

機上研削焼け深さ推定技術の研究

Study on On-Machine Grinding Burn Depth Estimation Technology

後藤直規 N. GOTO 村上慎二 S. MURAKAMI 河原 徹 T. KAWAHARA

Grinding can achieve high-precision finished surfaces but is prone to grinding burn caused by heat generated during processing. Components affected by grinding burn can suffer premature failure due to reduced fatigue strength. Non-destructive testing evaluation is critical to avoid such issues. This paper describes a non-destructive method to measure grinding burn depth using an eddy current sensor. It also presents a method for estimating grinding burn depth based on the amount of heat that induces the softened layer, by quantifying the cooling capacity using the grinding wheel spindle power. The developed technology allows for rapid evaluation of the presence and depth of grinding burn. The measured burn depth showed accuracy equivalent to Nital etching. It also became possible to quantitatively estimate the margin before grinding burn occurs under given machining conditions.

Key Words: grinding burn, eddy current, wheel spindle power, non-destructive

1. はじめに

研削加工は高精度な仕上げ面が得られるが、加工時の発熱が大きく、被加工物に変質層が生じやすい。この変質層は研削焼けともよばれ、高負荷の研削や冷却能力が低い条件下において、研削点温度の急激な上昇に伴い、金属組織が焼戻しあるいは再焼入れされる現象である。研削焼けが残存した部品が市場に流出した場合、疲労強度の低下に起因する早期破壊などの品質問題が生じる可能性がある。したがって、研削焼けを非破壊で評価する技術の確立が必要である。

研削焼けの評価方法は、大別すると研削焼けの有無を判別する方法と、研削焼けの損傷状態や深さを計測する方法に分類される。前者は研削後の仕上げ面を正常品と比較して研削焼けの有無を判別する方法であり、不良品の流出防止に有効である。この評価法として、バルクハウゼンノイズや渦電流などを利用した多くの非破壊検査技術が報告されている。一方、後者は金属組織の状態を把握して研削焼けの損傷状態や深さを計測する方法であり、研削焼けを防止するための適正な加工条件の決定などに活用できる。しかし、現時点で研削焼け深さを高い精度で評価可能な手法は、金属組織を直接観察するナイ

タル腐食法に限られており、計測に破壊が必要という課題を有する。したがって、非破壊かつ短時間で評価可能な手法の開発が求められている。

そこで本報では、渦電流センサーによる研削焼け状態および深さの非破壊計測技術¹⁾と、砥石軸モーターの消費電力を用いた研削焼け深さ推定技術²⁾について、研究内容を報告する。

2. 研削焼け深さの非破壊計測法

2.1 インプロセス研削焼け深さ計測システム

研削焼けは、研削熱とクーラントによる熱除去で決まる研削点の温度履歴に伴う金属組織変化³⁾である。熱処理鋼では数百度で軟化層（焼戻し層）が生じ、オーステナイト化温度近傍以上で白層（再焼入れ層）が生じる。また、金属組織の変化に伴い透磁率と導電率が変化する。渦電流計測は、これらの電磁気的特性の変化に対して高感度に応答する。本計測法は表面から深さ方向に減衰する電磁場を利用するため、測定信号には深さ方向の電磁特性が重み付きで反映される。したがって、測定信号から内部組織変化の評価が可能であり、研削焼け深さの計測に応用できる。

渦電流出力信号の視覚化方法を図1に示す^{4), 5)}。コイルに高周波電流を印加すると高周波磁界が発生し、電磁誘導により測定面に渦電流が発生する。その結果、金

*本報は、2025年砥粒加工学会誌11月号、特集 機械的除去加工における研削焼けの制御と利用、69(11)598-601を基に作成した。

属組織に応じた振幅 A および位相 ϕ の情報を含む渦電流出力信号が得られる。本研究では、この信号を直交検波によって X 信号（実軸）と Y 信号（虚軸）に分離させた複素平面上にプロットし、振幅 A と位相 ϕ を求める。図 2 に示すとおり、研削によって金属組織が変化するとプロット点は加工前と異なる位置へ移動する。そのため、研削開始から終了までの X 信号および Y 信号を複素平面上に逐次プロットした軌跡（以下、渦電流軌跡）により、加工中の金属組織変化を詳細に把握できる。

開発したインプロセス研削焼け深さ計測システムの外観を図 3 に示す。渦電流センサーは非接触計測が可能であるが、研削時の振動や工作物とセンサー間の隙間の変化で出力が著しく変化する。この影響を抑制するため、本研究ではセンサー先端を研削面に接触させ、背面に設置したばねによって一定の押圧を付与した。なお、渦電流計測の励磁周波数は 250 kHz とした。さらに、加工中の工作物寸法変化と砥石軸負荷を測定するため、定寸装置と電力計も設置し、各信号を加工中に取得した。

2.2 金属組織状態と複素平面上の軌跡の関係

本計測システムを用いて、さまざまな加工条件下における金属組織状態と渦電流信号の複素平面上にプロットされる軌跡との対応関係を評価した。ここで、工作物材質は浸炭焼入れされた SCr420 とし、加工中の工作物回転速度 N_w は 80 min^{-1} とした。なお、金属組織状態の違いは粗研削の研削能率 $Z' \text{ mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{s})$ とクーラント流量 $L \text{ L/min}$ の調整により変化させた。 Z' は単位幅・単位時間当たりの除去体積である。組織状態と渦電流軌跡に変化が認められた 4 条件を表 1 に示す。

各条件での粗研削および仕上げ研削における複素平面上の渦電流軌跡と、粗研削のみを施した工作物断面のナイタール腐食結果を図 4 に示す。

条件 1 では、粗研削後の渦電流軌跡およびナイタール腐食結果に変化が認められない。

条件 2 では、粗研削開始時の砥石接触から渦電流のプロット点は左方向へ移動し、砥石の切込み深さが一定となる定常状態で同じ位置に留まった。その後、仕上げ研削が始まるとプロット点は右方向へ移動し、粗研削開始時の位置に戻った。また、ナイタール腐食結果では組織変化が確認されなかったが、渦電流軌跡には条件 1 と異なりプロット点軌跡の変化から組織変化を示す挙動が確認された。本報では、この変質層を「組織変化層」と定義する。

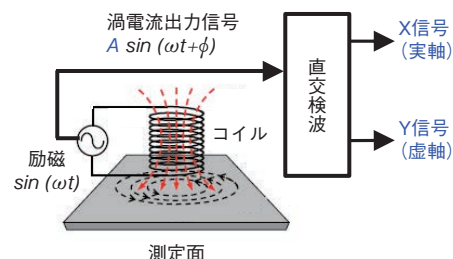


図 1 渦電流出力信号の視覚化
Principle of eddy current sensor measurement

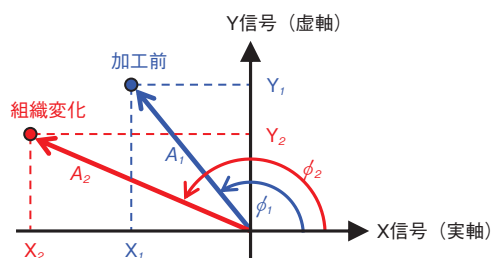


図 2 複素平面表示
Complex plane representation

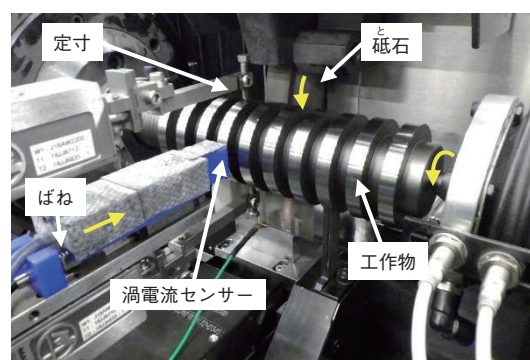


図 3 研削焼け深さ計測システムの外観
Appearance of grinding burn depth measurement system

条件 3 では、粗研削開始時にプロット点は左方向へ移動後、曲線を描いて下方向へ移動し、定常状態となった。その後、仕上げ研削開始によりプロット点は逆方向へ移動して開始位置付近に戻った。また、粗研削後の工作物断面をナイタール腐食した結果、黒色に変色した軟化層が認められた。その軟化層は深さ $72 \mu\text{m}$ であった。これらの結果から複素平面上の渦電流軌跡により、条件 3 の粗研削で生じた熱による軟化層の発生および仕上げ研削で軟化層、組織変化層の順に除去される過程を把握できる。

なお、図中の軌跡形状のうち、青丸（※ 1）で示した軌跡の傾向が変化する点（以下、転換点）の有無とナイタール腐食結果を比較したところ、転換点が確認された。

条件では工作物に軟化層が生じた。したがって、転換点を軟化有無の判定指標とし、「軟化層境界」と定義した。この境界は、粗研削時には過渡応答中の軟化開始位置を示し、仕上げ研削時には軟化層除去完了位置を示す。

条件4では、プロット点は条件3と同様の初期挙動を示した後、上方向へ転じて定常状態となり、仕上げ研削付近に戻った。また、粗研削のナイトール腐食では表面から34 μm の白層と121 μm の軟化層が確認された。さらに、図中に紫丸(※2)で示した白層境界の転換点は、白層と軟化層の境界位置に対応している。したがって、白層が生じる粗研削条件でも複素平面上の渦電流軌跡に基づいて加工中の金属組織状態を把握でき、白層境

界の同定が可能である。

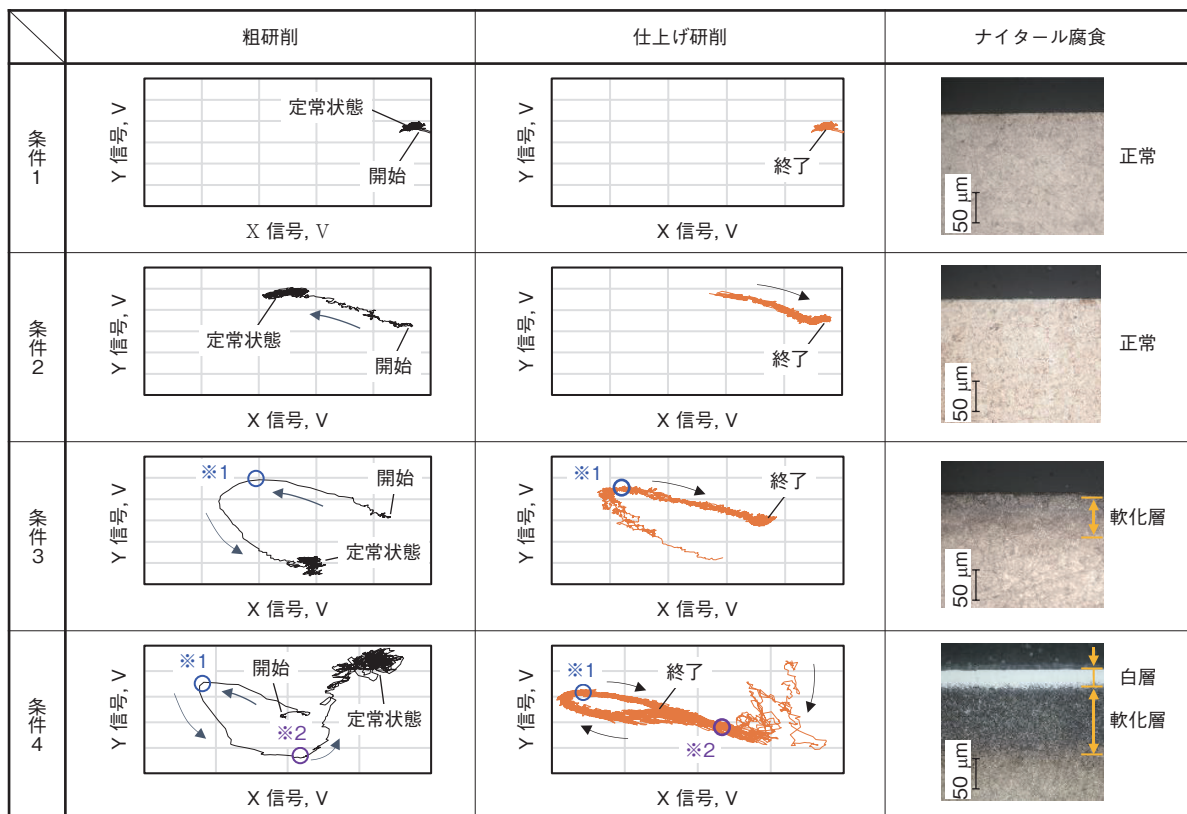
2.3 粗研削時の研削焼け深さの算出

前述のとおり、複素平面上の渦電流軌跡によって白層の有無や軟化層の深さは把握できるが、深さは定量的に求められない。一方、研削加工では研削焼けは粗研削で発生し、仕上げ研削では新たな焼けはなく変質層が除去される。本研究では、この変質層の除去過程に着目し、研削焼け深さを算出する方法を検討した。図5を用いてその方法を説明する。

円筒研削の場合、軟化層が工作物中心方向に最も深く生成されるのは粗研削終了時であり、図中に示す仕上げ

表1 渦電流軌跡の評価条件
Evaluation conditions of eddy current trajectory

項目		単位	加工条件			
			条件1	条件2	条件3	条件4
研削能率	粗研削	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	2	6	10	10
	仕上げ研削	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	2	2	2	1
クーラント流量		L/min	37	37	37	10
組織状態		—	正常品	正常品	軟化	再硬化



※1 軟化層境界 ※2 白層境界

図4 各条件での渦電流複素平面上の軌跡

Eddy current trajectory on the complex plane under various conditions

研削開始点の工作物位相である。この位相を工作物の回転ごとにプロット点をつけて追跡し、プロット点が軟化層境界を通過するまでの工作物が回転した回数を計測する。この回転回数に仕上げ研削時の1回転あたりの切込み量 ($Z' = 2$ のとき $8 \mu\text{m}/\text{rev}$) を乗じることで軟化層深さを算出できる。また、白層深さも同様の方法で求められる。

条件3および条件4における本手法による研削焼け深さを図6に示す。軟化層および白層はナイトール腐食結果と良好に一致し、本測定システムにより非破壊かつ高精度に研削焼け深さを測定可能であることが確認された。したがって、次章以降の焼け深さは、この渦電流測

定によって求めた値を用いた。

3. 研削焼け深さの推定法⁴⁾

前章までの結果から、渦電流計測で研削焼け深さの評価が可能であることが確認された。一方、生産設備への適用には、設置スペースや渦電流センサーの摩耗、切粉のかみ込みに伴う出力変動ならびにコストの制約により、渦電流センサーを搭載できない場合がある。また、渦電流出力は金属組織変化後に応答するため、加工条件が軟化層発生限界に対して、どの程度の余裕（以下、余裕度）を有するか定量的な評価は困難である。そこで本章では、導入が容易な電力計で砥石軸モーターの消費電力を測定し、粗研削時の研削焼け深さおよび余裕度の推定手法を検討する。

3.1 沸騰現象を考慮した冷却能力の定量化

研削焼けは複雑な研削現象の結果として生じるが、本報では現象を簡略化し、粗研削における研削熱とクーラントの冷却能力によって軟化層深さが決定されると仮定する。すなわち、入力を「①発熱および②冷却能力」、出力を「③軟化層深さ」とし、両者の関係を推定する。研削加工では、砥石軸電力として消費されるエネルギーの大部分が金属の塑性変形および砥粒と工作物間の摩擦により熱に変換されることが知られている。すなわち、材料除去に対応するエネルギーの大部分が熱として散逸する。本研究では塑性変形および摩擦による発熱を一括して扱う。そのため、入力の一つである①発熱量は粗研削時の砥石軸モーター消費電力と空転時電力との差（以下、研削電力）から求める。一方、出力である③軟化層深さは前章の計測システムにより得られる。したがって、不明な入力である②冷却能力を定量化することで軟化層深さの数式化が可能となる。

クーラントの冷却能力は、クーラントの沸騰状態が核沸騰または膜沸騰によって異なることが知られている⁶⁾。核沸騰では発熱面に液体が直接接触するため熱伝達率が高い。一方、膜沸騰では発熱面と液体の間に蒸気膜が形成されるため、熱伝達率は著しく低下する。

軟化層が生成される場合の接触弧内の模式図を図7(a)に示す。研削熱が大きいと、接触弧内は非沸騰領域、核沸騰領域、膜沸騰領域の3領域に分かれる。本報では、この非沸騰と核沸騰、および膜沸騰領域における発熱と冷却は、図の上側で示した矩形波状に簡略化した

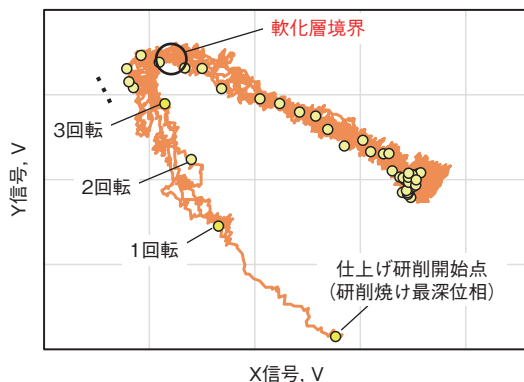
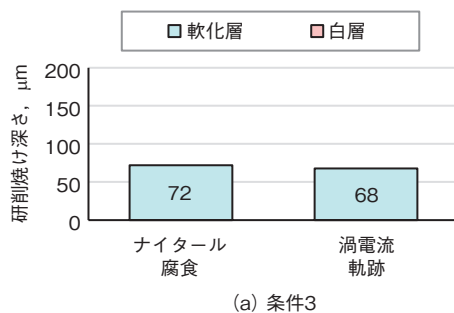
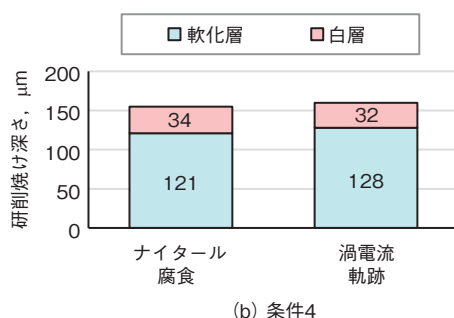


図5 研削焼け深さ算出方法
Method for calculating grinding burn depth



(a) 条件3



(b) 条件4

図6 研削焼け深さの測定結果
Measurement results for grinding burn depth

モデルとした。非沸騰および核沸騰領域では熱伝達率が高く、表面温度は 130°C 以下⁷⁾に保たれ軟化は生じない。一方、膜沸騰領域では熱伝達率が空気と同程度まで低下し、核沸騰領域に対して表面温度が急上昇し、軟化層が生成される。以上のように表面温度の上昇と軟化層の生成は、研削熱とクーラントによる熱の除去能力のバランスにより決定される。ここで、本研究では冷却能力を研削焼けの発生防止に必要な熱除去能力と定義し、その大きさを核沸騰領域に到達するまでの研削電力によって定量化する。しかし、核沸騰領域と膜沸騰領域の境界を直接測定するのは困難である。そこで、前章で定義した軟化層境界に着目する。図4の条件3における軟化層境界位置での接触弧内の模式図を図7(b)に示す。この位置では、表面温度が軟化開始温度に達し、核沸騰領域に加えて僅かに膜沸騰領域が生じる。本研究では、この状態までの熱除去能力を冷却効果が有効な範囲とみなし、このときの研削電力を「軟化層境界電力」と定義する。

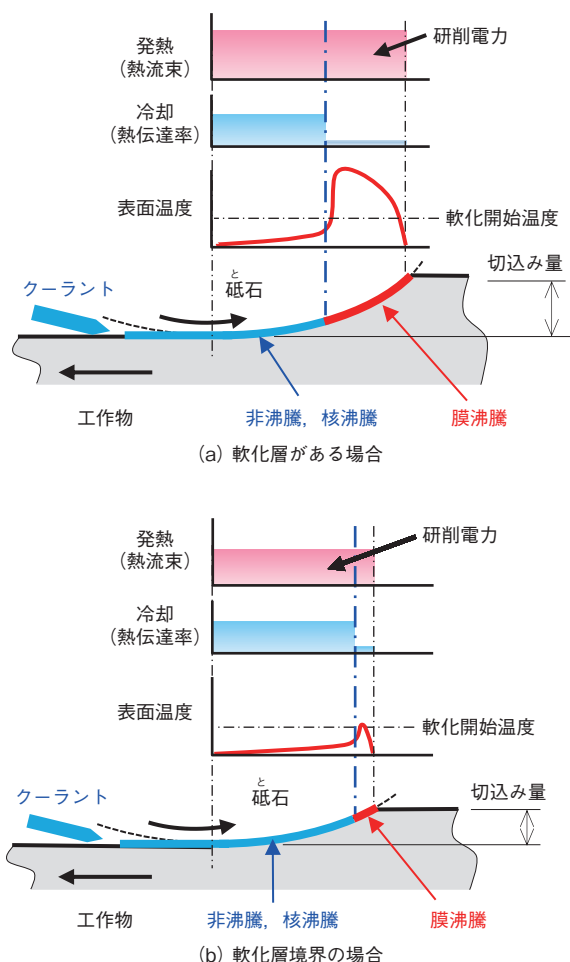


図7 接触弧内の模式図

Schematic diagram within contact area

軟化層境界は、粗研削が定常状態に至る過程において、図8に示す渦電流 Y 信号の時系列変化における急激な変化点として特定される。この時点の砥石軸モーターの消費電力から軟化層境界電力 Q'_w (冷却能力) を算出する。

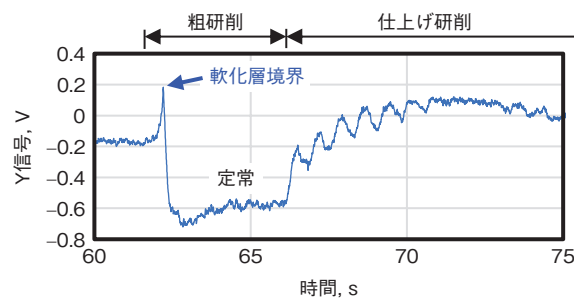


図8 軟化層発生時の渦電流 Y 信号

Y signal of eddy current during softened layer formation

3.2 軟化層境界電力 Q'_w の検証

前節で述べた軟化層境界電力を軟化発生の境界値として算出する手法の有効性を検証するため、複数の加工条件で評価した。加工条件は表2に示すように工作物回転速度 N_w を3条件、粗研削の研削能率 Z' を8条件に設定した。

評価結果を図9に示す。異なる加工条件を同一図上で比較するため、横軸には砥石と工作物の干渉により決定される接触弧長さ l_c を用い、縦軸には熱流束 q を用いた。 l_c は粗研削の実切込み量から幾何学的に求め、熱流束 q は単位幅あたりの研削電力を $Q' \text{ W/mm}$ としたとき、 Q'/l_c から求められる。すなわち、研削電力 Q' は図では接触弧長さと熱流束の積である面積で表すことができる。評価の結果、単位幅あたりの軟化層境界電力 Q'_w は異なる工作物回転速度 N_w でもほぼ一定であることが確認された。そこで、これらの平均値を「軟化層境界線」として図中に破線で示した。この図上に研削能率 Z' 、工作物の回転速度 N_w ごとに得られた研削電力 Q' をプロットした結果、軟化層境界線より上側の加工条件では

表2 軟化層境界判別の加工条件

Experimental conditions of boundary of softened layer

項目	単位	条件
工作物回転速度 N_w	min^{-1}	80, 120, 160
研削能率 Z'	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
クーラント流量 L	L/min	37

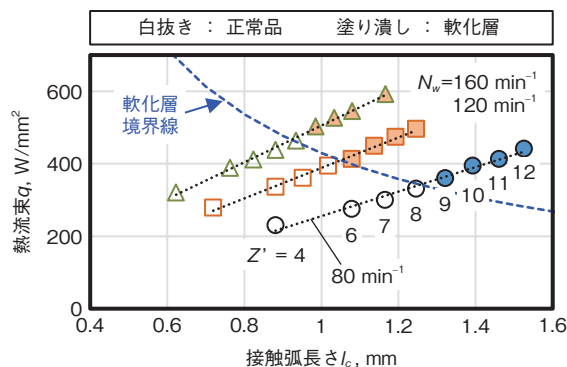


図9 各加工条件での軟化層評価結果

Evaluation results of softened layer under each processing condition

軟化層が発生し、下側では発生しないことが確認された。以上より、前述の計測法によって軟化層境界電力 Q'_w は、冷却能力を高精度に定量化できることが示された。

3.3 軟化層誘発熱量 J_m と軟化層深さの関係

つぎに、図9に示す接触弧長と熱流束の関係について、軟化層発生時の接触弧内における電力配分を図10に模式図で示す。前述のとおり、赤破線で囲まれた面積は研削電力 Q' を表し、軟化層境界線と熱流束 q の交点により分割される。左側の青色面積は冷却能力に相当する軟化層境界電力 Q'_w に対応し、右側の赤色面積は膜沸騰領域における電力 Q'_m に対応する。本報では、この超過分の電力 Q'_m を「軟化層誘発電力」と定義する。

軟化層深さは図11に示す熱源移動モデルにおいて、工作物内部に投入される熱量および工作物の移動速度 v によって決まる温度分布に依存する。そこで、軟化層誘発電力 Q'_m を単位面積あたりの熱量に換算する。この熱量 J_m J/mm² は Q'_m/v から算出される。本研究では、この J_m を「軟化層誘発熱量」と定義し、 J_m と軟化層深さとの間に正の相関があると仮定した。

この仮定の妥当性を複数の加工条件で検証した。加工条件は、直径 $\phi 60$ mm および $\phi 30$ mm の工作物を対象

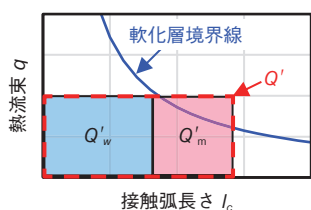


図10 接触弧内の電力配分
Power distribution within contact area

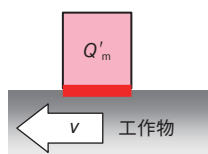


図11 移動熱源
Mobile heat source

とし、クーラント流量を 37 L/min と一定としたうえで、工作物回転速度 N_w および単位幅あたりの研削電力 Q' に影響する研削能率 Z' と砥石切れ味の変化を設定した。さらに、 $\phi 60$ mm の工作物ではクーラント流量を 10 L/min に低減した条件も評価した。評価結果を図12に示す。各種の加工条件に対し、 J_m と軟化層深さの間に正の相関があることが確認された。たとえば、表1の条件3と条件4は研削能率が同一でクーラント量が異なるが、図12中の回帰直線付近にプロットされている。

両条件における接触弧内の電力配分実測値を図13に示す。(a) は表1の条件3、(b) は条件4の結果であり、流量がそれぞれ $L=37$ と $L=10$ と異なるが、同等の砥石

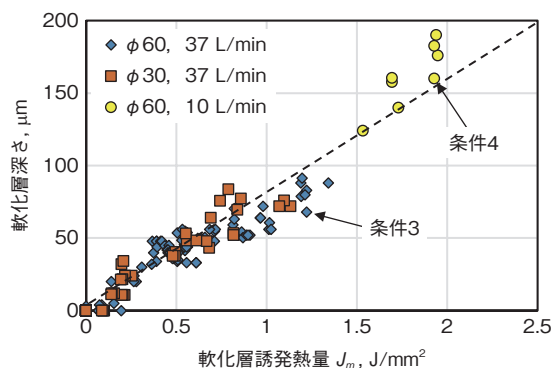
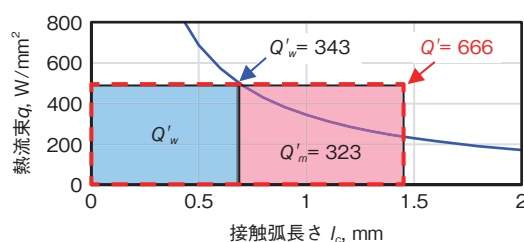
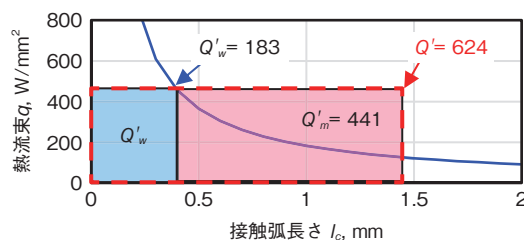


図12 軟化層誘発熱量 J_m と軟化層深さの関係

Relationship between softened layer induced heat J_m and softened layer depth



(a) 条件3 ($Z'=10$, $L=37$)



(b) 条件4 ($Z'=10$, $L=10$)

図13 接触弧内の電力配分実測値

Measurement results of power distribution within contact arc

切れ味かつ研削能率 $Z' = 10$ に調整しているため、研削電力 Q' はほぼ同程度である。一方、クーラント流量が異なるため、青色面積で示される軟化層境界電力 Q'_w は異なる。その結果、条件 4 では条件 3 に比べて赤色面積に相当する軟化層誘発電力 Q'_m が増加し、白層が形成されるほど深い研削焼けが生じた。

また、軟化層が生じない場合、すなわち図 14 に示す $Q' < Q'_w$ の条件では Q'_m および J_m は負となる。このとき、絶対値が大きいほど軟化に対する余裕度が大きく、研削焼けは生じにくいと考えられる。

3.4 軟化層深さの推定法

これまで述べた砥石軸モーターの電力を用いた軟化層深さの推定方法を整理し、図 15 に手順を示す。生産準備段階では、研削焼け深さ計測システムを用い、軟化層境界電力 Q'_w および軟化層誘発熱量 J_m と軟化層深さの検量線をあらかじめ取得して記憶装置に格納する。生産段階では、砥石軸モーターの消費電力から粗研削時の研削電力 Q' を測定し、図 15 に従って軟化層深さおよび加工条件の余裕度を推定する。なお、 Q'_w は砥石切れ味やクーラント流量など加工環境に依存するため、適切な値の設定が重要である。

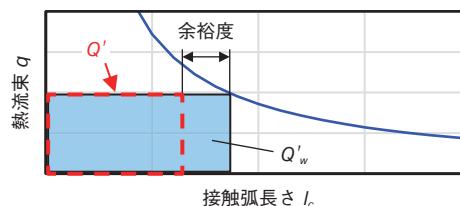


図 14 接触弧内の電力配分実測値 ($Q' < Q'_w$)
Measurement results of power distribution within contact arc ($Q' < Q'_w$)

4. おわりに

本報では、加工中に渦電流センサーから取得した信号の複素平面上の位置および軌跡に基づき、研削焼け深さを算出する非破壊計測法を提案した。

さらに、接触弧内における沸騰現象に着目し、軟化層境界電力 Q'_w を定義することで、軟化層誘発熱量 J_m と軟化層深さとの間に正の相関があることを示した。これにより、砥石軸モーターの電力に基づく軟化層深さおよび加工条件の余裕度を推定する手法を構築した。

本研究により、渦電流計測は金属組織変化に対して高い感度を有する測定手法であることが確認された。今後は研削焼け評価に限定することなく、金属組織変化の検出が必要な幅広い用途での活用を進めていく。

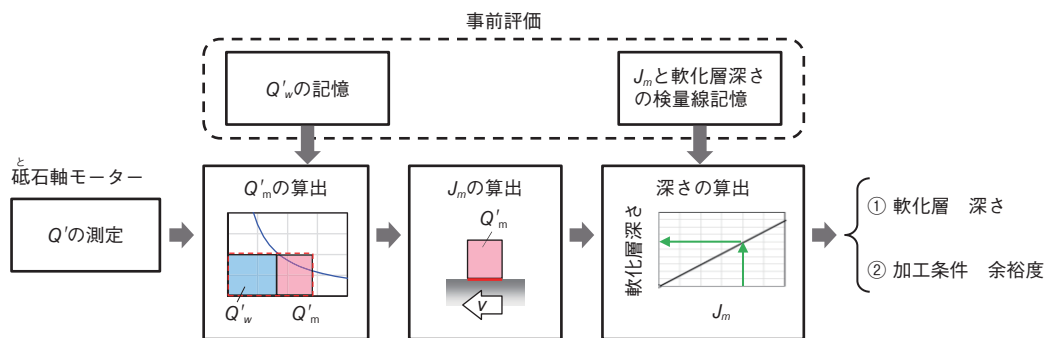


図 15 軟化層深さの推定法
Method for estimating depth of softened layer

参考文献

- 1) 後藤直規, 村上慎二, 河原 徹: 研削加工中の研削焼け深さに関する研究(第1報)ーインプロセス焼け深さ測定システムー, 2024年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会(2024)661.
- 2) 村上慎二, 後藤直規, 河原 徹: 研削加工中の研削焼け深さに関する研究(第2報)ー冷却能力を考慮した焼け深さ推定法ー, 2024年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会(2024)663.
- 3) 江田 弘, 貴志浩三, 橋本 聡: 研削白層の生成機構, 日本機械学会(C編), 46, 408(1980)970.
- 4) 伊藤 亮, 東 孝幸, 相馬伸司, 村上慎二, 厨川常元: 研削焼けの非破壊検出技術の開発ー第1報: 渦電流センサによる研削焼け検出方法ー, 砥粒加工学会誌, Vol. 56, No.8(2012)533.
- 5) 伊藤 亮, 東 孝幸, 相馬伸司, 村上慎二, 厨川常元: 研削焼けの非破壊検出技術の開発ー第2報: 渦電流センサの外乱抑制ー, 砥粒加工学会誌, Vol. 56, No.10(2012)677.
- 6) 安井平司: 接触弧内における研削液の沸騰ー湿式研削温度の研究(第1報)ー, 精密機械, 48巻, 5号(1982)609.
- 7) 日本機械学会: 伝熱ハンドブック, 日本機械学会(1993).

筆 者



後藤直規*
N. GOTO



村上慎二*
S. MURAKAMI



河原 徹*
T. KAWAHARA

* イノベーション本部 データアナリティクス研究部