

赤外線カメラを用いた切削加工監視技術の開発

南 晃*

Development of the Monitoring Technology for Cutting Process with Infrared Thermography

Akira MINAMI

マシニングセンタによる切削加工において、加工状態を監視してトラブルを未然に防止する技術の確立が求められている。本研究では加工監視のためのパラメータとして切削加工における工具温度に着目した。

赤外線カメラと切削動力計を使用して工具温度と切削抵抗を測定するシステムを構築し、切削加工条件を変化させながら工具温度と切削抵抗を測定する実験を行った。その結果、工具温度と切削抵抗の間には強い相関があり、加工監視のパラメータとして利用できることがわかった。

keyword : 切削抵抗, 赤外線カメラ, 工具温度

1. 緒 言

マシニングセンタを使用した切削加工工程では、長時間無人運転の実現、加工精度や品質の確保、工具の摩耗・破損の防止など多くの技術的課題があり、その解決が求められている。これらを解決するためには切削の状態を監視し、トラブルを未然に防止したり加工条件の最適化を図る技術の確立が必要である。当センターにおいてもCCDカメラを使用した工具挙動測定や工具摩耗測定に関する研究などを行ってきた¹⁾²⁾が、切削加工監視技術は確立されていないのが現状である。

切削の状態を監視するためには、切削の状態を連続的に測定し、その変化を素早く把握する必要がある。既存の代表的手法として、切削加工時の切削抵抗を測定する方法がある。切削加工では切削工具や被削材の各部分にそれぞれ現象が発生するが、これら多岐にわたる情報が切削抵抗というひとつの数値情報に集約されてしまう。したがって切削抵抗を測定し、その変化から切削加工の様々な現象を分析し、切削の状態を監視することは困難である。

本研究では、切削加工時の工具温度と切削抵抗を測定するシステムを構築した。このシステムを用いて切削工具や被削材の熱画像から切削工具刃先近傍の温度を測定し、切削加工条件や切削抵抗との関係を検討した。

2. 切削加工における発熱のメカニズム

図1に切削加工における発熱のメカニズムを示す。切削加工において、被削材が切屑に変形するときのせん断仕事と工具刃先と被削材間の摩擦仕事によって大量の熱が発生する。その一部は空気中に放散したり切削液に持ち去られたりするが、それ以外の熱は切削工具や被削材に伝わり

各部分の温度を上昇させる。

切削加工条件の中で、送り速度や切削幅などが大きくなると、被削材の除去量が多くなり、発熱量および温度上昇が大きくなる。

また、工具刃先の受ける切削抵抗もそれとともに大きくなる。

このことから、工具温度と切削抵抗の間には何らかの相関があることが推測される。

切削加工条件を変化させたときの工具温度と切削抵抗との関係を明らかにできれば、工具温度を測定することで切削抵抗が推測でき、切削加工の状態を把握することが可能となる。

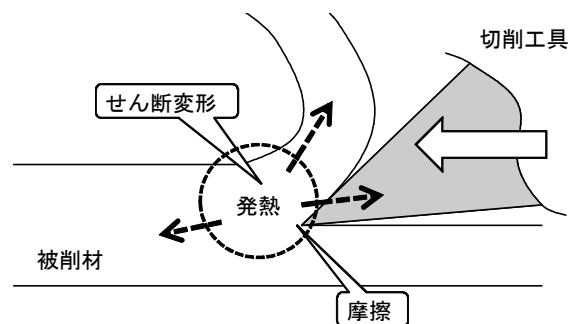


図1 切削加工における発熱のメカニズム

3. 赤外線カメラによる温度測定

3.1 温度測定の原理

赤外線は電磁波の一種であり、可視光線の赤よりも波長が長く肉眼では見えない。物体の放射する赤外線の量と温度の間には密接な関係がある。赤外線カメラは、この特性を利用して測定物から出る赤外線を検出し、温度分布を画像として表示する装置である。赤外線カメラで撮影された画像を熱画像と言い、熱画像中の各セルにはそれぞれ温度

*生産技術部

が記録され、温度情報を2次的に把握することができる。

また、測定物から離れていても連続的に非接触で温度測定ができるので、切削加工中の工具温度測定に適している。

3. 2 放射率

測定物が全く反射をしない完全な黒体の場合、赤外線カメラで検出される赤外線は全て測定物からの放射によるものである。完全な黒体でない場合、検出される赤外線は放射と反射の和であり、放射の占める比率を放射率という。

放射率は0～1の間の値をとり、放射が少なければ放射率は小さく、放射が多ければ放射率は大きくなる。

赤外線カメラによる温度測定では放射率を適切に設定することがきわめて重要である。

3. 3 放射率の設定方法

温度T(K)の物体が発する放射Wは(1)式⁴⁾で表される。

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \dots (1)$$

σ : ステファンボルツマン定数 (W/cm² · K⁴)

物体の放射率はそれぞれの物体で固有の数値である。また、同じ物体でも表面の性状で変化する。赤外線カメラで温度測定を行う場合、その物体の放射率を求める必要がある。

図2に赤外線カメラによる温度測定の原理を示す。赤外線カメラが検出する赤外線W₀は、(2)式³⁾で表される。

$$W_0 = \epsilon \cdot \tau \cdot W_1 + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_2 + (1 - \tau) \cdot W_3 \dots (2)$$

- $\epsilon \cdot \tau \cdot W_1$: 測定物からの放射 (W/cm²)
- $(1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_2$: 周囲からの放射 (W/cm²)
- $(1 - \tau) \cdot W_3$: 大気からの放射 (W/cm²)
- ϵ : 測定対象の放射率 (NoUnit)
- $(1 - \tau)$: 大気の放射率 (NoUnit)
- τ : 0.88⁵⁾

(1)式と(2)式から赤外線カメラで放射率の設定を1とした測定で得られる温度T₀を求める(3)式が得られる。

$$T_0^4 = \epsilon \cdot \tau \cdot T_1^4 + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot T_2^4 + (1 - \tau) \cdot T_3^4 \dots (3)$$

- T₁ : 測定対象の温度 (K), T₂ : 周囲の温度 (K)
- T₃ : 大気温度 (K)

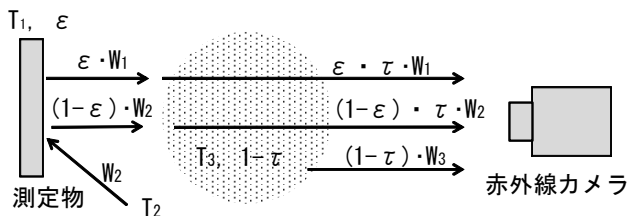


図2 赤外線カメラによる温度測定の原理

本研究で使用した赤外線カメラ (FLIR SC620) には解析用ソフトFLIR ResearchIRが付属されており、これを使用してパソコンに保存された熱画像動画は測定エリアや放射率を任意に設定できる。

赤外線カメラで測定した温度T₀と温度計で直接測定した温度T₁とが合致するように放射率の設定を調整することで、放射率を求めることができる。

3. 4 放射率測定の実験方法

本研究で使用する切削工具の仕様を表1に示す。工具材種はハイスピード鋼 (以下、ハイスと略す) であり、その放射率を求める実験を行った。

表1 切削工具の仕様

切削工具仕様	形状	フラットエンドミル
	直径	10 mm
	材質	ハイス(ノンコート)
	刃数	2枚

図3に放射率測定の実験方法を示す。エンドミルにはあらかじめ穴を開けておき、熱源と温度計を差込んで固定した。熱源はスライダックにより電圧を変化させ、温度を約40℃～150℃に変化させた。加熱開始後、時間が十分に経過し、エンドミルの温度が一定となった時点で赤外線カメラでT₀、温度計でT₁を測定した。

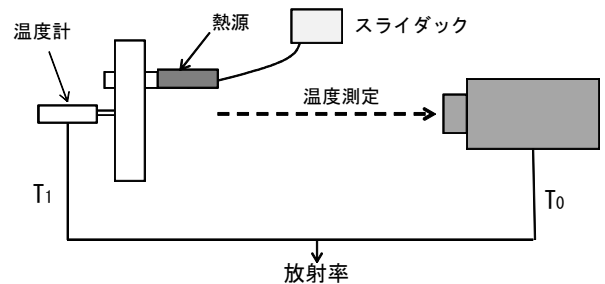


図3 ハイスエンドミルの放射率測定実験

4. 赤外線カメラによる工具温度の測定方法

4. 1 工具温度測定システムの構築

図4に工具温度測定システムの概要、図5にその写真を示す。主な構成はマシニングセンタ (三井精機 VT3A)、切削動力計 (キスラー 9257B)、赤外線カメラ (FLIR SC620) およびパソコンである。

被削材は切削動力計を介してテーブルに固定した。赤外線カメラはマシニングセンタ上のフレームに設置した。

切削加工を行い、赤外線カメラで切削工具刃先近傍の温度を測定し、同時に切削動力計で切削抵抗を測定した。切削条件を変化させながら実験を行い、工具温度と切削抵抗を比較し、両者の関係について検討した。

4. 2 工具温度測定実験

構築したシステムを使用して、切削加工中の工具温度を測定する実験を行った。表2に実験の条件を示す。切削長100mmの側面切削を行い、工具温度を測定した。切削工具の仕様は表1に示すとおりである。工具温度の測定領域は

切削工具刃先近傍の矩形領域とし、その最大温度を工具温度とした。切削抵抗は切削動力計を使用して測定し、主分力の平均値を切削抵抗とした。

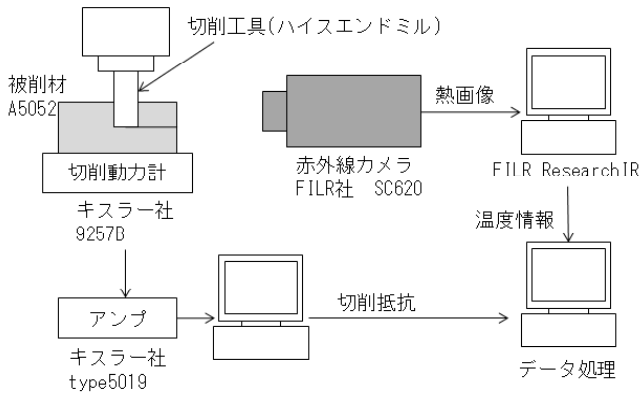
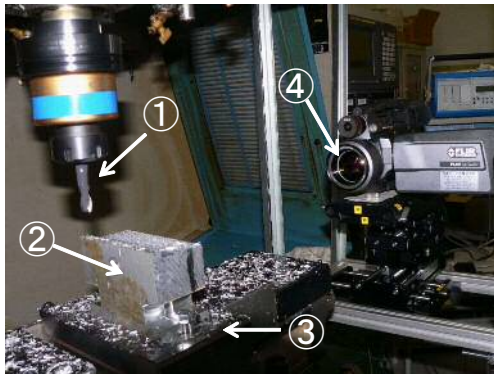


図4 工具温度測定システムの概要



①切削工具 ②被削材
③切削動力計 ④赤外線カメラ

図5 工具温度測定システムの写真

表2 実験の条件

切削形態	側面切削, ダウンカット
切削深さ	4.0 mm
切削幅	1.0~4.0 mm
送り速度	100~400mm/min
主軸回転数	500~4,000 rpm
切削油剤	不使用, エアブローあり
被削材	アルミ合金 A5052

4.3 工具折損実験

工具折損はマシニングセンタを使用した切削加工において、重大なトラブルの要因となるものの一つであり、これを検出したり予測することができればトラブルの発生を未然に防止することができる。そこで、工具折損の検出の可能性について検討するために、工具温度の変化を調べた。

図6に工具折損実験の概要と熱画像を示す。切削長100mmに対し切削深さ0.0mm~7.0mmに変化するようにテーパを付けた被削材を側面切削した。

切削が進行するにしたがい切削深さが深くなり、切削抵抗が過大になると工具は折損する。このときの工具温度を

測定し、折損前後の温度と比較した。実験の条件を表3に示す。

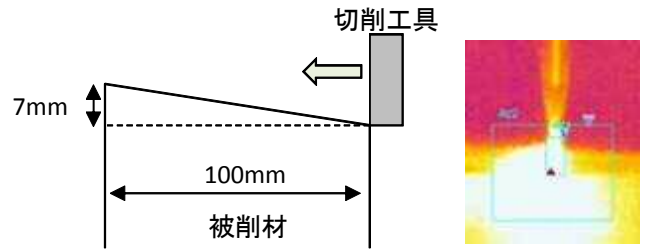


図6 工具折損実験の概要および熱画像

表3 実験の条件

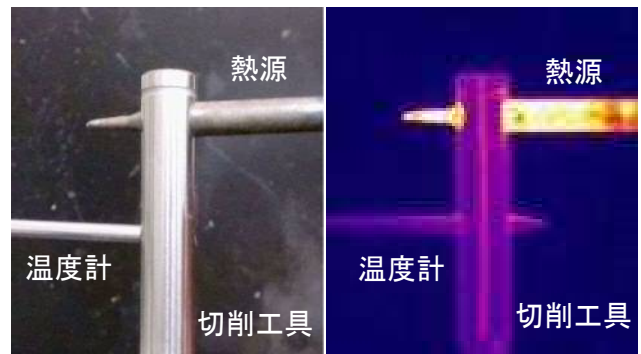
切削形態	側面切削, ダウンカット	
切削工具仕様	形状	フラットエンドミル
	直径	2.0mm
	材質	ハイス(コーテッド)
	刃数	2枚
切削深さ	0.0~7.0 mm (徐変)	
切削幅	1.0mm	
送り速度	300mm/min	
主軸回転数	3,000 5,000rpm	
切削油剤	不使用, エアブローあり	
被削材	アルミ合金 A5052	

5. 実験の結果および考察

5.1 放射率測定実験の結果

図7に切削工具とその熱画像を示す。熱源とその周辺は温度が高く、遠くなるにしたがって温度は低くなるのが熱画像によって明確に見ることができた。

熱源の大きさが測定物に対して大きすぎると発熱量も大きくなるので、周囲温度 T_2 および大気温度 T_3 に影響を及ぼし、適正な放射率が得られないこともあるので注意が必要である。本実験では、直径10mmの切削工具を局部的に加熱して、周囲に熱源による影響をなるべく及ぼさないようにするため、熱源として市販のハンダごてを使用し、熱源から20mm離れた場所の温度を測定した。



(a)測定したエンドミル (b)熱画像

図7 放射率測定実験の熱画像

図8に電源電圧と測定温度の関係を示す。電源電圧の上昇とともに温度計におけるエンドミルの温度は直線的に150℃程度まで上昇したが、赤外線カメラで測定した温度は50℃程度までしか上昇しなかった。

これは、赤外線カメラでの放射率の設定を $\epsilon = 1$ としていたためである。これは完全黒体を測定するときの放射率で、エンドミルの表面は光沢があるので不適切な値である。これを補正するため、適正な放射率の設定を行った。

図9に設定した放射率を示す。45℃のとき0.35程度で温度の上昇とともに小さくなり、130℃以上で0.15程度となった。本研究では赤外線カメラの放射率の設定は $\epsilon = 0.15$ として実験を行うこととした。

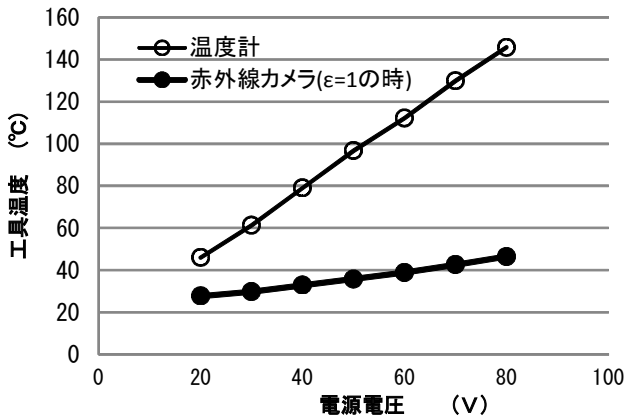


図8 電源電圧と測定温度の関係

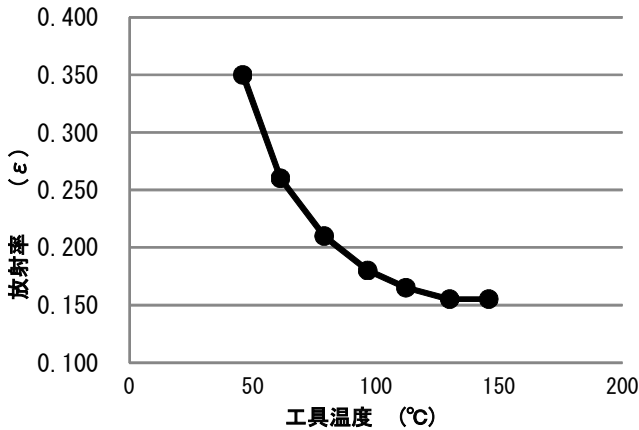


図9 ハイスエンドミルの放射率

5. 2 赤外線カメラによる工具温度測定実験の結果

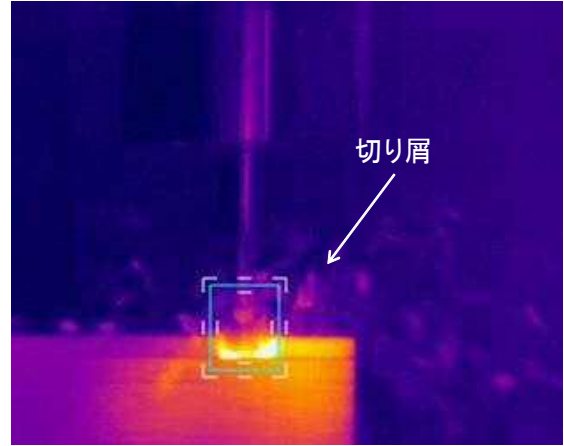
5. 2. 1 赤外線カメラによる熱画像

図10に赤外線カメラで撮影した熱画像の例を示す。熱画像の各画素は温度情報を持っており、赤外線カメラに付属する解析用ソフトFLIR ResearchIRにより任意に計測できる。工具刃先部分が最も高い温度（熱画像の白色部分）を示すことがわかった。また、切り屑が比較的高い温度を保ったまま飛散することもわかった。矩形で囲んだ工具刃先近傍を温度測定範囲とし、その最大温度を工具温度とした。

図11に熱画像の情報を元に温度分布を等高線図として表した例を示す。高い温度を示す工具刃先の中でも、左側

の場所の温度が顕著に高かった。熱画像でもほぼ同じ場所の温度が最も高かった。これは、ちょうど回転する切削工具の刃先が被削材に切り込みを開始する場所にあたる。

このように、赤外線カメラで撮影された熱画像を解析することで温度分布や切り屑の飛散、最大温度などを測定できることがわかった。



主軸回転数 2,500rpm, 切削深さ 4.0mm
送り速度 250mm/min, 切削幅 2.0mm

図10 熱画像の例

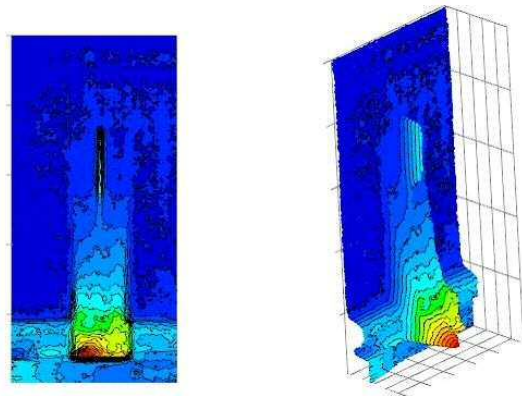


図11 温度分布の等高線図化の例

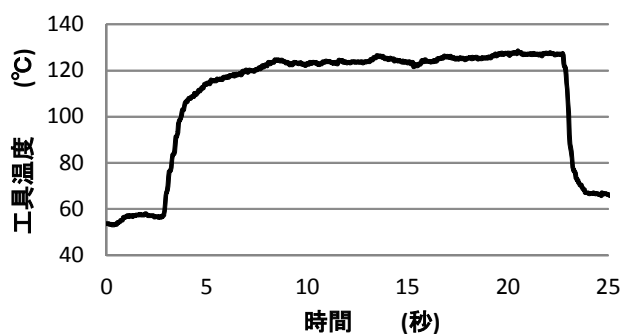
5. 2. 2 工具温度の測定

図12に切削長100mmの側面切削を行ったときの工具温度の例を示す。切削開始直後に工具温度は急激に上昇し、125℃付近で平衡状態となった。切削が終了し、工具が被削材から離れると急激に工具温度は低下した。

以上のように、赤外線カメラで連続的に切削中の工具温度を測定し、その変化を把握できることがわかった。

5. 2. 3 切削抵抗の測定

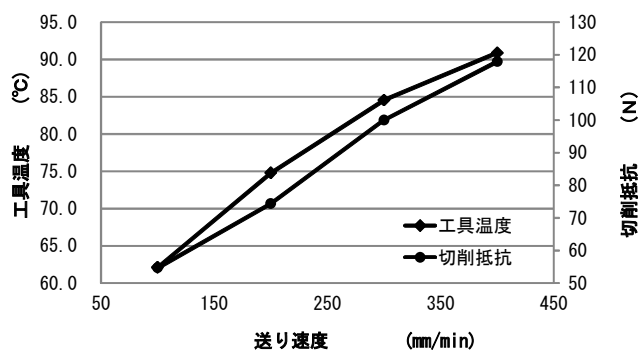
図13に切削長100mmの側面切削を行ったときの切削抵抗の例を示す。工具温度と同様に、切削開始直後に切削抵抗は急激に上昇し平衡状態となり、工具がワークから離れると急激に低下した。



主軸回転数 2,000rpm, 送り速度 300mm/min

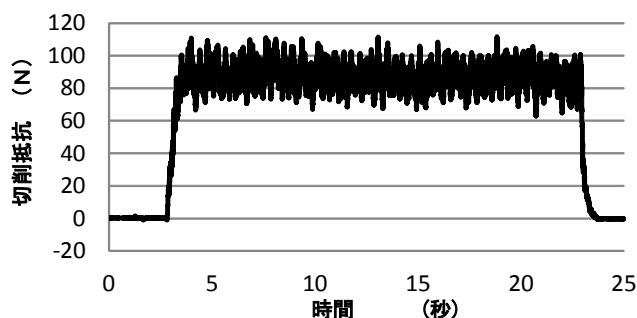
切削深さ 4.0mm, 切削幅 2.0mm

図12 工具温度の例



主軸回転数 2,500rpm, 切削深さ 4.0mm, 切削幅 2.0mm

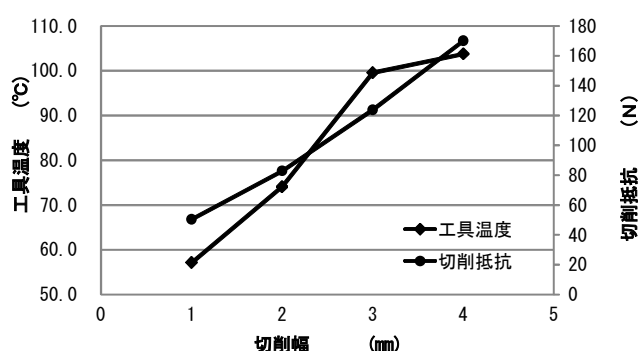
図14 送り速度と工具温度, 切削抵抗



主軸回転数 2,000rpm, 送り速度 300mm/min

切削深さ 4.0mm 切削幅 2.0mm

図13 切削抵抗の例



主軸回転数 2,500rpm, 送り速度 100mm/min,

切削深さ 4.0mm

図15 切削幅と工具温度, 切削抵抗

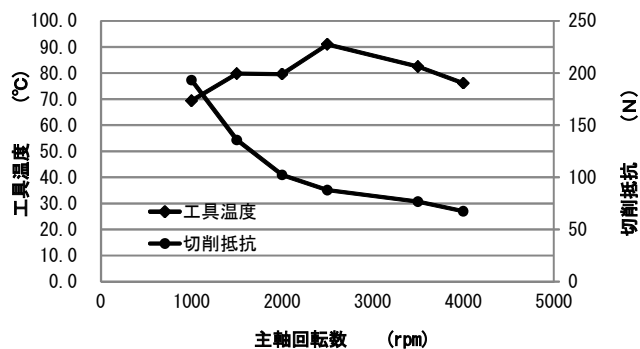
5. 2. 4 工具温度と切削抵抗の関係

図14に送り速度を100mm/min~400mm/minに変化させたときの工具温度と切削抵抗を示す。送り速度を大きくすると、工具温度は上昇し、同時に切削抵抗も上昇しており、両者の間には強い相関関係が認められる。これは送り速度を大きくすることで単位時間当たりにエンドミルが被削材を切り屑として除去する量が増加したためである。

図15に切削幅を1.0mm~4.0mmに変化させたときの工具温度と切削抵抗を示す。切削幅を大きくすると工具温度は上昇し、同時に切削抵抗も上昇した。これは送り速度を変化させたときと同様に、単位時間当たりの被削材除去量が増加したためである。

図16に主軸回転数を1,000rpm~4,000rpmに変化させたときの工具温度と切削抵抗を示す。切削抵抗は主軸回転数の増加とともに減少することがよく知られている。しかし、主軸回転数と工具温度の関係には特徴的な傾向は見られなかった。

以上のことから主軸回転数一定の場合には送り速度や切削幅など切削加工条件と工具温度、切削抵抗の間には強い相関関係があることが分かった。



送り速度 100mm/min, 切削深さ 4.0mm, 切削幅 2.0mm

図16 主軸回転数と工具温度, 切削抵抗

5. 3 工具折損実験

図17に側面切削における切削工具が折損するまでの工具温度の変化を示す。熱画像動画は1秒間に120フレームで撮影したので1/120秒間隔の温度の移り変わりを示している。切削が進むにつれて切削深さは大きくなり、工具温度は上昇した。切削工具が折損する瞬間には、工具温度が急激に低下した。

図18に工具折損の前後における前フレームとの工具温度の差を示す。切削工具折損前後での工具温度の変動を詳しく見るために、前フレームに対する工具温度の変化を調べた。折損の直前まではごく小さい温度変化で推移していた

が、折損の瞬間に工具温度は大きく低下した。その後は再び小さい温度変化に戻った。

図19に切削工具が折損する瞬間の連続写真を示す。折損が確認された瞬間に工具温度が大きく低下した。これはもともと温度の高い工具刃先部が折損して測定範囲の外に出て、測定範囲内の最大温度が低下するためである。

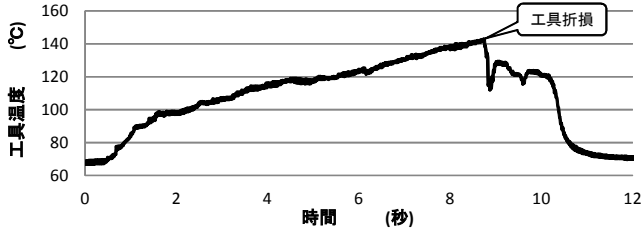


図17 工具折損における工具温度の変化

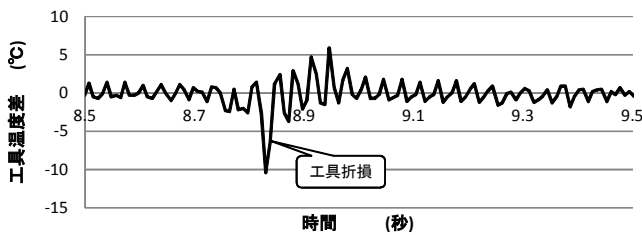


図18 工具折損時の工具温度差

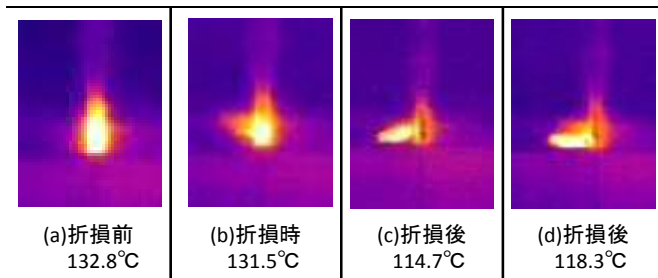


図19 工具折損時の熱画像

6. 結 言

赤外線カメラと切削動力計を使用して、切削中の工具温度と切削抵抗を測定するシステムを構築し、切削加工条件が工具温度に及ぼす影響について実験を行った。

その結果、以下のことがわかった。

- (1) 赤外線カメラを用いた温度測定において放射率の設定はきわめて重要であり、ハイスエンドミルの放射率は0.15程度であった。
- (2) 加工条件を変えながら切削加工実験を行った結果、
 - ・送り速度が大きくなると工具温度、切削抵抗も大きくなり、強い相関が認められた。
 - ・切削幅が大きくなると工具温度、切削抵抗も大きくなり、強い相関が認められた。
 - ・主軸回転数が大きくなると切削抵抗は減少したが、工具温度との関連性は認められなかった。
- (3) 切削工具が折損した瞬間、折損した工具は測定範囲外に出るため工具温度は急激に低下した。工具折損の防止は困難であるが、折損を検知し、トラブルの拡大を防止できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 南晃：鹿児島県工業技術センター研究報告，43(2002)
- 2) 南晃：鹿児島県工業技術センター研究報告，33(2006)
- 3) FLIR600series ユーザーマニュアル，317
- 4) 久野治義：赤外線工学，社団法人電子情報通信学会，15，(2002)
- 5) FLIR600series ユーザーマニュアル，318