

# AE センシングによる超精密加工の IoT 化・知能化に関する基礎研究 — 旋削加工実験と二次元切削シミュレーションによる加工状態と AE 信号の相関 —

埼玉工業大学 ○荒木貴志, ◎長谷亜蘭

## 要 旨

超精密加工は、微小な工具摩耗でも高精度な切削が困難になり、加工精度や表面品位にばらつきが生じてしまうことが問題となっている。そこで本研究では、超小型超精密旋盤を用いた切削加工実験と有限要素法による二次元切削シミュレーションから、切削状態とアコースティックエミッション (AE) 信号の相関について検討した。その結果、工具摩耗の進行に伴って、AE 信号原波形の中・高周波領域に大きな周波数ピークが現れることが確認された。また、シミュレーション解析からも類似した結果が得られた。

## 1. 緒 言

超精密加工においては、加工物の形状精度が約数  $\mu\text{m}$  以内、加工面粗さは  $\text{nm} R_z$  以内が要求される加工であり、加工状態の管理や段取りに時間と手間を要する。しかし、工具・被削材間の相性や切削条件の違いといった様々な要因によって工具摩耗が進行し、加工精度が大きく低下してしまうことがある。加工精度や表面品位にばらつきが生じると、機械の運動精度低下や故障などの問題へと繋がるため、加工状態を的確にセンシングする技術が必要不可欠となる。

本研究では、材料の変形・破壊で生じる弾性波を計測するアコースティックエミッション (AE) センシングを活用し、超精密加工の中でも難削材の旋削加工に焦点を当てた実験研究を行う。本実験では、超小型超精密 CNC 旋盤を使用し、治具を用いて AE センサを工具に取り付け、切削加工中の AE 信号を計測した。また、デジタルマイクロスコプを用いて切削状況の撮影、切りくずの採取、表面粗さの測定、逃げ面摩耗幅の観察も行った。さらに、同条件で有限要素法による二次元切削シミュレーションでも検討を行った。得られた結果から、AE センシングを加工状態監視に有効な特徴を見だし、超精密旋削加工の IoT 化・知能化の実現を目標とする。

## 2. 実験装置の構成

図 1 は、本研究で使用した実験装置の構成である。本研究では、超小型 AE センサをバイトホルダ後方に治具を使用して取り付け、切削点からの AE 波を計測した。この際、AE 波の検出感度を高めるため、AE センサ受波面にはワセリンを塗布した。AE センサからの出力信号は、プリアンプとディスクリミネータを用いて総合利得で 70 dB 増幅した。また、ノイズ除去の目的で 50 kHz のハイパスフィルタ処理、100 kHz のローパスフィルタ処理を行った。検出された AE 信号波形は、高速波形デジタルライザで信号原

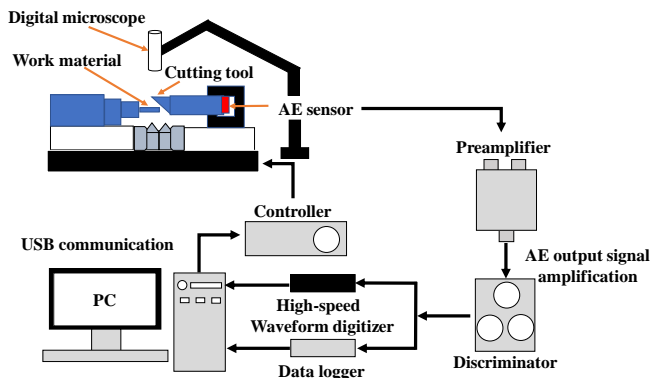


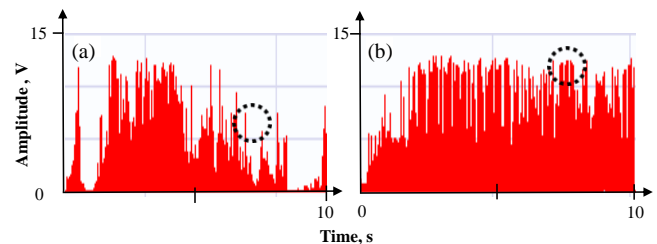
図 1 実験系および計測システムの構成図

波形の周波数解析を行うとともに、AE 信号振幅値をデータロガーで計測して評価に用いた。

加工実験は、被削材に難削材である Inconel718 を使用し、切削工具に立方晶窒化ホウ素 (CBN) を使用した。また、主軸回転数を 3000 rpm、送り速度を 60 mm/min、切込み 0.1  $\mu\text{m}$  として、乾式による外径切削を実施した。実験は、工具摩耗が進行して表面粗さが上昇するまで実験を続けた。実験データは、外径切削 1 パス (1 回) ごとに整理している。

## 3. 実験結果および考察

図 2 は、切削時にデータロガーで計測された AE 信号振幅変化を切削初期 (5 回目) と後期 (10 回目) で示した結果である。図 2 (a) の 5 回目切削時の AE 信号レベルは小さく、大振幅の突発



(a) 切削初期 (5回目) (b) 切削後期 (10回目)

図 2 切削時の AE 信号振幅変化

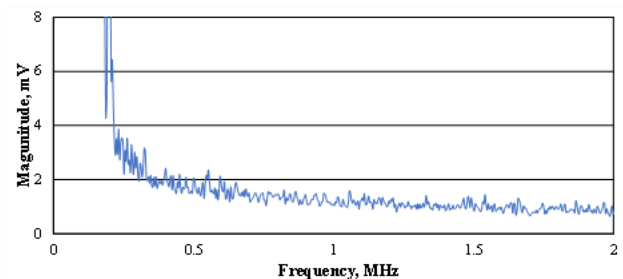


図 3 切削初期に検出された AE 信号原波形の周波数解析結果

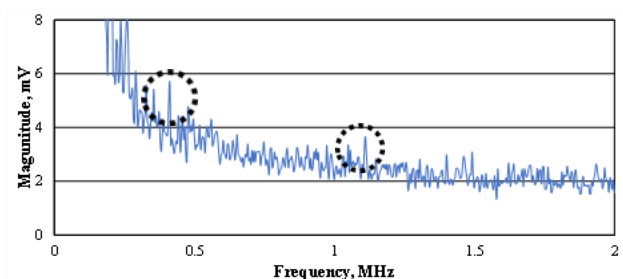
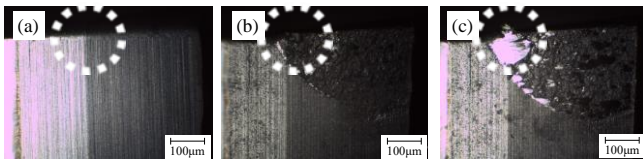
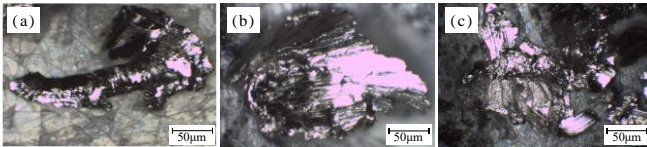


図 4 切削後期に検出された AE 信号原波形の周波数解析結果



(a) 工具未使用時 (b) 5回切削時 (c) 10回切削時  
図5 工具刃先の顕微鏡観察結果の比較



(a) 良好な切削時 (b) 異常検知時 (c) 実験終了付近  
図6 切りくずの顕微鏡観察結果の比較

型 AE 信号の検出も少ない。外径切削 1 パス中においては、AE 信号振幅の変動が確認されている。この振幅が大きく変動している箇所では、工具の摩耗が大きく進行していると考えられる。また、ここでは工具刃先の凝着現象は起こっておらず、比較的安定した切削が行えていると考える。対して、図 2 (b) の 10 回目切削時の AE 信号レベルは大きく、突発型 AE 信号の検出が多いことがわかる。この突発型 AE 信号が検出される箇所では、工具先端で異常が起こったと推察される。

図 3 および図 4 は、それぞれ図 2 に黒丸で示した部分で検出された AE 信号原波形の高速波形デジタイザによる周波数解析結果である。周波数解析の結果から、いずれの場合も 0.25 MHz 以下に大きな周波数ピークが多数みられる。これは主に、切りくずのせん断過程によるものと考えられる。一方で、図 4 の切削後期 (10 回目) の周波数解析結果は、0.25 MHz 以下の大きな周波数ピークの他に、黒丸で示したように 0.5 MHz や 1 MHz 付近にも大きな反応があり、工具刃先の異常を捉えたものと考えられる。

図 5 は、工具逃げ面の摩耗状態の比較結果である。左から工具未使用時、切削初期および切削後期の比較である。白丸の部分に着目すると、図 5 (b) では、図 5 (a) に比べ逃げ面摩耗が進行している様子がわかる。図 5 (c) では、図 5 (b) に比べさらに逃げ面摩耗が進行し、被削材の凝着も確認されている。

図 6 は、実験中に採取した切りくずの顕微鏡観察結果である。図 6 (a) は切削初期に採取した切りくずであり、長くカール状の切りくずが多くみられ、良好な切削状態であったと考える。図 6 (b) は切削状態の異常が生じたと思われる切削後期に採取した切りくずであり、細かいむしれ型の形状であることがわかる。工具摩耗の進行によって、切れ味が変わり切りくず形状にも変化が現れたと考える。図 6 (c) は実験終了付近 (12 回目) に採取した切りくずであり、他に比べて切りくずが一段と細くなっている。これは、10 回目の切削以降、凝着による工具刃先の変化が進行し、さらに切削状態が悪化したと考えられる。

図 7 は、AE 平均値 (AE 信号振幅の平均値) と表面粗さの推移を切削回数ごとに整理した結果である。この結果から、AE 平均値が小さくなると  $R_z$ ,  $R_a$  の値が小さくなり、AE 平均値が大きくなると  $R_z$ ,  $R_a$  の値が大きくなることからわかる。これは、先に述べた工具摩耗の進行に伴う切りくずの生成状態と AE 信号振幅に関係があることから説明できる。図 8 は、AE 平均値と表面粗さの  $R_a$ ,  $R_z$  の値の関係をプロットしたグラフである。この結果から、AE 平均値と表面粗さには正の相関性があることがわかる。

図 9 は、先行研究<sup>2)</sup>と同様の方法で有限要素法による二次元切削シミュレーションを実施し、本実験条件を入力して得られた切

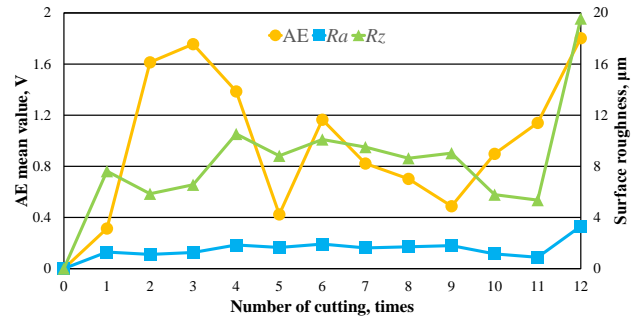


図7 切削回数による AE 平均値と表面粗さの推移

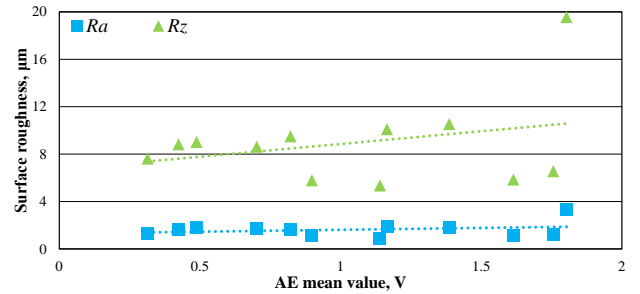


図8 AE 平均値と表面粗さの相関

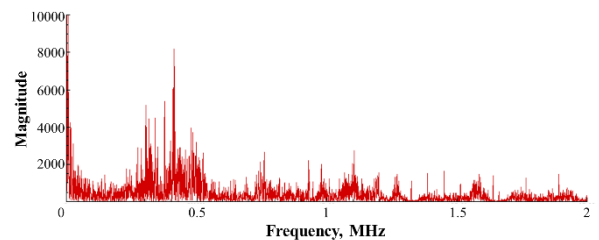


図9 有限要素法シミュレーションによる 2次元切削時の切削力変化の周波数解析結果

削力変化の周波数解析結果である。その結果、切削後期になると切削初期にはみられなかった高周波領域に周波数ピークが現れることが確認された。

#### 4. 結言

本研究では、AEセンシングを用いた超精密加工のIoT化・知能化を目指し、超小型超精密旋盤を用いた切削実験と有限要素法による二次元切削シミュレーションから、切削状態とAE信号の相関を検討した。その結果、AE信号原波形の周波数解析において、0.5 MHzおよび1 MHz付近の中・高周波領域に周波数ピークが現れた際に、工具刃先に摩耗や凝着による異常が起こっていることがわかった。また、シミュレーション解析からも類似した結果が確認された。

#### 謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 工作機械技術振興財団 第42次試験研究助成により実施した。ここに記して、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 長谷：アコースティックエミッション計測の基礎，精密工学会誌，78巻，10号，pp.856-861 (2012)
- 2) 長谷：FEMシミュレーションを用いたマイクロ切削加工時に生じる弾性応力波に関する研究，2019年度精密工学会春季大会学術講演論文集，D33，pp.343-344 (2019)