

穴あけ加工のドリル破損予兆の検出 (第2報)

横山哲也*、田畑克彦*、小川公輔†

Predictive detection of drill breakage in drilling (II)

YOKOYAMA Tetsuya*, TABATA Katsuhiko* and OGAWA Kousuke†

穴あけ加工では、設定した加工数や加工時間に達したときにドリルを交換することで、ドリルや加工物の破損を未然に防いでいる。この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリルの破損を予知できる仕組みが構築できれば、ドリルを有効に使い切ることが可能となり、コストの削減につながる。そこで昨年度は、穴あけ加工時の加工機の電流データから特徴量を算出し、外れ値検知手法を用いてドリルの破損予兆が検出できる仕組みを構築した。本年度は計測データに含まれるノイズの対策を施したうえで、加工業務にシステムを導入し、問題点の抽出を図った。

1. はじめに

加工中にドリル破損が生じるとドリルの一部が被削材に食い込み、加工物が不良品となるため、ドリル破損を未然に防ぐ必要がある。その対策として、設定した加工時間や加工数に達したときにドリルを交換している。しかし、この設定値は安全率を反映した値となっており、現実にはまだ使用できるドリルを交換することになる。そのため、ドリル破損の予兆を検出できれば、ドリルが破損する直前まで使い切ることが可能となり、コストが削減できる。

ドリル破損を予知するには、異常を示す変化を見つける必要がある。IoT 技術を用いて加工機の計測データを継続的に収集することで、定常時のデータを得ることができる。定常時のデータから外れたデータが測定された場合は、何らかの状態変化が生じたと考えられる。異常データの取得が困難な加工では、定常時に得られたデータを正常データとみなし、正常データの分布から外れたデータを検知することで、ドリル破損の予兆検出ができると考える。

昨年度は穴あけ加工時の加工機のモータ電流を計測し、計測データから算出した特徴量の統計データをもとに外れ値を検知することで、ドリルの破損予兆を検出できる仕組みを検討した¹⁾。ただし、計測データに含まれる高調波ノイズの影響が大きく、破損予兆を誤検出する可能性があった。そこで本年度は計測部にノイズを低減する回路を追加したうえで加工業務にシステムを導入し、問題点の抽出を行った。

2. 計測データからの特徴量算出

本研究ではドリル破損の数穴前に破損予兆を検出することを想定している。そこで1穴の加工毎に、計測デー

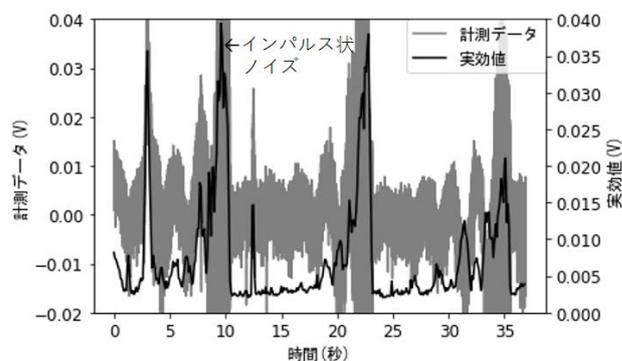
タからドリル破損を示唆する特徴量を計算する。

2.1 対象加工

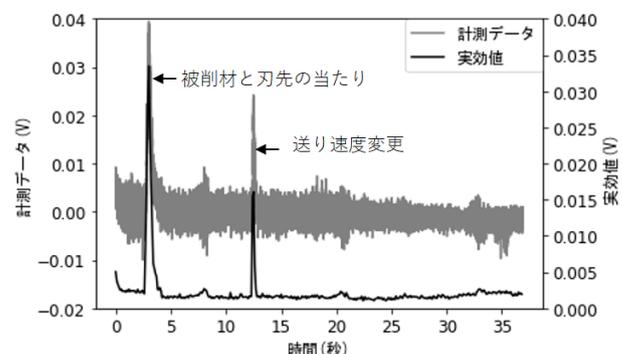
対象とする加工は穴あけのノンステップ加工で、多数の穴の連続加工である。被削材は超硬で、ダイヤモンドコーティング処理を施した小径の超硬ドリルで穴あけを行う。加工時の主軸回転数は一定で、刃先が被削材に食いつく前と後で、送り速度を変更している。

2.2 データ計測

ドリル破損は切削抵抗の増加により発生する。切削抵抗は加工機モータのトルクに比例し、その大きさはモー



(a) Z軸モータ電流 (LPF処理前)



(b) Z軸モータ電流 (LPF処理後)

図1 計測データと実効値(加工1穴分)

* 情報技術部

† イビデンエンジニアリング株式会社

タに流れる電流によって変化することから、本研究ではモータ電流を計測している。なお、本稿では穴あけ加工の切削条件より、破損予兆の検出見込みが高いと推測されるZ軸モータ電流に関して記述する。

昨年度報告では、Z軸モータのサーボアンプ出力には、高調波に起因すると考えられるノイズが認められた。本年度はノイズ対策としてローパスフィルタ(LPF)を追加したうえで、クランプ型電流センサを用いて電流計測を行った。クランプ型電流センサは、Z軸モータとサーボアンプ間のケーブルをクランプするように取り付けた。

図1にLPF処理前と処理後の、Z軸モータ電流の計測データと、計測データから算出した実効値の時系列グラフ(1穴分)を示す。グラフ縦軸は電流センサの出力電圧であり、その大きさは電流の大きさに比例する。グラフ横軸は加工開始からの経過時間である。図よりLPFの追加により、10数秒間隔の周期的なインパルス状ノイズが低減していることが分かる。なお、2~3秒と12~13秒に出現するインパルス状波形は、ドリル刃先が被削材に当たった際の、送り速度の変化に伴う負荷変化を示す波形である。

2.3 特徴量の算出

特徴量算出にあたり、解析コストを考慮して、計測データから算出した実効値をもとに1穴ごとの特徴量を計算する。

本研究では、対象とする穴あけ加工で使用ドリルが小径であることから、ドリル刃先が摩耗し、被削材に食いつきできない状態で送りが進み、送りの力が増加することで発生する座屈の破損について注目する。被削材と刃先の当たりから送り速度が変更するまでの間に特徴量算出時間帯を設け(図2)、その時間帯で特徴量を算出する。ただし、Z軸モータに若干のノイズが混入するため、時間窓Wで実効値を切り取り、特徴量を算出する。具体的には、図2に示す特徴量算出時間帯において時間窓Wをずらしながら実効値の平均を計算する。計算から求めた複数の実効値の平均値の中から最小値を選択することで、ノイズの影響が小さい特徴量を求められる。

図3にドリル破損時の実効値から算出した特徴量の推移を示す。横軸は破損までの加工穴数を示し、0が破損穴になる。図より破損2穴前に特徴量が増加しているこ

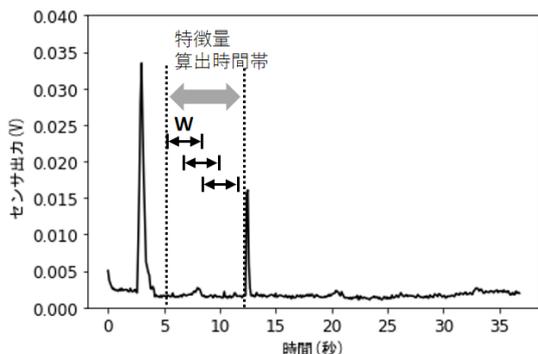


図2 Z軸モータ電流の特徴量算出

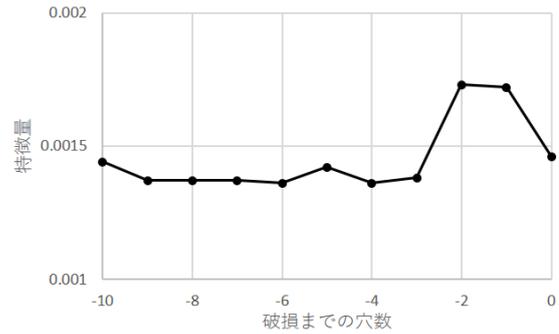


図3 特徴量の推移

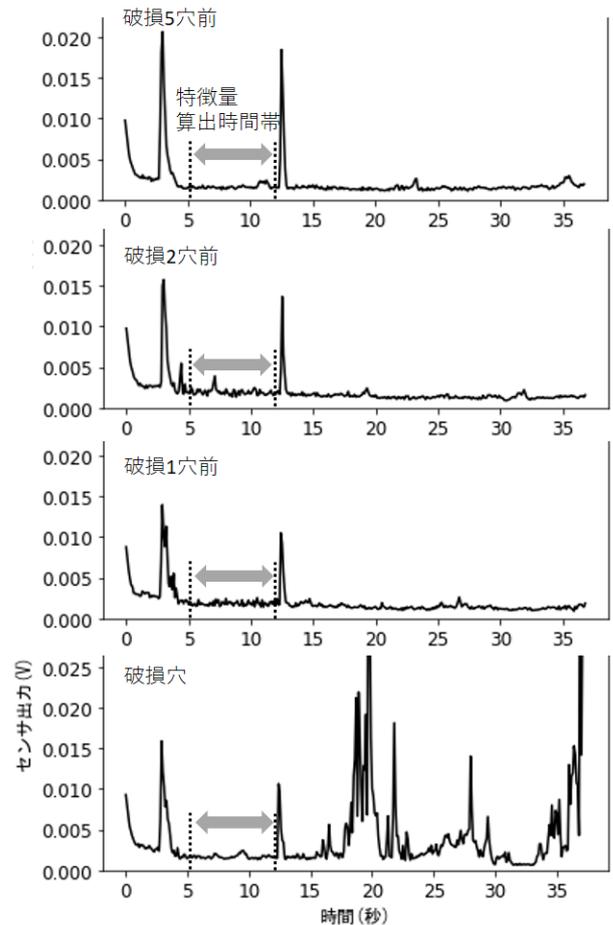


図4 実効値の時系列データ

とがわかる。この変化を破損予兆として検出することでドリル破損を未然に防ぐこととする。参考までに、このときの実効値の時系列データを図4に示す。破損5穴前のグラフでは5秒から12秒の特徴量算出時間帯で実効値は安定しているが、破損1、2穴前のグラフでは特徴量算出時間帯で実効値がばたついており、これが図3の特徴量変化と関連していると考えられる。

3. システムの試行運用

本研究では特徴量の統計データをもとに外れ値検知を行うことで、ドリル破損の予兆を検出するシステムを構

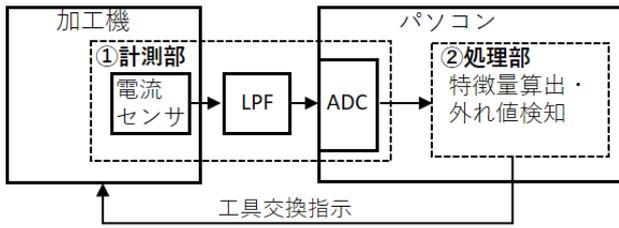


図5 システム構成

築した。加工業務にシステムを導入し破損予兆の検出を試みたところ、破損の可能性が低いケースで破損予兆を検出した事例があった。以下ではその内容について考察する。

3.1 システムの構成

図5にシステムの構成図を示す。システムは大きく分けて、①計測部と②特微量算出と外れ値検知の処理部の2つにわかれている。計測部では穴あけ加工時の電流データを電流センサで計測し、ADコンバータ(ADC)を介して、パソコンにデータを送る。処理部では、計測で得られたデータから特微量を算出し、特微量の統計データと閾値判定に基づく外れ値検知を行う。NGと判定した場合は、加工機に対してドリルの交換指示を出す。

処理部の外れ値検知では、式(1)に示す異常度²⁾を計算し、異常度と予め設定した閾値を用いて閾値判定を行

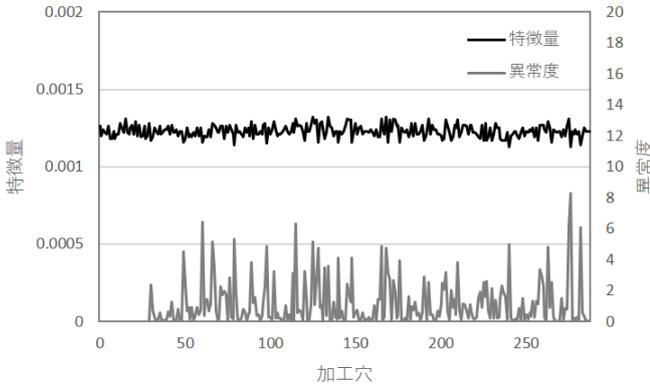
うことで破損予兆を検出している。

$$a^{(i)} = \left(\frac{x^{(i)} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right)^2 \quad (1)$$

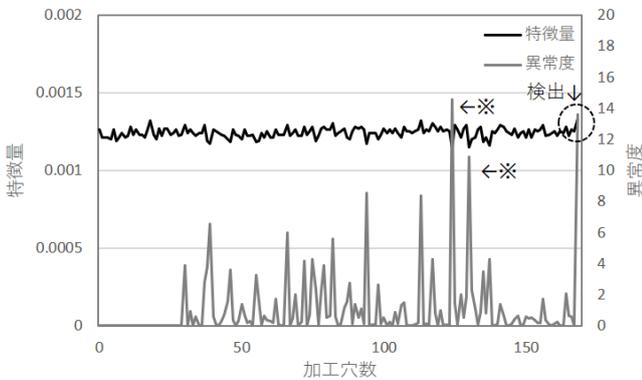
ここで式(1)の $x^{(i)}$ は*i*番目の穴を加工しているときの特微量を示し、 $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}^2$ は直前に加工した穴の特微量*N*個を用いて計算した標本平均、標本分散を示す。ただし、特微量 $x^{(i)}$ が標本平均 $\hat{\mu}$ より下回ったときの異常度 $a^{(i)}$ は、特微量が小さいことから加工負荷が小さく破損の予兆とは考えづらい。そのため、特微量 $x^{(i)}$ が標本平均 $\hat{\mu}$ を上回り、かつ異常度 $a^{(i)}$ が閾値を超えた場合のみを破損予兆として検出する。

3.2 特微量分布の影響

加工業務にシステムを導入し、得られたデータをもとに特微量を算出したところ、特微量の分布によっては破損予兆を誤検出する可能性があることが示唆された。図6(a)は破損予兆がなく正常に動作していたときの特微量と異常度の推移を、図6(b)に加工穴数が少なく破損の可能性が小さいにもかかわらず破損予兆を検出したときの特微量と異常度の推移を示す。図6(b)の破線部(169穴)において、システムは破損予兆を検出した。なお、※部は特微量が標本平均を下回っており、3.1節の条件により破損予兆と判定しない。なお、このときの



(a) 破損予兆なし



(b) 破損予兆あり (直前30穴で異常度計算)

図6 特微量と異常度の推移

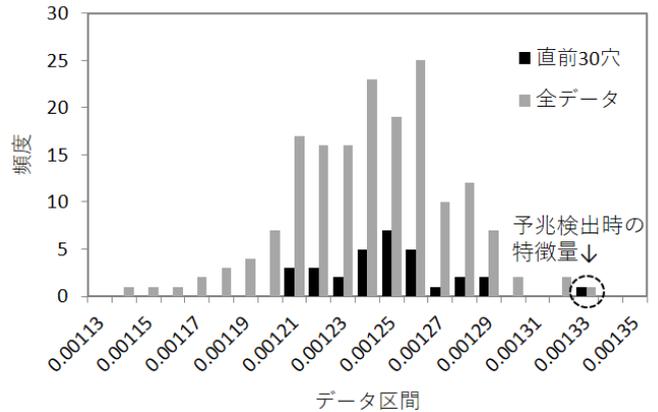


図7 破損予兆検出時の特微量分布

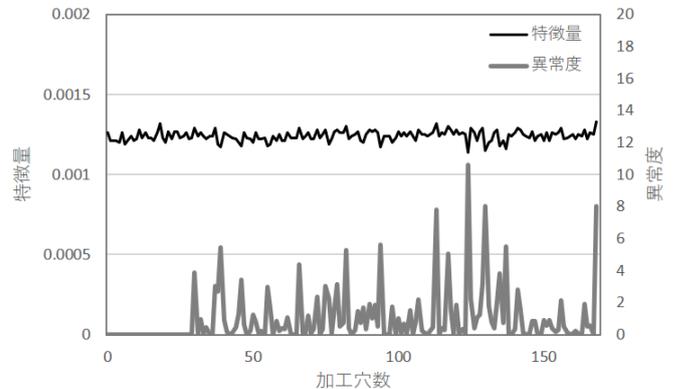


図8 異常度計算結果 (加工直全データで計算)

加工では、式(1)で使用する標本平均、標本分散の標本母数を $N=30$ とし、直前 30 穴の標本平均、標本分散を用いて異常度を計算した。(a) (b) どちらもドリルは破損してないが、異常度の大きさが異なり、(b) で破損予兆を検出した。

図7に、図6 (b)の破損予兆を検出した加工時の特徴量分布を示す。図7には破損予兆検出時(図6 (b)の破線部 169 穴)の直前 30 穴と加工全データ(169 穴分)の2つの特徴量分布を記載する。図より直前 30 穴の分布は、全データの分布に比べて正規分布特有の釣鐘形状とは言い難く、非正規分布となっている。式(1)の異常度計算は、特徴量の分布が正規分布であることを仮定しているため、図7に示す直前 30 穴の非正規分布の特徴量を用いた異常度計算は適切でない。

図8に加工直前の全データを用いて異常度計算した結果を示す。図より、直前 30 穴で計算した図6 (b)の異常度と比べて、全データで計算した異常度が小さくなっていることがわかる。図7に示すように特徴量全データの分布は正規分布に近似しているため、このときの異常度計算は適切であると考えられる。これより、図6 (b)の 169 穴の破損予兆検出は誤検出の可能性が高いと判断される。

特徴量の時間的変化を考慮するため、異常度計算時の統計データの標本母数を直前の加工穴数 N としていたが、 N が適切でないと特徴量分布の形によっては異常度が大きくなることがわかった。このため、 N を適切に設定する必要がある。

4. まとめ

本研究では、穴あけ加工時の Z 軸モータの電流から特徴量を求め、外れ値検知手法を用いてドリル破損を予兆する破損予兆検出システムを構築し、加工業務に導入した。昨年度の課題であった計測データに含まれる高調波に起因するノイズに関しては、計測部に LPF を追加することで低減することを確認した。

実際の加工業務でシステムを試行運用したところ、特徴量の分布によっては異常度が大きくなり、破損予兆として誤検出したと考えられるケースがあった。ただし、適切な特徴量の統計データを選ぶことで異常度の大きさは小さくなることから、適切な統計データの選定が今後の課題として挙げられる。

【参考文献】

- 1) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp.91-94, 2020
- 2) 井手剛, 入門機械学習による異常検知, コロナ社, 2015