

経常研究

立壁切削加工における AE センサを用いた工具欠損状態監視

棚原 貴登* 近藤 弘康* 西宮 紹* 松本 健司*

Monitoring of Tool Failure by Acoustic Emission Sensor in Vertical Wall Cutting
TANAHARA Takato, KONDO Hiroyasu, NISHIMIYA Sho and MATSUMOTO Kenji

立壁切削の仕上げ加工等に見られる工具軸方向切込みが大きく同時切削刃数が複数となる加工において、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、工具欠損状態が AE に及ぼす影響を調査することで、工具欠損検知手法の開発を行った。その結果、欠損の大きさによって AE 波形が変化することや、加工面に影響が現れる前の僅かな欠損を検知できることが分かった。また、開発した工具欠損検知手法において、しきい値判定を用いることで自動での工具欠損検知に成功した。

Key words: 工具状態監視, 工具欠損検知, AE センサ, 立壁切削加工, 同時切削刃数

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。

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。

そのため、令和 4 年度の研究において、エンドミル側面切削中の AE センサから得られる情報を用いて、エンドミル側面刃における 30 μm 以上の欠損を検知する手法を開発した¹⁾。

このときは、欠損検知を可能としたのは、エンドミル側面刃の同時切削刃数が 1 枚の場合に限られたが、航空機部品では立壁形状が多く、当手法の適用対象を軸方向切込みが深く、同時切削刃数が複数となることが多い立壁切削加工等に応えるためには、エンドミル側面刃の同時切削刃数が複数となる場合においても工具欠損状態を推定する手法が必要である。

そこで本研究では、同時切削刃数が複数の加工において、工具欠損が AE に及ぼす影響を調査し、その結果から、工具欠損検知手法を開発したので報告する。

2 研究の方法

2. 1 同時切削刃数及び欠損状態が AE 波形に及ぼす影響

試験工具は、新品の φ 6mm スクエアエンドミル (MOLDINO HESM4060) を 6 本用意し、その内 5 本の工具にワイヤ放電加工機 (ソディック VL600Q) を用いて、欠損を模した傷を付けた (4 枚刃の内 1 枚のみ)。各工具の傷の位置と大きさを表 1 に、刃先の顕微鏡写真を図 1 に示す。

加工機は 3 軸マシニングセンタ (安田工業 YBM640ver III) を用いて、テーブル上に 64 チタン被削材 (ASTM B348 Gr. 5) 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) を設置した。

なお、AE センサは防水対策のためシリコーンゴム (信越化学工業 KE-45-W) を表面に塗布した (図 2)。また、AE 取得のサンプリングレートは 1MHz とした。

表 1 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]	傷の深さ [mm]	傷の幅 [mm]
1	なし	なし	なし
2	1.88~2.13	0.1	0.25
3	1.7~2.2	0.1	0.5
4	1.2~2.2	0.1	1.0
5	1.7~2.2	0.2	0.5
6	1.2~2.2	0.2	1.0

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

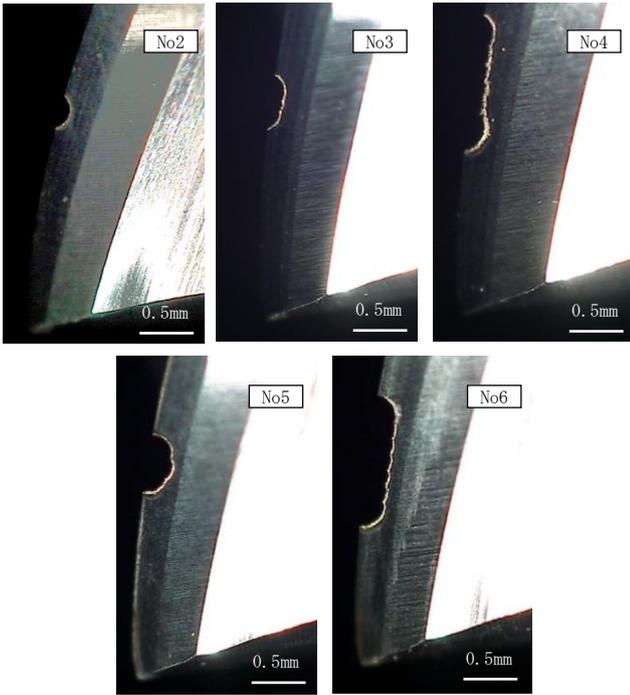


図1 試験工具刃先の顕微鏡写真

切削条件は、切削速度 $V_c=15\text{m/min}$ 、1刃送り $f_z=0.025\text{mm/tooth}$ 、径方向切込み $a_e=0.1\text{mm}$ とし、軸方向切込みについては $a_p=12\text{mm}$ 、 16.316mm の2パターンの片削りで試験を実施した。軸方向切込みについては、工具ねじれ角から計算した刃のピッチから、 $a_p=12\text{mm}$ は同時切削刃数が1~2枚で変動する条件、 $a_p=16.316\text{mm}$ は常に同時切削刃数が2枚になる条件である。

2.2 工具欠損状態推定手法の開発

2.1の結果を踏まえ、工具欠損状態を推定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から工具欠損有無を自動判定するシステムの開発を行った。

2.3 実証試験

開発したシステムの実証のため、新品工具を用いて欠損検知判定が得られるまで加工を継続する切削試験を行った。

試験段取りは図3のとおりとし、試験方法は、USBカメラによる刃先撮影、データ取得切削及び工具を消耗させるための切削を繰り返し行った。

なお、加工機、被削材材質、工具、データ取得切削の条件は2.1と同様とし、軸方向切込みについては、同時切削刃数が変動することでより複雑な加工となる $a_p=12\text{mm}$ とした。また、工具を消耗させるための切削条件は、消耗の効率を考慮し、切削速度 $V_c=50\text{m/min}$ 、1刃送り $f_z=0.1\text{mm/tooth}$ としたが、この切削条件では刃先の摩耗が進行するだけで、欠損が見られなかったため、徐々に切削速度を上げていき、最終的に切削長 119m 以

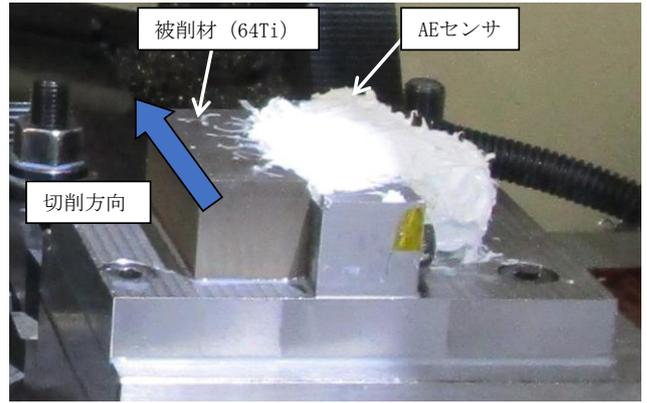


図2 切削試験段取り

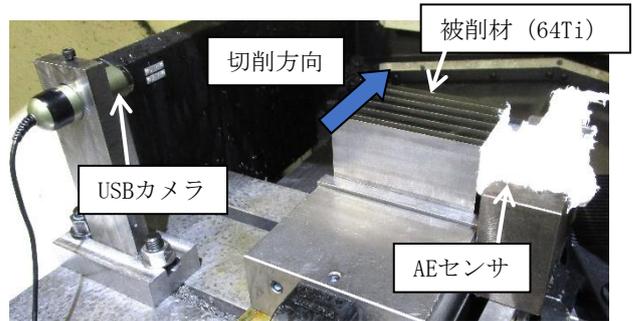


図3 実証試験段取り

降は $V_c=150\text{m/min}$ 、1刃送り $f_z=0.1\text{mm/tooth}$ で加工を行った。

3 結果及び考察

3.1 同時切削刃数及び欠損状態が AE 波形に及ぼす影響

$a_p=12\text{mm}$ の試験において、約 53 秒間の試験切削の中心付近から工具 1 回転分 (約 0.075 秒) の AE 波形を抽出し、RMS の移動平均処理を行った波形を図4に示す。

欠損が大きい工具に関しては赤丸で示したとおり、特徴的なピークが見えるが、工具の傷による影響を判断するため、傷の大きさ (幅) から切削加工中の傷の接触時間を計算したところ、AE 波形のピークが立つ時間と工具傷の理論上の接触時間が一致した (図5)。

これより、No5、No6 で見られる AE 波形のピークは工具傷による影響であると考えられる。

次に、AE 波形は欠損有無に関係なく工具個体差や摩耗状態などによって全体のレベルが変動し、また工具傷による AE 波形は急峻なピークであることが多いことに着目すると、RMS 移動平均の最大値から平均値を引いた値 (以下、最大平均差) を比較することで欠損検知が可能になると考えられる。一方、工具 1 回転毎の波形で見た場合、欠損がない工具においても、切りくずが刃先に対して付着と剥がれを繰り返すなかで突発的にピークが発生することや、欠損がある工具においても、一時的に

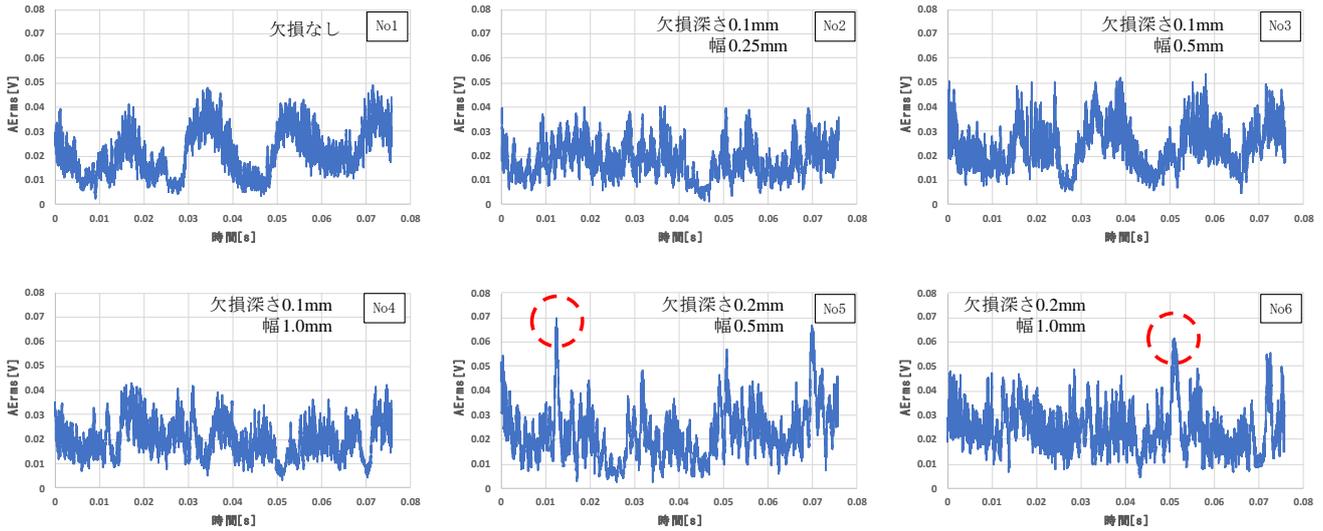


図4 AE波形のRMS処理結果 (ap=12mm)

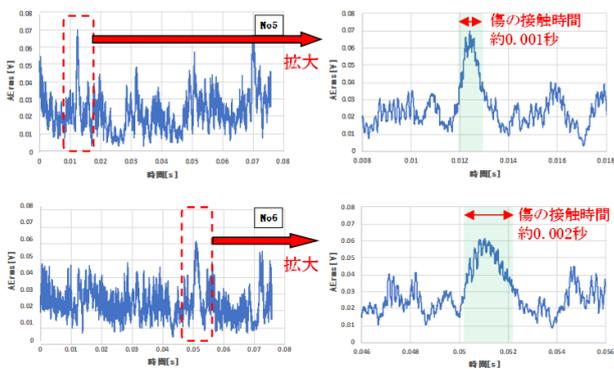


図5 工具傷接触時間とAE波形の関係 (上: No5, 下: No6)

溶着物が欠損を埋めてしまいピークが発生しないこともあるため、誤検知が発生する可能性がある。

そこで、工具1回転分の波形ではなく、複数回転分の波形を見ることで検知精度を上げられると考えられる。

それらを踏まえた上で、ap=12及び16.316mmの試験において、約53秒間の試験切削の中心6秒間(工具78回転分)のAE波形を抽出し、工具1回転毎に78波形に分割してそれぞれにRMSの移動平均処理を行った。

加えて、得られた全波形の最大平均差を計算し、任意のしきい値を最大平均差を超えた割合(以下、カウント割合)を算出した。各工具とカウント割合の関係を図6に示す。

なお、しきい値については、工具No1を基準として、突発的に最大平均差が大きくでている部分以外をカウントしない値を切削条件ごとに定めた。

図6より、ap=12mmの場合は工具No1~4まではカウ

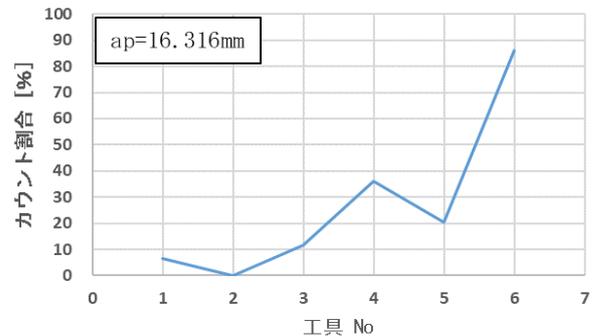
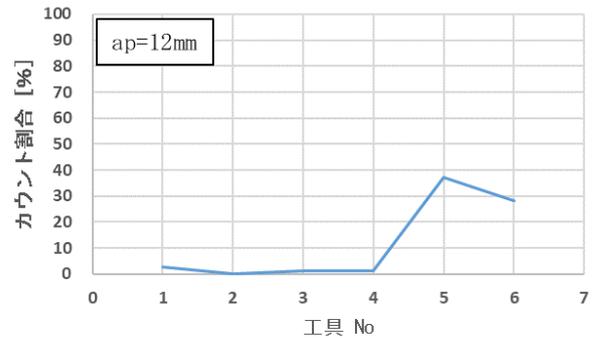


図6 各工具のカウント割合 (上: ap=12mm, 下: ap=16.316mm)

ント割合は5%以下であり、工具No5から25%以上に上昇していることが分かる。また、ap=16.316mmの場合も右肩上がりでも上昇していることが分かる。

なお、ap=12mmではNo1~4の工具でカウント割合が変わらなかった。ap=16.316mmではNo4~6でカウント割合が増える結果となった。これは、ap=16.316mmは同時切削刃数が常に2枚となる安定切削²⁾であることから、傷によるAE波形ピークが検出しやすかったことが原因と考えられる。

以上の結果から、欠損サイズが一定の大きさを越えた場合において、加工条件に合ったしきい値を定めることで工具欠損を検知できる可能性が示唆された。

ここで、工具欠損による影響を確認するため、 $a_p=12$ 及び 16.316mm の両試験でカウント割合が大きくなった工具 No5 の切削加工面を、非接触輪郭形状測定機（三鷹光器 MLP-3SP）を用いて観察した。

測定方法は、切削試験後の被削材を図 7 のように測定機上に段取りして、削り始め、中心付近、抜け際の 3 所の工具傷による加工面のスジの有無を観察した。

測定結果から、中心付近の工具の傷接触位置を表示したものを図 8 に示す。その結果、工具 No5 では傷による加工面への影響は見られなかった。今回用いた工具が 4 枚刃であり、そのうちの 1 枚のみ傷を付けていたため、加工面に傷に伴う削り残りが発生したとしても、他の 3 枚の刃によって加工されるため、加工面に影響は出なかったものと考えられる。

なお、削り始め、抜け際についても同様の結果となった。

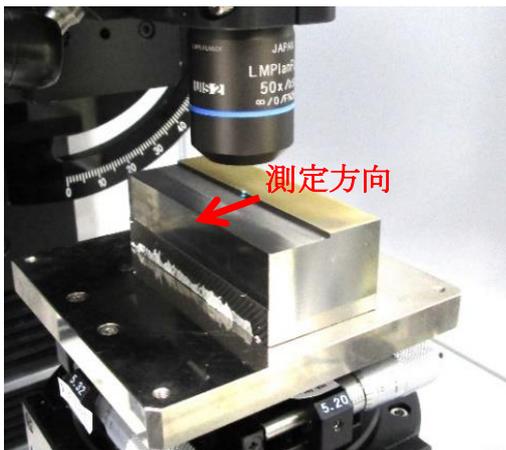


図 7 工具 No5 切削加工面測定段取り

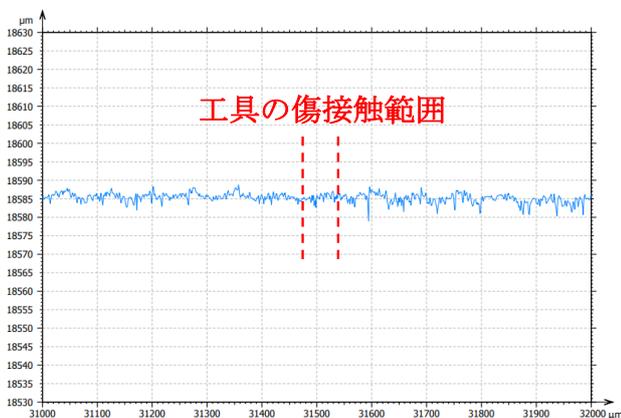


図 8 加工面測定結果（中心付近）

3. 2 工具欠損状態推定手法の開発

3. 1 の切削試験結果から、カウント割合による工具欠損の自動判定プログラムを作成した。データロガーで取得したデータが、特定のフォルダに保存された際に自動でプログラムが作動し、工具欠損の判定を行うものとした。なお、3. 1 の結果よりカウント割合が 20% を超えたときに欠損検知判定とした。

3. 3 実証試験

切削長 0m から 224m まで、定期的に欠損判定を行った結果、切削長 173m で欠損検知判定を示した（図 9）。欠損検知判定前後の先端刃先写真を図 10 に示す。

切削長 165m 時点では 2 刃は溶着により欠損が発生しているか確認できなかったが、3 刃及び 4 刃では 0.06mm 以上の欠損は発生していなかった。しかし、切削長 173m は全ての刃で 0.06mm 以上の欠損が発生しており、本システムで NG の判定となった。

このことから、本システムを用いることで 4 刃すべてに 0.06mm 以上の欠損が発生したときに欠損の検知ができると言える。

次に、図 9 で示した今回の欠損検知判定について、信頼性を評価するため、試験開始から終了までの全切削長における切削長とカウント割合の関係を図 11 に示す。

切削長 15m 以下の初期摩耗域は値がばらつく傾向が見られるが、切削長 165m まではカウント割合が 5% 以下に収まっている。それに対して、切削長 173m 以降はカウント割合が 50% を超えていることが確認でき、信頼性があると考えられる。

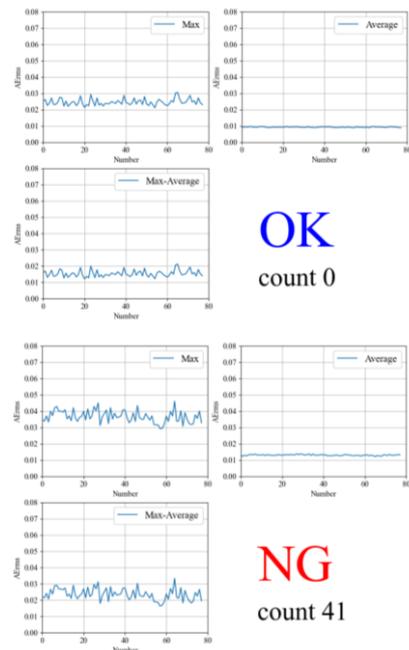


図 9 欠損検知判定画面
(切削長：上 165m, 下 173m)

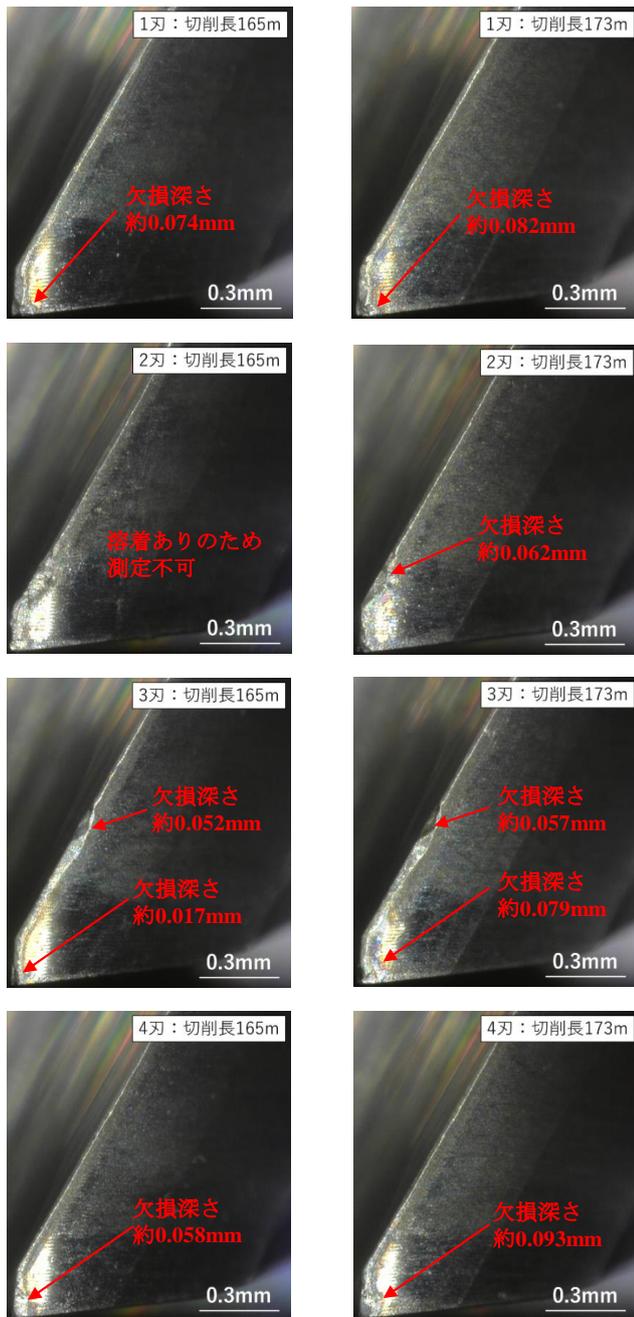


図 10 実証試験 先端刃先写真

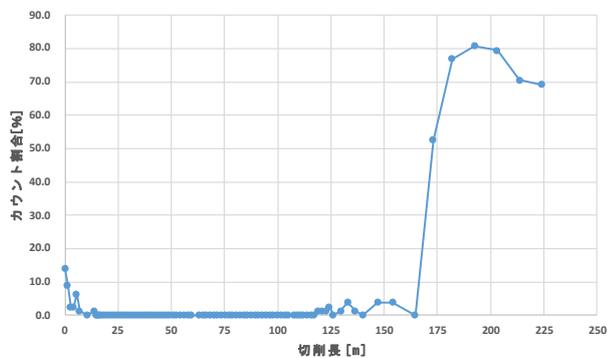


図 11 切削長とカウント割合の関係

最後に、試験終了時の切削長 224m の加工面について、非接触輪郭形状測定機を用いて、切り始め、中心付近、抜け際の 3 か所測定した。中心付近の測定の中で、工具欠損が発生した刃先先端から 1mm までの範囲を図 12 に示す。この部分における面の凹凸は最大最小差で $7.7 \mu\text{m}$ であった。

また、欠損のない工具において、同条件で加工した際の刃先先端から 1mm までの範囲の加工面を図 13 に示す。この部分における面の凹凸は最大最小差で $10 \mu\text{m}$ であった。

なお、それぞれの測定で、削り始め、抜け際についても同様の結果となった。

このことから、図 12、13 で見られる加工面の凹凸は、欠損の有無によらず常に発生していた凹凸であると考えられるため、試験終了時の加工面について工具欠損の影響は確認されなかった。

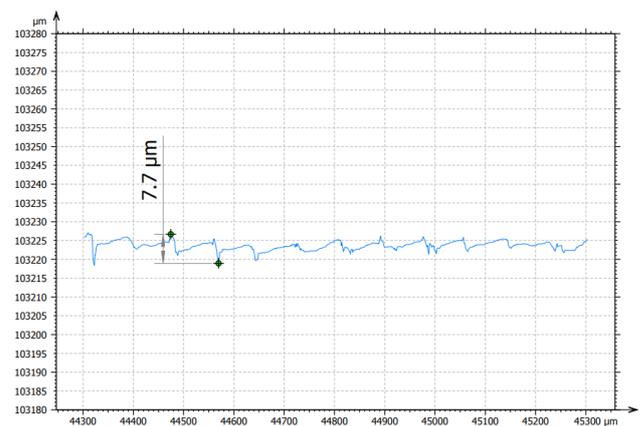


図 12 加工面測定結果 (実証試験終了時)

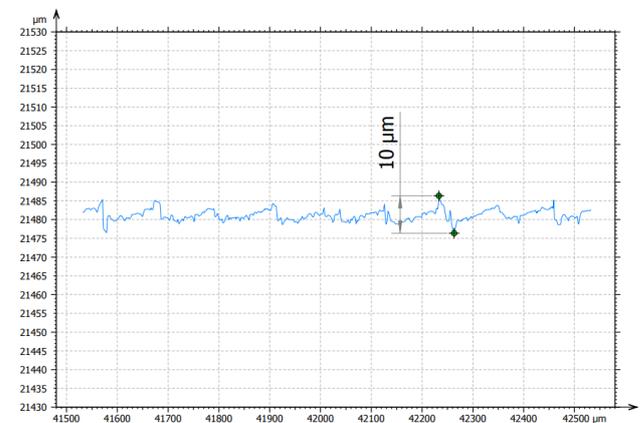


図 13 加工面測定結果 (欠損なし工具)

4 おわりに

本研究では、AE センサを用いた工具欠損検知を目的として、同時切削刃数が複数の場合において工具欠損が 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、以下の結果を得た。

- (1) 同時切削刃数が複数の場合において、工具欠損状態によって AE 波形が変化する。
- (2) AE 波形の最大平均差から算出したカウント割合を用いて、しきい値判定を行うことで、同時切削刃数が複数の場合においても工具欠損状態が推定できる。
- (3) 開発した工具欠損有無の自動判定システムの実証のため、新品工具を用いて欠損検知判定が得られるまで加工を継続する切削試験を行ったところ、4 刃すべてで欠損深さが 0.06mm 以上になった際に工具欠損を検知できた。

参考文献

- 1) 棚原貴登ほか：“栃木県産業技術センター研究報告”，20, 45-53, (2023),
- 2) 榎本康司ほか：“公開特許公報”，特開平 8-19912, エンドミルによる切削加工法