

## 経常研究

# 加速度センサを用いた工具摩耗推定方法の開発

阿部 雅\* 近藤 弘康\* 棚原 貴登\*

Development of in-Process Tool Wear Monitoring Method by using Accelerometer  
ABE Masashi, KONDO Hiroyasu and TANAHARA Takato

切削時の振動を加速度センサで検出し、工具の摩耗状態を把握することを目的とし、加速度センサの設置位置や切削速度を変えたとき、検出される振動にどのような影響を及ぼすか、比較・検討を行った。その結果、加速度センサをテーブルに設置すると、加工中の加速度は被削材の固定状況に影響を受け、加速度センサを主軸に設置すると、加工中の加速度は主軸の振動特性に影響を受けることが分かった。また、摩耗状態把握の精度を低下させる主軸回転数があるため、予め使用する加工機において振動特性を確認する必要があることが分かった。64 チタン圧延材を用いた摩耗試験を行ったところ、主軸に設置した加速度センサで、加工中の工具摩耗状態を終期摩耗へ遷移するまで把握することができた。

Key words: 工具摩耗, インプロセス, 切削力, 加速度センサ

## 1 はじめに

航空機部品の製造において切削加工のコスト削減が求められている。そのため、工具は寿命限界まで使用することが望ましい。しかし、生産現場では仕上がり面の品質を担保するため、工具の摩耗状態を把握しないまま、十分な余裕をもって工具交換を行っている。

切削加工に用いられる工具であるエンドミルの摩耗状態は、以下の3段階に分類できる。

- ①加工開始直後、切れ刃先端が摩耗する初期摩耗
- ②切削距離に比例して摩耗する定常摩耗
- ③摩耗が急速に進行する終期摩耗

終期摩耗状態に移行する直前までの工具摩耗状態を把握し、工具交換のタイミングを遅らせることができれば、工具の長寿命化と同様にコスト削減の効果が得られると考えられる。

インプロセスで摩耗状態を把握する場合は、摩耗の進行とともに切削力が増大することから、切削動力計で切削力を測定する方法が用いられている。しかし、切削動力計は非常に高価であり、かつ被削材の大きさに制限があることから、生産現場で活用することは困難である。

昨年度の研究において、データ取得ユニット（以下ユニットという。）を開発し、ユニットを加工した際の振動を加速度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<sup>1)</sup>。

生産現場への適用範囲を広げるためには、製品加工中の摩耗状態をユニット加工無しに把握することが望ましい。そこで本研究では、加速度センサの設置位置と加工中の加速度の関係性及び工具摩耗状態を把握するための切削条件について検討することで、安価な加速度センサを用いて加工中の工具摩耗状態を把握するための条件を明らかにしたので報告する。

## 2 研究の方法

### 2.1 加工機

切削加工は5軸マシニングセンタ（DMG 森精機(株)：DMF180、以下加工機という。）を用いた。

### 2.2 加工工具

工具の振れによって径切込み深さが変化しないよう、スクエアエンドミル（(株)MOLDINO：EPSM4060-PN）の2枚刃のうち1枚をグラインダで削り1枚刃とし、切削速度 200m/min、1刃送り 0.1mm/tooth、軸方向切込み 3mm、径方向切込み 0.1mm、水溶性切削液下で被削材（NAK80 材）を切削長 30mm まで加工して定常摩耗まで予備摩耗させた後、実験に用いた。

### 2.3 加速度センサ及び周波数解析方法

加速度センサには電荷出力型の一軸加速度センサ（日本キスラー(同)：Type 8776A50）を使用した。

エンドミル加工では、主軸回転に合わせて刃先が断続的に被削材と接触する際に発生する周波数（以下強制振動という。）及びその整数倍の高調波周波数の振動が生じることが知られている<sup>2)</sup>。周波数解析方法

\* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

は、昨年度の研究による知見から、加速度センサで取得した信号をフーリエ変換し、第7高調波までの周波数帯でローパスフィルタ処理を行い、さらに逆フーリエ変換した波形のうち、加工開始から1割と終了までの1割を除く、加工時間の8割の区間で最大値のピーク平均を算出し、これを加速度値とした。

2. 4 加速度センサの設置位置の影響

加速度センサの設置位置と加速度の関係を明らかにするため、加工機のテーブル及び主軸に加速度センサを設置し、加工時の振動による加速度を比較検討した。

2. 4. 1 テーブル設置

被削材と加速度センサの距離による影響を明らかにするため、被削材の固定位置を変え、加工時の振動による加速度を測定することとした。被削材 (NAK80) をテーブル中心から被削材中心までの距離で左右に600mm固定治具ごと移動し、それぞれの場所で表1に示す切削条件により加工を行った。段取りの模式図を図1に示す。加速度センサはテーブル右端に固定し、送り方向の法線成分を測定した。また、図2に示すとおり、被削材の上には20mm間隔で溝を施し、被削材内での加工位置による影響も検討した。

表1 切削条件

切削速度 $V_c$	200 m/min
1刃送り $f_z$	0.1 mm/tooth
送り方向	Y軸正方向
軸方向切込み $a_e$	3 mm
径方向切込み $a_p$	0.1 mm
切削液	水溶性切削液
削りの向き	ダウンカット

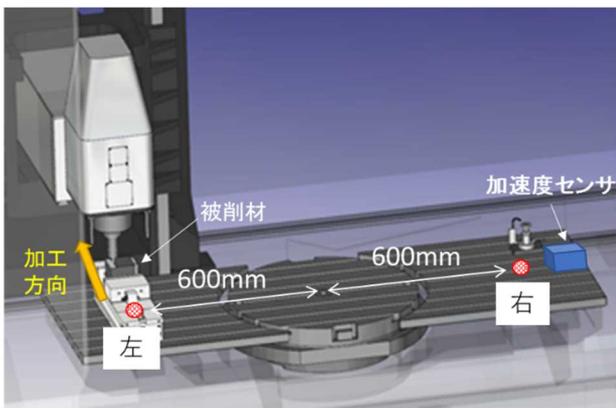


図1 段取り模式図 (●: 被削材設置位置)



図2 被削材内加工位置

2. 4. 2 加工機主軸設置

被削材の固定状況の影響を受けずに摩耗状態を把握可能か確認するため、加工機主軸のX軸正方向側に加速度センサを設置 (図3) し、送り方向の法線成分を測定した。切削条件は表1と同様、被削材の段取り及び上面は図1、2と同様とし、加工を行った。



図3 加速度センサ主軸設置

2. 5 工具摩耗状態把握に適した切削条件

昨年度の研究から、工具摩耗の進行に伴って切削力が増加すること、加工時の加速度と切削力の関係は線形性があることが明らかとなった。したがって、加速度センサを用いて工具の摩耗状態を精度よく把握するためには、加速度と切削力の線形性を評価する決定係数  $R^2$  値が1 (完全なる直線) に近い値の切削条件であることが望ましいと考えられる。そこで表1に示した切削条件のうち、切削速度を50, 70, 75, 100, 150, 200m/min, 径方向切込みを0.1, 0.2, 0.4, 0.6mmとして加工した際の加速度と切削力から、摩耗状態を精度よく把握するための切削条件について検討を行った。

2. 6 工具摩耗状態把握の確認試験

加速度センサで、ユニット加工を行わずに工具摩耗状態の把握が可能かを確認するため、摩耗試験用の被削材を加工した時の加速度及びユニットを加工した時の加速度と切削力を測定し、比較した。

摩耗試験用の被削材は、航空機部品加工を想定して64チタン圧延材 (AMS4911) とし、加工工具は2枚刃の

うち1枚をグラインダで削り1枚刃とした新品のスクエアエンドミル(株式会社MOLDINO EPSM4060-PN)を用いて、切削速度75m/min, 送り速度0.1mm/tooth, 軸方向切込み3mm, 径方向切込み0.1mm, 水溶性切削液下での片削りの摩耗試験を、5軸マシニングセンタで切削長700mmまで実施した。

### 3 結果及び考察

#### 3.1 加速度センサの設置位置の影響

##### 3.1.1 テーブル設置

被削材をテーブルの左右において加工を行った時の被削材内加工位置ごとの加速度値を図4に示す。

被削材と加速度センサが遠い(被削材左側設置)場合、被削材内加工位置による加速度値の違いは見られなかった。

被削材と加速度センサが近い(被削材右側設置)場合、遠い場合と比べて距離減衰の影響が少ないため、遠い場合の3倍程度の加速度値となった。また、被削材内加工位置ごとの加速度値は、加速度センサに対して遠くなるほど加速度値が高くなる傾向になった。振動の伝播が距離減衰のみの影響を受ける場合、加工位置が遠くなるほど加速度値は低くなるが、固定治具及びテーブルの振動特性や密着度合いなどの固定状況による影響で、逆の傾向が生じたものと考えられる。

このことから、生産現場では多数個加工や固定治具の移動などで被削材の固定状況が常に同じとは限らないため、生産現場への適用を想定した場合、テーブルに設置した加速度センサでの工具摩耗状態の把握は、困難であると考えられる。

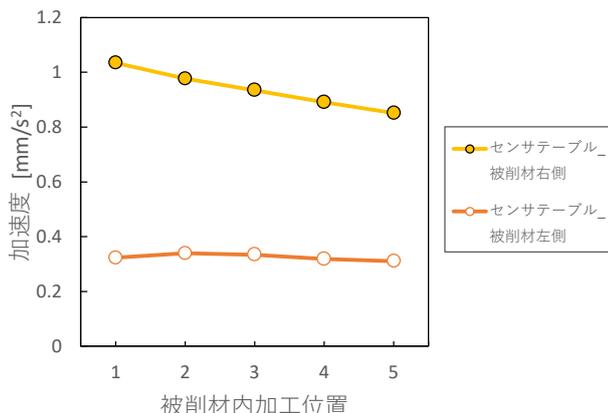


図4 被削材設置位置変更時の被削材内加工位置と加速度 (n=4)

##### 3.1.2 加工機主軸設置

加速度センサを主軸に設置して加工を行った際の被削材内加工位置ごとの加速度値を、前項の結果と併せ

て図5に示す。

加速度センサを主軸に設置した場合、加速度センサと加工位置が非常に近いため、加速度センサをテーブルに設置した時よりも得られる加速度値は大きくなっている。また、被削材がテーブルの左右にあってもほぼ同じ値を示したことから、加速度値に及ぼす被削材の固定状況の影響はテーブル設置時よりも小さいと考えられる。しかし、データのばらつきを比較すると、テーブル設置時より主軸設置時の方が大きい(図6)。これは主軸や加速度センサの振動特性によって切削時における強制振動(Vc200の場合176.9Hz)の整数倍以外の振動が生じたことによるものと考えられる(図7)。この現象が低速域でも発生するか確認するため、切削速度を70m/minに下げて再度加工を行ったところ、概ね強制振動(Vc70の場合61.9Hz)の整数倍のみで振動しており(図8)、加速度値のばらつきが減少した(図9)。

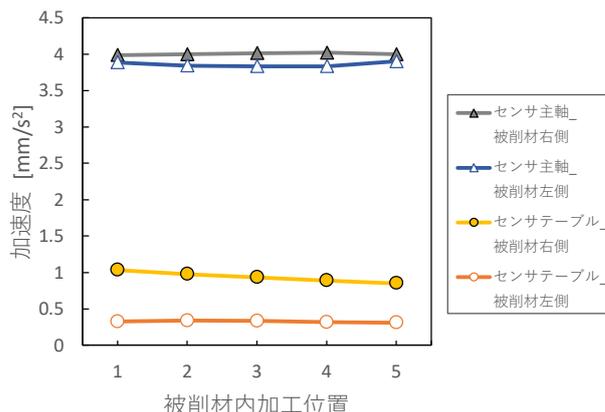


図5 設置位置の違いによる加速度の比較 (n=4)

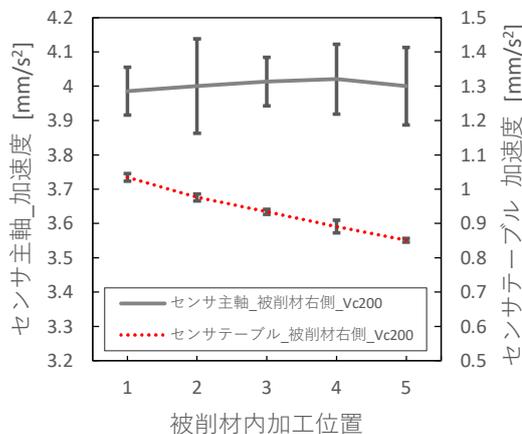


図6 Vc200の加速度値のばらつき (n=4, 誤差範囲±σ)

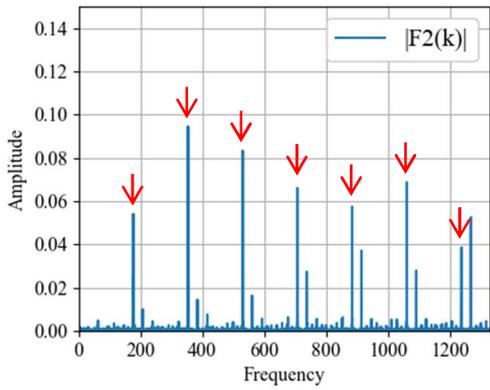


図7 Vc200の加速度波形の周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

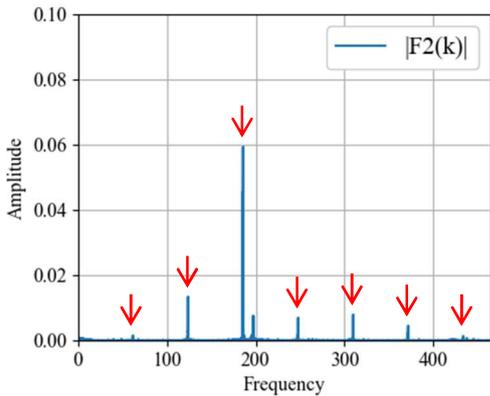


図8 Vc70の加速度波形の周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

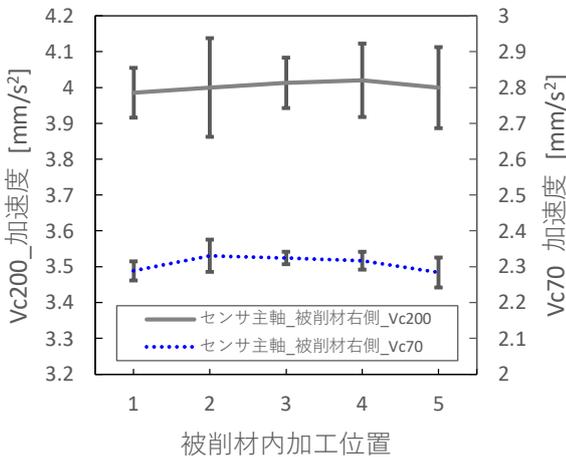


図9 Vc200とVc70の加速度値のばらつき  
(n=4, 誤差範囲±σ)

### 3.2 工具摩耗状態把握に適した切削条件

加速度センサを主軸に設置した状態で切削速度と径方向切込みを変え、加工した際の加速度と切削力を図10に示す。

R<sup>2</sup>値が切削速度によって異なることから、加速度と切削力の線形性の悪い条件が存在することがわかる。

また、径方向切込み0.6mmで加工した際の加速度波形とその周波数解析結果を図11~16に示す。Vc50, 70, 75では概ね強制振動の整数倍のみの振動であるが、Vc100以上では強制振動の整数倍以外の振動が見られたことから、本研究で用いた5軸マシニングセンタにおいては、Vc100以上は摩耗状態把握の精度を低下させる恐れがある。このことから、予め使用する加工機において切削速度を変えた際の振動特性を確認する必要があると考えられる。

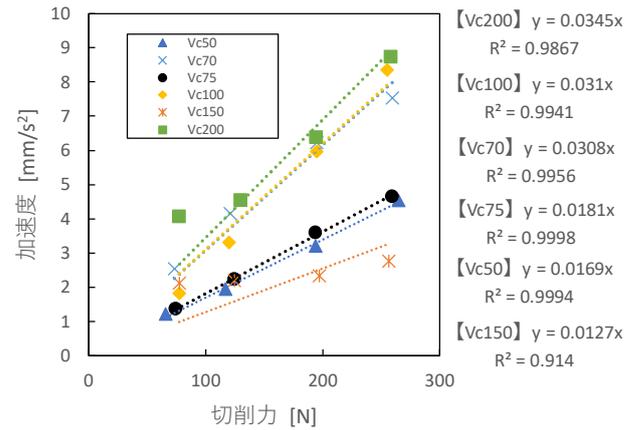


図10 切削条件変更時の加速度と切削力の関係

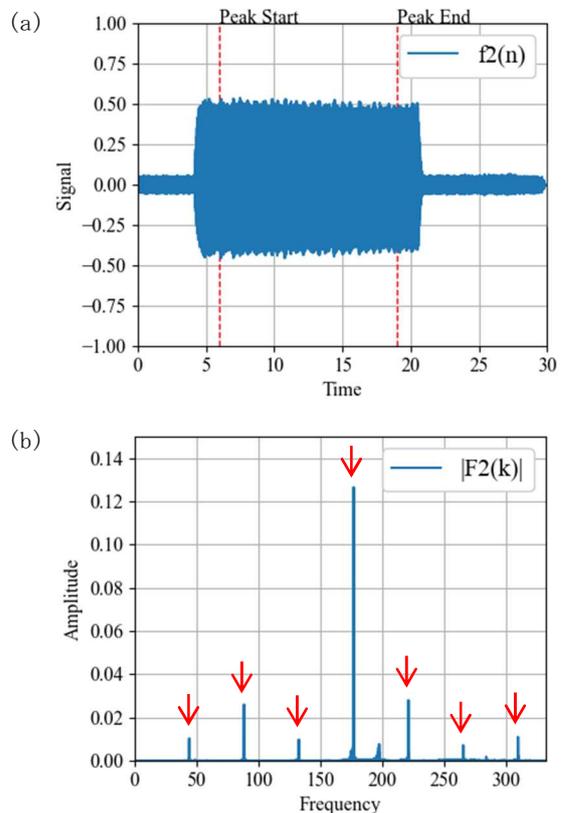


図11 Vc50加工時の(a)加速度と(b)周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

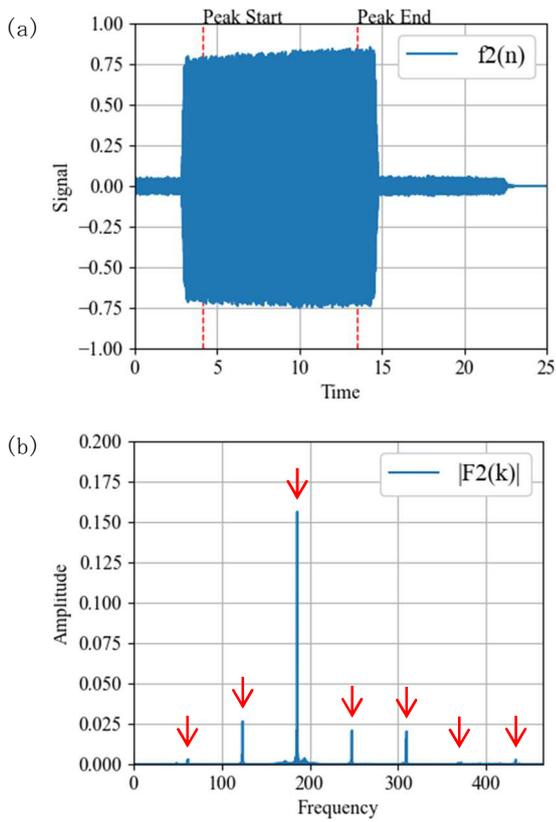


図 12 Vc70 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

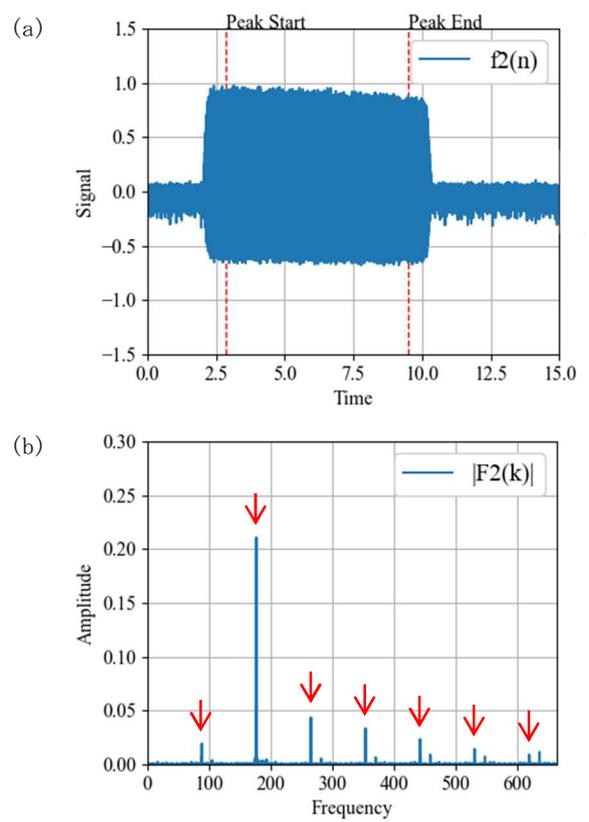


図 14 Vc100 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

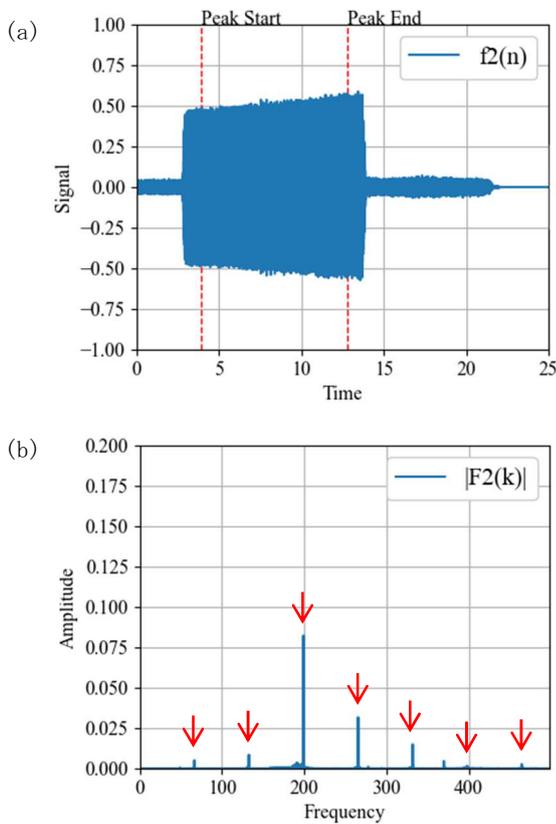


図 13 Vc75 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

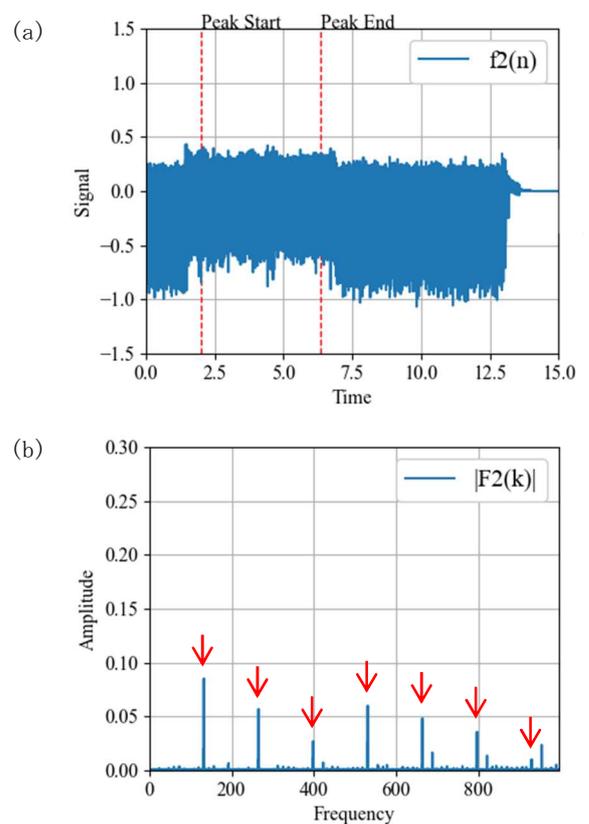


図 15 Vc150 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果  
(矢印は強制振動の整数倍)

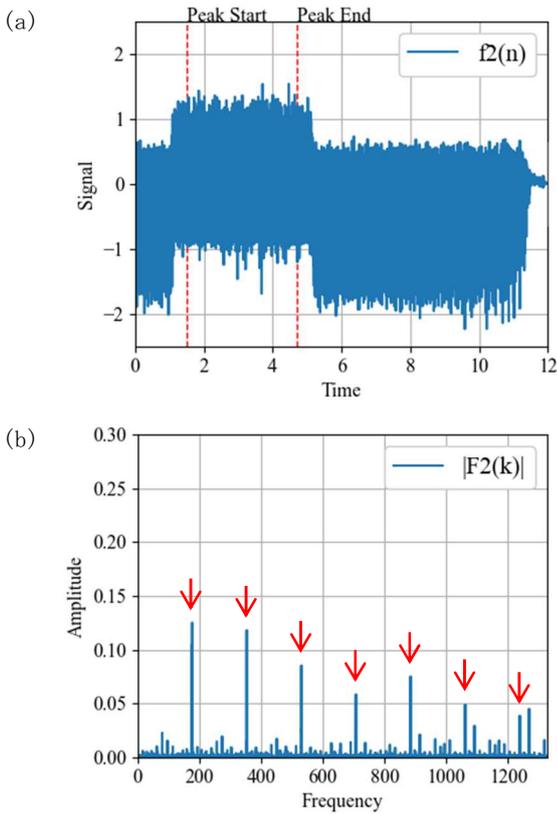


図 16 Vc200 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

### 3. 3 工具摩耗状態把握の確認試験

摩耗試験用被削材加工時とユニット加工時の加速度では、切削長 550m 程度までほぼ一致した挙動を示し (図 17), ユニット加工時の加速度と切削力も、切削長 550m 程度まで挙動が一致している (図 18)。このことから、ユニット加工の代わりとして、主軸に設置した加速度センサによって工具が定常摩耗から終期摩耗へ遷移する様子を把握可能であると考えられる。

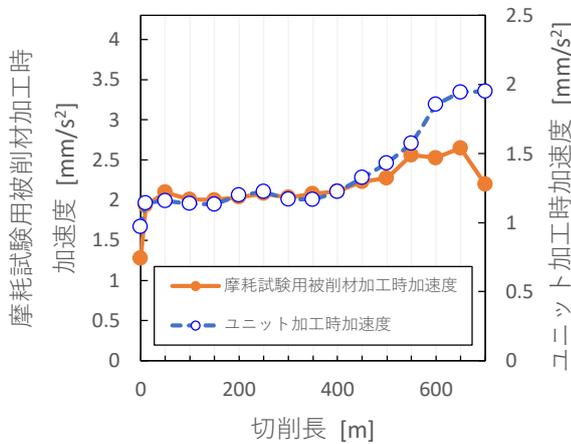


図 17 摩耗試験用被削材とユニットの加速度の比較

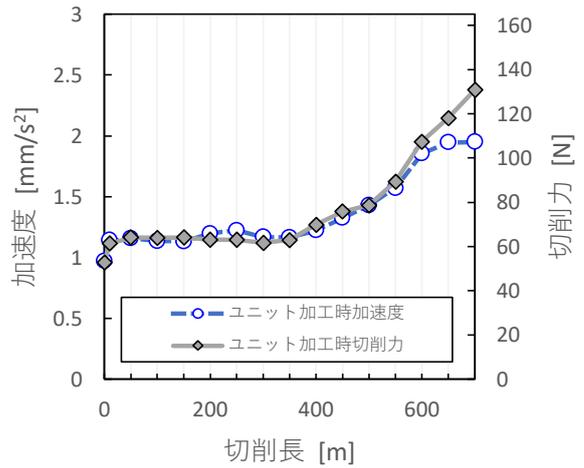


図 18 ユニットの加速度と切削力の比較

## 4 おわりに

本研究では、加速度センサの設置位置と加工中の加速度の関係性を調べ、工具摩耗状態を把握するための切削条件について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 加速度センサをテーブルに設置すると、加工中の振動は被削材の固定状況に影響を受ける。
- (2) 加工機主軸に加速度センサを設置して、主軸回転数を変更したときの加速度を測定し、振動特性を確認することで、安価な加速度センサであっても、加工中の工具摩耗状態を終期摩耗へ遷移するまで把握することが可能である。

## 参考文献

- 1) 稲澤勝史ら: “栃木県産業技術センター研究報告”, 18, 1-5, (2021)
- 2) 竹山秀彦ら: “加工技術データファイル基礎編切削加工編”