

経常研究

AE センサを用いた工具摩耗状態の監視

棚原 貴登* 近藤 弘康* 松本 健司*

Monitoring of Tool Wear with Acoustic Emission Sensor
TANAHARA Takato, KONDO Hiroyasu and MATSUMOTO Kenji

金属等の材料が破壊される際に発生する弾性波を検出可能な AE センサを用いて、切削加工における工具摩耗・欠損等の工具状態を推定することを目的とし、工具摩耗状態及び欠損状態が AE に及ぼす影響を調査し、工具欠損状態推定手法の開発を行った。その結果、取得した AE 波形に対して FFT 解析を用いることで、AE センサで取得した値と切削力に比例関係があることが分かり、摩耗状態を推定できる可能性を示した。また、欠損の位置及び大きさによって AE 波形が変化することが分かり、開発した工具欠損状態推定手法において、切削動力計では判断できない 30 μ m 程度の微細な欠損を検知できた。

Key words: 工具摩耗, 工具欠損, 切削力, AE センサ, 機械学習

1 はじめに

近年、航空業界では部品価格の低下に伴う部品製造コストの削減が大きな課題となっている。特に難削材の加工においては、製造コスト全体の中でも工具コストの占める割合が大きく、工具コストの削減が重要視されている。また、製品不具合が発生した場合、再製作にかかるコストが余分に発生してしまうため、不具合リスクの低減も加工現場では常に意識されている。

一方、航空機部品の加工現場では加工時間や加工ロットで工具を管理し、工具交換が行われているため、まだ使用できる工具を早期に交換しているという課題がある。

加えて、製品不具合の 1 つとして、仕上げ工程において微細な欠損が生じたことに気づかず、加工を継続することで欠損が大きくなり、結果として製品仕上げ面にスジが残ってしまい、後工程にて手作業による磨きが必要となるケースがある。

このため、切削加工現場では工具コストの削減、欠けの早期発見を目的として、工具の摩耗・欠損を監視する手法が求められている。

令和 2 年度の研究において、AE センサを用いることで工具が定常摩耗から終期摩耗に移行する様子が確認できた¹⁾が、このとき用いた AE センサ (エヌエフ回路設計ブロック AE-901S) は 70kHz 共振型であったため、数百 kHz 以上の帯域での反応は十分に確認できていなかった。

そこで本研究では、広帯域型の AE センサ (エヌエフ

回路設計ブロック AE-900S-WB) 及び最大 200MS/s まで取得可能なデータロガー (横河計測 DL950) を用いることで、数十 kHz~数 MHz の広い範囲で工具摩耗及び工具欠損が AE に及ぼす影響を調査した。

その結果から、工具切れ刃の微細な変化を検出することが可能な AE センサ²⁾を用いて工具欠損状態を監視する手法を開発したので報告する。

2 研究の方法

2.1 工具摩耗状態が AE に及ぼす影響

図 1 に示す段取りで、エンドミルを用いて初期摩耗から終期摩耗に至るまで切削試験 (以下、摩耗試験) を複数回行い、切削動力計や刃先画像から得られた工具摩耗状態と AE との関係性を評価した。なお、工具摩耗の進展に伴って切削力が上昇することは一般的に知られているため、切削力と AE との相関関係を示すことで工具摩耗状態を推定することを目指した。

加工機は 3 軸マシニングセンタ (安田工業 YBM640V III) を用いた。また、被削材は 64 チタン (ASTM B348 Gr.5) とし、加工工具は工具の振れによって半径方向切込み深さが変化しないよう、新品の 2 枚刃スクエアエンドミル (MOLDINO HES2060) をグラインダで 1 枚刃に刃落として使用した。

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

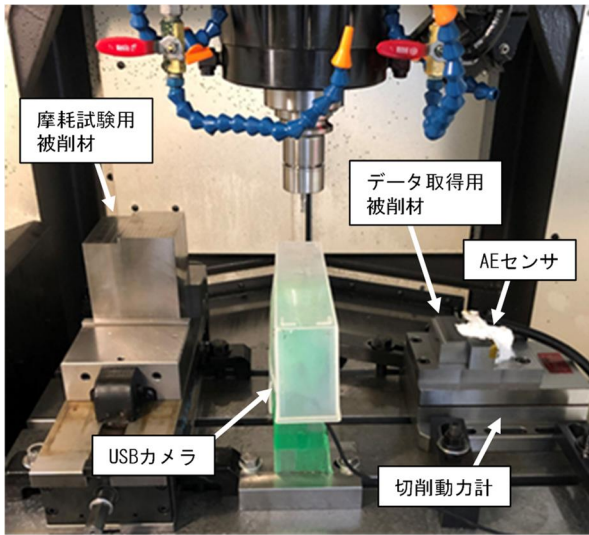


図1 摩耗試験段取り

表1 工具・切削条件

工具	径	6mm
	形状	スクエアエンドミル (アタリ付き)
	コーティング	なし
	母材	超硬
	刃数	2枚刃→1枚刃 (グラインダで刃落とし)
切削条件	切削速度	200mm/min
	1刃切込み	0.1mm/tooth
	軸方向切込み	3.0mm
	半径方向切込み	0.1mm
	切削油	WET

切削条件は表1のとおりとし、片削りの摩耗試験を刃先が大きく欠けるまで実施した。

また、切削力とAEのデータ取得方法は、切削動力計(日本キスラー 9265B)に64チタン被削材を固定した治具を取り付け、被削材に広帯域型AEセンサ(エヌエフ回路設計ブロック AE-900S-WB)を設置し、切削動力計とAEセンサから得られるデータを切削長10m毎に取得した。なお、AEはサンプルレート10MS/sでデータ取得を行った。またAEセンサは防水対策のためシリコン(信越化学工業 KE-45-W)を表面に塗布した。

2.2 工具欠損状態がAEに及ぼす影響

機械加工によって所定の位置を任意の大きさに欠損させた工具を用いた切削試験(以下、欠損試験)を行い、工具欠損状態がAEに及ぼす影響を調査した。

試験工具は、摩耗試験と同様の新品6mmスクエアエンドミルをグラインダで1枚刃に刃落としした工具を5本用意し、その内4本にワイヤ放電加工機(ソディック

表2 試験工具の傷の位置と大きさ

工具 No	刃先先端からの位置 [mm]	傷の大きさ [μm]
1	なし	なし
2	1	10
3	1	20
4	1	30
5	2	30

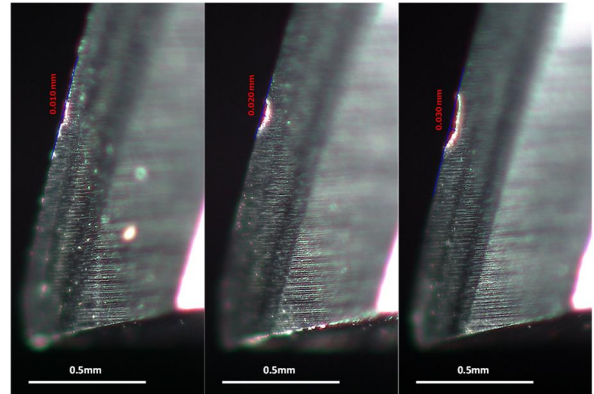


図2 試験工具の顕微鏡写真(傷の大きさ)

左から: No.2(10μm), No.3(20μm), No.4(30μm)

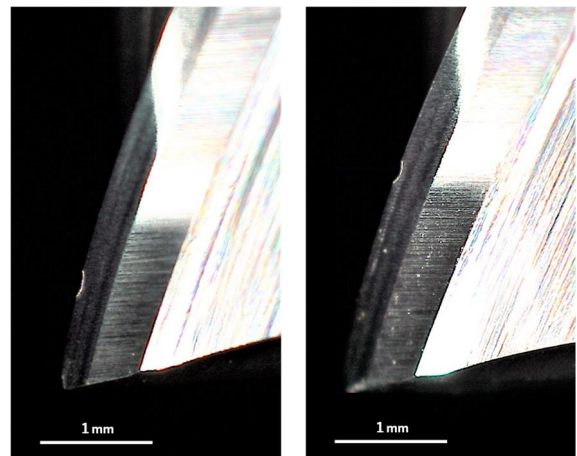


図3 試験工具の顕微鏡写真(刃先先端からの位置)

左: No.4(1mm), 右: No.5(2mm)

VL600Q)を用いて、欠損を模した傷を付けた。各工具の傷の位置と大きさを表2に示す。また、デジタルマイクロスコープ(ハイロックス KH-8700)で撮影した試験工具の顕微鏡写真を図2、図3に示す。

試験段取り及び切削条件については、2.1の摩耗試験と同様とし、データ取得用被削材のみを切削して試験工具毎の切削力及びAE波形を取得した。

次に、工具の傷の大きさが加工面に与える影響を調

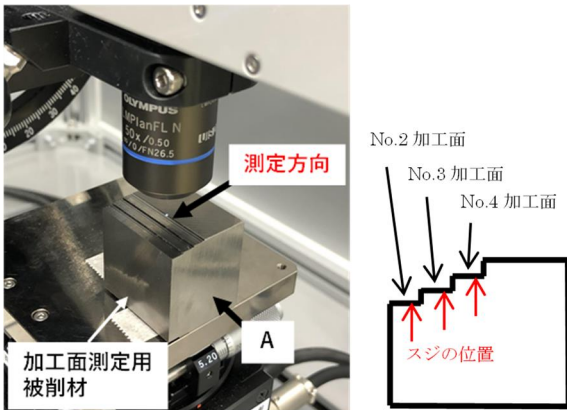


図4 左:測定方向, 右:A の方向から見た参考図

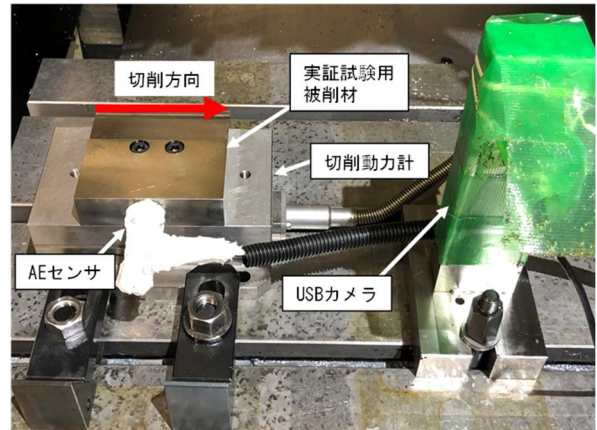


図5 実証試験段取り

査するため、非接触輪郭形状測定機（三鷹光器 MLP-3SP）を用いて試験工具毎の加工面の状態を観察し、工具傷による加工面のスジ高さを測定した。

なお、加工面測定用被削材は 64 チタン材を別に用意し、図 1 の摩耗試験用被削材を取り外したバイスで固定した。欠損試験後に工具 No. 2~4 を用いて欠損試験と同条件で加工面測定用被削材に側面切削を行った後、加工面を図 4 の測定方向で、削り始め、中心付近、抜け際の 3 か所を測定した。

2. 3 工具欠損状態推定手法の開発

2. 1 及び 2. 2 の結果を踏まえ、工具摩耗及び欠損状態を監視可能なデータ処理プロセスを検討するとともに、AE センサから取得したデータを入力すれば工具状態を自動判定するシステムの開発を行った。

2. 4 実証試験

開発したシステムの実証のため、切削試験中すべての加工時のデータを取得する実証試験を行った。なお、実証試験の加工機、被削材材質、工具、切削条件は 2. 1 と同様とし、切削動力計は被削材の都合上、日本キスラー 9257B を用いた。AE のサンプルレートについては、長時間のデータ収集が必要であること、また今後加工現場への適応を想定し、データ容量が少ない必要があることを考慮して、これまでの 10MHz から 1MHz に変更した。実証試験の段取りを図 5 に示す。

3 結果及び考察

3. 1 工具摩耗状態が AE に及ぼす影響

3. 1. 1 FFT 解析による結果

全部で 3 回行った摩耗試験の中で、1 回目の摩耗試験から得られた AE 波形に FFT 解析を行った結果を図 6 に示す。切削の進行に伴って 14kHz 付近に波形が見られたため、14kHz 付近の振動が工具摩耗に起因していると予

想した。

そこで、切削力は主成分力のピーク平均値、AE は 12~16kHz 間の最大振幅値を用いて、切削長毎にプロットしたグラフを図 7 に示す。その結果、AE は切削力と同様に右肩上がりグラフが推移し、摩耗の進展とともに上昇傾向であることが観察できる。

また、再現性を確認するため同一条件の試験を再度行った 2 回目の摩耗試験の結果について、切削長に対する切削力と AE の変化を図 8 に示す。AE のスケールが異なるものの、図 7 と同様に切削力との比例関係が確認できる。AE のスケールが異なる理由は、被削材の切削量によって切削位置と AE センサとの距離が変化するため、距離の差が AE の値にも影響した可能性等が考えられる。

次に、1 回目と 2 回目の切削力と AE の関係を図 9 に示す。1 回目と 2 回目の試験で切削力と AE の傾きが異なる結果となったが、どちらも線形性が見られるため、摩耗状態の推定ができる可能性を示せたと考えられる。

なお、3 回目に行った摩耗試験では、1 回目 2 回目と比較して、早い段階で工具に欠損が発生したため、工具摩耗状態の評価としてデータを扱うには適していないと判断し、欠損発生の時点で試験を終了した。

以上の結果から、AE センサで取得した値と切削力に比例関係が確認できたため、AE センサを用いることで工具摩耗状態を推定できる可能性があることが分かった。

一方、今回の結果は同一の加工条件下であっても切削力に対する AE の傾きが異なる場合があることから、加工現場への適用のためには更なる検討が必要と考えられる。

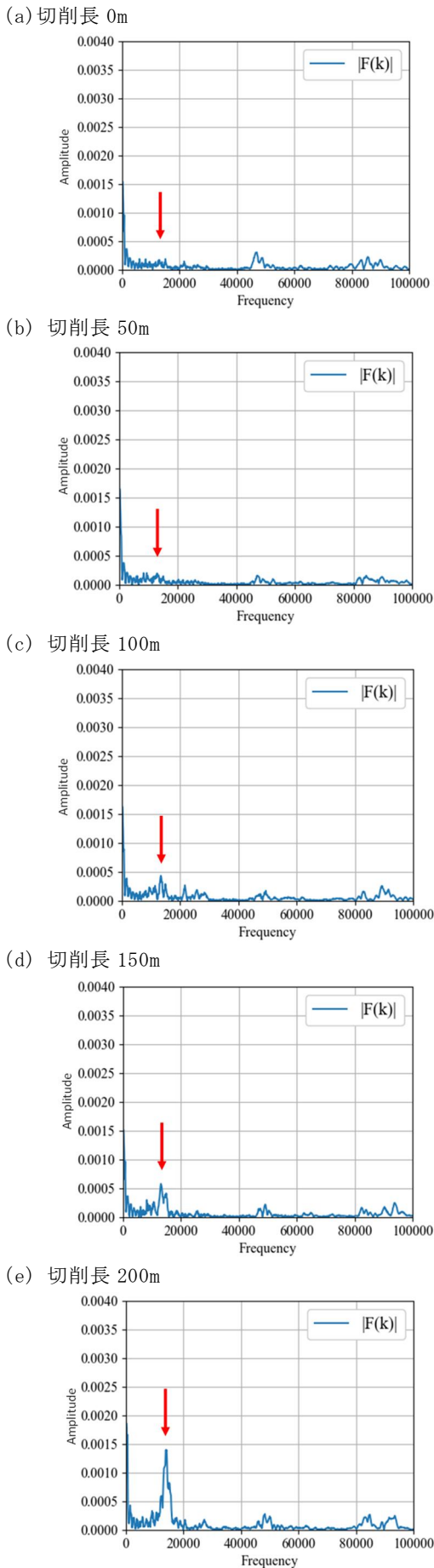


図6 AE FFT 解析結果

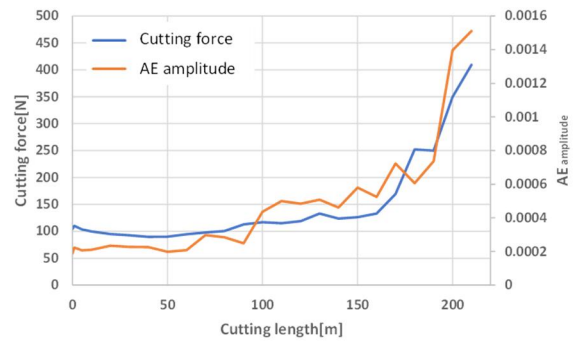


図7 切削長に対する切削力と AE の変化(1 回目)

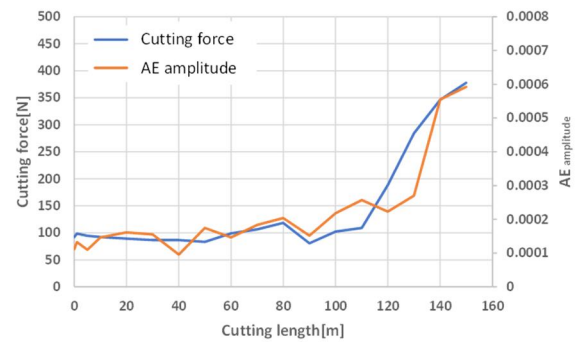


図8 切削長に対する切削力と AE の変化(2 回目)

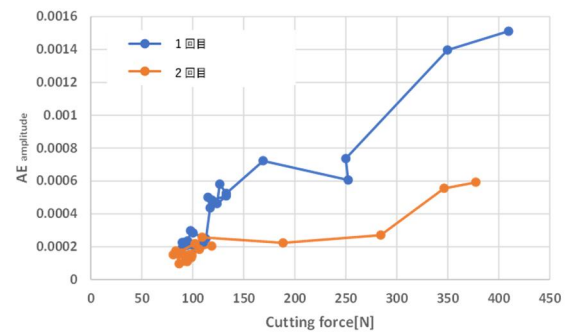


図9 切削力と AE の関係

3. 1. 2 機械学習による結果

今年度は切削試験に使用できる工具に限りがあり、機械学習に十分なデータが揃わなかったため、今年度の条件に近い令和2年度の研究¹⁾の4回分の摩耗試験データから、3回分を学習用データ、1回分をテストデータとして使用し、工具摩耗状態とAEの関係性を調査した。

なお、調査に用いた4回の摩耗試験はすべて同様の試験条件で行っており、試験工具は超硬母材のノンコーティング2枚刃φ6mmのスクエアエンドミル(不二越2CE6)を表1の試験工具と同様にグラインダで1枚刃に刃落として使用した。また、AEセンサは共振型のAE

センサ(エヌエフ回路設計ブロック AE-901S)を使用してサンプルレート 1MHz でデータ取得を行っており、切削液を使用せずにドライ加工で試験を行った。その他の試験条件は2. 1と同様である。

取得した AE 波形から時系列データとしての特徴量を算出し、切削力との相関がある特徴量を選定したところ、AE 波形から切削力を予測させて摩耗状態を推定できる可能性が伺えた。このとき、切削力の評価は XY 方向の合成成分の実効値を用いた。図 10 に切削動力計から取得した切削力(横軸)と、AE 波形から機械学習を用いて予測した切削力(縦軸)をプロットしたところ、予測した切削力に多少ばらつきはあるものの、比例関係が見られ、AE 波形から予測した切削力は切削動力計から取得した切削力に近い値と言える。

ただ、本手法については過去のデータでのみ検証しており、試験条件が異なる今回のデータへの有効性は確認できていない。

今後データを蓄積し、本手法で工具摩耗状態を推定できるか検証を進める。

3. 2 工具欠損状態が AE に及ぼす影響

欠損試験のデータ取得における約 4 秒間の試験切削中の AE 波形は、削り始め及び抜け際は波形が不安定であり、中心付近はセンサ設置位置に近づくにつれて波形が大きくなる傾向があった。そのため、削り始めを 0 秒として、比較的波形が安定している 0.5~1.25 秒間、2.75~3.5 秒間の中から、1.0~1.1 秒の 0.1 秒間の波形を抽出し、その中で 1 刃切削毎の 18 波形を平均化した平均波形を作成した。なお、本研究では実験的に波形安定区間を選択して波形を抽出しているため、今後実用化に向けて、波形抽出について更なる検討が必要である。作成した平均波形の RMS の移動平均を取得した結果、試験工具の欠損の大きさによって波形に変化が見られた(図 11~15)。

また、工具のねじれ角及び切削条件から、被削材への

1 刃接触時間及び傷の接触時間を計算したところ、RMS 値に反応が現れている部分と傷の接触時間が概ね一致する結果となった。傷の接触時間は図 12~15 の網掛部分で示す。

一方、傷の位置による AE 波形の変化を確認したところ、図 15 に示すように RMS 値に反応が現れている部分が、他の試験工具と比較すると右にスライドしており、刃先から 2mm の位置にある幅約 0.1mm の傷が被削材に接触する時間である、約 3.44ms~3.80ms 間(図 15 網掛部)と概ね一致した。

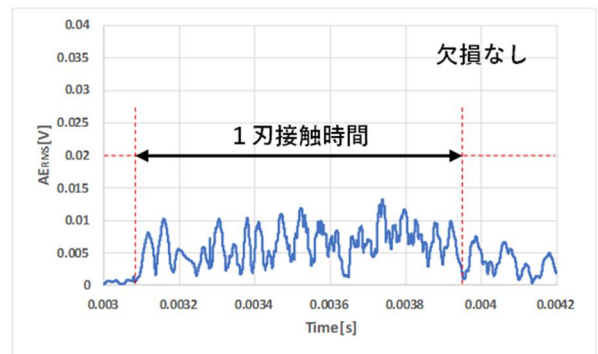


図 11 AE の RMS 波形 No. 1(欠損なし)

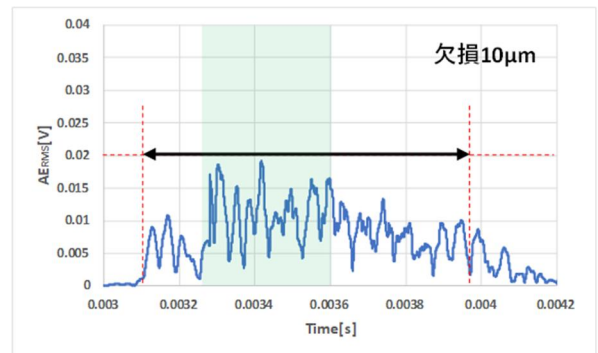


図 12 AE の RMS 波形(網掛部: 傷の接触時間) No. 2(欠損 10 μ m)

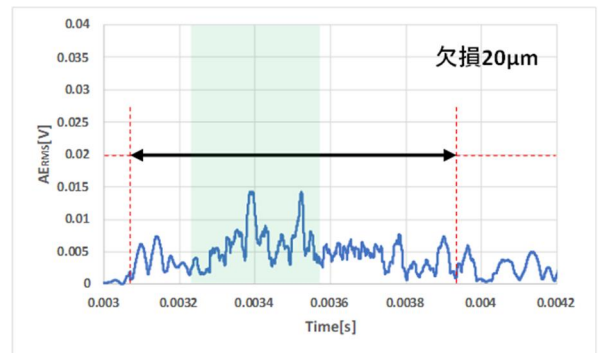


図 13 AE の RMS 波形(網掛部: 傷の接触時間) No. 3(欠損 20 μ m)

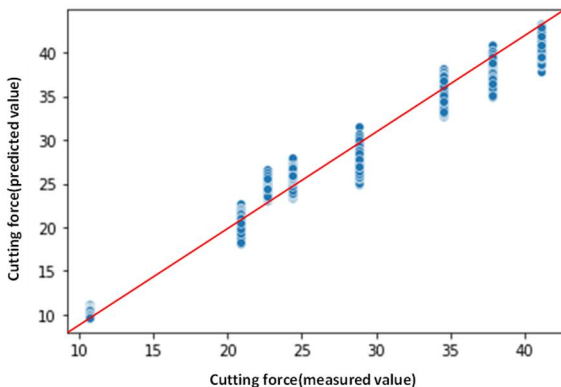


図 10 切削力実測値と予測値の関係

また、切削力は主分力のピーク平均値、AEはRMSの最大値を用いて、試験工具毎にプロットしたグラフを図16に示す。試験工具毎の切削力を比較すると、傷の有無、大きさに関わらず、大きな変化は見られない。そのため、 $30\mu\text{m}$ までの工具欠損は切削力に影響を与えないと考えられる。

一方、試験工具毎のAEのRMS最大値を比較すると、工具No.1~3まではほぼ一定だが、No.4及びNo.5では高い値を示した。

以上の結果から、AEを用いることで切削力では捉えられない $30\mu\text{m}$ 程度の欠損に伴う変動を検知できる可能

性が伺える。

次に、工具No.2~4でそれぞれ加工した加工面のスジの高さを測定した結果から、加工面中心付近のスジの位置を拡大表示したものを図17~19に示す。その結果、 $30\mu\text{m}$ の工具欠損では $10\mu\text{m}$ 程度の高さのスジとなった。なお、削り始め、抜け際についても同様の結果となった。

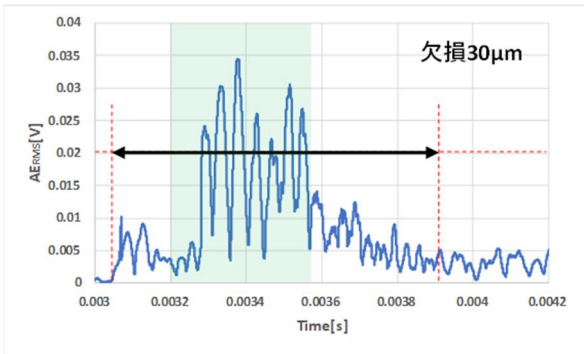


図14 AEのRMS波形（網掛部：傷の接触時間）
No.4(欠損 $30\mu\text{m}$)

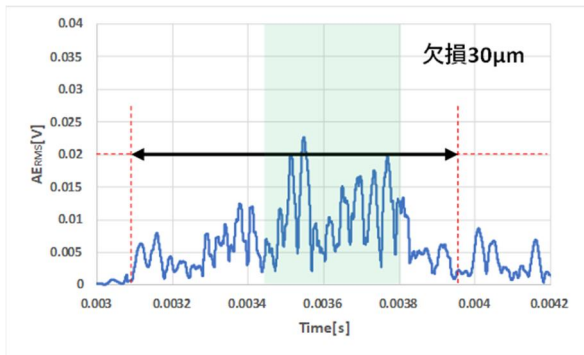


図15 AEのRMS波形（網掛部：傷の接触時間）
No.5(欠損 $30\mu\text{m}$ ，欠損位置刃先から2mm)

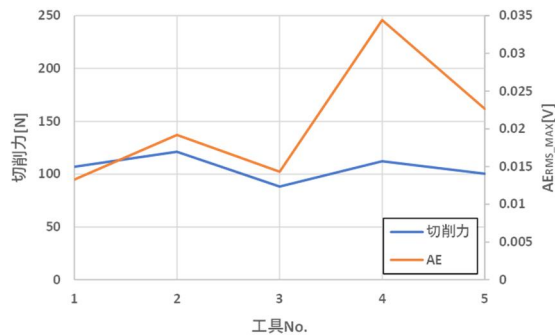


図16 試験工具毎の切削力とAEの変化

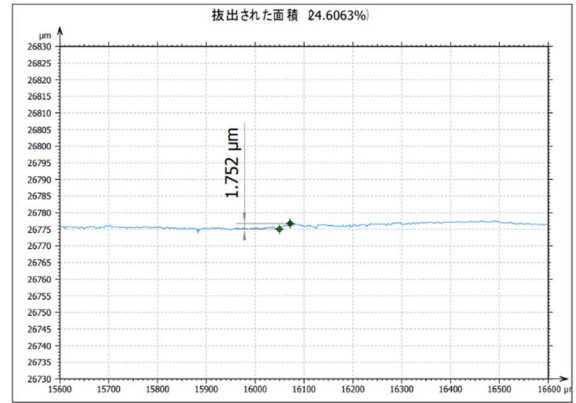


図17 加工面測定結果
No.2(欠損 $10\mu\text{m}$)

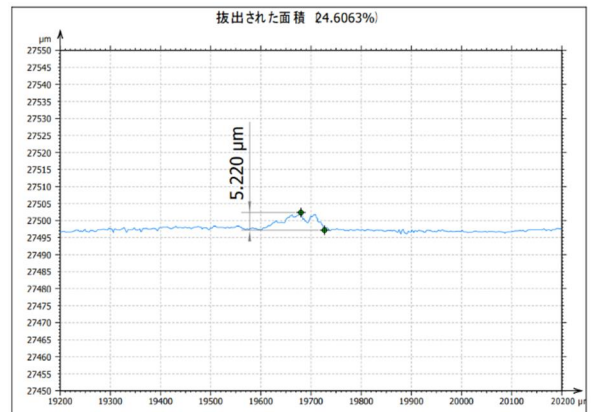


図18 加工面測定結果
No.3(欠損 $20\mu\text{m}$)

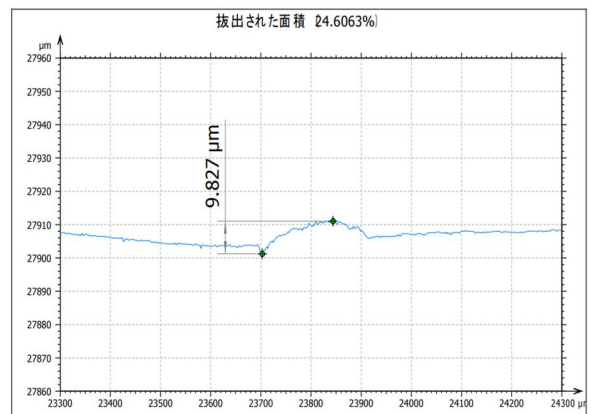


図19 加工面測定結果
No.4(欠損 $30\mu\text{m}$)

3.3 工具欠損状態推定手法の開発

これまでの結果から、3.1で評価を行った工具摩耗状態の推定については加工現場への適用のためには更なる検討が必要である。一方、3.2で評価を行った工具欠損状態の推定については、切削力では捉えられない微細な欠損をAEセンサで検知できることから、今回は3.2の結果を基に工具の欠損検知を行う手法の開発を目指した。

3.3.1 しきい値判定による欠損検知

今年度行った複数の切削試験から、欠損が発生した際のAE波形のしきい値を決定し、しきい値による自動判定での実装とした。なお、AE波形の処理方法は3.2と同様のRMS処理を行った。

切削長1m毎に欠損判定を行った結果、図20に示すとおり切削長14mで波形がしきい値を超え、欠損検知を意味するNG判定を出した。このときの刃先画像を確認すると、図21に示すとおり、NG判定が出た切削長14mで、約25 μ mの欠損が発生していることが確認できた。

以上の結果から、加工条件が同一の場合にのみ適用できるという条件付きではあるものの、しきい値判定によって約25 μ mの欠損が発生した際に欠損検知の判定を出すことに成功したと言える。なお、現状の判定処理は変更可能な実装となっているため、判定精度向上を目指して、今後も判定基準の検討を進める。

次に、欠損約30 μ mとなった切削長15m時点の加工面のスジについて、非接触輪郭形状測定機を用いて測定した結果を図22に示す。

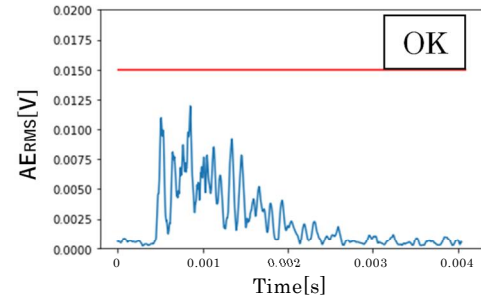
結果は、切り始め、中心付近、抜け際の3か所を測定し、スジの大きさは4.0~5.5 μ m程度であった。図22に中心付近の測定結果を示す。3.2と比較して小さい値となった原因は、人工的な傷と違い工具に広い範囲で摩耗及び微細な欠損が生じているため、値がならされたこと等が考えられる。

3.3.2 機械学習による欠損検知

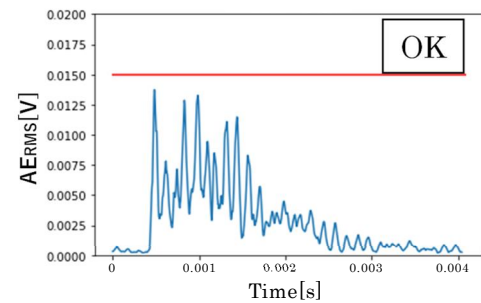
図14から欠損を有する工具による切削では、急峻な変化を含む波形であることが予想される。そこで、AEセンサ出力波形をウェーブレット解析し、取得した周波数に関するデータを比較することで、工具欠損の有無を推定することが出来ると考えた。

今年度行った切削試験の内、2.1で行った3回の摩耗試験を学習用データ、2.4で行った実証試験をテストデータとし、工具欠損有無の推定モデル作成を検討した。当該学習用データの特徴量を主成分分析し、テストデータを同次元に埋め込んだプロットを図23に示す。学習用データは、想定通り欠損の有無が反映された分布を形成しているが、テストデータは大きく外れた分布を

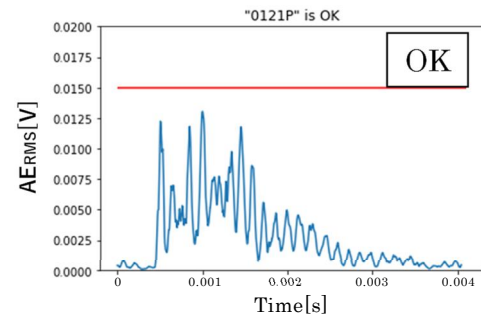
(a) 切削長 8m



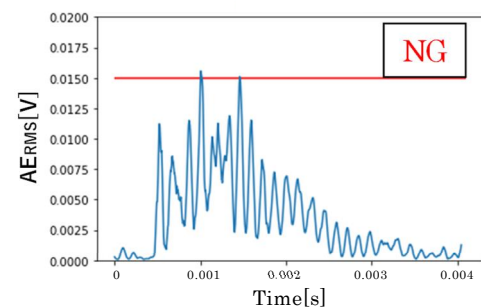
(b) 切削長 10m



(c) 切削長 12m



(d) 切削長 14m



(e) 切削長 15m

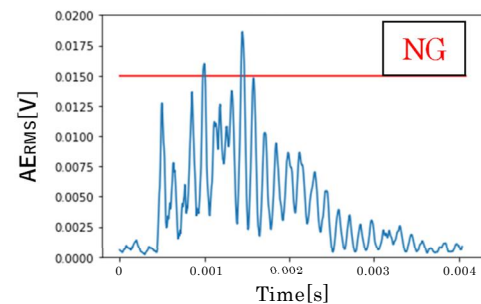


図20 欠損検知判定結果

形成している。

このことから、学習は良好に実施できることが予想できるが、作成したモデルはテストデータには適応が難しいと判断した。テストデータにおいて分布が大きく外れた原因は、実証試験ではサンプルレートをこれまでの10MHz から 1MHz に変更したことが影響したと考えられる。

次に、サンプルレート 10MHz で試験を行った 3 回の摩耗試験の内、最もデータ数の少ない 3 回目の摩耗試験を

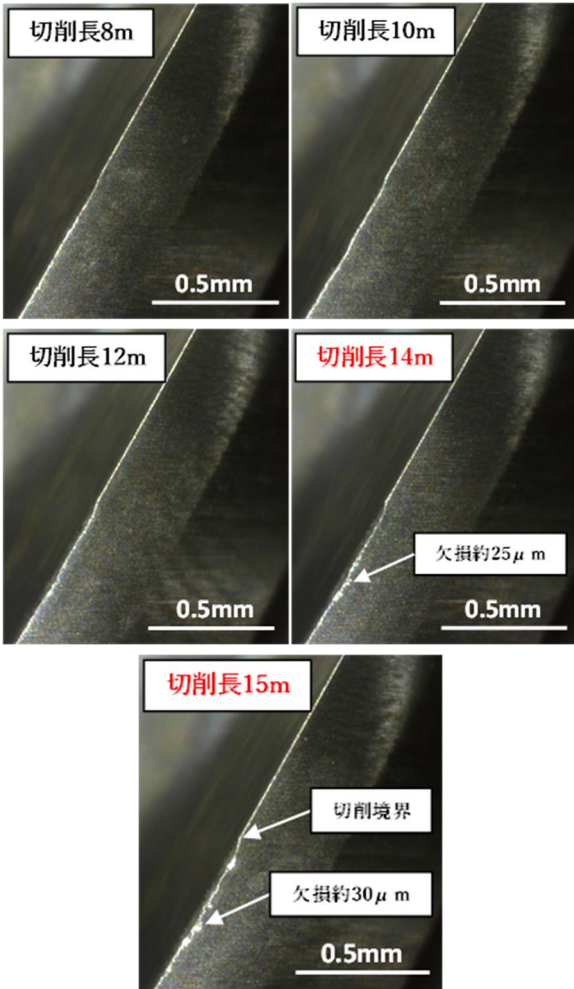


図 21 実証試験刃先画像

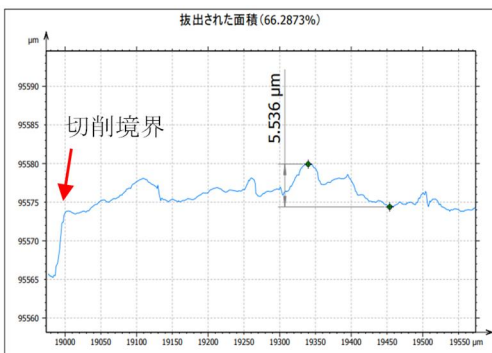


図 22 加工面測定結果 切削長 15m

テストデータ, 1 回目及び 2 回目を学習用データとし, 同モデルに推定させた推定結果を図 24 に示す。図 25 に示した刃先画像と比較すると, 切削長 20m の欠損発生に伴いモデル出力が異常を示すようになっており, 良好な推定結果を得られたことが分かる。当該学習用データの特徴量を主成分分析し, テストデータを同次元に埋め込んだプロットを図 26 に示す。テストデータは学習データ分布内に位置しており, 2 次元プロットでは欠損の有無の境界線が分かりづらいが, 3 次元プロット及び図

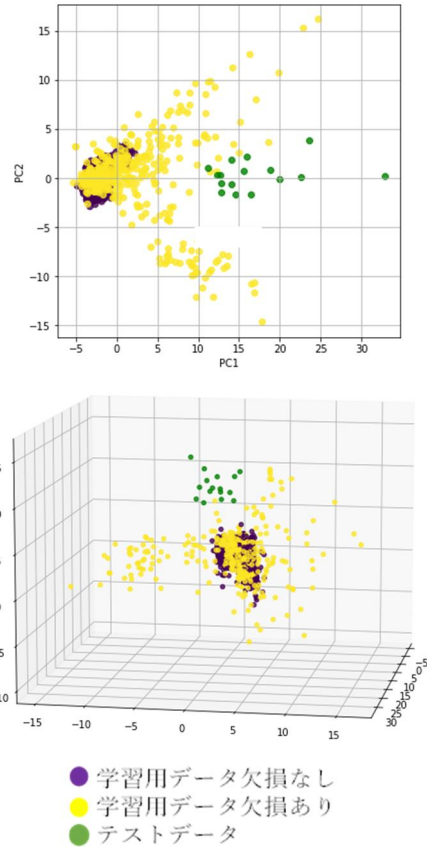


図 23 機械学習による主成分分析プロット (上: 2 次元, 下: 3 次元)

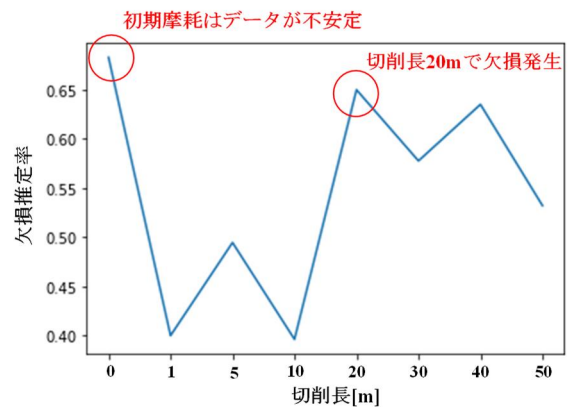


図 24 機械学習による工具欠損推定結果

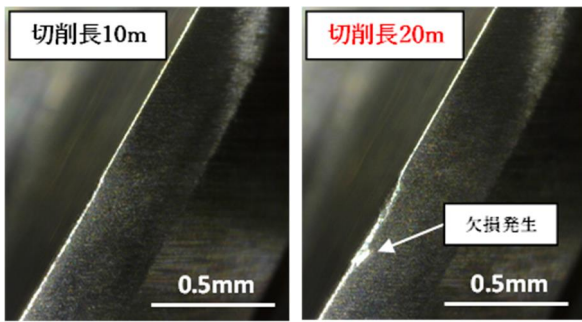


図 25 2 回目の摩耗試験の工具刃先画像

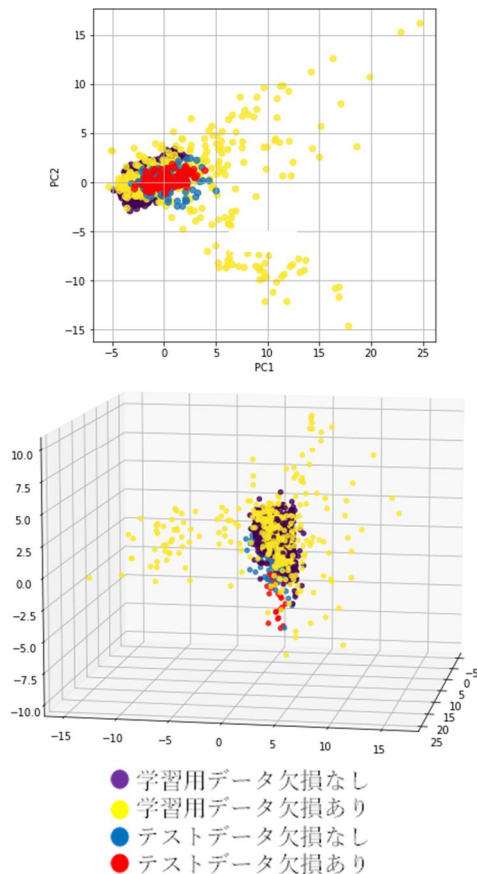


図 26 機械学習による主成分分析プロット
(上：2次元，下：3次元)

24 の結果からも分布に違いが出ていることが分かる。

以上の結果より、同一試験条件でのみ適用可能ではあるものの、機械学習を用いることで、工具欠損状態を推定できる可能性がある。

4 おわりに

本研究では、AE センサを用いた摩耗や欠損等の工具状態推定を目的として、工具摩耗及び工具欠損が AE に及ぼす影響を調査し、工具欠損状態推定手法を検討することで、以下の知見を得た。

- (1) 工具摩耗の進展に伴い 14kHz 付近の周波数帯に反応が見られ、切削力の主成分のピーク平均値と AE の 12~16kHz の最大振幅値に比例関係が確認できる。
- (2) 工具欠損の大きさ及び位置により、AE 波形に変化が現れ、切削力では判断できない 30 μ m 程度の微細な工具欠損を検知できる。
- (3) 開発した工具欠損状態推定手法において、しきい値判定または機械学習を用いることで、自動で工具欠損状態が推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 古賀 俊彦ほか：“トライボロジスト”，63(7), 487-498, (2018)