

タップ加工時の工具異常検知技術の開発

横山哲也*、田畑克彦**、村井正司†、亀井誠二†

Development of anomaly detection in tapping process

YOKOYAMA Tetsuya*, TABATA Katsuhiko**, MURAI Masashi† and KAMEI Seiji†

製造業の人手不足などの解決策の一つとして、DXの導入による業務の自動化がある。切削加工の現場においても、人が関わる作業をなくす、または機械で置き換えることにより業務の自動化が可能となり、省人化や生産性の向上が期待できる。本研究では切削加工の業務の自動化を目的とし、加工機のモータ電流の変化より工具異常を検知する技術を開発する。今年度は切削タップ加工におけるモータ電流の計測を行い、加工中の電流の変化で工具の異常を検知できるか検討した。

1 はじめに

製造業の人手不足などの解決策の一つとして、DXの導入がある。DXの導入は3つの段階¹⁾(データのデジタル化、個別プロセスのデジタル化、全体プロセスのデジタル化)に分けられ、企業の現状に応じて取り組むべき内容を選定し、推進していくことになる。

切削加工の現場においても、IoTを活用して加工データの収集やデータの可視化など、データのデジタル化に取り組んでいる。その取り組みの次の段階は、収集データを活用した業務の自動化やプロセスのデジタル化である。切削加工の現場で作業者が関わる作業をなくす、または機械で置き換えることにより業務を自動化できれば、省人化や生産性向上が期待できる。このため本研究では切削加工業務の自動化に取り組んでいる。

切削加工において、工具の破損、欠け、摩耗は不良品を発生する原因となり、また自動加工で工具に異常が生じたまま加工を続けると大量の不良品を生産する恐れがある。タップ加工においてはタップ刃先の摩耗、チッピングがあると、切れ味が劣り、加工面にむしれなどが発生し、めねじ精度が低下する。その結果、めねじが通らない不良品が発生する。そのため、切削加工の保守業務として、適切なタイミングで工具交換を行うことが重要となる。

工具異常による加工不良を未然に防ぐための方法として、工具の寿命管理がある。例えば、決まった加工時間や加工数に基づき工具を交換することで、工具破損を未然に防ぐことができる。しかし、交換前に工具が破損しない保証がないため、作業者が定期的に工具刃先をチェックするか、または加工品に対して工具破損による未加工部位がないか定期的にチェックする作業が必要となり、自動化への課題となっている。

この課題に対する有効な手法として、インプロセス計測²⁾がある。インプロセス計測は加工と同時に、加工により生じる振動や、モータに流れる電流などの物理量を計測することでリアルタイムに異常を検知することができる。

本研究では切削加工で作業者が関わる保守作業の自動化を目的とし、昨年度は加工中の主軸モータの電流を計測することで小径タップの破損検知を行った³⁾。今年度は、切削タップ加工を対象に加工機モータの電流変化で工具異常を検知する技術を開発する。これにより、タップ加工時の工具異常に伴う加工不良を未然に防ぐことができ、従来、作業者が行っていた作業の一部をなくすことが可能となる。

2 タップ加工時のモータ電流の計測

2.1 対象加工と電流計測方法

対象とする加工は、ドリルで開けた下穴に対してねじ山を成形するタップ加工で、対象工具は切削タップ(スパイラルタップ)である。タップ加工を行う加工機は複合加工機で、タレットでタップを把持し、スピンドルのチャックで材料を固定し回転させて加工を行う。

本研究ではスピンドルモータに流れる電流を計測した。スピンドルモータとサーボアンプ間の3相配線の1つに電流センサ(クランプセンサ)を取付け、電流センサの出力を電子回路経由でRaspberry Piにて蓄積した。計測時のサンプリング周波数は1kHzとした。

2.2 モータ電流と切削抵抗の関係

図1にスピンドルモータの計測電流データのうち、タップが材料に食付く前後の電流を示す。計測データは瞬時値と呼ばれる交流信号であり、0Aを中心に振動している。電流の振幅の大きさはモータに発生するトルクの大きさと関係しており、異常検知を行うにあたり重要なパラメータとなる。

図1に示す電流データには無負荷時と負荷時の電流が

* 機械部

** 情報技術部

† 株式会社イマオコーポレーション

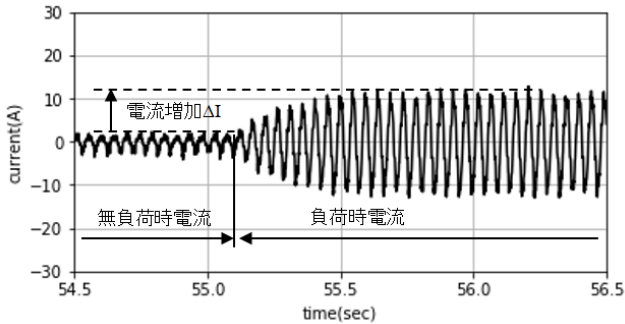


図1 モータ電流(瞬時値)

流れている。無負荷時はスピンドルが把持している材料が回転しているだけでタップ加工は行っておらず、流れる電流は小さい。負荷時はタップの刃先が材料を削ることでスピンドルは材料から切削抵抗を受けており、切削抵抗に対抗するトルクをスピンドルモータで発生させるため、電流が増加することになる。これより、無負荷時の電流値と切削加工時の電流値の差分、電流増加 ΔI は切削抵抗に関係する値と読み取ることができる。

2.3 タップ加工時の計測データ

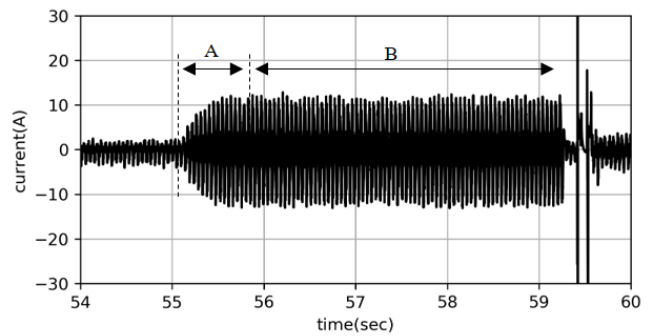
図2(a)に加工穴数が少ないときの電流データを示す。切削タップの先端には下穴の側面を削る食付き部があり、その刃先が下穴に当たり始めると、図2(a)の区間Aのように電流の振幅が徐々に大きくなる。食付き部の刃先全面が材料に食付くと、これ以降は切削量が一定になるため、図中の区間Bのように電流の振幅が一定となる。つまり切削抵抗は一定となる。

図2(b)に加工穴数が多いとき(交換直前)の電流データを示す。加工穴数が増えると電流の振幅が平均的に大きくなり、切削抵抗が増加する。また図のように振幅が不揃いになる。これは切削時に発生する切りくずがタップの溝に沿って排出される際の抵抗に関係している⁴⁾。加工穴数の増加に伴いタップ刃先の摩耗が進み、その結果、切りくず形状が変化して、切りくずの排出が良好でなくなる。その結果、タップに働く回転方向の抵抗が大きくなり、それに対抗するトルクを発生するために電流が大きくなったと考えられる。大きなトルクがタップに働くと刃先の一部が欠け、場合によっては折損することもある。このため、電流データから異常を検出し、タップ交換できるようにする必要がある。

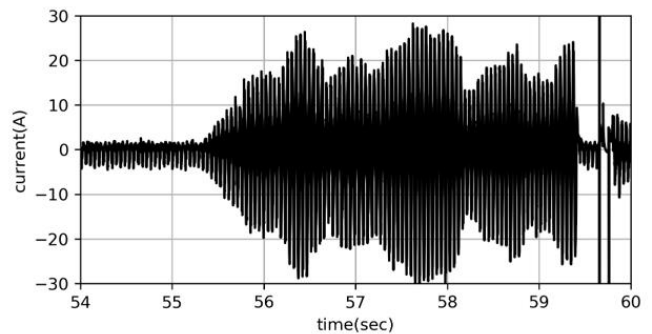
またタップ交換前において、図3で示すように電流の値が急激に小さくなる事象が発生していた。これは工具の安全機能が一時的に働き、タップが空転(無負荷)した可能性が考えられる。この事象が発生するのはタップに過負荷が働いたことが原因と考えられることから、この事象が検出された際には工具を交換することが望ましい。

3 計測データの解析

計測したモータ電流データをもとに、タップの異常検



(a) 加工穴数が少ないとき



(b) 加工穴数が多いとき

図2 加工穴数の増加に伴うモータ電流(瞬時値)の変化

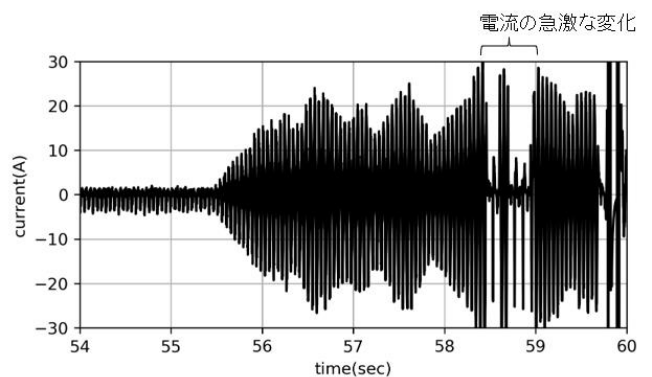


図3 タップ加工時の電流の急激な変化

知(変化検知)ができるか検討を行う。ここでは(1)加工穴数の増加に伴い電流値がどのように変化するか、(2)図3に示す電流の急激な変化が検出できるかどうかに着目した。

3.1 電流実効値の加工穴毎の時間変化

加工穴数の増加に伴い、スピンドルモータの電流がどのように変化するか調べるため、モータの電流データ(瞬時値)を実効値に変換し、その時間変化を調べる。図4に、図2(a)の電流データ(瞬時値)を実効値に変換したグラフを示す。

以下では電流増加 ΔI (実効値)を指標とする。 ΔI は以下の計算式で求める。

$$\Delta I = \bar{I}_l - \bar{I}_{nl}$$

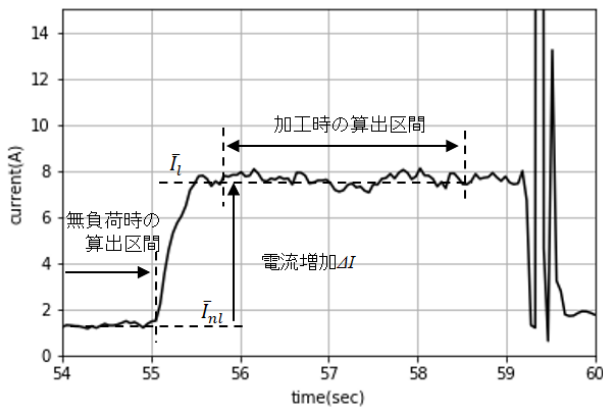
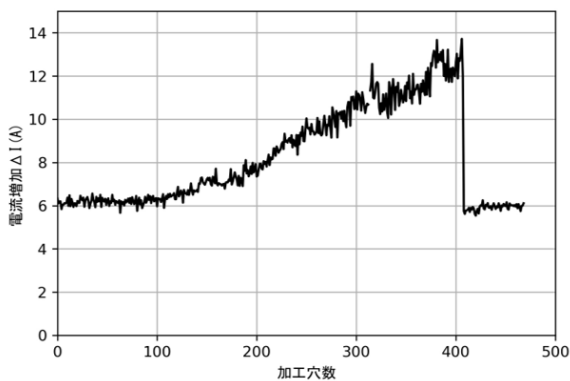


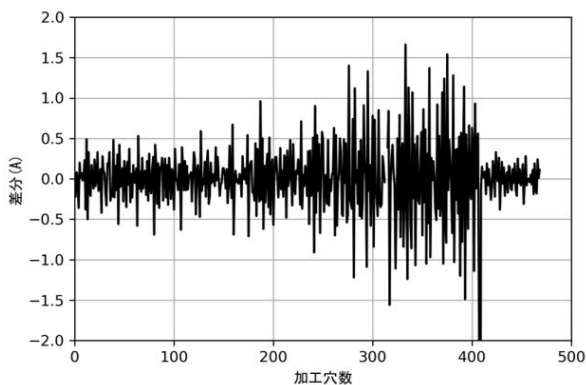
図4 スピンドルモータ電流(実効値)

ここで I_l は切削時の電流実効値 I_l の平均値、 I_{nl} は無負荷時の電流実効値 I_{nl} の平均値である。図4に各々の実効値の算出区間を示す。なお、加工時の算出区間は、実効値波形の形状をもとに決めた。

図5(a)に、M12 タップ加工の加工穴毎に計算した電流増加 ΔI の推移を示す。横軸は計測を開始してから加工穴数である。数日に渡って加工しており、一部データが欠損している。408 穴目で作業者の判断によりタップを交換した。図より加工穴数が少ない場合、電流増加 ΔI は一定であるが、加工穴数が増えると値は増加し、

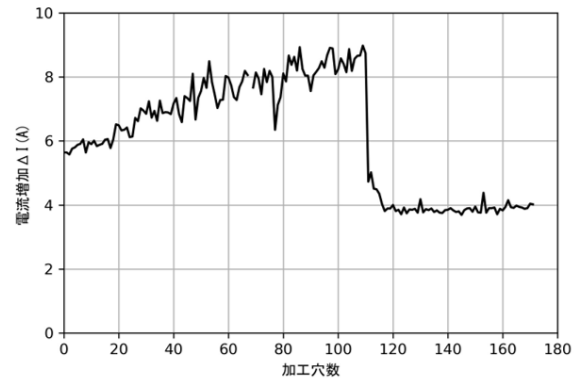


(a) 加工穴数の増加による電流増加

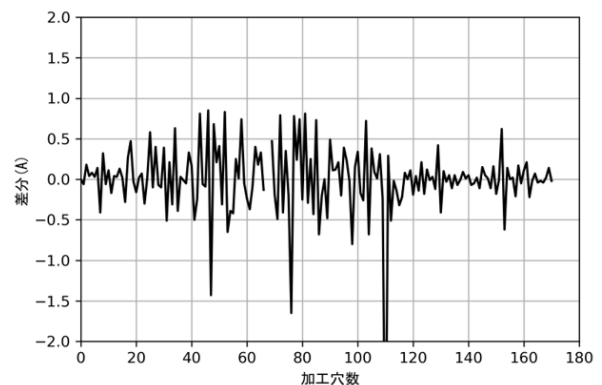


(b) 前加工に対する差分電流

図5 M12 タップ加工データ



(a) 加工穴数の増加による電流増加



(b) 前加工に対する差分電流

図6 M10 のタップ加工データ

タップを交換すると値は小さくなる。また、タップ交換前では ΔI がばらついている。このばらつきの大きさを把握するため、図5(b)に1つ前の加工の電流増加 ΔI との差分をグラフに示す。差分電流は加工穴数の増加に伴い大きくなり、タップ交換後に小さくなることから、この ΔI の変動は図2(b)に示す切りくずの排出時の切削抵抗の変化の影響と考えられる。

図6(a)(b)にM10 タップ加工の結果を示す。横軸は計測を開始してから加工穴数であり、数日に渡って加工しており、一部データが欠損している。こちらもM12と同様に加工穴数の増加に伴い電流増加 ΔI が増加し、工具交換(111 穴)に伴い電流の値が小さくなることからわかる。また前加工との差分を見ても、加工穴数の増加に伴い差分の振幅は大きくなり、工具交換により振幅は小さくなる。

以上より、電流センサを用いてモータ無負荷時の電流値からの増加分を算出することで、切削抵抗に対応する電流を知ることができる。またその増加分は作業者の工具交換とのタイミングと連動して変化していることから、工具交換の指標として使用できると考える。

3.2 電流瞬時値の変化検出

交流信号のような周期的な時系列データの変化検出方法として、特異スペクトル変換がある。図3に示す電流

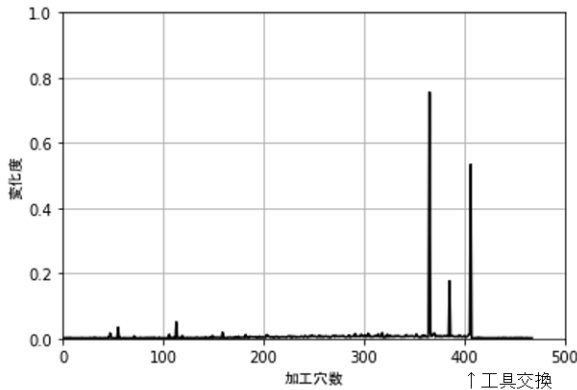


図7 特異スペクトル変換による変化度(M12)

の急激な変化を、特異スペクトル変換を用いて検出できるか試した。図4に示す加工時算出区間の電流瞬時値データを対象に、時間をずらした2つの時間窓を設け、その時間窓を算出区間内で移動しながら特異スペクトル変換を実施した。

M12 タップ加工の特異スペクトル変換の結果を図7に示す。横軸は計測を開始してからの加工穴数で、縦軸は加工穴毎に算出した特異スペクトル変換の計算結果で1を最大値とする変化度で、値が大きいほど変化の度合いが大きいことを示す。なお、算出した変化度は、加工穴毎に算出区間内で時間窓をずらしながら計算した特異スペクトル変換の結果のうちの最大値である。

図より工具交換(408 穴)前に変化度が大きくなっており、このときの電流波形を確認すると、加工中に電流値(瞬時値)が急激に小さくなっていることが確認できた。

図3に示すケースはタップに過負荷が働いた可能性が高いことから、この計算結果は工具交換判断の指標候補となりうる。

4 まとめ

切削加工の業務の中で人が関わる作業をなくし業務の自動化を図ることを目的に、切削タップ加工を対象に、加工機のモータ電流を計測し、タップ加工中の電流の変化で工具の異常を検知できるか検討した。

タップ加工時にスピンドルモータに流れる電流を計測し、加工穴毎に電流増加 ΔI を求め、その値が加工穴数の増加に伴う変化を調べたところ、加工穴数の増加に伴い電流増加 ΔI は大きくなることが分かった。また前加工との ΔI の差分を調べたところ、加工穴数の増加に伴い大きくなることが判明した。いずれも作業者の判断による工具交換によって、値が小さくなることを確認した。

加工中における負荷の急激な変化に関しては、計測データに特異スペクトル変換を施すことで、電流の急激な変化を検知できることを確認した。

今後は、工具異常による交換を判断する指標を特定し、実際の加工業務を通じて、その検証に取り組む予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省, DX レポート 2 中間取りまとめ (概要), <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201228004/20201228004-3.pdf> (参照 2024/3/14)
- 2) 吉岡勇人, 精密工学会誌 Vol.80, No.7, pp646-649, 2014
- 3) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp75-78, 2023
- 4) 山岡ら, 精密工学会誌 Vol.66, No.12, pp1922-1926, 2000