放射温度計による切りくず排出状態の監視*

新井 実** 中山一雄** 塚田康夫*** 加賀美信明†

The Monitoring of Chip Flow in Metal Cutting using Radiation Thermometer

Minoru ARAI, Kazuo NAKAYAMA, Yasuo TSUKADA and Nobuaki KAGAMI

This paper presents a new method for the monitoring of chip flow using the radiation thermometer. The principle of the monitoring is as follows: Newly born chips in usual metal cutting are at the temperature over 600 K and radiate infrared rays. When such chips run out of cutting point quickly, the radiation from the zone around the tool is low compared with the case when long tangled chips are staying around the tool. So, the difference in the mode of chip flow can be detected from the output of the thermometer when its range of view is properly settled. In turning operations, the conditions of monitoring for the best discrimination of the mode of chip flow are investigated experimentally. This monitoring method has the following merits: (1) The mode of chip flow can be monitored from a remote point without direct contact. (2) By using the revolving mirror, one radiation thermometer can watch many cutting points. (3) Accordingly, this method is suitable to the unmanned machining system.

Key words: metal cutting, chip control, chip temperature, monitoring, radiation thermometer, unmanned machining

1. 緒 言

高能率切削加工では、短時間に大量の切りくずが発生するので、切りくず処理が重要な問題になる。これは切削加工を無人化しようとする場合に特に重要であり、無人化の成否が切りくず処理問題の解決にかかっている場合がしばしばである。最近話題を呼んでいるFMS (Flexible Manufacturing System) は現在のところ、鋳鉄のような連続切りくずを生じにくい材料の切削や、フライス削りのような断続切削に限られているが、これを鋼のような延性材料の連続切削にも適用するためには、まず切りくず処理問題を解決することが必要である。

旋削や中ぐりのような連続切削での切りくず処理の第1歩は、長い切りくずが工具や工作物にからみつくような事態が絶対に起こらないようにすることである。そのために、被削材質に応じてチップブレーカや切削条件を選び、適当な長さに折れた切りくずが発生するようにする。ところが現実の切削作業では、すべ

ての条件を厳密に一定に保つことは難しい。工具の損耗や被削材質のわずかな変化等によって、切りくずが急に折れなくなるといった事態の発生を完全に予防することは困難である。

万一このような事態が発生しても作業者がついていれば容易に見え、対策を講ずることができるが、無人化する場合には人間に代わる何らかの切りくず監視装置が必要になる。これまでに、切りくずの折断や排出の状態を監視する方法として次のものが提案されている。すなわち、松島ら¹⁾による切削抵抗の動的成分を周波数解析する方法、廣田ら²⁾による工具-被削材間の熱起電力の変動成分を周波数解析する方法およびKönigら³⁾による数十個のフォトダイオードをリング状に配列した検出器で切りくず流出方向を検知する方法である。

本論文で提案する方法は市販の赤外線放射温度計を利用して切りくず排出状態を監視しようとするものである。すなわち、切削点付近を放射温度計で監視していると、もし大量の高温切りくずが刃先付近に滞留するという危険な状態が発生すると、放射温度計への入射エネルギーが増加するのでそのことが検知できる。この方法は遠隔点からの監視が可能であるから、工場ですぐの場合に反射鏡と旋回装置を使えば1台の温度計で多数の切削点の監視ができるし、工作機械の過熱や

* 原稿受付 昭和59年6月6日、昭和57年度精機学会春季大会学術講演会(昭和57年3月23日)にて発表

** 正会員 横浜国立大学工学部(横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

*** 正会員 (株)東芝(川崎市幸区柳町70)

† 日本発条(株)(豊田市東海坪町5-86)

Fig. 1 Setup for the monitoring of the mode of chip flow

火災の監視にも併用できる。

2. 原 理

図1に示すように、切削点から L_m 離れたところに放射温度計をセットして工具刃先を含むある領域からの入射エネルギーを測定する。この距離 L は放射温度計の視野の1辺の長さに比例するので後述するように切りくずの大きさに応じて適当に選定する。いま放射温度計の視野中にある切りくずの射影面積を $S_c \text{ m}^2$ とすると、温度計への入射エネルギー E_c は

$$E_c \propto I_\lambda \cdot S_c \cdot (D/L)^2 \quad (1)$$

である。ただし、 I_λ は切りくずの放射強度（単位面積当たりの放射エネルギー）、 D は放射温度計の口径とする。

波長が $\lambda \pm \Delta\lambda/2$ の範囲の放射エネルギーを検出する放射温度計を用いれば、Plank の法則によって I_λ は

$$I_\lambda = \epsilon \cdot C_1 \cdot \Delta\lambda / \lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1] \quad (2)$$

で表される。ただし、 ϵ と T は切りくずの放射率と温度*、 C_1 と C_2 は定数で、 $C_1 = 3.74 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 、 $C_2 = 1.439 (\text{m} \cdot \text{K})$ である。本研究に用いた放射温度計が検出する赤外線の波長は $2 \mu\text{m}$ であり、鋼切削で生成される切りくずの平均温度は 650 K 程度であるから、 $\exp(C_2/\lambda T) \approx 10^5 \gg 1$ であり、式(2)は次の近似式に変換できる。

$$I_\lambda = \frac{\epsilon C_1 \Delta\lambda}{\lambda^5} \cdot \exp(-C_2/\lambda T) \quad (3)$$

したがって、切りくずからの入射エネルギー E_c は式(3)を式(1)へ代入して

$$E_c \propto \frac{\epsilon C_1 \Delta\lambda}{\lambda^5} \cdot \exp(-C_2/\lambda T) \cdot S_c \cdot (D/L)^2 \quad (4)$$

となる。ここで λ 、 $\Delta\lambda$ および D は放射温度計によって決まる定数であり、視野全体の面積 S は L^2 に比例するから E_c は次式で表すことができる。

$$E_c = A \cdot \frac{S_c}{S} \cdot \epsilon \cdot \exp(-B/T) \quad (5)$$

ただし、 A と B は放射温度計によって決まる定数である。

このようにセットした放射温度計には切りくず以外に工具、工作物および背景からの放射エネルギーも入射する。しかし、これらの大部分の温度は低く、また工具・切りくず接触面近傍の高温部もそのほとんどが切りくずにかくれているから、そこからの入射エネルギーの影響は小さいと考えられる。

本監視法は、放射温度計の視野内に高温切りくずが増えると、式(5)中の面積率 S_c/S が増え、入射エネルギーも増えることを利用しようとするものである。これが信頼できる監視法であるためには、実際の切削作業中に、式(5)中の放射率 ϵ や切りくず温度 T の変動の影響が面積率 S_c/S の変化に比べて十分小さくなくてはならない。そこでこれらの影響を以下の実験で検討する。

3. 放射温度計の特性

実験には市販の赤外放射温度計(パイロスコープ P, 千野製作所製)を用いた。その特性は下記の通りである。

検出素子: PbS

検出波長: $2 \mu\text{m}$

測定範囲: $200 \sim 600^\circ\text{C}$ (出力はこの温度に対応して $0 \sim 10 \text{ mV}$ に直線近似されている)

測定精度: フルスケールの $\pm 1\%$

応答時間: 0.01 s

測定距離: $90 \text{ mm} \sim \infty$

距離係数 (測定距離/視野の1辺の長さ): 200

この温度計は視野全体が均一な温度である場合に、その物体の放射率 ϵ を設定するとその温度 ($^\circ\text{C}$) を指示するようになっている。しかし、本監視法では切りくずは視野の一部を占めるだけで、式(5)に従う放射エネルギーを測っているのであるから、温度計の指示値は温度ではなく、入射エネルギーの大小を示すにすぎない。以下で示す出力はこの温度計を $\epsilon=1$ にセットしたときの出力を mV 単位で表したものである。上記のようにこの温度計は 200°C (473 K) を 0 mV として近似しているから出力は $(T-473)$ に比例しており、

* ϵ や T は切りくずの部位や経過時間によって変わるが、ここでの定性的な論議のためにはこのような単純な表現にとどめる。

Fig. 2 Relation between the area ratio and the output of thermometer

S_c/S に対しては式 (5) から推定できるように指数関数的に変化する。

4. 基礎実験

4.1 高温体の占める面積率と出力の関係

全視野中に高温体が占める面積率が変化したとき、放射温度計の出力がどのように変化するかを調べるために次の実験をした。すなわち、図 2 上部に示すように電気炉中で約 650 K に加熱した鉄板の前に遮へい板をおき、その板にあけた小さな穴から放射エネルギーを測定した。面積率は穴径を 3 および 5 mm に、また放射温度計までの測定距離を 0.5~3.5 m の範囲に変化させた。

この結果が図 2 下で、面積率が 40% 程度より小さい領域では温度計の出力は面積率の変動に対して敏感に変わるが、それ以上では次第に鈍感になることがわかる。切りくずを監視する場合にはこのことを考慮して視野の大きさを定める必要がある。

4.2 経過時間による出力の変化

高温切りくずは空気中への放熱によって時間とともにその温度が低下する。一方その表面の酸化が進行するから放射率は増大する。これらのうちどちらの影響の方が強いかは切りくずの形や寸法、初期温度、材質による酸化しやすさなどで変わるはずである。

代表的なケースとして S 45 C を図 3 の下に記すような普通の条件で旋削する場合について、切りくず各

Fig. 3 Measurement of radiation from various parts of chip
Cutting speed; 100 m/min, Depth of cut; 2 mm, Feed; 0.2 mm

Fig. 4 Variation of radiation with the time elapsed

部位からの放射エネルギーを測って見た。その際、放射温度計の視野の大きさは 0.5 mm 角とし、切りくず(幅 2.2 mm)が全視野を十分カバーするようにした。

図 4 の●印は、図 3 (a) のようなコイル状切りくずの光沢面(すくい面側)についての測定結果で、横軸は切削点から測定点までの切りくず長さ、切削速度および切削比から計算した経過時間である。これから、0.02~1 s 程度の範囲では放射エネルギーに大きな変化がないことがわかる。

4.3 切りくずの表面粗さの影響

図 4 中の○印は図 3 (b) のような上向きカールのない切りくずについて、その粗面(自由面側)からの放射エネルギーを測定した結果であり、凹凸の激しい粗面は光沢面(すくい面側)に比べて放射率が高いため出力が大きい。放射温度計で切りくずの排出状態を監視する場合にはこのことを考慮しなければならない。

5. 切りくず排出状態の監視条件

5.1 実験条件

切りくず排出状態の良否を容易にかつ確実に識別するためには放射温度計でどの方向から監視し、その視野の大きさをどの程度にしたらよいかについて実験的に調べた。すなわち、S 45 C の丸棒の外周長手乾旋削で 3 種類の代表的な切りくず排出状態を作り、これを

Fig. 5 Three typical modes of chip flow measured and size of view
Cutting speed; 150 m/min, Depth of cut; 2 mm, Feed; 0.2 mm

監視する放射温度計の出力を比較した。その切りくずは図5の写真で示す次の3種類とした。

- (i) C字形に短く折れる切りくず。これは切削点から迅速に飛散するので好ましいタイプである。
- (ii) 横向きにカールしたコイル状連続切りくず。切削点から離脱する速度は比較的遅い。
- (iii) 長く延びて切削点近傍に滞留する連続切りくず。工具や工作物にからみつから非常に危険である。

これらの3種類の切りくずを発生させるには次のようにした。すなわち、切削条件はすべて同一(図5下に記載)とし、切削工具には超硬P20の三角チップを用いたが、平行溝掘込み型のチップブレーカ付きのもの(実質すくい角 $+9^\circ$)を使うと(i)のC字形折断切りくずが発生し、ブレーカの付いていないもの(実質すくい角 -5°)を使うと切削初期には(ii)型、十数s後には(iii)型の切りくずが発生する*という事実を利用した。

5.2 監視方向の影響

図6上部に示すような3方向から監視した場合、図5の3つのタイプの切りくずによる放射温度計の出力

Fig. 6 Outputs of thermometer in the observations from various directions
Cutting conditions are same as in Fig. 5

を比較したのが図6下図である。ただし、この測定では視野の大きさを20 mm角に固定した。図6の棒グラフの頂部が傾いているものは出力がこの範囲で変動したことを示す。この図から明らかなことは、

- (1) 短く折れて飛散する切りくず(i)はどの方向から監視しても出力が低く、他の2つの切りくずが発生する場合と明白に識別できる。
- (2) 横向きカールした切りくず(ii)は上方から見た場合には他の2方向から見た場合より出力が高い。これは上方から見るとこの切りくずは面積が広く、しかも放射率の高い粗面を見るためと考えられる。

(ii)型の切りくずも(iii)型の切りくず同様に危険な切りくずと見なして(i)と識別するには、上方から見るのがよいことになる。以上のほか、作業の邪魔にならないという点でも、上方からの監視が好都合である。以下の実験ではすべて上方から見ることにした。

5.3 放射温度計の視野の大きさの影響

切りくずの排出状態を明確に識別するのに適した視野の大きさを調べるため、放射温度計と切削点の距離 L を変え、視野の大きさを変えて測定した。視野の大きさとその切りくずに対する相対位置は図5右下に示す4種類とした。切削条件は図5の場合と同じとし、切りくずは短く折れる(i)型とコイル状に連続した

* ブレーカの有無によってすくい角が異なるから切りくず温度も変わる。カロリメータ法で測った切りくずの平均温度はブレーカ付きの方が約 40°C 低い。しかし、この差は $\varepsilon=1$, $S_c/S=1$ とした場合でも放射温度計には1 mVの出力の差しか与えない。

Fig. 7 Effect of the size of view to the output
Cutting conditions are same as in Fig. 5

(a) Effect of depth of cut
(cutting speed; 150m/min)

(b) Effect of cutting speed
(depth of cut; 2mm)

Fig. 8 Effect of cutting conditions to the output of radiation thermometer
Feed; 0.2 mm

(ii) 型の 2 種類について温度計の出力を比較した。

図 7 はその測定結果である。2 種類の切りくずに対する出力の差は全般に大きい。図の左よりの部分で接近する傾向がみられる。換言すれば視野の大きさの選択は切りくず排出状態の識別に関してそれほど微妙な問題ではないが、この実験条件下では 20~30 mm 角程度にした場合に出力の差が最大になる。本実験では切りくず幅が 2.2 mm であるから、以上をもっと一般的な表現にすると、“視野の大きさの 1 辺は切りくず幅の 10 倍程度とするのがよい”といえよう。このことは図 2 の結果とも符合する。

6. 切削条件による出力の変化

実際の切削加工中には切込みや切削速度が変化するのが普通であるが、これらの変化による放射温度計の出力の変化に比べて、切りくず排出状態の変化による出力変化の方が十分大きくなくては識別にさしつかえる。そこで切込みと切削速度を変えて実験を行った。

6.1 切込みの影響

切込みが増すと切りくずの幅が増すから、放射温度計への入射エネルギーも増すはずである。

図 8 (a) は S 45 C 丸棒の旋削で切込みを変えたときの放射温度計の出力の変化を示す実験結果である。切込みが増すと出力が増すが 1~3 mm の範囲であれば、短く折れた切りくず (○印) と連続切りくず (●印) との間には明確な差がある。なお、下側の曲線 (チップブレーカ付きバイト使用) の左端に ● 印で示した点は切込みが 0.5 mm と小さい割に出力が高いが、これは、この場合には切りくずが C 字形折断ではなくて数巻き続いて折れる ε タイプになったためである。一方上側の曲線で出力が飽和する傾向が見られるが、これ

は図 5 (ii) 型の切りくずの幅が増しても、上方から見ると重なる部分が増えるだけであるためと思われる。

6.2 切削速度の影響

切削速度を変えたときの放射温度計の出力を示したのが図 8 (b) である。その速度範囲では切りくずの排出状態は切削速度によって変わらなかったが、このような場合には放射温度計の出力もこの図で明らかのようにほとんど変わらない。

このことは、さきにカロリメータ法で測定した切りくず温度が切削速度によってほとんど変化しなかったという実験事実⁴⁾と一致する。このように切削速度によって切りくず温度が変わらないという事実は、切削速度を増すとせん断角が増し、切削抵抗、したがって発熱量が減少するが、発熱量の中で切りくずに流入する割合が増大するという効果と打ち消し合ったためと解される。

7. 出力波形

上記の放射温度計出力にはその平均値を用いたが、一般に出力は時間に対して変動するので、その変動成分からも切りくず排出状態を識別できそうである。すなわち、切りくずが短く折れて飛散する時に比べて、連続切りくずがからみつくと周期が長く不規則な出力波形が現れる。

図 9 はそれを示す例で、NC 旋盤による丸棒長手旋削中に、送り量を 0.25 mm から 0.15 mm まで漸減した間の放射温度計の出力をペンレコーダで記録したものである。その間に切りくず形状は 1 巻き以下で折れる C 字形折断から数巻きで折れる ε 形折断をへてコイル状切りくずになり、最後に長く延びた連続切りくずが刃先付近に滞留する、という変化を生じた。この

Fig. 9 Output of thermometer in the turning at continuously decreasing feed rate
Cutting speed; 150 m/min, Depth of cut; 1.5 mm,
Tool; with chip breaker

記録例で明かなように、連続切りくずになると、1s以上の長周期で振幅の大きい変動が現れている。したがって、このような変動からも連続切りくずの滞留を認知することができる。

8. 結 論

市販の赤外線放射温度計を使って、切削点近傍の高温切りくずが放射する熱エネルギーを測定して、切りくず排出状態を遠隔点から監視できることがわかった。すなわち、

(1) 高温切りくずが刃先付近に滞留すると、放射温

度計への入射エネルギーが増すことから、その事実を検知できる。

(2) その際、放射温度計の視野の1辺の長さは切りくず幅の10倍程度になるようにするのがよい。

(3) 監視はどの方向から行っても折断切りくずと連続切りくずの識別は明確にできる。

(4) 切込み深さが変わると温度計の出力も変わるから注意を要する。しかし、切込みの変化が3倍程度までならば、切りくず折断から連続への変化と区別できる。

(5) 切削速度の変化は放射温度計の出力にほとんど変化を与えない。

(6) 放射温度計の変動成分、特にその周期も切りくず排出状態の識別に利用できる。

本研究の研究費の一部は昭和57年度科学研究費(一般研究C)および昭和58年度科学研究費(総合研究A)によったものである。

参 考 文 献

- 1) 松島克守, 河野英一, 佐田登志夫: パターン認識技術による切削状態の認識, 精密機械, 42, 2 (1976) 88.
- 2) 廣田平一, 鈴木重信, 篠崎 襄: 工具・被削材熱起電力の変動特性, 精密機械, 45, 5 (1979) 592.
- 3) W. Kluft, W. König, C. A. Von Luttermelt, K. Nakayama and A. J. Pekelharing: Present Knowledge of Chip Control, Ann. CIRP, 28, 2, (1979) 441.
- 4) 中山一雄, 新井 実: 切りくず折れやすさの測定, 精密機械, 44, 9 (1978) 1129.

北海道支部「曲面加工・計測技術懇話会」を設置

委員長 斎藤勝政

(北海道大学工学部精密工学科)

精機学会北海道支部では、機械加工組立産業の活性化による地域技術の振興を目的として、支部会員を中心に関連企業との協同研究を図る「曲面加工・計測技術懇話会」を設置し、昭和60年3月16日、北海道大学工学部において第1回の技術懇話会を開催した。

本技術懇話会は学会の支部連携強化活動の一環として行われるものであり、これにより定着化の兆しが見えはじめた北海道地域における精密機械産業の活性化と技術力の育成、さらには精機学会の理解と支部会員増への波及効果が期待されるものである。

そこで本技術懇話会では、パーソナルコンピュータの有効利用による曲面の加工・計測技術の高度化を中核として、

- (1) 曲面を持つ複雑機能部品, 意匠デザイン部品の自動加工技術
- (2) 設計で得られた曲面形状データと加工データの

三次元表示による検証と、加工曲面の非接触による高速形状測定法

- (3) 金型キャビティおよび模型・木型の曲面加工の自動化

を研究開発課題として取り上げ、その他生産技術に関する会員相互および企業間の情報交換の場を提供することにより、具体的問題を事例研究として解決するための協同研究を行う。

これらのために、北海道地区において技術懇話会を年間4回、関東地区を中心に企業見学会を兼ねた技術懇話会を年間2回程開催する予定である。現在参加企業20社の内訳は機械系10社、材料系5社、工具系3社、ソフト・システムハウス系2社となっている。

第2回技術懇話会は6月21日(金)北海道大学工学部で開催予定。