# デュアルAEセンシングによる小型工作機械のスマート状態 監視技術の開発

埼玉工業大学大学院 工学研究科

## 長谷 亜蘭

## 1. はじめに

電子機器、医療機器、航空宇宙機器などの工業製品の小型化・軽量化が進められ、その機構 部品やデバイス等のマイクロ化の要求は益々高まっている。これらの微小部品製造において、 大規模化した従来の製造ラインでは、エネルギー効率、設置スペース、設備投資、柔軟性など に関する不利益が生じることから、生産機械システムのマイクロ化(マイクロファクトリやマ イクロファブリケーションの展開)が進められている<sup>1,2)</sup>。

一方、工作物の加工精度と加工品位の維持、加工の効率化、フェールセーフなどの観点から、 加工状態の監視はとても重要である。それに加え、工作機械や製造装置の状態を最適に保ち、 そのパフォーマンスを最大限に活用することは、これからのスマート工場やものづくり DX の 実現において必要不可欠となる。工作物の小型化に関しては、加工現象が微視的になるため、 加工状態の監視を技能者の感覚に頼ることも難しくなる。工作機械や製造装置の小型化に関し ては、微視的な損傷が劣化を加速させるため、その早期検出が求められる。しかしながら、力 計測や振動計測などでは、これらの微視的な現象に対する十分な検出が期待できない。

上述した問題を解決するため、小型工作機械における加工状態監視および工作機械自体の状態監視を同時に行うデュアル AE (アコースティックエミッション) センシングを提案する。 AE センシングは、材料の変形・破壊時に生じる弾性応力波(AE 波)を AE 信号として計測す る技術であり<sup>3)</sup>、加工点のみならず軸受などからも AE 信号が計測される<sup>4,5)</sup>。これらの AE 信 号を同時に計測・解析・特徴抽出してフィードバック制御すれば、最適な加工状態を維持する ためのスマート状態監視が実現できると考える。本研究では、デュアル AE センシングによる マイクロ旋盤の状態監視を行い、工具側および主軸側から得られる AE 信号の変化および特徴 について調査している。

#### 2. マイクロ旋盤におけるデュアル AE センシング<sup>6)</sup>

本研究では、小型工作機械としてマイクロ旋盤を用いて、デュアル AE センシングの検 証実験を実施した。図1は、本実験のセットアップ概略および AE センサ位置を示してい る。超小型 AE センサをツールホルダ後方部と主軸側面に設置して、加工中の AE 信号の 同時計測を行った。ここでは、CBN 工具を用いて Inconel718 を乾式切削する実験を実施し た。主軸回転数 3000 rpm、切込み 10 µm、送り 60 mm/min で外径切削を行った。比較のた めに、新品工具と摩耗工具で実験を実施した。

図2は、摩耗工具で得られた AE 信号波形(上)とその短時間周波数解析結果(下)で ある。図2(a)は切削工具側、図2(b)は主軸側の AE センサで計測されたデータである。 まず、図2(b)の変化からわかるように、主軸の回転によって AE 信号振幅が大きくなっ ていることがわかる。この主な周波数成分は 0.1 MHz 以下であり、軸受における摩擦に起 因した AE 信号であると言える<sup>7)</sup>。対して図 2(a)の変化からは、12 s 付近から切削工具の接触が始まり、AE 信号振幅が徐々に大きくなることがわかる。周波数成分に関しては、 所々で 1 MHz 付近の信号強度が大きいことがわかる。これは、凝着現象に起因する AE 信 号であり<sup>8)</sup>、摩耗が進行して切削性能が低下し、工具刃先で被削材の凝着が発生したと言 える<sup>9)</sup>。図 3 は、新品工具で得られた AE 信号波形(上)とその短時間周波数解析結果(下)



図 1. マイクロ旋盤におけるデュアル AE センシング実験のセットアップ



図 2. 摩耗工具を用いたマイクロ旋盤加工によるデュアル AE センシング実験から得られた AE 信号波形(上)とその短時間周波数解析結果(下)

である。図2と比較すると、新品工具ではこの1MHz付近の信号強度は小さく、AE信号振幅も小さい傾向がみられることがわかった。

図4は、実験後の摩耗工具と新品工具の切れ刃すくい面の観察結果である。図4(a)の 摩耗工具では、切りくずの流れ方向に沿って摩耗とチッピング(はく離)が著しく進行し ていることがわかる。この摩耗工具は、意図的に大きな切込みで過負荷を与えて得たもの



図 3. 新品工具を用いたマイクロ旋盤加工によるデュアル AE センシング実験から得られた AE 信号波形(上)とその短時間周波数解析結果(下)



図 4. 工具切れ刃すくい面の観察結果:(a) 摩耗工具,(b) 新品工具



図 5. 切りくず生成の観察結果: (a) 摩耗工具,(b) 新品工具

であり、図2(a)においても凝着とはく離現象に起因した AE 信号波形の周波数解析結果 の特徴(AE 周波数と呼ぶ)がそれぞれ 1 MHz 付近と 0.25 MHz よりやや高い位置に現れ ていることがわかる。一方、図4(b)の新品工具では摩耗がほとんど見られず、工具先端 に被削材の凝着がわずかに確認された。この凝着に起因した 1 MHz 付近の AE 周波数の発 生が図2(b)の後半部分で現れていることがわかる。図5は、(a)摩耗工具と(b)新品 工具を使用した際の切削点における切りくず生成状態の観察結果である。図5(b)に示す 新品工具では、切りくずは短く、巻き数が 1~5 程度の良好な形状(C型または D型)で あった。対して、図5(a)に示す摩耗工具では、切りくずは長く、巻き数も 1 未満の形状 (A型または E型)であり、不良な切削状態であった。したがって、摩耗工具では切りく ずの生成および排出が劣ると言える。

以上の検証実験から、デュアル AE センシングの適用によって、切削加工の状態および 工作機械自体の状態を同時に診断・評価できることがわかった。新品工具から切削実験を 繰り返して工具摩耗を進行させる過程においても同様の傾向が得られ、主軸への負荷も検 出可能であることが確認されている<sup>10)</sup>。

## 4. 小型工作機械のスマート状態監視のための相関マップと計測アルゴリズム 11)

AE センシングを故障原因の解析・判定に活用するためには、その指針となるリファレ ンスデータが必要となる。そこで、前述した AE 周波数だけでなく AE 信号振幅値も考慮



図 6. 小型工作機械のスマート状態監視のための相関マップ

に入れた故障原因との対応関係を体系的に整理した。図6は、故障原因となりうる各種変形・破壊現象に対して AE 信号の特徴(AE 信号振幅値および AE 周波数)をまとめた相関 マップである。これを活用すれば、機械・設備で発生する故障原因に合わせた後述する計 測アルゴリズムを組むことによって、プロアクティブ状態監視の実現を図ることができる。

図6は、トライボロジー現象を骨子として作成した相関マップ<sup>5,12)</sup>を基に、小型軸受、 マイクロ切削、マイクロ研削などの様々な実験検討から得られた知見を加えてアップグレ ードしている。小型軸受に関しては、正常時および異常時において一般的な軸受と同様の 周波数ピークが確認されている<sup>7)</sup>。また、マイクロ切削加工時の工具刃先の材料凝着<sup>9,13,14)</sup> や砥粒加工時の砥面の目づまり<sup>15)</sup>が生じる際には高周波のAE信号が検出されることがわ かっている。これは、摩擦界面の不安定現象が起因していることが有限要素解析からも示 されている<sup>16)</sup>。マイクロ研削加工時や研磨加工時のAE信号の特徴は、摩擦界面で生じる トライボロジー現象(アブレシブ摩耗やマイルド摩耗など)と共通していることが確認さ れている<sup>17-19)</sup>。なお、AE信号振幅に関しては除去量(切込み量)の影響を受けるため、 図6大小関係は参考程度である。

AE センシングにおいては、AE センサの種類、取付け位置・方法、計測条件、信号処理 条件などによって、得られる AE 信号の強度や周波数特性が変化することに注意しなけれ ばならない。また、診断・評価の精度を向上させるためには、入念な事前検証を行うとと もに、実測による蓄積データの解析結果から計測アルゴリズムをしっかりと改良していく ことが肝要となる。

図7は、小型工作機械における AE センシングを活用した計測アルゴリズムの一例であ る。後述する相関マップを活用することで、加工状態監視(図7下部)のみならず軸受等 の摺動部のプロアクティブな健全性監視も同時に可能となる(図7上部)。この計測アル ゴリズムから、図6の相関マップで示した各現象に関係する AE 周波数成分で特徴抽出・ パラメータ化し、アラーム通知やフィードバック制御などを行うシステムを構築・搭載す



図 7. 小型工作機械のスマート状態監視のための計測アルゴリズムの一例

れば、加工の精度および品位の維持、効率化、フェールセーフの実現と、工作機械や製造 装置の状態を最適に保ち、そのパフォーマンスを最大限に活用したスマート工場やものづ くり DX の高度化も期待できる。

#### 5. まとめ

本研究では、二つの AE センサを用いて加工状態監視および工作機械自体の状態監視を 同時に行うデュアル AE センシングを提案し、マイクロ旋盤における検証実験を行った。 その結果、AE 信号振幅の大きさによって切削負荷(摩耗状態)を認識でき、その摩耗形 態を AE 周波数から認識できる可能性が示唆された。また、加工状態監視と同時に主軸の 健全性を摩擦や疲労摩耗に起因する AE 周波数の変化から診断・評価できる可能性がある ことがわかった。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野工業技術研究所 2024 年度(前期募集)研究助成によ る多大なご支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。また、実験データの取 得に協力いただいた埼玉工業大学 工学部 機械工学科の当時学生であった渡部航平 氏に 感謝いたします。

#### 参考文献

- 長谷亜蘭:マイクロ生産機械システム専門委員会のこれまでの歩みと現況,精密工学会誌,90
  巻,1号,pp.72-73,2024.
- 2) 長野県産業振興機構, DTF 研究会(DESKTOP FACTORY), https://dtf.ne.jp/, 2024.
- 3) 長谷亜蘭: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.
- A. Hase, M. Wada, T. Koga, H. Mishina: The Relationship between Acoustic Emission Signals and Cutting Phenomena in Turning Process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70, pp.947-955, 2014.
- A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, Vol.8, 37, 2020.
- A. Hase: Proactive condition monitoring for super-small ultra-precision lathes using dual AE sensing, Proc. of the 18th CHINA-JAPAN International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP 2024), pp.218-227, 2024.
- 7) 長谷亜蘭:ミニチュア玉軸受における転動状態の AE センシング, 2022 年度精密工学会春季大 会学術講演論文集, pp.205-206, 2022.
- A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, Tribology International, Vol.72, pp.51–57, 2014.
- A. Hase: Study on Monitoring and Control of Machining Process by Acoustic Emission Technique, Proc. of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 156, 2017.

- 10) 渡部航平,長谷亜蘭:マイクロ工作機械における切削状態と主軸運転状態の同時監視のための デュアル AE センシング,2025 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,pp.37-38,2025.
- 11) 長谷亜蘭:AE センシングを活用したマイクロ生産機械システムのプロアクティブ状態監視, 2025年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.33-34, 2025.
- A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, Vol.292-293, pp.144-150, 2012.
- A. Hase: Proactive condition monitoring for super-small ultra-precision lathes using dual AE sensing, Proc. of the 18th CHINA-JAPAN International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP 2024), pp.218-227, 2024.
- A. Hase: In Situ Measurement of the Machining State in Small-Diameter Drilling by Acoustic Emission Sensing, Coatings, Vol.14, No.2, 193, 2024.
- 15) 今井幸輝,長谷亜蘭:砥粒加工における AE センシングを用いたトライボロジー現象変化の検出, 2021年度砥粒加工学会学術講演会論文集, pp.246-247, 2021.
- 16) 長谷亜蘭: 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, pp.343-344, 2019.
- 17) 今井幸輝,長谷亜蘭:マイクロ研削盤における AE センシングに関する基礎研究—ガラス研削時における砥石の性能変化の評価—,2021年度精密工学会春季大会学術講演論文集,pp.555-556,2021.
- 18) 長谷亜蘭: 砥粒表面におけるトライボロジー現象変化のデュアル AE センシング, 2022 年度砥 粒加工学会学術講演会論文集, pp.120-121, 2022.
- 19) 長谷亜蘭・宮岡秀治:研磨・琢磨機におけるポリシング状態の AE センシング, 2024 年度砥粒 加工学会学術講演会論文集, pp.1-2, 2024.