

経常研究

AE センサを用いた研削加工状態の推定

山下 健介* 近藤 弘康* 小池 宏侑*

Estimation of Stability of Grinding Process by Acoustic Emission Sensor
YAMASHITA Kensuke, KONDO Hiroyasu and KOIKE Hiroyuki

研削加工において目立てのタイミングや加工条件は作業者の熟練度によるところが大きく、技能レス化や不良品低減のため、安価なセンサを用いた研削加工状態の見える化が求められている。本研究では、びびりなどを推定するためアコースティック・エミッション(AE)波を用いて研削加工状態の推定を行った。その結果、びびりなどの不安定加工状態やスパークアウト加工時の加工負荷の推定が可能であることが分かった。

Key words: AE センサ, 平面研削, 電流, 加工負荷, びびり

1 はじめに

研削加工では加工中に切りくずなどが砥石表面に凝着・堆積し切れ味が低下する目づまりや砥粒先端が摩滅する目つぶれなどが起こる。そのため砥石の表面を削り、切れ味を回復させる目立て作業を行う必要がある。

目立てのタイミングや加工条件が不適切な場合、加工時に砥石の目づまりやびびりなどが生じて加工負荷が増加又は変動する。これにより研削面の形状精度や粗さの低下、研削焼けなどが起こり、製品不良に繋がる。一方で、目立てのタイミングや加工条件の設定は作業者の熟練度によるところが大きく、熟練度によるばらつきが発生や判断が定量的ではないことから OJT による技術伝承の課題になっている。そのため技能レス化や不良品低減を目的とした研削加工状態の見える化が求められている。なお加工状態は動力計を用いれば一定の水準で推定可能であるが、動力計は高価なため、より低コストな見える化手法が求められている。

令和 4 年度の研究において、砥石主軸電流から研削抵抗や目づまり状態の推定が可能であることを明らかにした¹⁾。

しかし、電源周波数を超えるような高い周波数を有するびびりやスパークアウトのような切込みが小さい加工を電流で捉えることは難しい。

そこで本研究では、研削加工状態によるアコースティック・エミッション(AE)への影響を明らかにし、不安定加工における AE の変化を検出することにより、研削加工状態の推定を目指した。

2 研究の方法

2. 1 不安定加工状態と AE の関係

2. 1. 1 びびり状態と AE の関係

平面研削盤（榊岡本工作機械 PSG-63DXNC）を用い、表 1 の条件で、びびりが発生するまで加工を行い、加工負荷と被削材に設置した AE センサの出力を評価した。

実験の段取りについては、図 1 に示すとおり被削材 SUS304（W15×L75×H29mm）を切削動力計（日本キスラー(合) 9257B）の上に固定治具ごと固定し、被削材に AE センサ（榊エヌエフ回路設計ブロック AE-905S）を設置した。

図 2 に示すとおりテーブル上にも AE センサを設置し、加工機配電盤の主軸モータ配線の三相交流ブレーカーに電流クランププローブ（横河計測 720931）を取り付け加工した。

切削動力計、被削材に設置した AE センサ及び電流の測定はデータロガー（横河計測 DL950）で測定し、テーブル上に設置した AE センサはディスクリミネータ（榊エヌエフ回路設計ブロック AE9922）で 500kHz の LPF を使用し 60dB 増幅してから測定した。

なお、データロガーのサンプリングレートは、AE センサは 5MS/s、それ以外は 5kS/s で測定し、研削砥石は #220 の平型砥石（榊ノリタケカンパニーリミテド WA220K7V35R）、研削液は水道水にて 50 倍希釈した弱導電性研削液（佐藤特殊製油 ヴァニソール）を用いた。

加工負荷及び電流の評価方法は、加工時間中心の 6 割を評価領域とした。加工負荷は接線抵抗 Ft、法線抵抗 Fn の各平平均値を算出し、電流値は空転時の電流をゼロとし

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

て補正後、R相、S相、T相の合計平均値を算出した。

砥石の目づまり割合を定量化するため、加工後の砥石表面を高速度ビデオカメラ（株式会社フォトロン FASTCAM SA3 model160K）で撮影し、画像を抽出し二値化後に黒色部を目づまりとし、画像全体の画素数から黒色部画素数の割合を算出した。

なお、加工中にびびりが発生すると被削材表面にびびりマークと呼ばれるうねり模様が見られるため、加工後の被削材表面を、非接触輪郭形状測定機（三鷹光器株式会社 MLP-3SP）を用い、幅方向 2.5mm、7.5mm、12.5mm の位置を測定し表面形状を FFT 処理し平均値を算出した。

2. 1. 2 目づまり状態（加工負荷）と AE の関係

超精密加工機（東洋工学株式会社 LINIMAX）を用い、表 2 の条件で加工を行い、加工負荷と被削材に設置した AE センサの出力を評価した。

実験の段取りについては、図 1 に示すとおり被削材 SUS304（W15×L75×H29mm）を切削動力計に固定し、図 3 に示すとおり設置した。AE センサはディスクリミネータで 500kHz の LPF を使用し 60dB 増幅してから切削動力計と同様にデータロガーで測定した。

なお、データロガーのサンプリングレート、研削液、加工負荷の評価方法及び目づまり割合の算出は 2. 1. 1 と同様であり、研削砥石は #220 の軸付き砥石（株式会社ノリタケカンパニーリミテド WA220K7V35R）を用いた。

また、再現性を確認するため平面研削盤を用い 2. 1. 1 の加工条件を 7 パス目まで加工し、繰り返し N 数として 8 回行い、加工負荷、被削材に設置した AE センサ、テーブル上に設置した AE センサ及び電流値の出力を評価した。

2. 2 微小切込み加工における加工負荷と AE の関係

研削加工では寸法精度向上のためにスパークアウト加工を行うことがあるため、超精密加工機を用い 2. 1. 2 と同様の段取りで、一定切込み後、切削動力計の検出下限程度までスパークアウト加工を表 3 の条件で行い、加工負荷と被削材に設置した AE センサの出力を評価した。

2. 3 研削加工状態の推定手法の開発

令和 4 年度研究、2. 1 及び 2. 2 を踏まえ、電流と AE 波を用いた研削加工状態の推定手法を開発した。

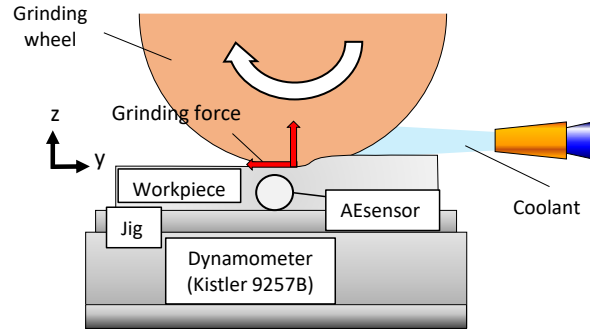


図 1 実験段取り（概略図）

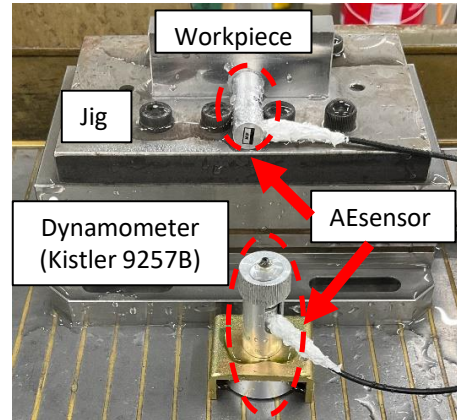


図 2 実験段取り（平面研削盤）

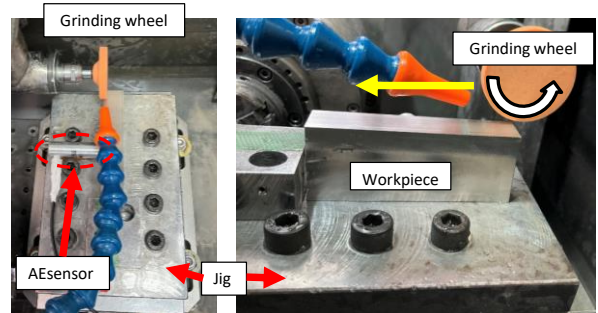


図 3 実験段取り（超精密加工機）

表 1 平面研削盤研削条件

砥石周速度 [m/s]	25.8
切込み [μm]	5
テーブル送り速度 [m/min]	10
研削幅 [mm]	15

表 2 超精密加工機研削条件

砥石周速度 [m/s]	2.32, 5.97
切込み [μm]	5
合計切込み量 [μm]	100
テーブル送り速度 [m/min]	0.9
研削幅 [mm]	3

表 3 スパークアウト加工条件

加工条件番号	①	②	③	④
砥石周速度 [m/s]	2.32	5.97		
切込み [μm]	1		5	
合計切込み量 [μm]	10		100	
スパークアウト回数	10	4	4	3
テーブル送り速度 [m/min]	0.9			

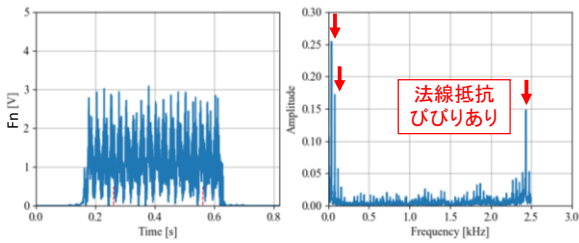


図4 法線抵抗 Fn の FFT 結果 (びびりあり)
(左: FFT 処理前、右: FFT 処理後)

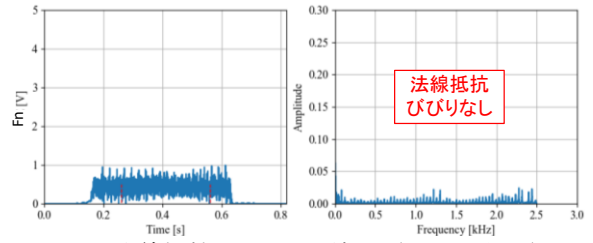


図6 法線抵抗 Fn の FFT 結果 (びびりなし)
(左: FFT 処理前、右: FFT 処理後)

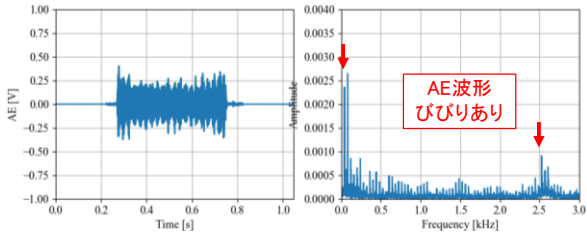


図5 被削材設置センサの AE 波の FFT 結果
(びびりあり)
(左: FFT 処理前、右: FFT 処理後)

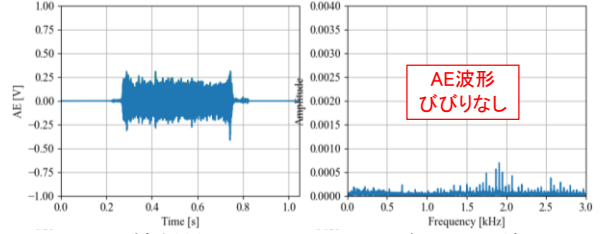


図7 被削材設置センサの AE 波の FFT 結果
(びびりなし)
(左: FFT 処理前、右: FFT 処理後)

3 結果及び考察

3.1 不安定加工状態と AE の関係

3.1.1 びびり状態と AE の関係

加工中にびびりが発生したときの法線抵抗 Fn と AE 波の FFT 結果を図4, 5に、びびりがないときの FFT 結果を図6, 7に示す。なお、AE 波に関しては1/10間引き処理後に FFT 処理を行った。

その結果、びびりが発生すると法線抵抗 Fn, AE 波ともに約40Hzの整数倍のピークが目立ち100Hz以下と2.5kHz付近に大きいピークが見られる(図4, 5)。

次に被削材表面のうねり模様を測定した結果、ピーク波長の平均は4151μmであり、図8の砥石表面画像の目づまり割合を見ると偏りがあることが分かる。砥石回転数は2400rpm(40Hz)、テーブル送り速度は10m/minであり、砥石一回転当たりの研削距離は4166μmとなることから、うねりの波長とほぼ同じため今回のびびりは目づまり等によるバランス変化の偏心によるものと推測される。

平面研削では砥石の偏心によるびびりが起こりやすいため、AE 波の FFT 結果から砥石回転数に応じた周波数のピークに着目することで、びびりの検出が可能と思われる。

3.1.2 目づまり状態(加工負荷)と AE の関係

超精密加工機の AE 波を FFT 処理した結果を図9に示す。加工パスが増えるにつれて振幅スペクトルが増大していることが分かる。そこで特に変動量の大きい100k~350kHzのパワースペクトル平均値(面積)を算出し、加工負荷 F (接線抵抗 Ft と法線抵抗 Fn の合力)と目づまり割合と比較を行った(図10, 1

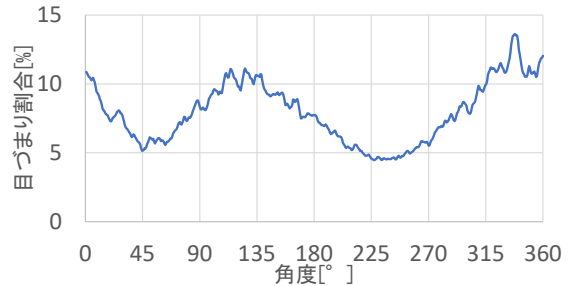


図8 砥石表面目づまり割合

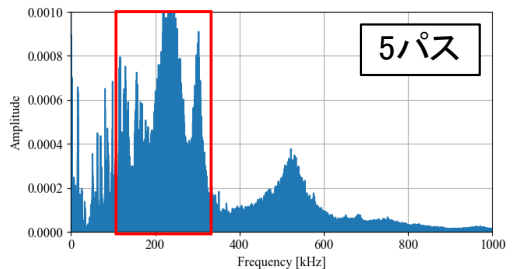
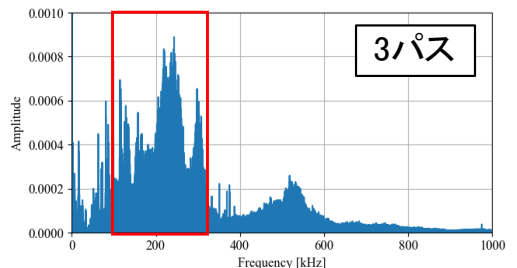
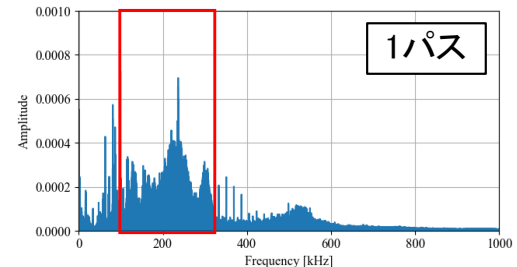


図9 AE 波の FFT 結果 (砥石周速度: 2.32m/s)

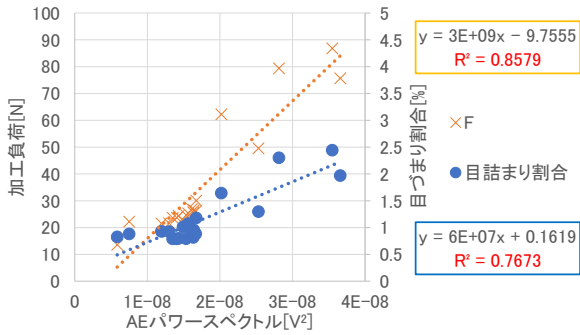


図 10 AE パワースペクトルと加工負荷、目づまり割合の関係 (砥石周速度：2.32m/s)

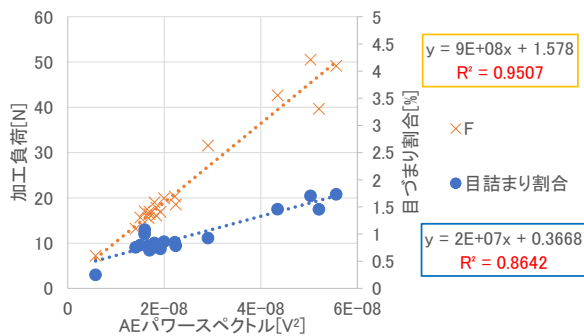


図 11 AE パワースペクトルと加工負荷、目づまり割合の関係 (砥石周速度：5.97m/s)

1)。

その結果、加工負荷及び目づまり割合の増加に伴い、AE のパワースペクトル平均値も増加しており、一定程度の線形性が見られることから、AE 波から加工負荷と目づまり割合を推定できる可能性があることが分かった。

次に平面研削盤を用いた加工における AE 波の再現性を確認するため、N=8 の実験毎に AE 波と加工負荷の線形近似式を求め、傾き、切片及び R² 値の平均値と標準誤差を評価した結果を表 4～6 に示す。なお、1 パス目の AE 波は当たり取りの影響で大きく出るため 2～7 パス目までを評価し、電流値は空転時をゼロに補正しているため切片はゼロである。

その結果、超精密加工機と同様に線形性が見られることが分かった。標準誤差を比較すると、被削材設置センサの標準誤差が最も大きく、電流値が最も小さい結果となった。AE センサは高感度であり、AE 波は設置時のグリスマ量や押し付け圧力、設置面状態の影響を受けやすい。本実験はくり返し数ごとに AE センサを設置したため、くり返し数ごとに検出される AE 波にばらつきが生じたと考えられる。

以上から、AE 波は主軸電流値と同様に加工負荷との線形性は良いが、設置毎にばらつきが大きくなることが分

かった。

3. 2 微小切込み加工における加工負荷と AE の関係

超精密加工機を用いて表 3 に示す条件でスパークアウト加工を行った結果を図 12 に示す。

その結果、すべての加工条件で一定程度の線形性が見られたことから、AE センサを用いスパークアウト加工時の加工負荷の推定が可能であることが分かった。

なお、線形性が悪い加工条件②に関しては、法線抵抗 F_n の S/N 比が悪くノイズを含んでおり、接線抵抗 F_t が小さくなると合力である加工負荷 F に対し法線抵抗 F_n が支配的になることが影響したと考えられる。

表 4 平面研削盤 N=8 の線形近似平均 (被削材設置 AE センサ)

被削材設置	平均	標準誤差
傾き	2.602.E+10	0.5052.E+10
切片	-16.55	3.23
R ² 値	0.9906	

表 5 平面研削盤 N=8 の線形近似平均 (テーブル設置 AE センサ)

テーブル設置	平均	標準誤差
傾き	1.647.E+10	0.0623.E+10
切片	-22.88	3.95
R ² 値	0.9903	

表 6 平面研削盤 N=8 の線形近似平均 (主軸電流値被削材設置)

主軸電流値	平均	標準誤差
傾き	15.93	0.154
R ² 値	0.9902	

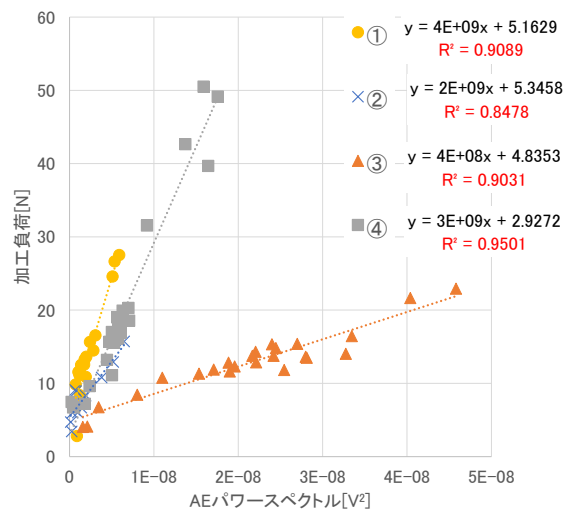


図 12 AE パワースペクトルと加工負荷の関係 (スパークアウト加工)

3. 3 研削加工状態の推定手法の開発

令和4年度研究と本研究結果から、閾値を決めることにより主軸電流から研削焼け等が推定でき、AE波によりびびりやスパークアウト加工時の加工負荷が推定できることが分かった。

そこで、電流とAE波を用いて研削加工状態を推定するプログラムを構築した。そのデータ処理フローを図13に示す。

AEデータの処理としては、間引き処理、エンベロープ処理を行い、元のAEデータを含めた3つのデータをFFT処理する。

なお、びびり判定のピーク検出処理において100Hz以下のピーク検出がし易い事からAE波のエンベロープ処理を採用することとした。

間引きとエンベロープのFFT処理データはピーク検出処理を行い、閾値によりびびり判定を行い結果出力する。

AEデータのFFT処理データはバンドパス処理により100k~350kHzのパワースペクトル平均値を算出し、後述の電流値で補正する。AEセンサは設置がシビアであり加工現場への適用を考えると設置毎の誤差を主軸電流値から求めた加工負荷を元として補正する方法を採用した。

電流データは空転時のゼロ補正とRMS処理を行った後、予め測定した換算係数から加工負荷へ変換し、AEの加工負荷を補正する。また、研削焼けの判定を閾値により行い、AE及び電流から求めた加工負荷と一緒に結果出力を行う。

以上から、既存手法では困難であった「高周波のびびり」と「スパークアウト加工時の加工負荷」を推定できる可能性がある。

4 おわりに

本研究では、AEセンサを用いた研削加工における加工状態の推定を目的として、不安定加工状態がAEに及ぼす影響を調査し、研削加工状態推定手法を検討することで、以下の知見が得られた。

- (1) AEセンサを用いてびびりなどの不安定加工状態の推定が可能であることが分かった。
- (2) AEセンサを用いてスパークアウト加工時の加工負荷の推定が可能であることが分かった。
- (3) 電流及びAE波を用いた研削加工状態推定手法を開発することで、びびりとスパークアウト加工時の加工負荷を推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 山下健介ほか: “栃木県産業技術センター研究報告”, 20, 54-57, (2023)

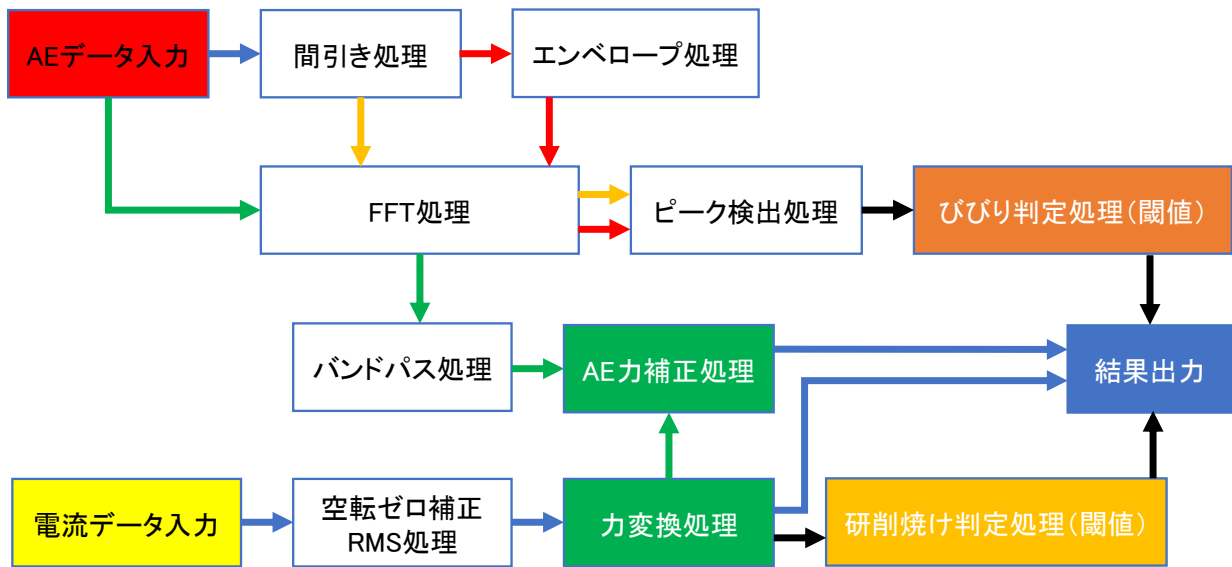


図 1 3 データ処理フロー