



切削加工を見える化するセンサ搭載切削工具

Sensor-Equipped Cutting Tools to Visualize the Cutting Process

小池 雄介*
Yusuke Koike

青木 友弥
Tomoya Aoki

村上 大介
Daisuke Murakami

近年、デジタル化の進展に伴い切削加工の自動化や無人化のニーズが高まっている。切削工具にセンサを搭載したセンサ搭載切削工具は加工状態を監視するツールとして期待されている。これは、従来の測定機よりも加工点に近い位置で測定が可能となることから、高感度な測定が実現できる可能性があるためである。当社では、センサ搭載切削工具として、センサ、無線通信装置および電源を搭載した旋削工具と転削工具の開発を進めてきた。本稿では、旋削加工と転削加工におけるセンサ搭載切削工具による加工状態監視について報告する。

The progress of digitalization increases the need for automated and unmanned cutting process. Sensor-equipped cutting tools are expected to be one of the measuring instruments that help visualize and monitor cutting operations because they are positioned closer to the cutting point than conventional measuring instruments, enabling more precise measurement. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has promoted research and development on turning tools and milling tools that are equipped with sensors, wireless communication devices, and electric power sources. This paper presents feasibility studies on the monitoring of cutting process with our sensor-equipped turning tool and milling tool.

キーワード：切削工具、センサ、IoT (Internet of Things)

1. 緒 言

ドイツのIndustrie 4.0^{*1}から始まった産業のデジタル化の流れは、機械加工の分野においても、工作機械やその周辺機器に各種センサや通信機器を搭載して、データを収集し解析することで、設備部品の保全や生産状態を監視するシステムを実現しようとしている。日本国内においてもSociety 5.0^{*2}としてIoT化やデジタル化が進展しつつあり、現在ではDX^{*3}デジタル革命として機械加工の自動化や無人化が押し進められようとしている。また、昨今のコロナ禍のもと、人の移動が困難となり、機械加工の遠隔監視や加工状態の記録などの新たなニーズも高まっている。

切削工具は加工点に最も近いところに位置しているため、センサを搭載することで、加工状態のより高精度な監視が実現できると考えられ、従来より様々な研究がなされてきた^{(1),(2)}。しかしながら、センサや無線通信装置などの大きさやコストが問題となり、実用化はあまり進展してこなかった。このため、前述したデジタル化の流れは前述の工作機械とその周辺機器にとどまっていたが、近年、センサの高度化、小型化および低価格化に伴い、切削工具にセンサを搭載する研究が再度活発化している^{(3)~(6)}。このような観点から、当社では切削工具にセンサを搭載した切削工具の研究開発を進めている。本稿では、センサ搭載切削工具による切削加工監視や異常検知の可能性について報告する。

2. 機械加工のデジタル化のトレンド

図1に機械加工における加工状態の監視と管理システムの概要を、マシニングセンタを一例として示す。一般的には工具を直接回転させる主軸モータの電流値の変化を測定することで、加工中の工具の摩耗や損傷を監視する方法が行われてきた。具体的には、主軸電流値がある閾値を超えると工具の寿命と判断する技術⁽⁷⁾や、主軸電流値を機械学習で解析して異常を検知する技術⁽⁸⁾が開発されている。

また、工作機械を駆動させるサーボモータの電流値の変化から加工状態を監視する技術⁽⁹⁾や、ひずみセンサや振動センサなどを工作機械に搭載して取得した測定値の変化から加工状態を監視する技術の開発⁽¹⁰⁾も進められている。さらに、それらの情報を統合して工作機械を監視するシス

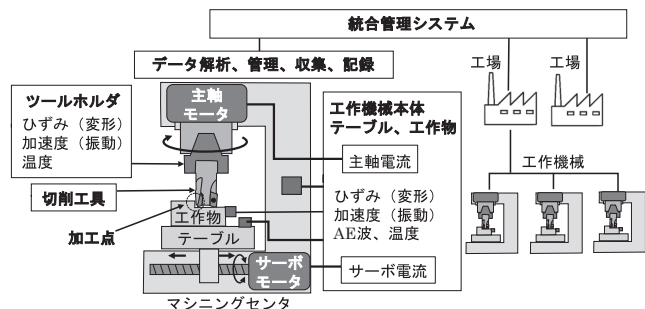


図1 機械加工における加工状態の監視、管理システム

テム⁽¹¹⁾や、その上位に、工作機械を通じて世界の工場の設備監視が行える統合管理システム⁽¹²⁾も開発されている。また、マシニングセンタにおいては、工作機械と切削工具を連結するためのツールホルダにセンサを搭載したものが⁽¹³⁾が実用化されている。このように工作機械やその周辺にセンサを搭載する場合、切削工具の種類に依存しないために汎用性は非常に高い反面、切削加工の加工点からセンサが遠くなるために加工点で発生している切削現象に対する感度が低下し、ユーザが求める異常検知ができない場合も多い。特に工作物を回転させる旋削加工では、加工点で生じる切削抵抗に抗するための動力に対して、工作物を回転させるのに必要な動力のほうが高いため、主軸モータの電流値からでは加工状態の監視や異常の検知が非常に難しい。このような観点から、加工点に最も近い切削工具にセンサを搭載することで、汎用性は低下するが、加工状態のより高精度・高感度な監視が可能になることが期待されている。

図2に、切削加工のコストにおける工具費や人件費などの一般的な割合を示す。産業分野や各ユーザによっても異なるが、一般論として切削加工のコストにおける切削工具費の割合は4%程度であり、その一方、人件費は34%程度を占めるといわれている⁽¹⁴⁾。また、実際の加工では、不良品の廃却や、不良品の選別作業、「ちよこ停」と呼ばれる加工異常に伴う機械停止、不良発生回避のために加工能率を落として加工するなどといった要因による生産ロスが5%から10%程度生じていると考えられる。センサ搭載切削工具の活用において、工具寿命延長による工具費削減のみに着目すると、切削加工のコスト全体に対する削減効果は小さいため、センサ搭載切削工具の導入における費用対効果も小さくなってしまふ。そのため、自動化による人件費の削減、加工状態を監視することによる生産ロスの低減、異常を回避しながら高能率・短時間で加工することで人件費や設備の減価償却の低減、などの項目にも着目することが重要である。また、今後の生産労働人口の減少や、熟練技能者の減少を考えると、センサ搭載切削工具の役割は切削加工の定量評価といった別な観点からも重要になってくると考えられる。

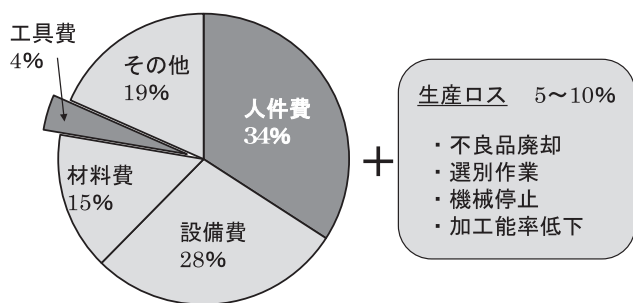


図2 切削加工に占めるコスト割合

3. 旋削加工へのセンサ搭載切削工具の適用

図3に、センサを搭載した外径加工用旋削工具を示す。刃先近傍にひずみセンサを、シャンク後端付近に無線通信装置および電源を取り付けている。ひずみセンサはボディのひずみを測定しており、切削抵抗に比例する値を出力する。センサ搭載旋削工具から無線で送信される測定値は、受信機と接続されたPCに蓄積される。サンプリング周波数は2 kHzである。受信機は工作機械外からも通信可能であるため、工作機械の窓に取り付けて用いることができる。本センサ搭載旋削工具の特徴は、全部品をボディに内蔵したため、旋盤の刃物台に直接取り付けることができ、工作物などとの干渉がない点である。そのため、現在使用している実機で実部品を切削しながら簡単に測定を行うことができる。以下に、センサ搭載旋削工具の活用事例を紹介する。

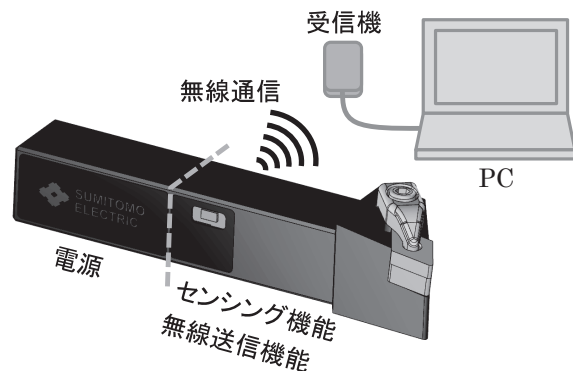


図3 センサ搭載旋削工具

刃先の欠損検知を目的とし、センサ搭載旋削工具を用いて断続加工の切削実験を実施した。図4に工作物形状を、表1に加工条件を示す。図5に、欠損発生前後での測定結果を示す。図5(a)に、欠損発生前のひずみ測定結果を変換したひずみ特徴量を示す。図5(b)に示すように、断続加工を測定したことによって、加工区間と非加工区間を繰り返す波形が得られている。欠損が生じていない状態では、加

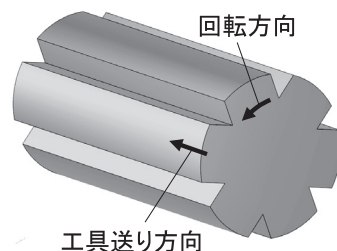


図4 断続加工の切削実験で用いた工作物

表1 加工条件

切削工具	DCLNL2525M12
チップ	CNGA120412 (BNC300)
被削材	焼入鋼
切削速度	100 m/min
切込み深さ	0.2 mm
送り量	0.1 mm/rev
切削油剤	ドライ

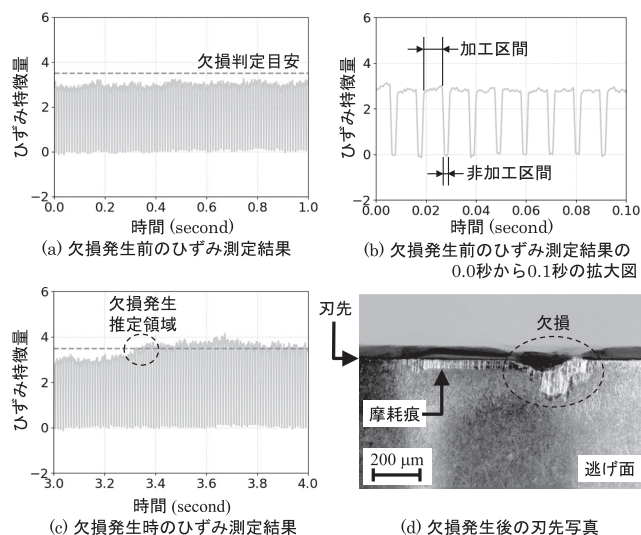


図5 欠損発生前後での測定結果

工区間でのひずみ特徴量は一定値を示す。しかしながら、欠損が生じた場合には、図5(c)のような不連続な変化を示す。図5(d)に、欠損発生後の工具刃先の写真を示す。実際の加工現場においては、加工音の変化で欠損が発見されることがある。しかしながら、同図に示すような大きさの欠損では、加工機設備音などに比べて、加工音の変化が小さく、作業者が発見できない場合が多い。センサ搭載旋削工具を活用することで、このような工具刃先の微小変化を把握することが可能になる。

図6に、センサ搭載旋削工具で実際の部品加工を実施した事例を示す。まず端面加工を行い、次に内径、コーナ部、端面の順に加工を行っている。コーナ加工時に、ひずみ特徴量が瞬間的に約3倍に増加していることがわかる。工具経路や加工条件などを設定する際に、コーナ部での切削抵抗の増大は一般的に想定されるが、ここまでの一時的な増加を作業者は予想しておらず、センサ搭載旋削工具での測定結果により認識することができた。センサ搭載切削工具を活用して加工の見える化を行うことで、このように好ましくない加工状態の発見と、加工条件などの見直しの機会を提供することができる。

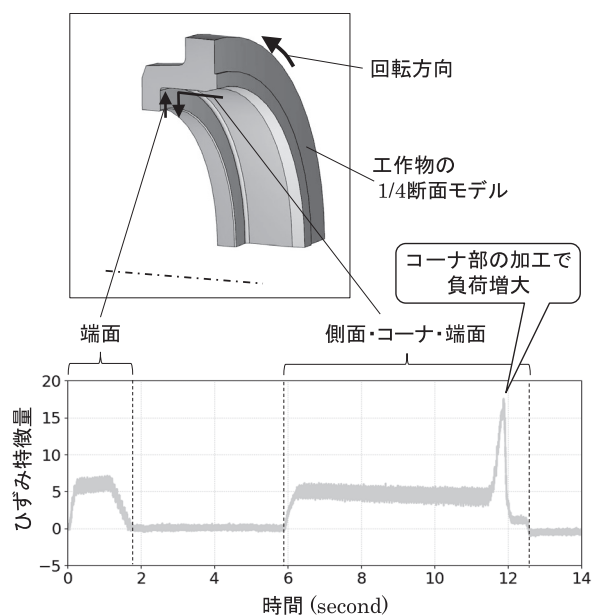


図6 実際の部品加工でのひずみ測定結果

今回紹介した事例のように、1つの測定結果から新たな知見が得られる場合もあるが、多くの場合はある程度の量のデータを収集することが好ましい。その理由は、センサ搭載切削工具の適用対象工程においては、刃先の損耗や工作物形状のばらつきなどが原因となって製品不良が発生するケースが多いためである。そのため、ある程度の期間でデータを収集し、製品不良の原因となっている変化やばらつきを十分に含んだデータ群を取得することが重要である。そのデータ群に対して詳細な分析を行うことによって、製品不良の発生原因の特定や、新たな知見の獲得ができる可能性が高まると考えられる。

4. 転削加工へのセンサ搭載切削工具の適用

転削工具においても同様にセンサ、無線通信装置および電源を搭載し、性能評価を行っている。当社のセンサ搭載転削工具の特徴として、以下の3点が挙げられる。

1点目は、切削工具に伴って回転する切削工具回転座標系で測定が可能という点である。多刃工具であれば、測定結果を各刃に分離することができる。

2点目は、加工点に近いことで切削現象以外の影響が測定結果に含まれにくい点である。全長の長いツールホルダを利用した際にも、ツールホルダの根元や主軸にセンサを付ける場合と比べて、加工点により近い位置にセンサを設置することができる。また、刃先とセンサの位置関係を、距離だけでなく、転削工具の回転軸周りの位相も含めて常に一定とすることができる。

3点目は、センサとしてひずみセンサと加速度センサの

両方を搭載して同時測定を行う点である。ひずみと加速度は、どちらも切削抵抗に起因して生じる物理量であるが、その発生に関係する要因が異なる。ひずみセンサでの測定結果は、加工点に加わる切削抵抗と転削工具の剛性によって定まるため、切削抵抗との相関が強い。一方、加速度センサでの測定結果は、転削工具単体の剛性だけでなく、主軸やツールホルダなどの主軸系の剛性の影響も受けるため、異常振動や加工精度との相関が強い。

上述の特徴により、切削工具回転座標系においてひずみと加速度を同時測定することで、切削加工の最適化や切削現象の解明にも有用な測定結果を取得することができると考えている。

図7に、刃先交換式転削工具（当社型番：WEZ2500E）に、ひずみセンサ、加速度センサ、無線通信装置および電源を搭載したセンサ搭載転削工具を示す。ひずみセンサと加速度センサの測定結果を変換し、同図に示すような、切削工具回転座標系における切削抵抗4成分と加速度4成分を取得することができる。図8に、センサ搭載転削工具で切削実験を行う際の装置構成を示す。受信機側の構成はセンサ搭載旋削工具と同様であり、サンプリング周波数は2 kHzである。

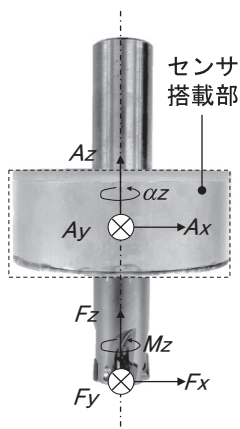


図7 センサ搭載転削工具

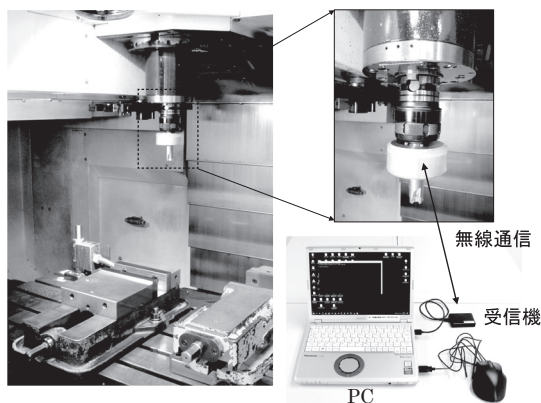


図8 センサ搭載転削工具での切削実験の装置構成

表2に示す加工条件にて切削実験を実施した。図9に、切削実験で測定した切削抵抗 F_x 、 F_y 、加速度 A_x および A_y を示す。図9(a)と(d)は時間に対する切削抵抗と加速度の測定結果を示しており、図9(b)と(c)は、同図(a)と(b)の40秒付近の拡大図である。切削工具回転座標系における測定により、図9(c)と(f)に示すように、縦軸と横軸を F_x と F_y や、 A_x と A_y とした図を作成することで、転削工具の回転軸に垂直な平面内での切削抵抗と加速度のベクトルを確認することができるため、各刃で生じる物理量を分離することが可能である。そこで、これら4成分の測定結果に着目し、加工点での変化との関係を調査した。今回実施した加工条件での同時作用刃数は1枚以下となっているため、図9(c)に示すように、各刃で生じる切削抵抗ベクトルは互いに異なる方向を示している。同図中に示す刃先番号は切削順序で付けており、1番から4番の順に切削が行われる。各ベクトルの大きさの違いは、各刃先間の相対位置による切削面積変動が原因である。

同加工条件での切削を継続し、刃先の欠損と測定結果の関係性を調査した。切削距離0.3 mごとに加工を停止し、刃先の観察を行った。欠損は1番の刃先に初めに発生し、その後、3番の刃先に発生した。2番と4番の刃先には欠損は発生しなかった。図10に、測定結果と刃先写真を示す。図10(a)と(d)は欠損が生じていない状態での測定結果、同図(b)と(e)は1番の刃先のみ欠損が生じた状態での測定結果、同図(c)と(f)は1番の刃先の欠損が進展したうえで、3番の刃先が新たに欠損した状態での測定結果を示す。図10(a)と(b)より、1番の刃先に欠損が生じたことで、1番の刃先での切削面積が減少し、切削抵抗が約522 Nから約442 Nに低下していることが確認できる。また、1番の刃先での切削面積が減少したことで、2番の刃先での切削面積が増大し、切削抵抗が約520 Nから約608 Nに増加している。図10(d)と(e)からは、ひずみの測定結果と比べて顕著な変化は確認できなかった。図10(b)と(c)より、3番の刃先が欠損したことにより、3番の刃先の切削抵抗が約864 Nから約645 Nへ減少し、4番の刃先の切削抵抗が約705 Nから約866 Nへ増大していることがわか

表2 加工条件

切削工具	WEZ2025E
工具径	25 mm
刃数	4
チップ	AOMT11T308PEER-G (ACK3000)
被削材	S50C (JIS)
切削速度	47.1 m/min
軸方向切込み深さ	2 mm
半径方向切込み深さ	5 mm
1刃当たりの送り量	0.1 mm/t
切削油剤	ドライ

る。また、図10 (e) と (f) より、2番と4番の刃先の方向の加速度が増大し、1番と3番の刃先の方向の加速度が減少していることがわかる。1番の刃先のみが欠損したときに

は加速度には大きな変化がなく、3番の刃先が新たに欠損した際に加速度が大きく変化した理由は、図9 (b) と (e) からわかるように、加速度が変位の2階微分であるため

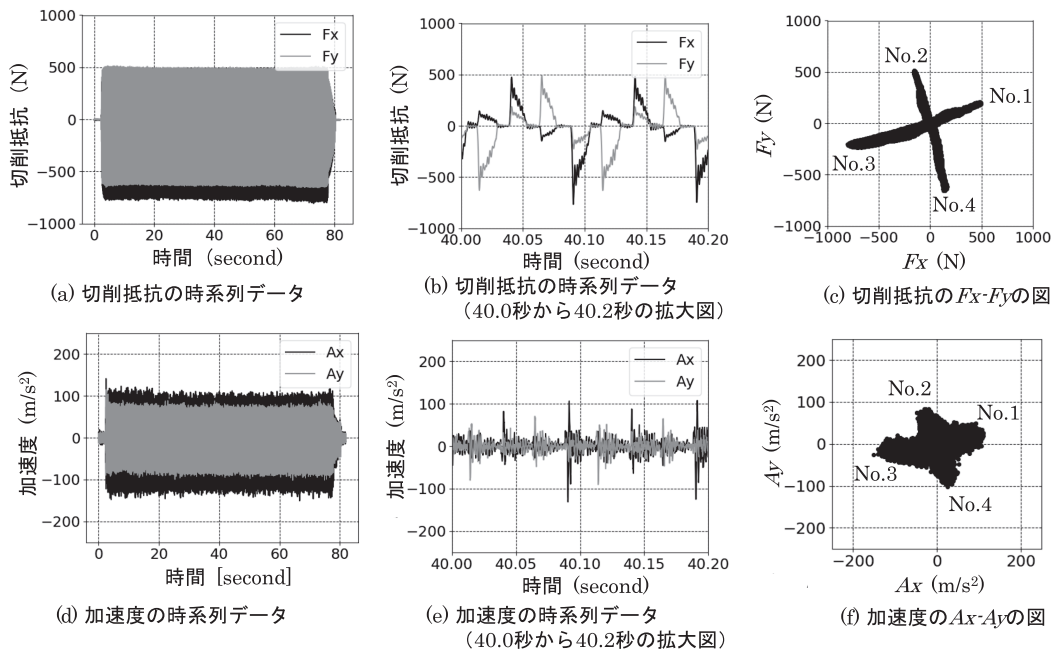


図9 センサ搭載転削工具での測定結果

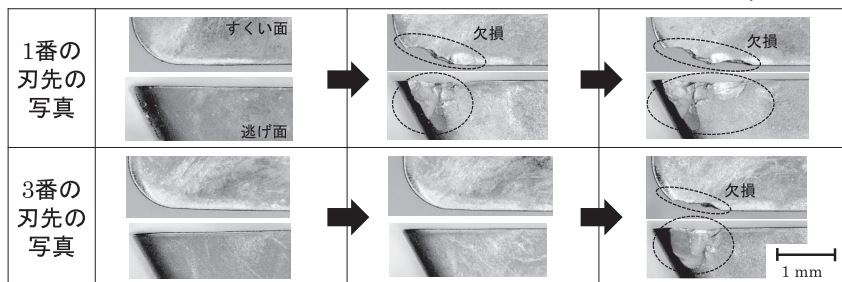
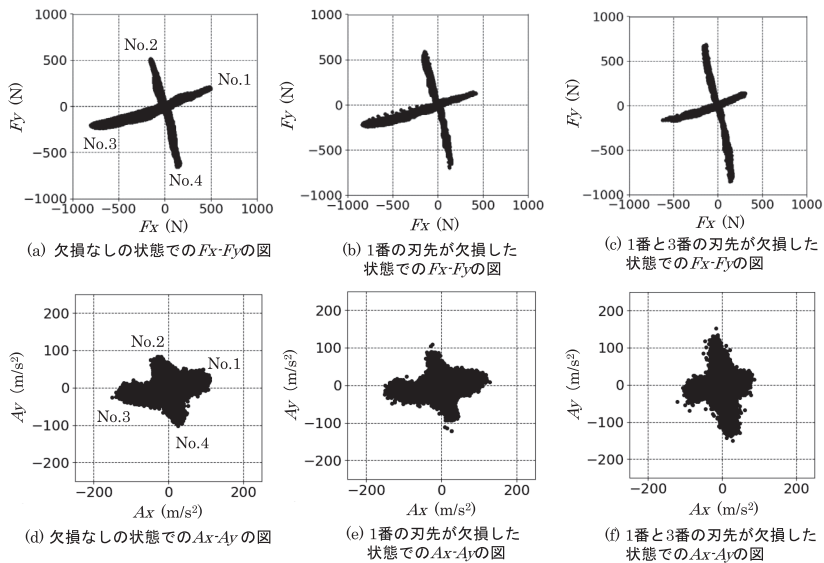


図10 センサ搭載転削工具での欠損と測定結果の関係

に、加速度ベクトルが回転軸周りに180度回転した方向にも生じるからである。今回の測定では、1番の刃先が欠損して切削抵抗ベクトルが減少しても、180度対向した位置にある3番の切削抵抗ベクトルのほうが大きく、**図10 (e)**では1番の加速度ベクトルが3番の加速度ベクトルに上書きされてしまうため、変化を確認することができなかった。

図10 (f)で3番の刃先が新たに欠損したことで、欠損がない状態と比較すると1番と3番の両方の切削抵抗ベクトルが減少したことになり、加速度でも欠損前後での変化が確認できるようになったと考えられる。

4枚刃の転削工具での切削加工におけるひずみと加速度の測定結果から、欠損の有無だけでなく欠損の発生している刃先位置も特定できることを示した。今後は、刃先摩耗などの切削現象との関係についても調査を行う予定である。

5. 結 言

本稿では、センサ、無線通信装置および電源を搭載したセンサ搭載切削工具を旋削加工と転削加工用途に開発し、加工状態を監視、その測定結果から加工時の切削抵抗の異常な変化や工具欠損を判定できることを見出した。

今後、これらセンサ搭載切削工具を活用して、加工の自動化や生産ロスの低減の可能性を追求するとともに、ブラックボックスとなっている切削現象を見える化することで、より最適な機械加工実現を目指す。

用語集

※1 Industrie 4.0

「第4次産業革命」を意味する。人間、機械およびその他の企業資源が互いに通信することで、各製品の製造状況や納品先などの情報を共有し、製造工程をより円滑なものにする。さらに、既存のバリューチェーンの変革や、新たなビジネスモデルの構築も目的としている。

※2 Society 5.0

仮想空間と現実空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会。

※3 DX

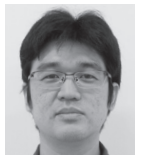
Digital Transformationの略称。データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること。

参 考 文 献

- (1) 畑村洋太郎、「多軸力センサとその応用」、精密工学会誌、vol. 57, no. 10, p.1749-1755 (1991)
- (2) 新野秀憲、黄国金、Mustafizur RAHMAN、「熱流束センサによる加工状態のインプロセスモニタリング(工具摩耗の監視)」、日本機械学会論文集(C編)、vol. 57, no. 538, p.2149-2153 (1991)
- (3) 本田光平、酒井克彦、静弘生、岡田亮二、宮嶋健太郎、「半導体ひずみセンサを用いた旋盤加工における工具摩耗状態のモニタリング」、日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、熊本大学、2019-10-4/6, p. 79-83 (2019)
- (4) Kai Cheng, Zhi-Chao Niu, Robin C. Wang, Richard Rakowski, Richard Bateman, "Smart Cutting Tools and Smart Machining," Development Approaches, and Their Implementation and Application Perspectives. Chinese Journal of Mechanical Engineering. vol. 30, p. 1162-1176 (2017)
- (5) 野村亜未、平井純一、千葉修、牧野瑞希、加藤和弥、「無線技術を用いた工具たわみ検知技術の開発」、2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、静岡大学、2019-9-4/6, p. 616-617 (2019)
- (6) Chandra Nath, "Integrated Tool Condition Monitoring Systems and Their Applications," A Comprehensive Review. Procedia Manufacturing, vol.48, p. 852-863 (2020)
- (7) 山岡義典、垣野義昭、鈴木康彦、「タップ加工の知能化」、日本機械学会第2回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、三島、2000-11-21/22, p. 35-36 (2000)
- (8) Tsubasa Watanabe, Ippei Kono, Hideaki Onozuka, Anomaly detection methods in turning based on motor data analysis, Procedia Manufacturing, vol.48, p. 882-893 (2020)
- (9) 碓井雄一、宮沢伸一、澤井信重、「工作機械のひずみや振動を利用した切削力の測定」、精密工学会誌、vol. 63, no. 11, p. 1605-1608 (1997)
- (10) 柿沼康弘、「センサレス切削力計測技術とその応用」、精密工学会誌、vol. 83, no. 3, p. 210-213 (2017)
- (11) X. Y. Zhang, X. Lu, S. Wang, W. Wang, W. D. Li, A multi-sensor based online tool condition monitoring system for milling process. Procedia CIRP, vol. 72, p. 1136-1141 (2018)
- (12) 齋藤尚登、坪井啓介、「生産現場“つながる化”KOM-MICS」、コマツテクニカルレポート(コマツ技報)、(株)小松製作所、vol. 62, no.169, p. 9-14 (2016)
- (13) 松田亮、新堂正俊、廣垣俊樹、青山栄一、「無線多機能ホルダによるタップおよびエンドミル工具の回転方向振動モニタと現象説明」、砥粒加工学会誌、vol. 61, no. 12, p. 674-680 (2017)
- (14) 横山明宜、「元素から見た鉄鋼材料と切削の基礎知識」、初版、日刊工業新聞社、p. 214 (2012)

執 筆 者

小池 雄介* : アドバンストマテリアル研究所 主査博士 (工学)



青木 友弥 : アドバンストマテリアル研究所 主査博士 (工学)



村上 大介 : アドバンストマテリアル研究所 室長博士 (工学)



*主執筆者