

重点共同研究（航空宇宙分野）

加速度センサを用いたインプロセス工具摩耗監視システムの開発

近藤 弘康* 小池 宏侑* 棚原 貴登*
松本 義則** 松本 アサイ** 松本 知之**

Development of in-Process Tool Wear Monitoring System by using Accelerometer
KONDO Hiroyasu, KOIKE Hiroyuki, TANAHARA Takato,
MATSUMOTO Yoshinori, MATSUMOTO Asai and MATSUMOTO Tomoyuki

本研究では、エンドミルを用いた2軸加工におけるインプロセス工具摩耗監視を実現するため、2軸加工における加速度と切削力の実験的に明らかにし、データ処理プロセスを検討することで、システムの開発を行った。その結果、加工機の構造等の影響で、被削材固定位置が変わると加速度と切削力の関係が変化することや切削条件と被削材固定位置が同じ場合、工具摩耗に伴う切削力変動を加速度で推定可能であることが明らかになった。そして、開発システムを用いて、2か所に固定した被削材に対して、製品を模擬したモデルを加工した結果、加速度の基準比と切削力に比例関係が得られ、2軸加工におけるインプロセス工具摩耗の監視を実現した。

Key words: エンドミル, 切削力, 加速度センサ, インプロセス, 工具摩耗監視

1 はじめに

ボーイング787、エアバス350等の新型航空機では、機体の軽量化等を目的としたCFRPの利用増に伴い、熱膨張率や電蝕の問題からCFRPと接する金属部材にチタン合金が多用されている。

チタン合金は熱伝導率が小さく、切削加工の際は刃先温度が高温になる等の要因のため、工具寿命が著しく短く、部品製造コストにおける工具費の割合が高くなっており、工具コスト低減が求められている。

工具コスト低減のため、工具は可能な限り長時間使用することが望ましいが、工具の個体差や突発的な損傷（欠け等）などから、同じ条件の加工においても工具寿命の正確な予測が困難なため、リスク回避の観点から十分な余裕をもって工具交換を行っている。

そのため、工具の摩耗状態を見える化し、工具交換のタイミングを把握できる手法が求められている。

切削工具においては、摩耗の進行とともに切削力も増大することが知られている¹⁾²⁾。これより、切削力の推移により摩耗状態を把握することは可能である。しかしながら、切削力を測定する動力計は非常に高価であり、また被加工物の形状に制限を受けるため、生産現場で活用することは困難である。

そこで、令和2年度の研究において、AEセンサと加

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

** 株式会社マツモトセイコー

速度センサを有するデータ取得ユニットを開発し、ユニットを加工した際の振動を各センサで測定することにより、安価なセンサでも工具の摩耗状態を把握可能であることが分かった³⁾。

しかし、生産現場への適用範囲をより広げるためには、製品加工中の摩耗状態をユニット加工無し、つまりインプロセスで把握することが望ましい。

そこで本研究では、センサ位置が加工点から離れても工具摩耗状態の推定が可能な加速度センサ⁴⁾に着目し、エンドミルを用いた2軸加工における加速度と切削力の関係を実験的に明らかにし、データ処理プロセスを検討することで、インプロセス工具摩耗監視システムの開発を行った。

2 研究の方法

2.1 1軸加工における加速度と切削力の関係

本研究では、工具が被削材に切り込む際に発生する主軸の振動（以下、加工時の振動）を加速度センサで取得・解析することで、2軸加工時の工具摩耗状態の推定を目指している。

一方、加工時の振動方向は切削方向に応じて変化するため、2軸加工の加工パスによって、1方向の加速度の取得のみでは工具摩耗状態の推定が困難な場合（振動方向が加速度センサの検知方向と直交する場合等）があると予測される。

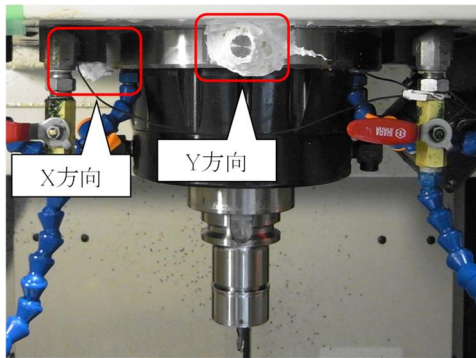


図1 加速度センサ取り付け状況

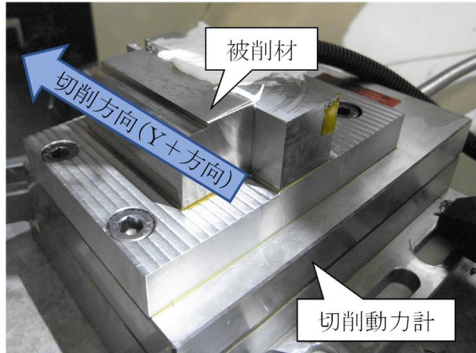


図2 1軸加工における切削動力計と被削材

表1 工具・切削条件

工具	径	6mm
	形状	スクエアエンドミル
	コーティング	AlCrSiN
	母材	超硬
	刃数	1枚刃 ※4枚刃のうち、3枚を グラインダで刃落とし
切削条件	切削速度	50, 70, 75, 100, 150, 200mm/min
	1刃送り	0.1mm/tooth
	軸方向切込み	2.0mm
	半径方向切込み	0.1, 0.2, 0.4, 0.6mm

そこで、3軸マシニングセンタ(安田工業 YBM-640V3)の主軸のX・Y方向に電荷出力型1軸加速度センサ(小野測器 NP-2120)を取り付け(図1)、切削動力計(日本キスラー 9265B)に固定した64チタン被削材(図2)に対して、エンドミルを用いたY+方向の1軸側面切削を行うことで、X・Y方向それぞれの加速度と切削力の関係を評価した。

なお、加速度は工具が被削材に接触する頻度の周波数に対し、7.5倍の周波数でローパスフィルタ処理を行い得られた波形の1切込み毎の絶対値の最大値平均を用い、切削力は各方向の1切込み毎の絶対値の最大値平均を用いた。また、工具・切削条件は表1のとおりとし、水溶性切削液を用いて切削試験を行った。

2.2 円加工における加速度と切削力の関係

切削方向が変わる際の加速度と切削力の関係を明らかにするため、3軸マシニングセンタを用いて、切削動

力計(日本キスラー 9257B)に固定した円筒形状の64チタン被削材(図3)に対し円加工を行い、加速度と切削力の関係を評価した。

工具・切削条件は表1のとおりとし、水溶性切削液を用いて切削試験を行った。

2.3 被削材固定位置変更時の加速度と切削力の関係

加工現場では、加工機テーブルの様々な場所に被削材を固定して加工を行っている。そこで、被削材固定位置を変えた際の加速度と切削力の関係を明らかにするため、2.2で用いた切削動力計に固定した円筒形状の64チタン被削材を3軸マシニングセンタのテーブル6か所に固定し(図4)、円加工を行うことで、加速度と切削力の関係を評価した。

工具条件は表1のとおりとし、切削条件は、切削速度は50, 70, 75, 100, 150, 200m/minの6条件、1刃送りは0.1mm/tooth、軸方向切込みは2.0mm、半径方向切込みは0.1mmとし、水溶性切削液を用いて切削試験を行った。



図3 円加工における切削動力計と被削材

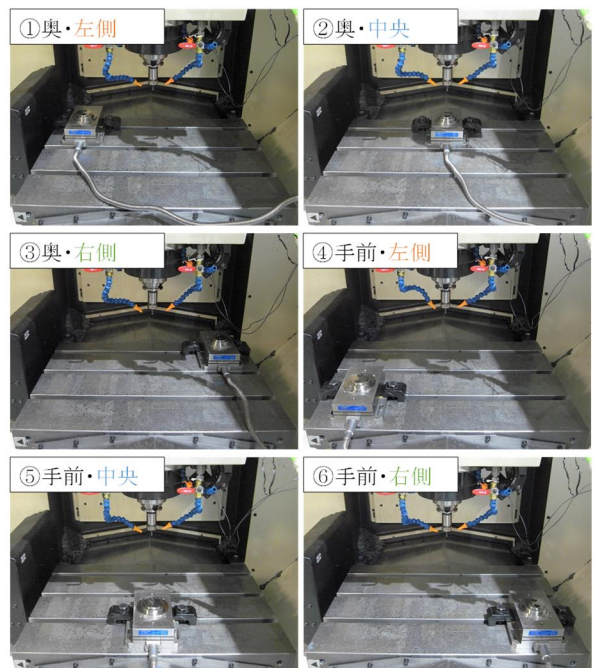


図4 被削材固定位置

2.4 円加工摩耗試験における加速度と切削力の関係

切削方向が変化する2軸加工においても、工具摩耗の進展とともに切削力が増加し、加速度も比例して増加することを確認するため、3軸マシニングセンタを用いて、2.2, 2.3で用いた切削動力計に固定した円筒形状の64チタン被削材を用いて、円加工摩耗試験を実施した。段取りを図5に示す。

工具は表1のとおりとし、切削条件は、切削速度は200m/min, 1刃送りは0.1mm/tooth, 軸方向切込みは2.0mm, 半径方向切込みは0.1mmとし、水溶性切削液を用いて切削試験を行った。

加工パスは、φ65.6mmの被削材に対して104パスの円加工を4段、合計416パスとし、所定の切削距離ごとにUSBカメラによる工具観察を行った。なお、加速度、切削力ともに、1パス毎に1切込み毎の絶対値の最大値平均を算出し、評価した。

2.5 インプロセス工具摩耗監視システムの開発

2.1~2.4の結果を踏まえ、2軸加工における工具摩耗に伴う切削力の変動を加速度で推定可能なデータ処理プロセスを検討するとともに、加速度信号のリアルタイム処理が可能な構成の検討、及びデータ処理ソフトウェアを独自開発することで、インプロセス工具摩耗監視システムの開発を行った。

2.6 実証試験

開発したシステムの実証のため、2台の3軸マシニングセンタ(安田工業 YBM-640V3, 森精機 NV5000α 1A/40)を用いて、製品を模擬したモデルを複数個切削し、加速度と切削力の関係性を評価した。

試験に用いる加工モデルを図6に示す。様々な切削方向を有する加工パスにおいても開発システムが機能するか確認するため、6山の花形形状を加工対象とした。

加工パスは図7のとおり、輪郭加工のオフセットを21回行い、側面切削の中仕上げ加工を繰り返すパスを用いた。なお、同被削材に対して、軸方向切込み1.9mm

の加工を最大4段行い、各段の加工を製品加工1回と捉え、4個の被削材に対して計14回加工を行った。

被削材は64チタンとし、バイスと治具を用いて2か所に固定し、交互に1回ずつ加工を実施した(図8・9)。

工具は表1のとおりとし、切削条件は、切削速度は100m/min, 1刃送りは0.1mm/tooth, 軸方向切込みは1.9mm, 半径方向切込みは0.4mmとし、水溶性切削液を用いて切削試験を行った。

加速度は、開発システムから得られる加工モデル1段加工時の基準比の全平均を用いた。なお、基準加速度デ

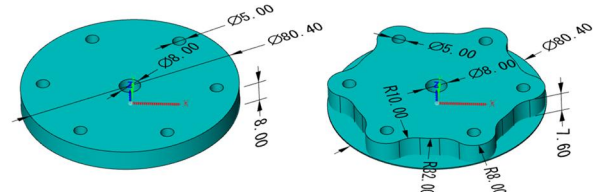


図6 実証試験に用いる加工モデル
(左:被削材, 右:加工モデル)

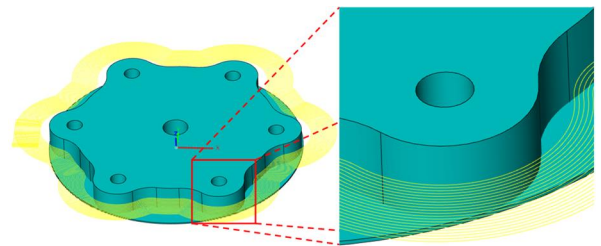


図7 加工パス(輪郭加工21回オフセット)

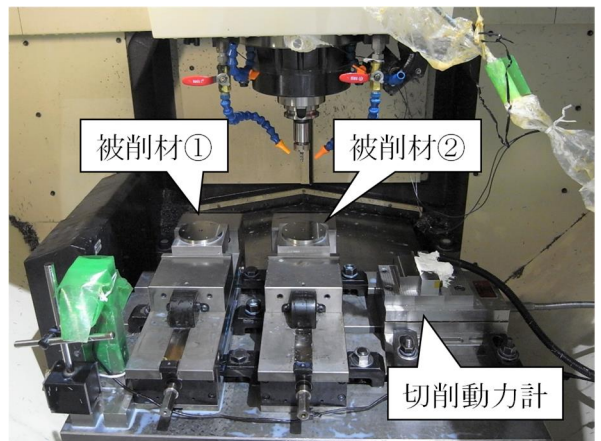


図8 実証試験段取り

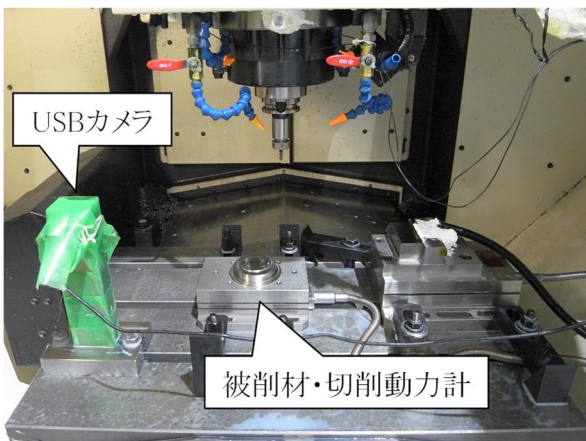


図5 円加工摩耗試験段取り

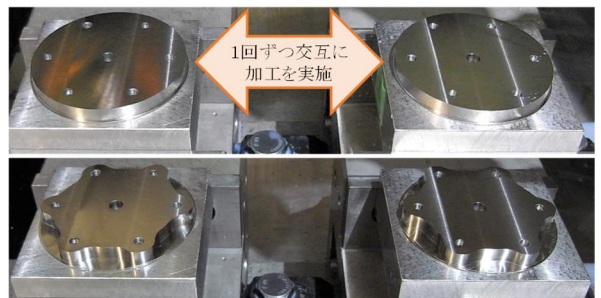


図9 被削材(上:加工前, 下:各4段加工後)

ータは、工具の個体差や試験毎の摩耗進行のばらつきの影響を抑えるため、同試験の各固定位置の2回目の加速度を用いた。

切削力は、加工モデルを1段加工した後、切削動力計（日本キスラー 9265B）に固定した64チタン被削材に対してY+方向の1軸側面切削を行い、X方向の1切込み毎の絶対値の最大値平均を用いた。

3 結果及び考察

3.1 1軸加工における加速度と切削力の関係

1軸加工におけるX方向・Y方向の加速度と切削力の関係を図10～13に示す。

切削速度毎に加速度と切削力を比較すると、X・Y方向ともに、Vc50～100では加速度と切削力に比例関係が見

られる一方、Vc150・200では切削力が大きくなるにつれて比例関係が崩れ、切削力に対して加速度は小さい値を示していることが分かる。

また、切削力に対する加速度の傾きはY方向に対してX方向は小さい。これは、3軸マシニングセンタは門型の構造であるため、Y方向に比べてX方向の主軸剛性が高いことが要因の1つと考えられる。

以上から、X・Y方向の2方向の加速度を取得・解析する場合、以下の点に留意する必要がある。

- 切削速度が変わると、加速度と切削力の関係が変化すること
- 加工機の構造等の影響で、X・Y方向それぞれの切削力に対する加速度の傾きが変化すること

3.2 円加工における加速度と切削力の関係

半径方向切込み0.1mmにおいて切削速度を変更した際の加速度と切削力の関係を図14～19に示す。なお、各図における切削方向は、加工開始点を0deg、加工終了点を360degとした。

その結果、Y方向はすべての切削速度において加速度は切削力と同様の傾向を示した。一方、X方向はVc150・200では加速度は切削力と同様の傾向を示したものの、

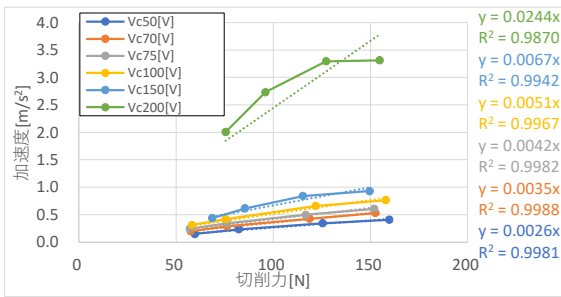


図10 X方向の加速度と切削力の関係（全体）

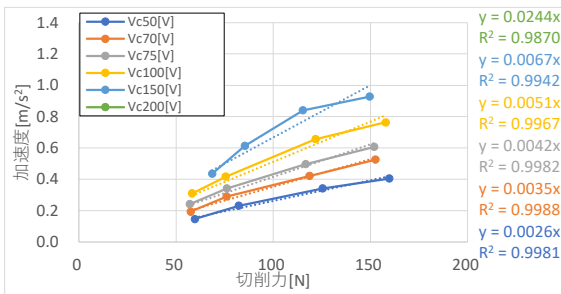


図11 X方向の加速度と切削力の関係（拡大）

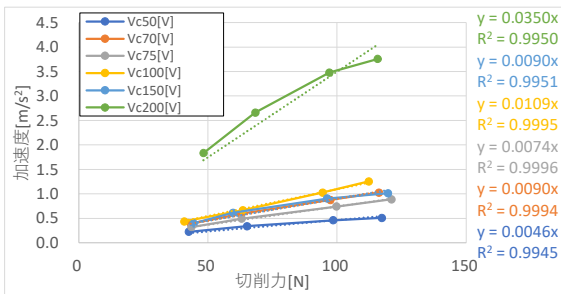


図12 Y方向の加速度と切削力の関係（全体）

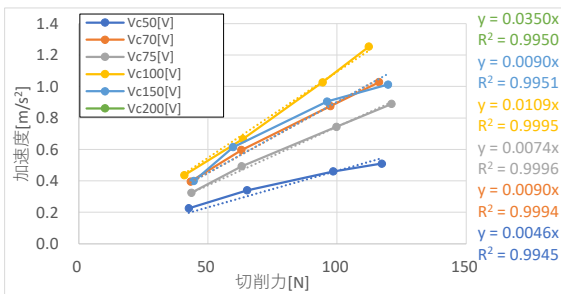


図13 Y方向の加速度と切削力の関係（拡大）

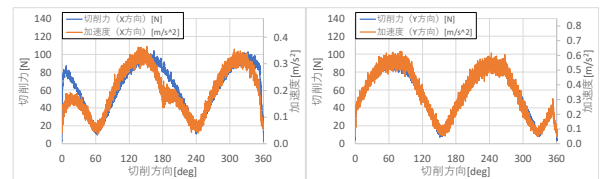


図14 円加工における加速度と切削力の関係【Vc50・ae0.1】（左：X方向，右：Y方向）

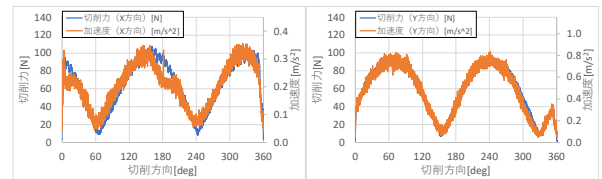


図15 円加工における加速度と切削力の関係【Vc70・ae0.1】（左：X方向，右：Y方向）

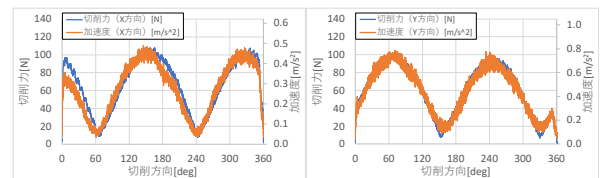


図16 円加工における加速度と切削力の関係【Vc75・ae0.1】（左：X方向，右：Y方向）

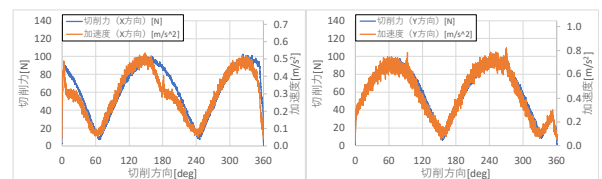


図17 円加工における加速度と切削力の関係【Vc100・ae0.1】（左：X方向，右：Y方向）

Vc50~100 では加工の中央 (180deg) 付近と両端 (0・360deg) 付近に加速度が小さい箇所が見られた。

切削速度 100m/min において半径方向切込みを変更した際の加速度と切削力の関係を図 20~23 に示す。

その結果、半径方向切込みが大きくなるにつれて、加速度・切削力ともに大きくなるが、値の傾向は大きく変わらない結果になった。

以上から、切削方向が変わる際に加速度と切削力を比較する場合、以下の点に留意する必要がある。

○切削速度が変わると、特定の切削方向において加速度と切削力の関係が変化すること

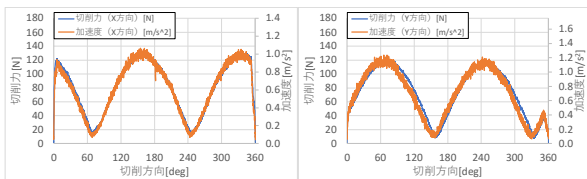


図 18 円加工における加速度と切削力の関係【Vc150・ae0.1】(左：X方向, 右：Y方向)

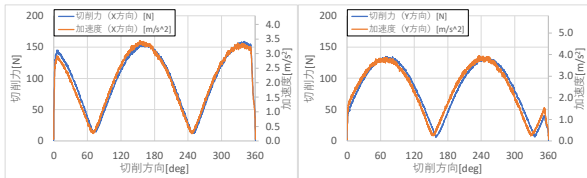


図 19 円加工における加速度と切削力の関係【Vc200・ae0.1】(左：X方向, 右：Y方向)

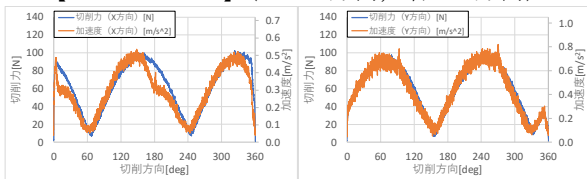


図 20 円加工における加速度と切削力の関係【Vc100・ae0.1】(左：X方向, 右：Y方向)

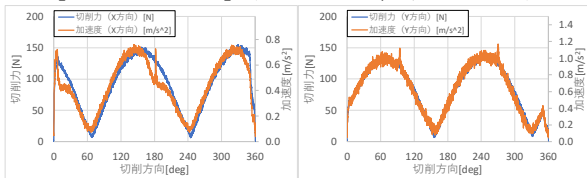


図 21 円加工における加速度と切削力の関係【Vc100・ae0.2】(左：X方向, 右：Y方向)

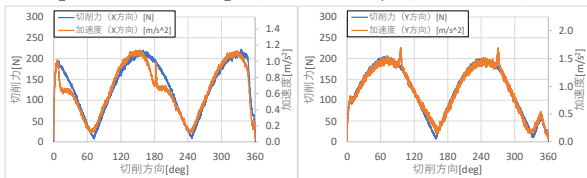


図 22 円加工における加速度と切削力の関係【Vc100・ae0.4】(左：X方向, 右：Y方向)

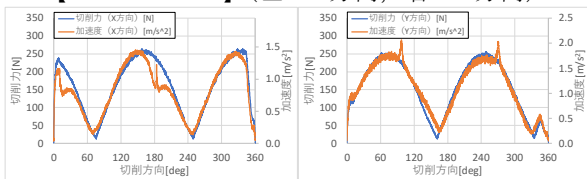


図 23 円加工における加速度と切削力の関係【Vc100・ae0.6】(左：X方向, 右：Y方向)

○同じ切削速度において、半径方向切込みを変えても加速度と切削力の関係は大きく変化しないこと

3.3 被削材固定位置変更時の加速度と切削力の関係

切削速度 100m/min において被削材固定位置を変更した際の加速度と切削力の関係を図 24~29 に示す。

左右方向の固定位置が変わると、X・Y方向ともに加速度と切削力の関係が変化することが分かる。一方、奥行方向の固定位置が変わっても、加速度と切削力の関係は同様の傾向を示した。これは、当マシニングセンタのY軸方向の駆動は、テーブル駆動のため、主軸の振動特性に与える影響が小さいものと考えられる。

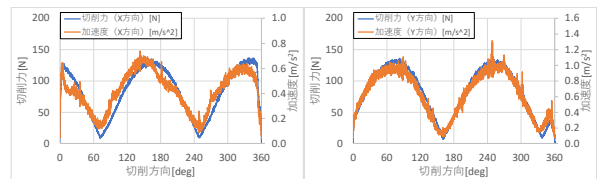


図 24 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【①奥・左側】(左：X方向, 右：Y方向)

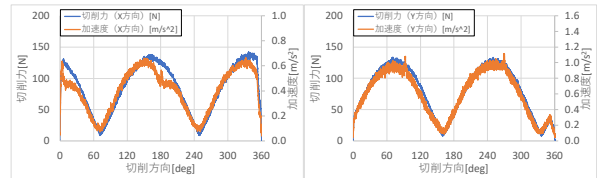


図 25 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【②奥・中央】(左：X方向, 右：Y方向)

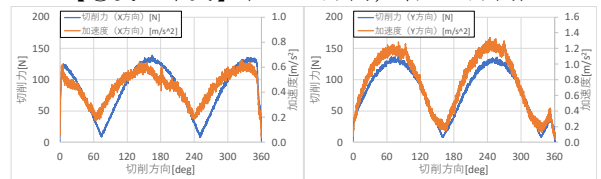


図 26 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【③奥・右側】(左：X方向, 右：Y方向)

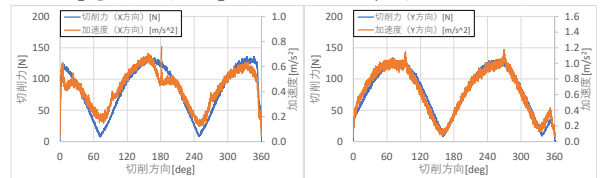


図 27 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【④手前・左側】(左：X方向, 右：Y方向)

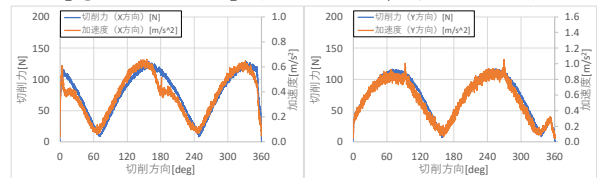


図 28 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【⑤手前・中央】(左：X方向, 右：Y方向)

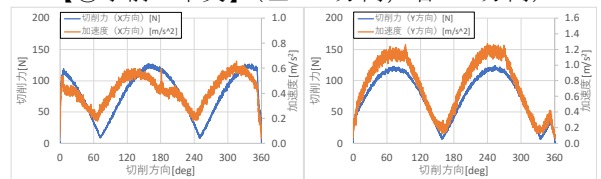


図 29 固定位置変更時の加速度と切削力の関係【⑥手前・右側】(左：X方向, 右：Y方向)

以上から、被削材固定位置を変更した際に加速度と切削力を比較する場合、以下の点に留意する必要がある。
 ○加工機の構造等の影響で、被削材固定位置が変わると
 加速度と切削力の関係が変化すること

3. 4 円加工摩耗試験における加速度と切削力の関係

円加工摩耗試験におけるパス数に対する加速度と切削力の変化を図 30・31 に、加速度と切削力の関係を図 32・33 にそれぞれ示す。

X・Y 方向ともに 350 パスまで加速度と切削力は同様の傾向を示し、351 パス以降加速度が切削力に対して小さい値を示した。

351 パスで加速度、切削力ともに大きく低下したため、

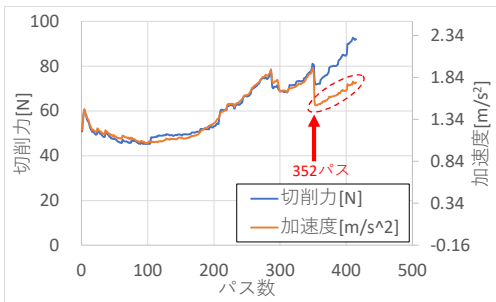


図 30 パス数に対する加速度と切削力の変化 (X 方向)

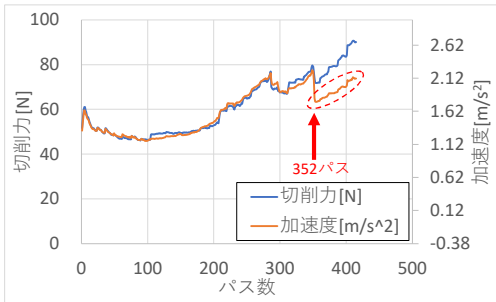


図 31 パス数に対する加速度と切削力の変化 (Y 方向)

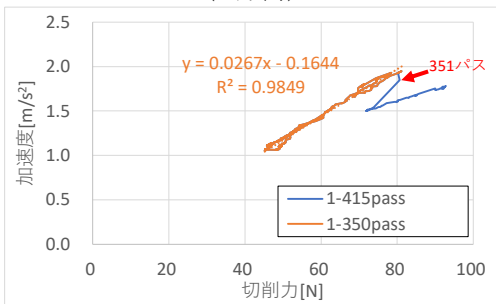


図 32 加速度と切削力の関係 (X 方向)

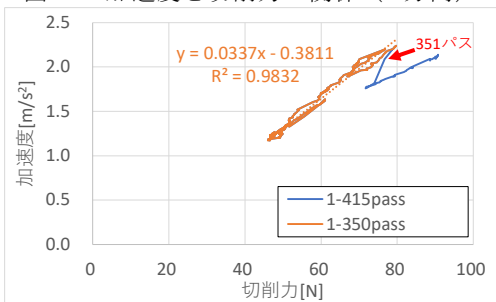


図 33 加速度と切削力の関係 (Y 方向)

351 パスの Y 方向の切削力を確認すると、図 34 のとおり加工途中で大きく低下している。また、347 パスと 360 パスの刃先画像を比較すると、図 35 のとおり大きく欠けが発生していることから、351 パスの途中で工具切れ刃に欠けが発生し切削状態が変化し、加速度と切削力の関係が変化したものと推察される。

以上から、同じ被削材固定位置における 2 軸加工の加速度と切削力を比較する場合、以下の点に留意する必要がある。

○切削条件と被削材固定位置が同じ場合、工具摩耗に伴う切削力の変動を加速度で推定可能であること

○一方、工具切れ刃の欠け等の影響で、加速度と切削力の関係は変化する可能性があること

3. 5 インプロセス工具摩耗監視システムの開発

3. 4 の結果から切削条件と被削材固定位置が同じ場合、2 軸加工においても工具摩耗に伴う切削力の変動を加速度で推定可能である。一方、加工現場では、加工機テーブルの複数の箇所被削材を固定（以下、多数個取り）し、連続加工を行うため、加速度と切削力の関係が変化し、切削力の推定が困難と考えられる。

そこで、固定位置毎に基準データを取得し、同固定位置の基準データと評価データの比を算出することで、多数個取り加工における切削力の変動、つまり工具摩耗状態を数値化するソフトウェアを独自開発した。

固定位置毎、言い換えると 1 つの製品の加工パス毎に基準データとの比較を行うことで、X 方向加速度で見られた「切削方向による加速度と切削力の変化」についても、影響を抑えることが可能と考えられる。

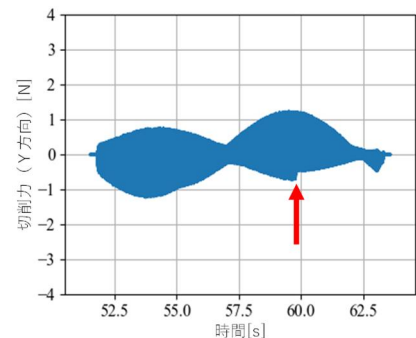


図 34 351 パスの切削力 (Y 方向)

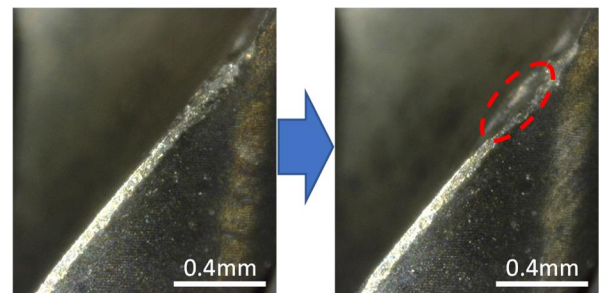


図 35 刃先画像【先端から z=+1mm】
 (左：347 パス、右：360 パス)

加えて、インプロセスの工具摩耗監視を行うためには、加速度信号のリアルタイム処理が必要であることから、入力信号を PC にリアルタイム出力できるデータロガーを採用し、インプロセス工具摩耗監視システムを開発した。システムの構成を図 36 に示す。

当システムは、加工機の主軸の X・Y 方向に電荷出力型 1 軸加速度センサ（小野測器 NP-2120）を取り付け、プリチャージアンプ（エミック 504-E-4-PS）を用いて電荷出力を電圧に変換し、データロガー（横河計測 DL950）を介して、電圧値を直接開発ソフトウェアに取り込むことが可能である。そのため、得られる加速度信号を CSV 等のファイルに変換せずに、リアルタイムのデータ解析を実現している。

データ処理プロセスは、図 37 のとおり、あらかじめ基準加速度データを取り込み、0 点補正、ローパスフィルタ処理、1 切込み毎の絶対値最大値を算出した上で、4 秒間毎に閾値を超えた 1 切込み毎の絶対値最大値の平均値を取得し、基準データを作成してデータベースに格納を行う。そして、リアルタイムに取得する評価加速度データについては、同様に 4 秒間毎に閾値を超えた平均値を取得し、基準データに対する比を算出した上で、一定区間の移動平均および加工開始から現時点までの全平均を算出し、結果を出力する。

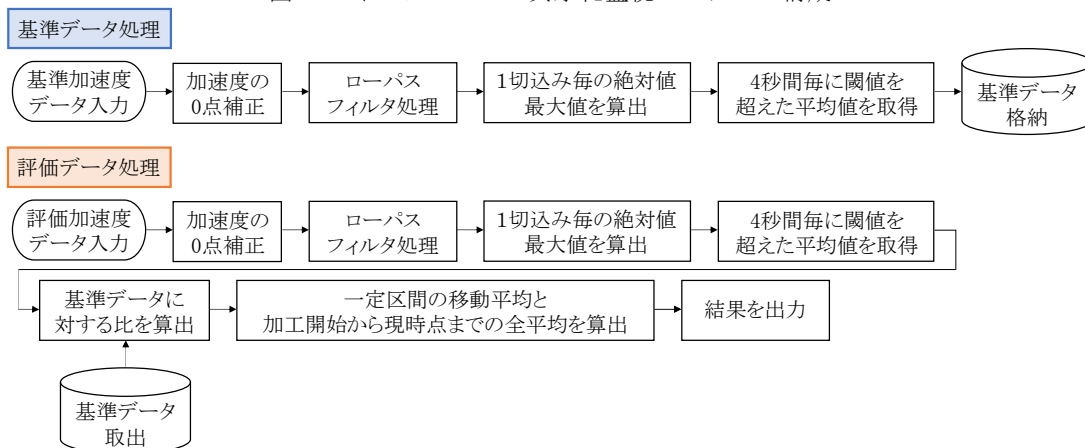
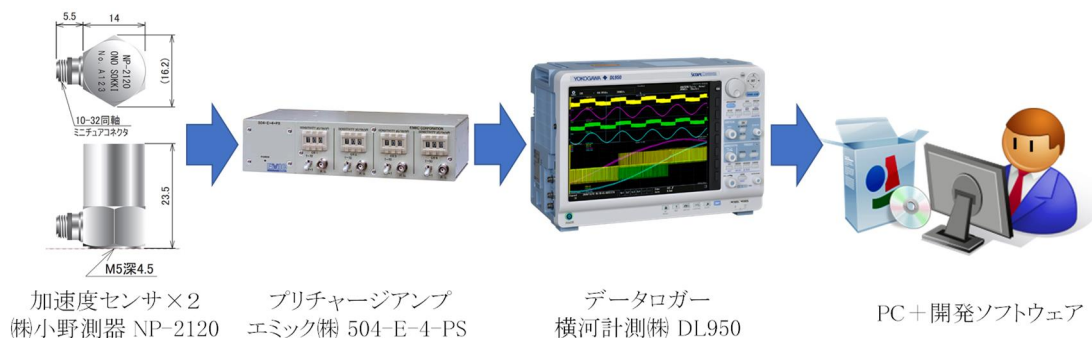
開発ソフトウェアは、開発環境は Visual Studio 2019 (Microsoft) を用いて、プログラム言語は C++ で windows

フォームアプリケーションを作成した。本ソフトウェアにおける解析結果画面の例を図 38 に示す。ソフトウェアは前述のデータ処理プロセスに加えて、以下の動作が可能である。

- ・基準及び評価データの 1 切込み毎の絶対値最大値を 4 秒毎にグラフ表示
- ・評価結果の「移動平均値」「加工開始から現時点までの全平均値」の時系列推移をグラフ表示
- ・「注意 (caution)」「警告 (warning)」を区別する閾値の設定及び摩耗状態表示

開発ソフトウェアの想定使用方法は、以下のとおり。

- ①摩耗状態監視を希望するワークに対し、新品工具を用いて工具交換が必要になるまで複数個の加工を行い、工具摩耗の初期段階（各被削材固定位置の 1 個目または 2 個目）の加速度を基準加速度データとして収集・処理し、データベースに格納する。
- ②工具の外観、切削音、製品のキズ等の要因から判断する工具交換タイミングを踏まえて、「注意 (caution)」「警告 (warning)」を区別する閾値を設定する。
- ③製品加工を開始し適宜ソフトウェアの摩耗状態表示を確認する。



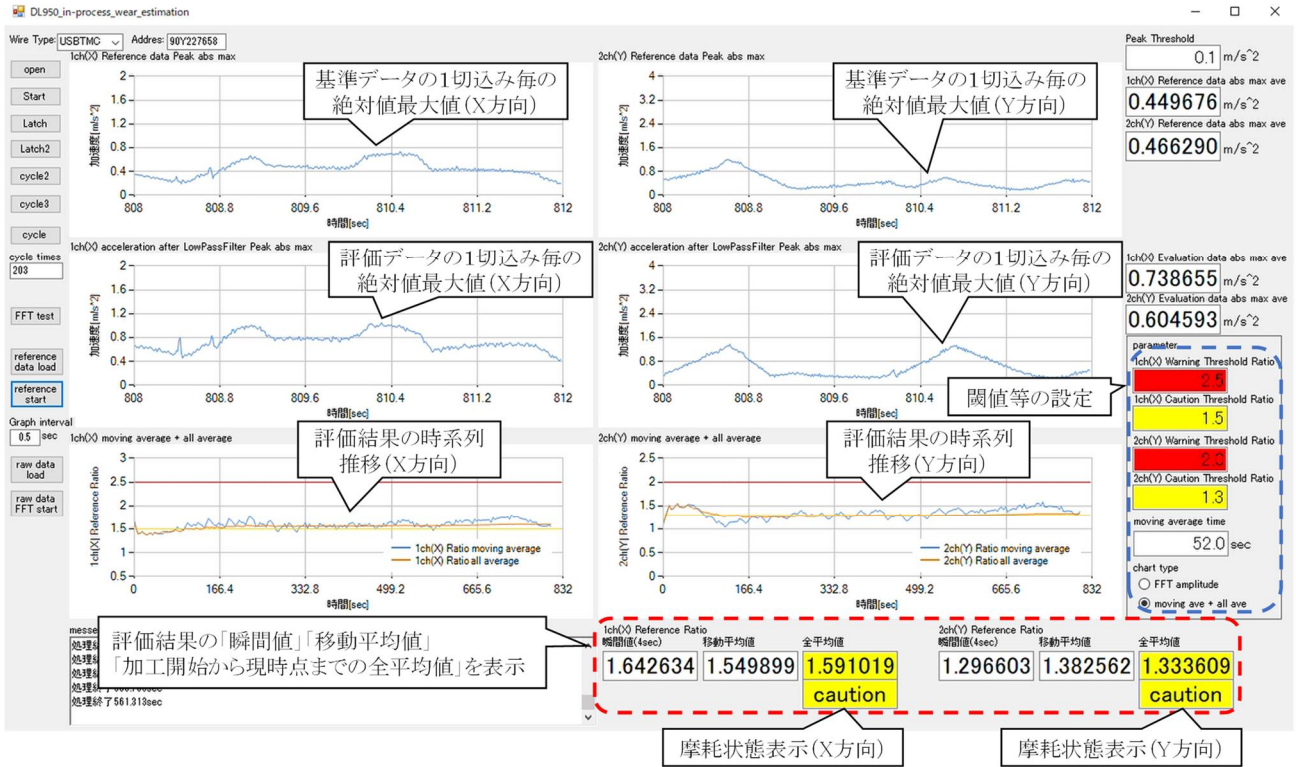


図 38 開発ソフトウェア外観

あらかじめ、データベースの構築と閾値設定が必要になるが、加工現場では新たな製品の加工を行う際や、加工条件を変える際等において、日常的にテスト加工と工具交換タイミングの設定が行われているため、ソフトウェアの操作以外に追加の加工や作業は必要とせず、インプロセス工具摩耗の監視を実現出来ると考えている。

3.6 実証試験

加工回数に対する加速度と切削力の変化を図 39・40、加速度と切削力の関係を図 41 に示す。

センター・共同研究者ともに工具摩耗の進展に伴い、切削力が増加し、加速度の基準比についても同様に増加することが分かる。加工回数によって、加速度の基準比がばらつく所も見られるが、加速度と切削力の決定係数 R^2 値が 1 に近い値を示している (図 41) ことから、加速度の基準比と切削力は比例関係があると言え、開発システムは 2 軸加工におけるインプロセス工具摩耗の監視を実現できたと考えられる。

なお、加速度の基準比がばらつく要因としては、以下が考えられる。

- ・現在のデータ処理プロセスでは、加工機の駆動に伴う早送り等の非切削時の振動と切削に伴う振動を区別していないこと
- ・加速度は加工モデル 1 段加工時の基準比の全平均を用いているが、切削力は加工モデル 1 段加工後に取得した値を用いていること

そのため、当システムを用いて更なるデータ収集を進

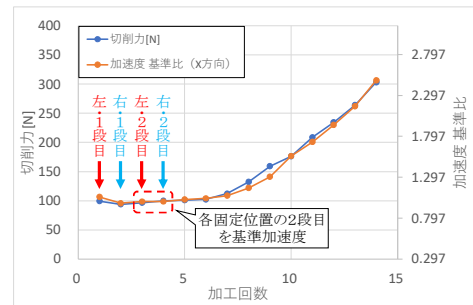


図 39 加工回数に対する加速度と切削力の変化 (安田工業 YBM-640V3・X 方向)

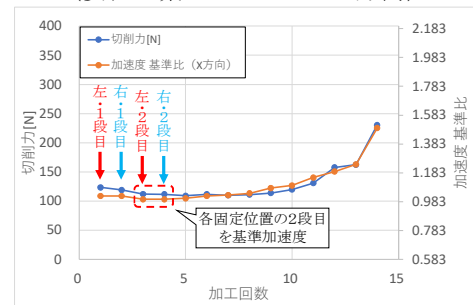


図 40 加工回数に対する加速度と切削力の変化 (森精機 NV5000α1A/40・X 方向)

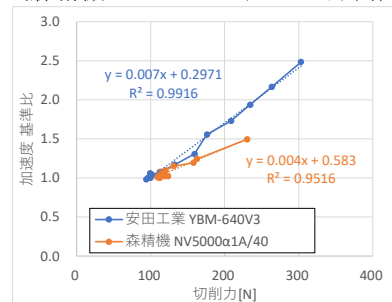


図 41 加速度と切削力の関係

め、値がばらつく要因を排除すれば、より高精度な工具摩耗監視を実現出来ると考えられる。

4 おわりに

本研究では、エンドミルを用いた2軸加工における加速度と切削力の実験的に明らかにし、データ処理プロセスを検討するとともに、インプロセス工具摩耗監視システムの開発を行うことで、以下の知見を得た。

- (1) 加工機の構造等の影響で、被削材固定位置が変わると加速度と切削力の関係が変化する。
- (2) 切削条件と被削材固定位置が同じ場合、工具摩耗に伴う切削力変動を加速度で推定可能である。
- (3) 被削材の固定位置毎に基準データを取得し、同固定位置の基準データと評価データの比を算出することで、多数個取り加工における工具摩耗に伴う切削力変動を加速度で推定可能である。

- (4) 開発システムを用いて、2か所に固定した被削材に対して製品を模擬したモデルを加工した結果、加速度の基準比と切削力に比例関係が得られ、2軸加工におけるインプロセス工具摩耗の監視を実現した。

参考文献

- 1) 頼 光哲ほか：“精密機械”，50(7)，1117-1122，(1984)
- 2) 樫村 幸辰：“精密機械”，51(11)，2115-2121，(1985)
- 3) 稲澤 勝史ほか：“栃木県産業技術センター研究報告”，18，1-5，(2021)
- 4) 阿部 雅ほか：“栃木県産業技術センター研究報告”，19，39-44，(2022)