

# タップ加工時の工具破損検知技術の開発

横山哲也\*、田畑克彦\*、村井正司†、亀井誠二†

## Detection of tool breakage 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、小径タップを用いたタップ加工を対象に、加工機のモータ電流の変化より破損を検知する技術を開発する。これにより、切削加工で人が関わる作業を減らすことができ、加工業務の自動化に近づくことが可能となる。

### 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<sup>1)</sup>(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の業務の自動化に取り組んでいる。

切削加工の保守業務として、工具の破損、欠け、摩耗の管理は重要である。加工中に工具が破損すると、加工中のワークが不良品となる。破損検知機能がない加工機で、量産加工時に工具が破損すると、大量に不良ワークが発生する可能性がある。また、タップ加工で破損が生じ不良ワークが加工済み品に紛れると、作業者がワークの下穴を覗いてねじ山の有無を確認し、良品と不良品を選別する作業が必要となり、余計な時間が費やされる。

上記問題の対策として、(1)機上に設置した機械的接触センサによる工具破損検知や(2)加工時間や加工数を基に工具交換する予防保全がある。(1)は工具を定期的にセンサに接触させることで破損検知を行うが、接触させるためのツールパスが必要となり、加工時間が増える問題がある。(2)は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

ないか作業者が定期的にチェックする作業が必要となり、自動化への足かせとなっている。この問題に対する有効な手法としてインプロセス計測<sup>2)</sup>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。とくに加工中の主軸モータの電流を計測することで切削抵抗を推定する事例<sup>3)</sup>もあり、電流計測により切削抵抗の有無を推定することで工具破損検知は実現できると考える。

そこで本研究では、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、破損し易い小径タップを用いたタップ加工を対象に、加工機モータの電流変化で破損を検知する技術(工具破損検知システム)を開発する。これにより、工具が破損するまで加工を続けることが可能となり、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. 工具破損検知システム

#### 2.1 システム概要

開発する工具破損検知システムは、加工機のスピンドルモータの電流を計測・蓄積し、工具破損を検知できる機能をもつ。

図1に加工機と工具破損検知システムとの関係を示す。回転工具主軸モータの3相配線の1つに電流センサ(クランプセンサ)を取付け、計測データを破損検知システムに出力する。加工機はタップ加工を行う前に、工具破損検知システムへ加工開始フラグを送り、これからタップ加工が始まることを知らせる。タップ加工が終了した際にも加工終了フラグを送る。もし工具破損検知システムが破損を検知した場合は、加工機に対して加工停止指示を送り、自動加工を停止させる。これにより、加工不良品の生成を最小限にとどめることができる。

#### 2.2 計測データのデジタル化

図1の破線枠内に、工具破損検知システムの詳細を示す。システムを構成するハード部はマイコンを含む計測

\* 情報技術部

† 株式会社イマオコーポレーション

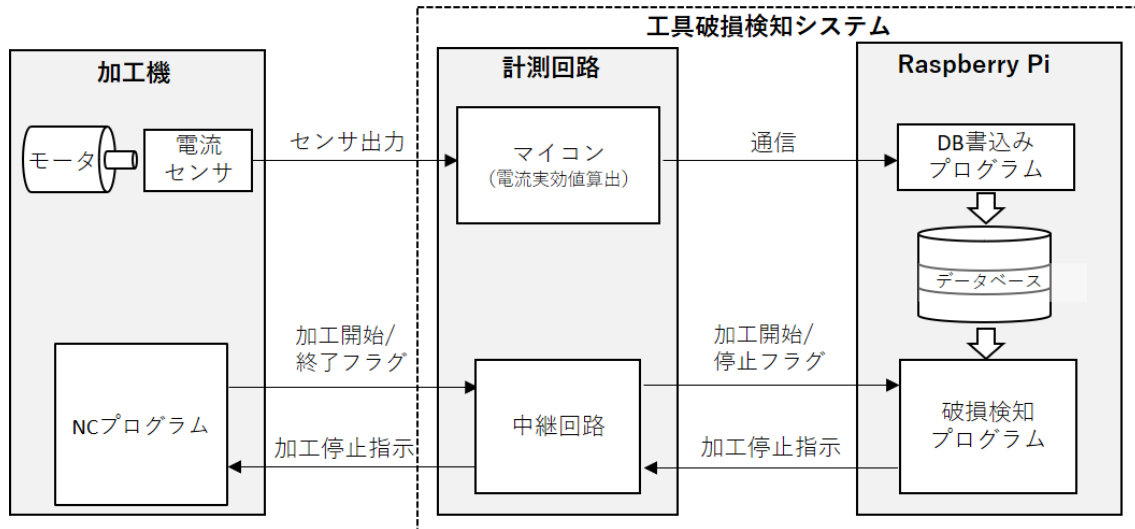


図1 工具破損検知システム

回路とシングルボードコンピュータの Raspberry Pi で構成されている。計測回路では主に電流実効値の計算を行い、Raspberry Pi ではデータの蓄積と破損検知のためのプログラムが動作する。

計測回路では電流センサの出力が、電子回路を経由してマイコンのアナログ入力端子に接続されている。マイコンではアナログ入力端子から定期的にデータを読み取り、電流の実効値を 0.1 秒毎に算出する。なお電流センサから得られる電流  $I$  は、モータ 3 相配線のうちの 1 配線の計測電流（線電流）の実効値を指し、以下の計算式で算出する。

$$I = \sqrt{\Sigma(i - \bar{i})^2 / N} \quad (1)$$

式 (1) の  $N$  は 0.1 秒間のデータ数、 $i$  は計測電流、 $\bar{i}$  は電流平均値である。

電流  $I$  の計算結果は、通信により Raspberry Pi に送られる。Raspberry Pi はデータを受信したら、タイムスタンプをつけて、逐次データベースに蓄積している。これにより、計測データのデジタル化を実施している。加工中の計測データを可視化ソフトウェアで表示させることもできる。

### 2. 3 破損検知プログラム

加工機は NC プログラムの記載コードにもとづき、タップ加工の開始、終了に合わせてフラグをシステムに送る。終了フラグが届くと破損検知プログラムが実行され、データベースに対してタップ加工時間帯のデータを要求する。データベースは指定された時間帯の電流データを破損検知プログラムに渡し、次章の破損検知の処理を行う。

## 3. 工具破損の検知方法

### 3. 1 切削抵抗とモータ電流の関係

切削加工において、工具が材料を削る際に切削抵抗  $F$

が働く。切削抵抗は加工条件、材料の硬さなどによって決まる。

工具が回転して切削するケースにおいては、工具は加工機の主軸モータに機械的に接続されており、モータで発生するトルクが切削工具に伝わり、材料を切削することができる。モータの回転方向に発生するトルク  $T$  と回転方向の切削抵抗  $F$  の関係は、以下の式で記述できる。

$$T = T_0 + rF = T_0 + \Delta T \quad (2)$$

$T_0$  は工具がある回転数で回転しているときの未切削時の無負荷トルク、 $\Delta T$  は切削しているときの切削抵抗に対抗するトルク増加分、 $r$  は工具の半径である。

モータに電流  $I$  が流れることでトルク  $T$  は発生する。NC 加工機の主軸モータは、NC プログラムで設定された回転数で回転するために、サーボ系モータコントローラの制御に基づいて動作する。工具が材料から切削抵抗  $F$  を受けると、モータ負荷が増加する。負荷が増加するとモータ回転数が低下するが、モータコントローラはモータに電流  $\Delta I$  を流しトルクを  $\Delta T$  増加させることで目標の回転数を維持している。

トルク増加分  $\Delta T$  と電流増加分  $\Delta I$  の関係を比例とみなした場合、式 (2) より電流増加分  $\Delta I$  は切削抵抗  $F$  に比例することになる。つまり、電流センサを用いて、モータ無負荷時の電流からの増加分を計測することで、切削抵抗に対応する電流を知ることができる。

図 2 に、タップ 1 穴加工時の電流実効値の時系列グラフを示す。タップ加工の前半はタップが回転しながら下穴の底に向かって前進し、ねじ山を転造で成形していく。所定の送り分進むとタップの回転を切り替え、下穴からタップを抜くため後退する。前進時はタップが下穴に近づき、接触してねじ山を形成することから、モータ負荷としては、無負荷から負荷有に変化する。後退時はねじ山を成形しないため、無負荷である。なお図中の鋭

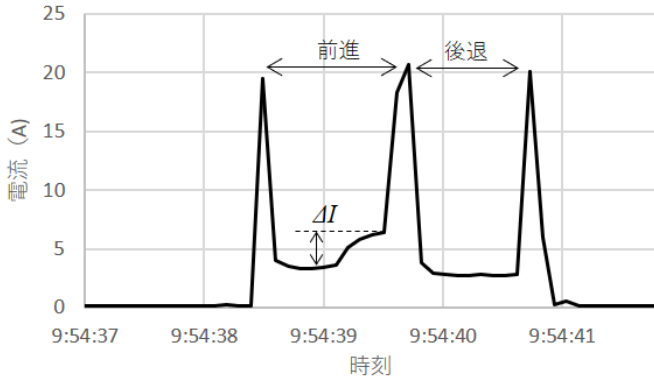


図2 タップ1穴加工時の電流

い3つの山は、工具の回転開始時や停止時の回転の急激な変化時に生じる電流である。図中に示すタップ前進時の電流増加分 $\Delta I$ が、ねじ山成形時の切削抵抗に相当する。

### 3.2 破損検知の処理手順

対象としている加工は転造タップで、複合加工機を使用して1個のワークにM3のねじ穴を3穴連続して加工する。タップは各穴に移動する際は回転を止め、基準位置に到達してから回転を始める。このときの電流時系列グラフを図3に示す。グラフの破線は、計測データから算出したモータ電流である。回転の急激な変化時は、図のように10Aを超える電流が瞬間的に流れる。破損検知プログラムではこの電流の影響を受けないようにするために、算出した電流値に対してメディアン処理を施している(実線)。

この加工の中で、モータが無負荷で回転しているときの電流と、切削抵抗を受けつつ回転しているときの最大電流との差 $\Delta I$ を求める。もし $\Delta I$ が小さいときは、タップが破損しタップ加工ができていない可能性があることから、 $\Delta I$ の大きさで破損検知を判断する。判断の処理手順を図4及び以下に示す。

(ステップ1)

閾値  $Th1$  を設け、メディアン処理後の値と大小比較を行う。閾値  $Th1$  より大きい値が連続して続く時間帯のデータでグループ分けをする(図4の太線が該当)。このグループはタップ加工時の各穴に対応することになる。

(ステップ2)

各グループの中で最大値と最小値を求め、その差分  $Err$  を求める。

(ステップ3)

閾値  $Th2$  を設け、 $Err$  と比較を行う。 $Err$  が  $Th2$  より小さい場合は、切削抵抗が作用してないとみなし、破損と判定する。

なお、ステップ2で求める最小値は、本来はタップ前進時の最小値であるべきだが、ここでは破損検知処理を簡便にするため、グループ内の最小値としている。

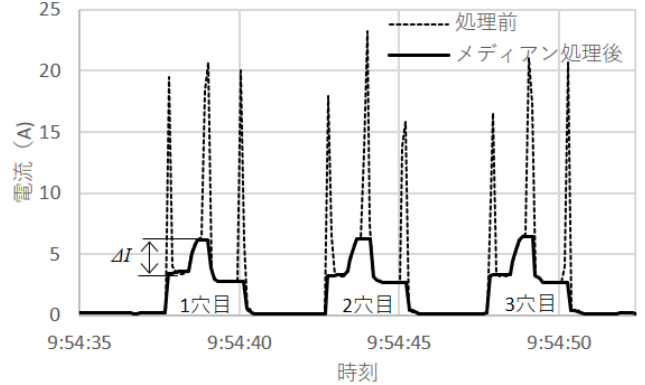


図3 3穴のタップ加工時の電流 (メディアン処理後)

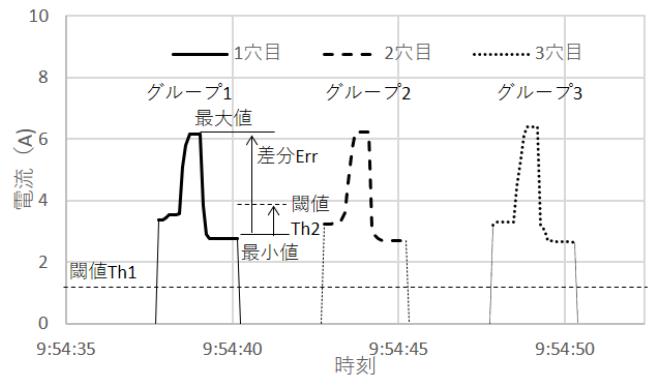


図4 破損検知の処理手順

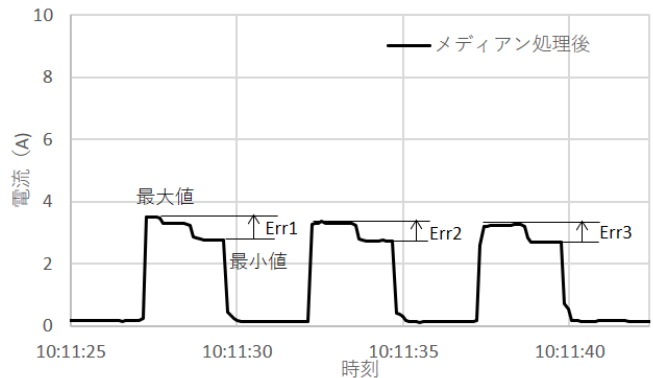


図5 ツールを外して実施したタップ加工時の電流

### 3.3 検証

実際の加工業務でシステムを運用し、その検証を行った。検証ではツールを外した状態でタップ加工を行うことで切削抵抗が働かない状況を作り出し、そのときに破損を検知できるか検証を行った。

このときの電流の時系列グラフを図5に示す。なお、ここでは経験的に  $Th1=1.0A$ 、 $Th2=1.0A$  とした。差分  $Err$  は  $1A$  以下であり、正常な加工(図4)の  $Err$  と比べて小さいことがわかる。また、実際にプログラムを動作させたところ、破損検知できることを確認した。

#### 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、破損し易い小径タップを用いた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破損を検知する工具破損検知システムを開発した。通常の業務にシステムを導入し、システムが機能するかツールを外してタップ加工を行ったところ、破損が検知できることを確認した。これにより、工具が破損するまで加工を続けることが可能となる。また、破損を検知した場合には加工機を停止させることができるため、破損時の不良品混入リスクが減少し、従来、作業者が行っていた加工品などのチェック作業の省略化も期待できる。

今後は実際の加工業務を通じて、開発したシステムの異なるタップ径加工への導入や、タップの欠けや摩耗などによる異常の検知をできるよう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> (2023.3.15 参照)
- 2) 吉岡勇人, 精密工学会誌 Vol.80, No.7, pp.646-649, 2014
- 3) 茨木ら, 精密工学会誌 Vol.70, No.8, pp.1091-1095, 2004