

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560124

研究課題名（和文） 断続切削における工具表層の過渡的温度特性と熱化学反応性が工具摩耗に及ぼす影響

研究課題名（英文） Transient temperature variation in the tool surface layer in interrupted cutting and the effect of thermochemical reactivity on tool wear

研究代表者

佐藤 昌彦 (SATO MASAHIKO)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50244512

研究成果の概要（和文）：本研究では、2本の光ファイバを組み合わせた新たな温度測定方法を開発し、エンドミル加工中の工具刃先表層の加熱冷却特性について調べた。理論的にも検討している。アップカットでは切削直後に温度が最大となり、ダウンカットでは切削中に最大となる。工具表層において切削時間 10ms の間に約 0.5mm あたり 300℃の勾配を持つ加熱と冷却の繰り返し負荷を受けている。1回あたりの切削時間の違いが工具の摩耗に及ぼす影響は小さい。

研究成果の概要（英文）：A newly developed infrared radiation pyrometer equipped with two optical fibers is used to measure the cyclic temperature variation beneath the rake face of a cutting tool in end milling. A theoretical analysis is conducted using a semi-infinite rectangular corner model. In up milling, the temperature beneath the rake face increases gradually during the cutting period and reaches a maximum just after the cutting. In down milling, the temperature increases immediately after cutting starts; it reaches a maximum and then begins to decrease during cutting. The temperature gradient toward the inner direction of the tool insert is about 300 degrees Celsius per 0.5 mm. The effect of a cutting time on a tool wear is small.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：切削，エンドミル，温度

## 1. 研究開始当初の背景

エンドミル加工は、機械構造用部材や金型などの高精度機械加工に広く適用されている。ところで、エンドミル加工は回転工具による断続切削であることから、加工中の工具刃先は過渡的な温度変化を繰り返し受けて

おり、旋削加工と比べると、加工中の工具刃先の熱挙動は複雑である。

工具刃先の温度上昇は、工具表層の熱軟化や被削材の凝着摩耗によって工具摩耗を促進し、切削抵抗の増大と加工精度の低下といった悪影響を引き起こす。このため、これま

でも切削温度と工具摩耗に関して数多くの研究が進められている。

最近、超音波だ円振動切削によってダイヤモンド工具による鉄系材料の超精密切削による鏡面加工が実現され、また短切削時間の断続切削においては工具摩耗が低減することが示唆されている。これは、工具表層の材質変化には数 ms の時間が必要であると考えられていることから、摩耗に関しては、切削における工具刃先の到達温度とその温度の持続時間が重要であると考えられる。

このように、エンドミル加工に代表される断続切削においては、切削時間を工具の熱化学反応による構造変化に必要な時間よりも短くすることによって工具摩耗を低減し、また、これまで加工が困難とされていたダイヤモンド工具による鉄系材料の超精密切削の可能性が示されつつあるのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究は、断続切削であるエンドミル加工における加工中の工具刃先の温度変化を測定するための新たな温度測定方法を開発し、工具表層の過渡的な加熱冷却特性を明らかにすることを主な目的としている。また、断続切削における切削時間を変えて実験を行うことにより、切削時間が工具摩耗に及ぼす影響についても調べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験方法

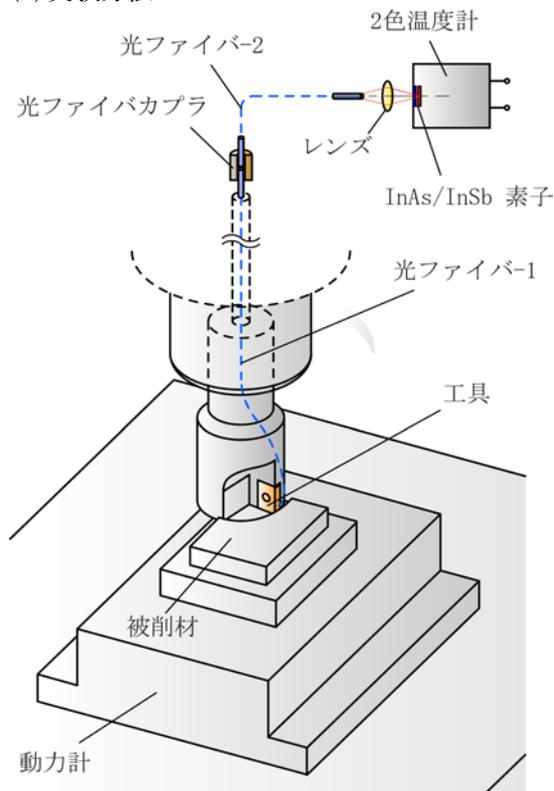


図1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。エンドミルカッターは1枚刃であり、スローアウェイチップとしてストレートタイプの超硬K10を使用した。カッターの直径は52mmである。

温度測定には、2本の光ファイバを組み合わせた放射温度計を用いている。工具チップには、温度測定用の細い穴がチップの底面からすくい面近傍まであけてあり、光ファイバ-1を挿入し、固定している。切削中に発生する加工熱によって工具刃先は加熱され、工具にあけた穴の底からはその温度に応じた赤外線が放射される。その赤外線を光ファイバ-1で受光する。光ファイバ-1は、エンドミルの回転中心軸に沿って主軸内を通してある。ファイバ-1内を伝送してきた赤外線はその端面から射出されるが、それを同軸上に配したファイバ-2によって再受光し、温度計へと伝送する。2本の光ファイバを使用することにより、回転している工具先端で受光した赤外線を工作機械の外に設置した温度計へと伝送することが可能となる。

被削材にはチタン合金Ti-6Al-4Vを使用した。また被削材は水晶圧電型の切削動力計に取り付けてあり、チャージアンプを介して切削抵抗を測定することができる。動力計と温度計からの出力は、デジタルデータレコーダに記録される。切削速度は214m/min、送りは0.105mm、軸方向切込みは2mm、半径方向切込みは21mmである。

工具チップには、温度測定用の光ファイバを挿入するための細い穴が、細穴放電加工機を用いてチップ裏面からすくい面近くまであけてある。すくい面と穴の底面との距離は0.1mm~0.5mmまで0.1mm刻みで変化させた。穴の直径は約0.5mmであり、穴の位置は、工具主切れ刃から0.6mm、前切れ刃から1.3mmである。穴深さの異なる工具を用いることにより、加工中の工具すくい面表層の異なる深さにおける内部温度の変化を測定することができる。

光ファイバには、フッ化物ガラスを主成分としたものを使用している。伝送波長域は約1~4 $\mu\text{m}$ であり、石英ガラスファイバよりも長い波長域の赤外線まで伝送することができる。受光角は約12.7°である。ファイバのコア径は、回転側のファイバ-1が200 $\mu\text{m}$ 、受け側のファイバ-2が430 $\mu\text{m}$ である。2本の光ファイバの接続部において、ファイバの端面は、約100 $\mu\text{m}$ 離している。ファイバ-2に伝送された赤外線は、集光レンズを介して赤外線検出素子に集光される。

赤外線検出素子にはInAs/InSb素子による2色温度計を使用した。これは積層化された2色素子であり、1-3 $\mu\text{m}$ の短波長域の赤外線をInAsが検出し、3-5 $\mu\text{m}$ の長波長域の赤外線をInSbが検出する。それぞれの赤外線検出素子からの出力は電気回路によって増幅さ

れ、デジタルレコーダに記録される。2つの素子からの出力比を求めることにより、温度に換算する。温度計の増幅回路は約100kHzまで損失の無い特性を有しており、本研究で使用するには十分な特性となっている。

## (2) 解析方法

切込みが一定の断続切削における工具刃先の加熱冷却特性については、D. A. Stephenson ら(1992)によって詳しく示されている。工具を1/8半無限体と仮定し、すくい面( $z=0$ )が熱源  $Q(x, y, t)$  によって熱せられるとすると、熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

であり、工具すくい面からの加工熱の流入に関する境界条件は

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = Q(x, y, t) \quad z=0; 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y \quad (2)$$

となる。ここで  $T$  は温度、 $\alpha$  は熱拡散率、 $k$  は熱伝導率、 $L$  は熱源の寸法、 $Q$  は熱流速である。他の境界は絶縁とし、初期温度は0とする。式(1)、(2)を満たす解、すなわち半無限体の内部の時刻  $t$  における温度は

$$T(x, y, z, t) = \frac{\alpha}{k} \int_0^t \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \theta_G(x, y, z, t, x_p, y_p, 0, D) \cdot Q(x_p, y_p, \tau) dy_p dx_p d\tau \quad (3)$$

で与えられる。ただし、

$$\theta_G(x, y, z, x_p, y_p, 0, D) = \frac{2}{(\sqrt{\pi}D)^3} \exp\left(-\frac{z^2}{D^2}\right) \cdot \left[ \exp\left\{-\frac{(x+x_p)^2}{D^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(x-x_p)^2}{D^2}\right\} \right] \cdot \left[ \exp\left\{-\frac{(y+y_p)^2}{D^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(y-y_p)^2}{D^2}\right\} \right] \quad (4)$$

ここで、 $D = 2\sqrt{\alpha(t-\tau)}$  (5) である。

D. A. Stephenson らは、熱源を簡略化して計算し有益な知見を得ているが、切り込みが一定の断続切削であり、加工中に切り取り厚さが増えるエンドミル加工に対しては計算していない。本研究では、エンドミル加工における刃先の加熱冷却特性を計算するために、切削中に工具刃先での工具と切りくずとの接触面積、すなわち熱流入面積が変化していくものとして式(3)を計算した。図2は模式図であるが、アップカットでは切削の初めにおいて切り取り厚さが0であり、切削の進行とともに切り取り厚さは大きくなっていく。逆

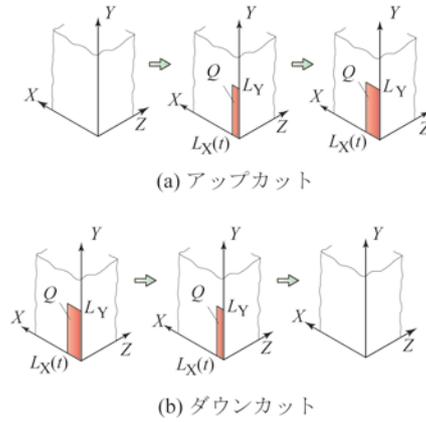


図2 熱流入モデル

にダウンカットにおいては切削の初めに切り取り厚さが最も大きく、切削の終わりに0となる。すなわち、式(3)において、工具と切りくずとの接触長さ  $L_x$  は時間の関数であり、アップカットでは近似的に

$$L_x(\tau) = cf \sin\left(\frac{\tau}{\tau_1} \eta\right) \quad (6)$$

ダウンカットでは近似的に

$$L_x(\tau) = cf \sin\left\{\left[1 - \frac{\tau}{\tau_1}\right] \eta\right\} \quad (7)$$

と与えられる。ここで、 $f$  は送り、 $c$  は切り取り厚さに対する工具-切りくず接触長さの比である。 $\tau_1$  は1回あたりの切削時間、 $\tau$  は1回の切りくず生成において切削が始まってからの経過時間である。

## 4. 研究成果

(1) エンドミル加工における工具表層の温度変化

エンドミル加工における切削抵抗の合力と工具刃先表層の温度変化の測定値と計算値を図3と図4に示す。図3はアップカット、図4はダウンカットの場合である。ほぼ定常的な加工状態における波形である。図(a)は切削抵抗の合力、図(b)は工具刃先温度の測定値、図(c)は計算値である。

アップカットの場合、切り取り厚さは切削の進行とともに増加していくため切削抵抗も増加する。このため、工具への流入熱量も増加することから刃先の内部の温度も上昇していく。また、切削抵抗が0になる切削終了直後に最高温度に達しており、これらの傾向は、計算結果とよく一致している。一方でダウンカットの場合には、切り取り厚さは切削の初期において最も大きく、以降は徐々に減少していくことから、切削抵抗は切削初期に最も大きく、以降は減少していく。工具刃先の温度はアップカットの場合と比べると、切削の開始とともに急な傾きで上昇していく。また、測定される工具刃先の温度が最も高くな

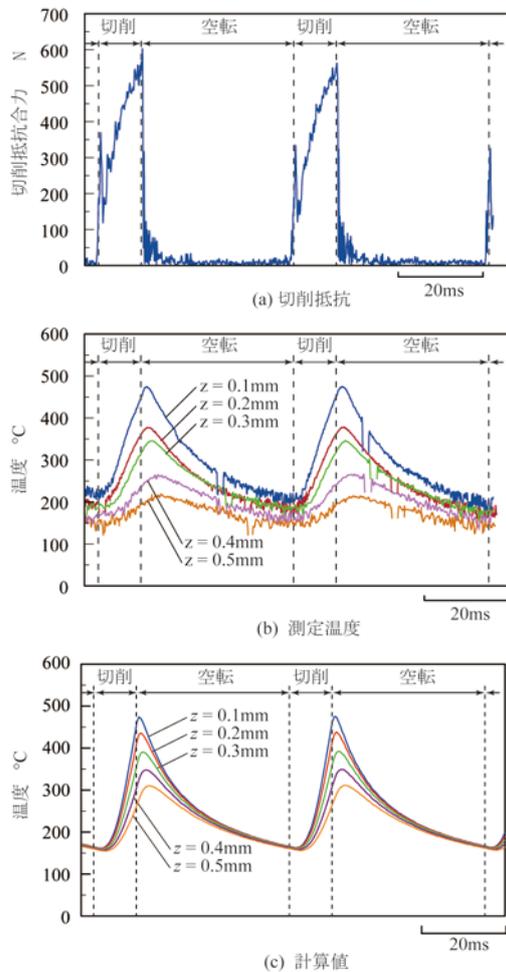


図3 アップカット加工中の切削抵抗および工具内温度分布の変化

るのは切削の途中であり、切削の終りにおいては既に温度が低下していく。

すくい面からの異なる深さにおける加工中の工具刃先内部温度の時間変化については、穴深さが深くなるにつれて工具刃先内部の温度は低くなっていく。計算結果と実験結果において、切削の進行に伴う工具刃先の温度変化は、計算結果に比べて実験結果の方が緩やかであり、また、すくい面からの深さが大きくなるにつれ、計算値に比べて測定温度は低くなる傾向にある。このような不一致は、主として、計算モデルが1/8半無限体と単純なモデルであることや、実験では温度測定用の穴の影響があること、測定の際に穴の底面が有する温度分布の影響を考慮していないことなどが挙げられる。しかしながら、アップカットとダウンカットの加熱冷却特性の違いなど全体的な傾向はよく一致している。

測定結果から、工具内部方向の温度勾配を求めることができる。

アップカットの場合、切削開始時  $th=0ms$  においては工具内部方向の温度勾配はほぼ平坦であり、切削が進行するにつれて深さ方向への勾配を持つようになり、切削の後半

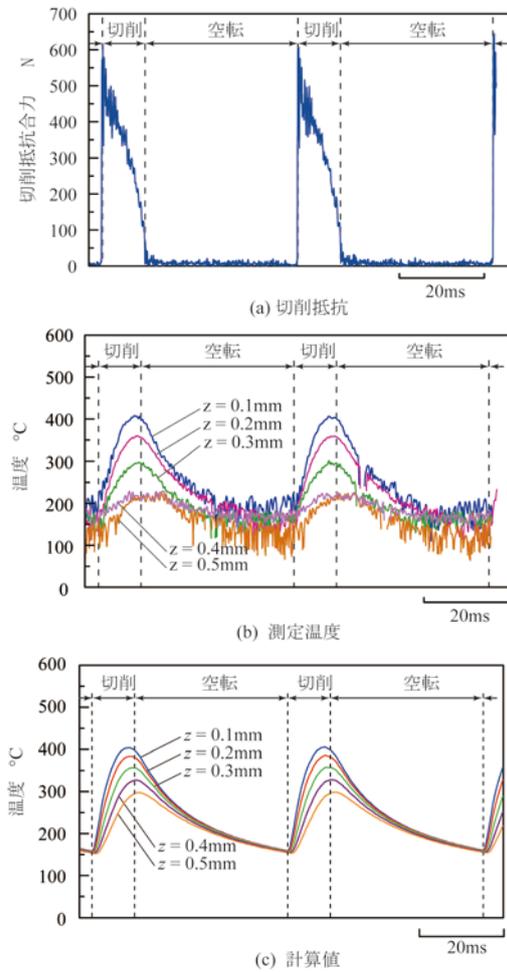
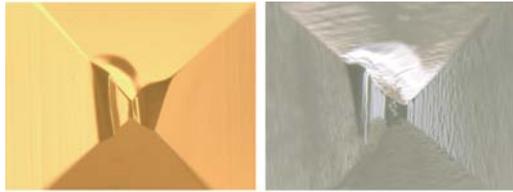


図4 ダウンカット加工中の切削抵抗および工具内温度分布の変化

$th=6ms-10ms$  においての増加が大きい。 $th=10ms$  はほぼ切削終了時であり、このときの温度勾配は  $0.5mm$  あたりで約  $200^{\circ}C$  となっている。冷却時においては、切削終了後数  $ms$  で深さ方向の温度勾配は緩やかとなる。このため、エンドミル加工のような断続的な切削においては、切りくず生成中の  $10ms$  程度の中に、工具の主切れ刃から  $0.6mm$  と少し離れた位置ではあるが、表面から内部方向  $0.5mm$  あたり  $300^{\circ}C$  程度の温度勾配を伴う加熱冷却の熱負荷を受けているものといえる。本研究では工具が超硬工具であったために内部への熱伝導性が高いが、サーメットなど熱伝導率が小さな工具の場合には温度勾配の変化による繰り返し熱負荷はさらに大きいものと考えられる。また、本実験ではドライ加工であったが、切削油を使用する場合には切削熱が工具表面から切削油を介して取り去られることから、内部温度と表面温度との温度勾配はさらに大きくなるものと考えられる。

ダウンカットの場合、切削の進行に伴う深さ方向の温度勾配は、アップカットと比べると早い段階  $th=3ms$  で上昇している。しかし、切削の途中  $th=6ms$  から  $th=10ms$  にかけては



(a)  $t_c = 0.1 \text{ ms}$  (b)  $t_c = 1.0 \text{ ms}$

図5 工具刃先の観察(切削距離18m)

表面  $z=0\text{mm}$  の温度はほぼ一定で、内部の温度が上昇することから温度勾配は加工中に緩やかになり始める。このため、ダウンカットにおける加工中の温度勾配の変化に伴う熱衝撃はアップカットの場合に比べて小さいと言える。

#### (2) 切削時間が工具摩耗に及ぼす影響

断続切削においては、1回あたりの切削長さを短くしていくと工具刃先の温度が定常温度に達する前に切削が終了し、工具摩耗の低減につながる事が指摘されている。単結晶ダイヤモンド工具を使用し、切削長さを変えた3種類の断続切削実験を行い、1回あたりの切削時間の違いによる切削温度と工具摩耗の変化について調べた。工具形状は頂角  $120^\circ$  の角すいとし、被削材にはステンレス鋼 SUS304 を使用した。被削材は円柱形状で端面を凸形としており、凸部の幅を変えることにより1回あたりの切削時間を変えている。切削速度は  $600\text{m/min}$ 、切込みは  $20\mu\text{m}$ 、送りは  $10\mu\text{m}$  である。切削長さを  $1\text{mm}$ 、 $5\text{mm}$ 、 $10\text{mm}$  とすることにより、1回あたりの切削時間はそれぞれ  $0.1\text{ms}$ 、 $0.5\text{ms}$ 、 $1.0\text{ms}$  となる。切り込みは切削距離が  $2\text{m}$  毎に再設定している。切削中の工具刃先温度の測定には熱放射温度計を使用し、切削中に工具と切りくずとの接触面から放射され工具内を透過してくる赤外線を工具裏面で検出することにより切削中の温度を測定した。切削中の工具刃先温度は、切削直後に急激に上昇するが、上昇の割合は次第に緩やかになり、 $1\text{ms}$  未満のうちに定常的な温度となる。切削中の工具刃先温度は、切削時間が  $0.1\text{ms}$ 、 $0.5\text{ms}$ 、 $1.0\text{ms}$  の場合、最大でそれぞれ約  $370^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $420^\circ\text{C}$  であり、切削時間が短いほど切削中に到達する温度は低い。切削の進行に伴う工具摩耗を観察した結果を図5に示す。図は総切削距離が  $18\text{m}$  のときの、(a) 1回あたりの切削時間が  $0.1\text{ms}$ 、(b) 1回あたりの切削時間が  $1.0\text{ms}$  の場合である。図より、工具先端の摩耗幅に関しては、1回あたりの切削時間によらずほぼ一定であり、切削時間が短くなると工具摩耗が低減する現象は見られなかった。一方で工具すくい面の摩耗については、切削時間が長くなるほど大きく摩耗していた。これは切削時間の違いではなく切削長さの違いによるものであり、切削時間が長くなると切りくず長さが長くなり、工具と切りくずとの接触長さが増大した結果すくい面摩耗の増大に

つながったと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Masahiko SATO, Naoki TAMURA and Hisataka TANAKA, Temperature Variation in the Cutting Tool in End Milling, Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.133, APRIL, pp. 021005-1-7, 2011年, 査読有.

〔学会発表〕(計1件)

- ① Masahiko SATO, Naoki TAMURA and Hisataka TANAKA, Transient Temperature Variation beneath Rake Face in End Milling, Proceedings of The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century, pp. 457-460, 2009年12月3日, 大阪.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 昌彦 (SATO MASAHIKO)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50244512