切削工具の異常検知および寿命予測システムの開発

Development of a System for Cutting Tool Abnormality Detection and Life Prediction

石樽祐貴　Y. ISHIGURE　笹井大和　Y. SASAI

In cutting processes, the deterioration of tool edges such as drills and cutters can lead to a decline in machining quality or even tool breakage during operation. To avoid such issues, tool life management values are set based on usage time and frequency, and tools are regularly replaced. However, due to factors such as individual differences in tools and workpieces, the rate of tool edge deterioration varies, sometimes causing tool failures before reaching the management values, leading to machining issues. Our company has developed a Tool Life Prediction System that detects tool anomalies and predicts tool life based on the servo motor torque values of the spindle and feed axes. This system learns the trends of increasing machining load from new tools to their end of life, predicting each tool's remaining life and detecting anomalies during use. Additionally, by feeding back the prediction results to the equipment's tool management function and automatically adjusting the life management values according to the tool condition, the system helps avoid machining issues due to tool anomalies and contributes to stable machining quality.

Key Words: cutting process, tool management, tool life prediction, abnormality detection

1．はじめに

ドリルやカッターなどの切削工具は，加工するたびに刃先の摩耗が進行し，欠けや折損などの工具異常が発生する場合がある．刃先が劣化した工具で加工すると寸法精度や加工面の表面粗さが悪化するため，適切なタイミングで工具の交換が必要である．そのため，マシニングセンターには，各工具の使用時間や使用回数に基づいて工具寿命を管理する機能が備えられている．しかし，工具や加工ワークの個体差などにより，工具刃先の劣化速度にばらつきが生じるため，定量管理値に到達する前に工具異常が発生し，加工不良に至る場合がある．

この課題を解決するため，当社では加工中に収集したデータから切削工具の刃先状態を予測し，工具管理にフィードバックするシステムを開発した．本報では工具異常による加工不良を回避し，安定した加工品質に貢献する切削工具の異常検知および寿命予測システムについて紹介する．

2．異常検知および寿命予測技術

2.1　マシニングセンターの工具寿命管理[1), 2), 3)]

一般的に工具寿命は工具の使用回数や使用時間で管理されており（**図1**），これらを可能な限り長く設定することで工具のランニングコストを抑制している．しかしながら，工具異常による加工不良や設備停止リスクを回避するため，多くの場合はマージンを考慮した工具寿命が設定されている．

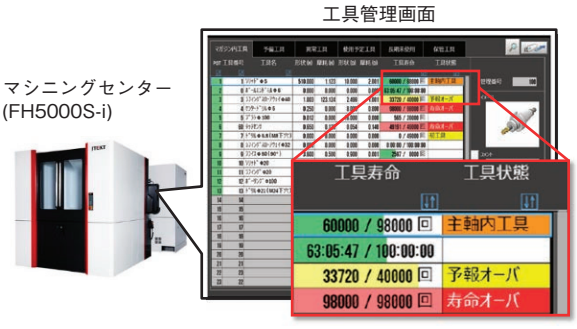

図1　マシニングセンターの工具寿命管理
Machining center tool life management

工具異常を検知する手段として，マシン内で工具長を自動測定する機能や，加工負荷を監視する機能がオプションとして用意されている．しかし，これらの機能では工具刃先の摩耗や微小欠けの検知は困難である．

また，振動センサーや機内カメラなどを用いた工具刃先の異常検知機能も存在するが，機器の追加コストや調整作業の負担が大きく，標準的な寿命管理機能として確立していない．

そこで当社では，センサーを追加することなく工具刃先の変化を検知し，工具の寿命管理にフィードバックするシステムを開発した．

2.2　異常検知・寿命予測技術の概要[4)]

開発した異常検知·寿命予測技術の概要を**図2**に示す．本技術は①データ収集，②前処理，③解析の三つのプロセスから構成される．

①データ収集プロセス

マシニングセンターのCNCから，主軸および送りモーターのトルク，回転速度，現在位置（エンコーダーによる検知）にくわえ，各加工時のプログラム番号，加工条件，工具使用カウント値などのデータを収集する．本技術は特別なセンサーの追加を必要としないため，初期費用を抑制できる．

②前処理プロセス

切削区間における主軸および送りモーターのトルクに対して，平均値・最大値・標準偏差などの統計量を算出し，プログラム番号，加工条件，工具使用カウント値と関連付ける．

③解析プロセス

解析プロセスは③－1学習フェーズと③－2予測フェーズの二段階で構成される．学習フェーズでは，工具ごとに収集データを用いて劣化予測モデルを更新する．予測フェーズでは，学習済みの予測モデルに使用中の工具のデータを入力し，工具の異常検知および寿命予測を実施する．

③－1学習フェーズ

前処理で算出した統計量を加工プログラム番号や加工条件などに基づいて層別する．各層別条件に対して，工具使用カウント値との相関が高い統計量を選定し，主成分分析を実施する．得られた第1主成分を「工具劣化指標」と定義し，使用した統計量とその係数を記録した条件別モデルを更新する．さらに，過去の寿命到達工具における工具劣化指標の時系列データを用いて，工具劣化指標の推移を予測する時系列予測モデルを更新し，正常傾向を表す信頼区間と，しきい値を算出する．

③－2予測フェーズ

使用中工具のデータに対して，学習した条件別モデルを適用し，工具劣化指標を算出する．算出された指標が正常傾向から逸脱した場合には，工具異常の兆候として検知される．また，時系列予測モデルにより，しきい値に到達するまでの予測寿命（回数・時間）を算出する．

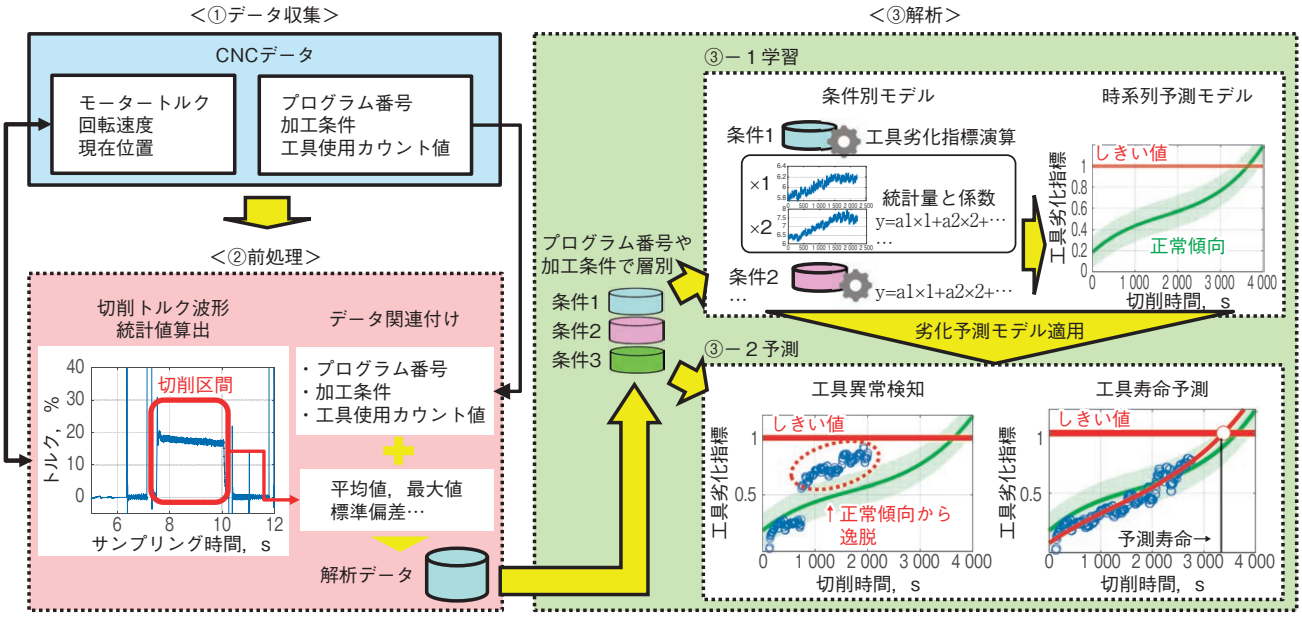

図2　異常検知・寿命予測技術の概要

Overview of technology developed for abnormality detection and tool life prediction

2.3　工具劣化指標の有効性検証

当社の部品加工ラインで収集したデータから工具劣化指標を算出し，当該指標が工具刃先の状態を適切に反映しているか検証した．対象工程は**図3**に示すロングドリルを用いた穴あけ加工である．この工具の寿命は再研磨直後の状態から使用回数が 250 回に設定されている．

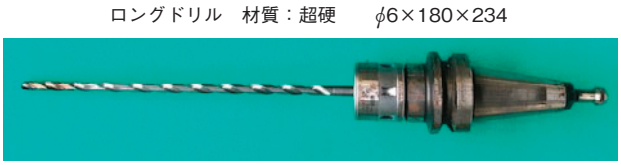

図3　対象工具
Target tool

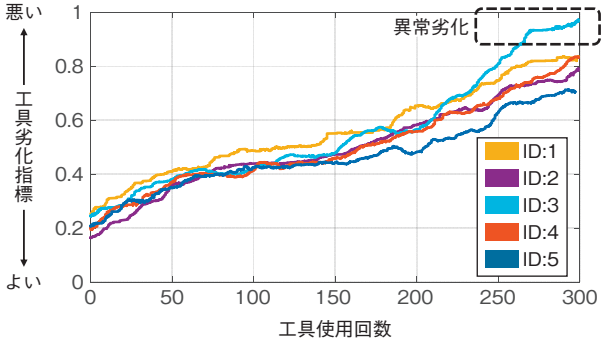

図4　工具劣化指標の傾向
Trends of tool deterioration indicators

本検証では工具寿命を従来の 250 回から 300 回へと 50 回延長し，5 本の工具について工具劣化指標を算出した（**図4**）．その結果，いずれの工具においても使用回数の増加に伴い，工具劣化指標が上昇し，特に 150 回を超えた時点から工具間のばらつきが顕著に現れた．

さらに，300 回使用後の工具劣化指標と刃先の欠け・摩耗量（先端欠け面積，逃げ面欠け幅，すくい面摩耗幅）との相関係数は 0.69 ～ 0.85 となり，中程度から強い相関が確認された（**図5**）．特に**図4**に示す点線枠内で工具劣化指標が顕著に高かった工具 ID：3 は，**図5**に示す逃げ面の欠け幅がほか工具の約 2 倍に達していた．

これらの結果から，工具劣化指標は刃先の劣化状態を表す有効な評価指標であることが確認された．

3. 工具寿命予測システム

3.1　システム概要

前述の予測技術を基に「工具寿命予測システム」を開発した（**図6**）．

本システムではエッジコンピューターが CNC からデータを収集し，工具の異常検知や寿命予測を実施する．予測結果は寿命管理機能にフィードバックされ，工具寿命（時間・回数）が自動的に補正される．この補正により，工具劣化の進行が早い場合には早期の工具交換が実施され，加工不良発生を未然に防止できる．

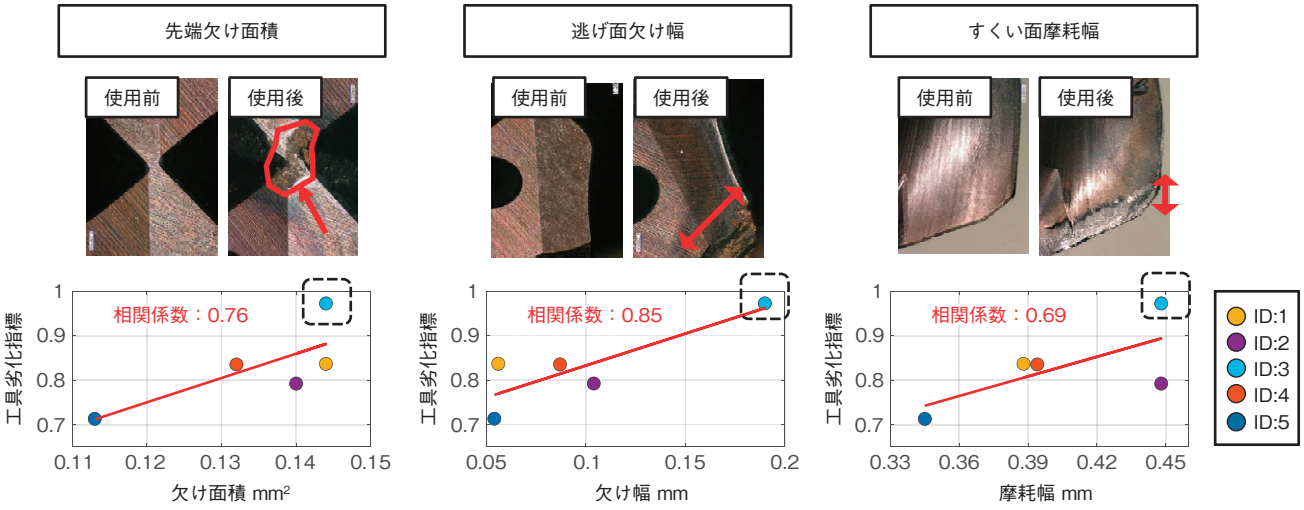

図5　工具劣化指標と刃先状態との相関
Correlation between tool deterioration indicators and edge condition

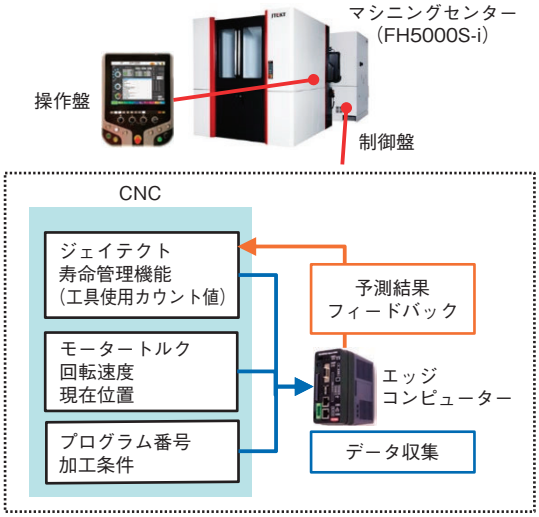

図6　工具寿命予測システムの構成
Configuration of tool life prediction system

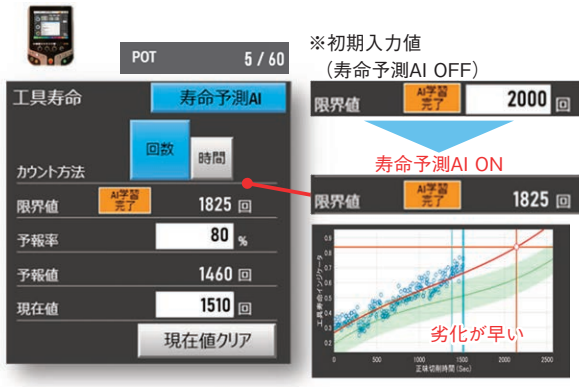

図7　工具寿命の設定画面
Tool life setting screen

3.2　工具寿命の自動補正

工具寿命の設定は操作盤で実施する(**図7**). 使用者は, 工具使用カウントの方法として「回数」または「時間」を選択し, 工具使用カウントの上限となる限界値および事前通知をする予報率を入力する. 「寿命予測 AI」ボタンを ON にすることで設定された限界値よりも実際の工具寿命が短いと予測した場合, 限界値を自動的に補正する. NC プログラムにより, よび出された工具が工具寿命に到達している場合, 工具はマガジン内の予備工具に自動で切り替えられる. 予備工具が存在しない場合は設備を停止し, 異常が生じた工具による加工不良を未然に防止する.

3.3　予測結果の詳細画面

使用者は操作盤の予測結果詳細画面から確認したい工具と日時を選択して, 異常発生時のトルク波形や解析結果を確認できる（**図8**）. 使用者が加工負荷を視覚的に確認することで適切な加工条件を設定できる. 例えば, 負荷が高く工具異常が発生しやすい工程は, 加工速度を下げて異常発生リスクを低減し, 逆に負荷が低い工程は, 加工速度を増加させてサイクルタイムを短縮するなど, 改善活動に活用されている.

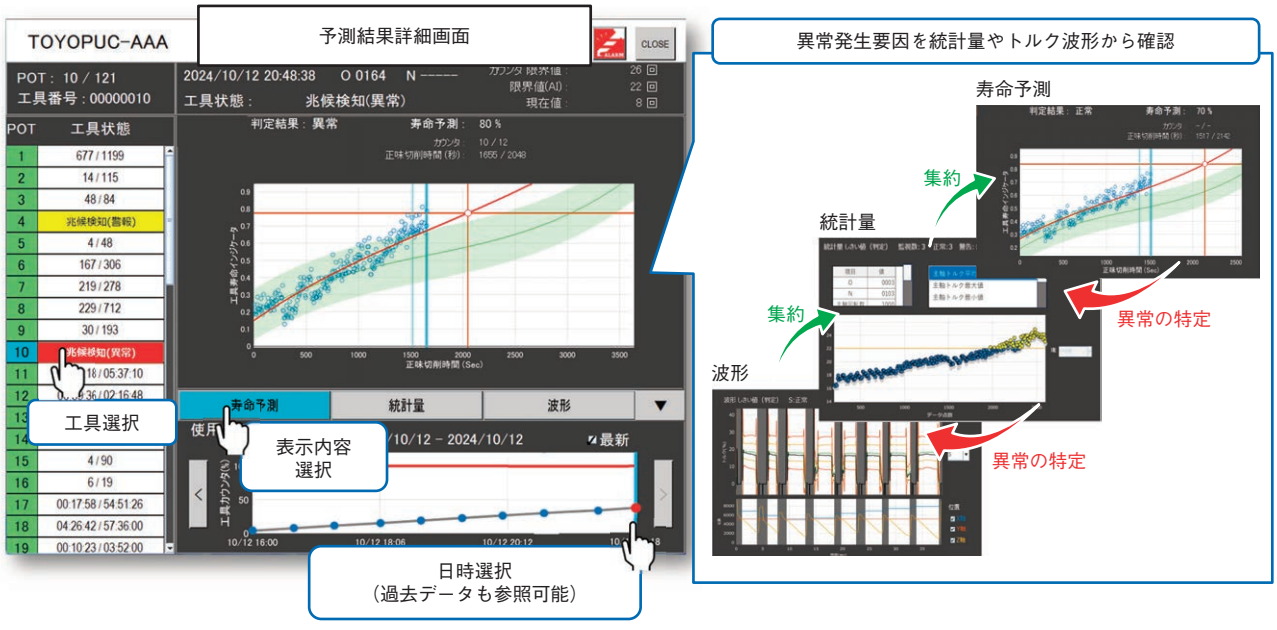

図8　工具寿命予測システムの詳細画面
Detailed screen of tool life prediction system

3.4　システム運用・効果

検証対象とした当社の製造工程では工具寿命を 250 回としていたが，月に 2 回程度の工具異常が発生していた．本システムを導入した結果，刃先の異常摩耗や欠けを検知し，異常の兆候が検知された工具は早期に交換され，加工不良の発生を未然に防止できた．さらに，今回の検証で工具寿命を 300 回に設定できることがわかったため，工具寿命を 250 回から 300 回に再設定し，イレギュラーで工具の寿命が短い場合は早期交換で対応するようにした．従来の 250 回到達後も安定した加工が継続され，工具寿命の延長（50 回）によってランニングコストを削減できた．

以下に，導入による効果金額を示す．

加工不良数の削減（2 台／月⇒ 0 台／月）：51 千円／年

工具寿命の延長（250 回⇒ 300 回）：912 千／年

4. おわりに

当社が開発した工具寿命予測システムは，追加のセンサー設置を必要とせず，工具刃先の状態を監視し，従来の工具管理における課題の解決が可能である．今後は工具管理機能にくわえ，加工データの活用による加工条件の最適化など，多様な場面で貢献できるよう，さらなる生産性向上を目指す．

参考文献

1）山蔭哲郎：工作機械におけるメカトロニクス，通巻第 90 号，Vol. 25，No. 1，豊田工機技報 (1984)．

2）株式会社ジェイテクト：横形マシニングセンタ FH5000 Series 2022，2025 CAT. NO. MA030JA-3TA.

3）R. MUNARO，A. ATTANASIO，A. DEL PRETE：Tool wear monitoring with artificial intelligence methods：A review，Journal of Manufacturing and Materials Processing，Vol. 7, No. 4 (2023) 129.

4）藪根夏樹，米津寿宏，加藤公一，石樽祐貴：工具寿命予測システム，特開 2021-71818 号 (2021)．

筆　者

石樽祐貴*
Y. ISHIGURE

笹井大和*
Y. SASAI

*　工作機械・システム事業本部　工作機械技術部