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。主にマクロな蓄熱作用に着目するのでエンドミルは軸対象モデルとして円筒形状で近似し、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。その他は断熱境界とする。図 3 からわかるように切削加工点で生じて発熱は、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ー部に向けて昇温の現象が観察される。したがって、ホルダー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 $80\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、ホルダー部は鋼材として、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。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 (D_e) でモデル化した⁴⁾。

上述のモデルおよび図 6 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決定して表面温度の解析を行った結果の一例を図 10 に示す。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 2mm, 8mm, 14mm 上方)の内部温度解析結果を図 10 に破線で合わせて示す。この結果は、図 6 に示される無線式多機能ホルダー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、無線多機能ホルダー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信頼性を有していることが示

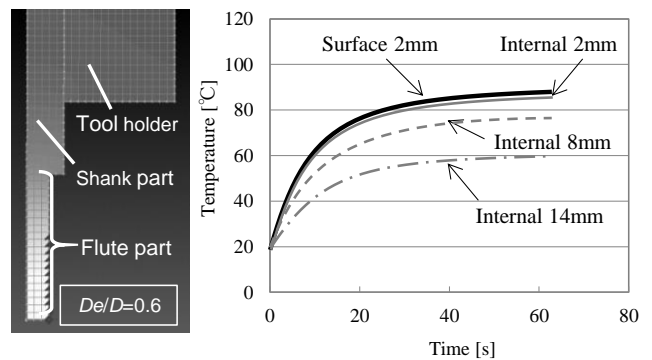


Fig. 10 FEM analysis result of temperature by axial symmetry model

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するため、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ー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ー手法になることもわかった。

4 結論

エンドミル加工現象を解明するため、高速ビデオ型サーモグラフィおよび無線式多機能ホルダーシステムを用いたモニター技術に取り組んだ。結果を以下にまとめる。

- (1) 高速ビデオ型サーモグラフィによるモニター手法の有効性が確認でき、加工中の各刃と切り屑の温度の変化を解明できた。
- (2) 無線式ホルダーにより多点の同時温度計測を遂行して、FEM 解析結果と合わせてエンドミル軸方向の温度分布を解明した。
- (3) それら計測により、エンドミル加工時の蓄熱作用とドライエアの冷却作用の関係を明確にできた。

参考文献

- 1) 廣垣, 青山, 片山, 中川, 中村, 下河, 井上, 日本材料学会誌, Vol.53, No.5 (2004), pp.553-559.
- 2) 廣垣, 青山, 小川, 松村, 住田, 精密工学会誌, Vol.74, No.7 (2008), pp.713-718.
- 3) Kodama, Hirogaki, Aoyama, and Ogawa, Int. Journal of Automation Technology, Vol.6, No.1 (2012), pp.61-74.
- 4) 新堂, 松田, 児玉, 廣垣, 青山, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.7 (2014), pp.39-44.
- 5) 杉田, 光石, 精密工学会誌, Vol.72, No.2 (2006), pp.276-280.
- 6) 岡田, 細川, 浅川, 藤田, 上田, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.3093-3103.
- 7) 宮城, 円能寺, 東海大学紀要, Vol.51, No.2 (2011), pp.145-149.
- 8) 萩島, 谷本, 成田, 水文・水質源学会誌, Vol.17, No.5 (2004), pp.536-554.