

Monitoring and Condition Assessment of Plunge Cutting Processes with Wireless Compact Acceleration Sensors

Yusuke NOZAKI,* Takamasa YAMAMOTO,** Ryo MATSUDA,***
Sai MADOKORO,**** Toshiki HIROGAKI,+ and Eiichi AOYAMA++

(Received March 24, 2023)

Nowadays, monitoring technology has attracted attention in the factory automation fields regarding IoT (Internet of Things). However, it is difficult to monitor the process information from a round tool during rotating operation in machine tools. We therefore have developed a novel tool holder equipped with a wireless communication function to monitor a cutting process. In the present report, we also attempt to develop a wireless compact acceleration sensor to monitor the cutting process in various kinds of machine tools. We set a developed sensor around the cutting tool in a lathe and perform to estimate a plunge cutting process with measuring the cutting force and the acceleration vibration. As a result, we demonstrated that the developed method with a wireless system is effective to evaluate the wear and flake damage of cutting tools under tuning processes.

Key words : smart factory, acceleration sensor, wireless communication, turning process monitoring, machine tools

キーワード: スマート工場, 加速度センサ, 無線通信, 旋削加工モニタリング, 工作機械

無線式コンパクト加速度センサによる突切り加工のモニタと状態診断

野崎友裕, 山本隆将, 松田亮, 真所最, 廣垣俊樹, 青山栄一

1. 緒言

近年, 日本の製造業においては日本政府が提唱している「Connected Industries」という指針のもと, 工場形態を「次世代スマート工場」に変革することが求められて

おり, そのための技術開発が益々重要となりつつある。

著者らは切削加工現場を想定し, マシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備した IoT 対応のモニタリングシステムの開発に取り組

* Yamamoto Metal Technos Co.,Ltd , Osaka
Telephone/Fax: +81-6-6704-6582, E-mail: nozaki@yama-kin.co.jp

** Yamamoto Metal Technos Co.,Ltd , Osaka
Telephone/Fax: +81-6-6704-6582, E-mail: takamasa-yamamoto@yama-kin.co.jp

*** Yamamoto Metal Technos Co.,Ltd , Okayama
Telephone/Fax: +81- 6-286-8330, E-mail: matsuda@yama-kin.co.jp

**** Yamamoto Metal Technos Co.,Ltd , Osaka
Telephone/Fax: +81- 6-6704-6582, E-mail: madokoro@yama-kin.co.jp

+ Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

++ Department of Energy and Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

んできた。その応用として、エンドミル加工における工具内部の温度モニタリング¹⁾、難削材のタップ加工時の回転方向スティックスリップ振動や高速エンドミル加工の工具ねじり振動²⁾、44.1kHzの高周波数サンプリングでの振動測定によるびり振動の解析³⁾などで加工情報のモニタリング技術の有効性を示すことができた。さらに近年ではCNCから得られる情報と振動情報を統合・解析しCAMへとフィードバックした事例⁴⁾もあり、次世代スマート工場への展開が期待されている。その一方で、回転工具ホルダを用いる制限下であり、その適応範囲は限定的であった。この問題を解決するためその中の内部回路を協働ロボットアームに取り付け、磨きに展開した事例⁵⁾もあるが、旋盤などの狭い機内で活用するためには、検出部のハードをより小型化することが求められていた。

そこで本報では、次世代スマート工場に必要とされる技術と開発デバイスの位置づけを検討した後、開発ホルダで使用していた加速度計測技術をより汎用的に活用するため、無線式コンパクト加速度センサを開発し、旋盤加工への展開を試みた。具体的には25mm立方のコンパクトなスペース内で3成分の情報が無線で取得可能な加速度センサを開発し、旋盤での突切り加工での適応を実施した。また、得られた振動情報と切削抵抗から加工状態について検討した。これにより、新たなモニタリングシステムの開発とその応用について検討した結果を報告する。

2. 次世代スマート工場に必要な技術

2.1 次世代スマート工場

機械加工現場を持つ製造業においては大きな生産性向上を目標に、Fig. 1に示すような次世代スマート工場を実現することを目指し技術開発が進められている。次世代スマート工場の構築においては、人が主役でありながらも工作機械とAGV（自動搬送車）と産業用ロボットが融合化した省人・無人化を進めることに加えて様々な機器がつながることが求められている。様々な機器がつながることにより、効率的な生産管理や、設備の予防保全といった活用が可能となり、さらなる次世代の省人化が期待されている。また、つながるだけでなく、状況に合わせて最適な制御を実行することが理想とされている。このような工場の構築においては、最初に「生産に

重要な情報である物理現象や生産状況などをリアルタイムモニタリング」し、「モニタリングデータでデータベースを構築」することが求められる。その後、リアルタイムモニタリング値とデータベースを比較することで「瞬時に現在の状態が正常か異常かをシステムが自動で判断」し、異常であればその異常に合わせて「加工設備を最適化制御する」ことで高度に智能化した自律制御型工場が実現可能となり、その基幹技術の開発の必要性が益々増大してきている。

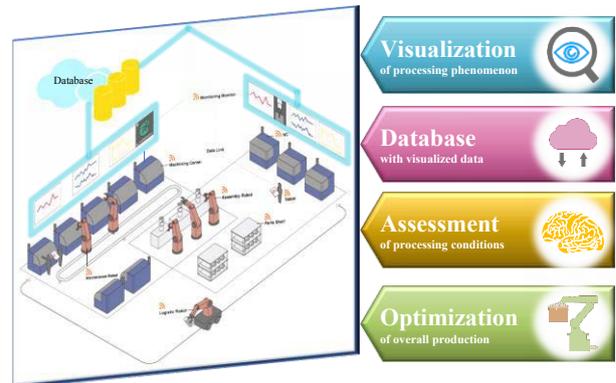


Fig. 1. Schematic drawing of the next generation smart factory.

2.2 工作機械の機上からの物理情報の取得

機械加工現場は次世代スマート工場の実現が求められているが、実際には自律制御型工場は十分に実現できていない。その大きな原因の一つとして機械加工で生じるトラブルがあげられる。特に切削加工を行う現場においては加工現象が原因となる課題が多く残っている。例えば、突発的な工具破損であり、その破損モードは複雑で、ねじり・曲げ・溶損などがあげられる⁶⁾。

そこでマシニングセンタなどの回転工具系に対して、著者らが継続して開発を進めてきた無線多機能モニタリングシステムはより加工点に近い点でのセンシングをするため、ツールホルダや工具内部にセンサを設置する設計とした。一例として無線振動モニタリングシステムでは工具ホルダ（シャンク規格BT40またはBT30）内に1軸方向に感度をもつ圧電型加速度センサが回転中心から径方向に等距離で回転座標系の回転（接線）方向に感度を有するように等間隔に4つ配置されている。各センサの加速度 a_{x1} 、 a_{x2} はFig. 2に示す矢印の方向に+の感度を有しており、半径方向として λ_m は $(a_{x1}-a_{x2})/2$ で振動加速度の差分演算により算出できる。また、回転

方向を示す R_m の振動加速度は、 $(a_{y1}+a_{y2})/2$ の加算演算により算出できる。したがって半径方向、回転 1 方向の計 2 方向の振動加速度のモニタが可能である。増幅器、A/D 変換器、マイクロコントローラおよび無線送信機もホルダ内部に配置した。加速度センサからの信号は増幅器でアナログ演算処理した後に A/D 変換してデジタル信号処理で情報を圧縮し、その結果を無線送信し、受信機に接続された PC により計測結果をリアルタイムに表示・記録可能である。また回転するホルダ内からの送信であるため、回路は内蔵した充電式電池で駆動して 1 回の充電で 20h の連続モニタリングが可能なる仕様である。さらに、 X_m 、 R_m と工作機械の CNC サーボから XYZ の座標の情報も時系列で同期して同時に取得可能なシステムである。このシステムを用いることで加工中のインプロセス振動情報から加工現象を解明し異常を検知することが可能^{2,3)}である。

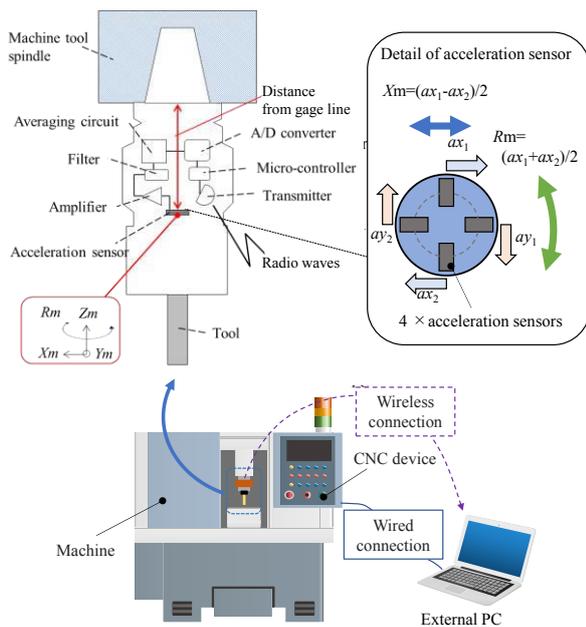


Fig. 2. Schematic drawing of wireless vibration holder system.

2.3 取得データの応用展開

2.1 節でも述べたように次世代スマート工場においては様々な機器間がつながることで全体最適化により、工場全体で見たとときの生産性を向上させることが求められる。切削加工を前工程とし、磨き加工を後工程とした際に、2.2 節で用いた無線振動モニタリングシステムで得られた前工程の振動データを用いることで後工程の磨き作業を効率化する概念図を Fig. 3 に示す。ホルダ

振動情報と CNC 座標情報を組み合わせることでワーク上の異常振動が生じていた座標が把握でき、その座標付近を選択的に磨く方法で無駄な加工時間の戦略的な削減を具現化する手法である。この手法をブレード形状に適応することで、その有効性は確認⁷⁾できている。

以上より、CNC サーボ情報の取得と無線送信の技術を工具ホルダに応用して情報を同時取得する手法は、次世代スマート工場の物理情報収集の技術として非常に有効であることが実証されてきている。

本手法の本質は、無線送信の技術を活用して切削加工点に近接する箇所から振動情報を取得する一方で、同時に工作機械の運動を CNC の座標情報としても取得して、それらを戦略的に活用する点にある。そこでより小型で内部回路を同様にした無線式コンパクト加速度センサを開発することで、旋盤などのワーク回転系の工作機械にも汎用的に展開できるものと考えられる。

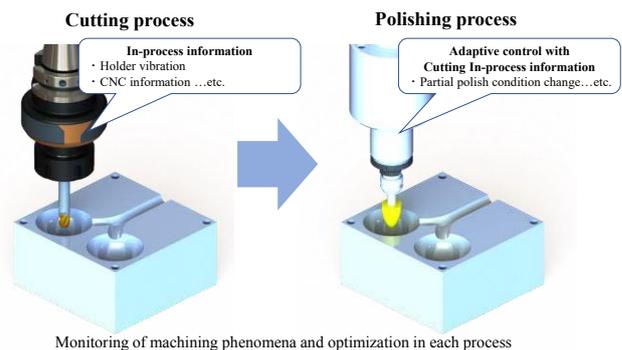


Fig. 3. Schematic drawing of the overall optimization of a wireless vibration monitoring system for a polishing process.

3. 無線式コンパクト加速度センサの旋盤加工への適応

3.1 無線式コンパクト加速度センサの概要

Figure 4 は、25mm 立方 (約 $25 \times 25 \times 25$ mm) のコンパクトなスペース内で 3 成分の情報を無線で取得するためのシステム構成図である。振動加速度は 3 軸方向に感度をもつ圧電型加速度センサによって検知可能とした。25mm 立方のボックス内には加速度センサ以外に、増幅器、A/D 変換器、マイクロコントローラおよび無線送信機を配置した。加速度センサからの信号は増幅器でアナログ演算処理した後に A/D 変換してデジタル信号処理で情報を圧縮し、その結果を無線送信し、受信機に接続された PC により計測結果をリアルタイムに表示・記録可能にした。内部回路では移動実効値を計算しており、サンプリ

ングレート 50~200Hz にて外部の PC に送信する仕様である。すなわち、センサ信号の任意時間 t における差分または加算演算の出力を $x(t)$ としたとき、ホルダ振動の移動実効値 RMS (Root Mean Square) 演算 $a(t)$ は次式で示される。

$$a(t) = \left(\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau)^2 d\tau \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

無線ホルダシステム内のマイコンでは、積分時間を $T=0.1s$ と設定しリアルタイムにアナログ演算した。すなわち、得られたデータからは振動の大きさを把握することができるため異常が生じているかどうかのわかりやすい。コンパクト化による検出位置の機動性を優先して、25mm 立方のボックスとは別に回路駆動用の充電電池（または AC アダプタ）を設置して、電源は別置き仕様とした。また、同時に工作機械の CNC と接続することで主軸・移動軸のモーター負荷情報や XZ の座標情報も時系列で同期して取得可能な仕様である。

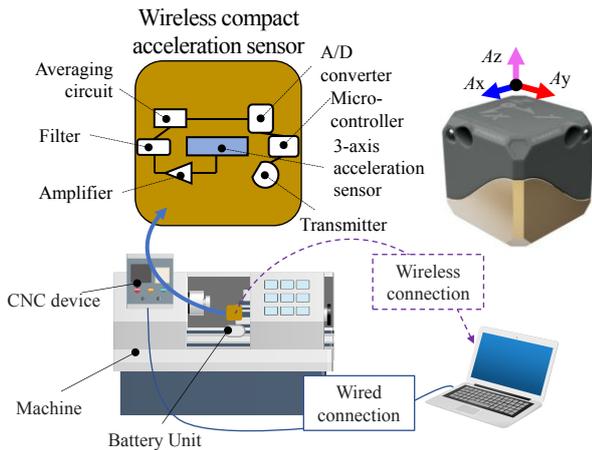


Fig. 4. Concept of wireless compact acceleration sensor.

3.2 旋盤での実験方法

Figure 5 に実験の様子を示す。被削材は炭素鋼 S55C ($\phi 30 \times 35L$) を使用し、1つのテストピースで連続5回（被削材厚み: 2mm）の突切り加工を行い、計 225 回の加工を行った。切削工具はホルダに京セラ製 KGDR2525M-2T17、インサートに同社製 GDM2020R-015PF-15D (PR1535 MEGACOAT NANO コーティングでコート膜の硬度 35GPa, 酸化開始温度 1,150 °C) を使用した。切削条件を Table. 1 に示す。切削工具と工作機械の間には切削動力計 (Kistler 製 9129AA) を取り付け、突切り回数に対する X, Y, Z 方向の切削抵抗を測定した。無線式コンパクト加速度センサはマグネットを用いて切削動力計に取

り付け、各振動加速度の方向は切削抵抗と同様とした。すなわち、Y 方向が主分力、X 方向が背分力、Z 方向が送り分力とした。無線式コンパクト加速度センサで計測した加速度の RMS 値は、ワイヤレス送信の最大周波数約 200Hz で切削加工中の振動加速度を計測した。加工時にはすくい面側からクーラント（サンコーオイル製 SE-1970 濃度約 10%）を供給した。25 回加工毎に光学顕微鏡（Keyence 製 VR-3000）により刃先を観察して最大逃げ面摩耗幅を測定し、振動加速度と切削抵抗との関係を検討した。

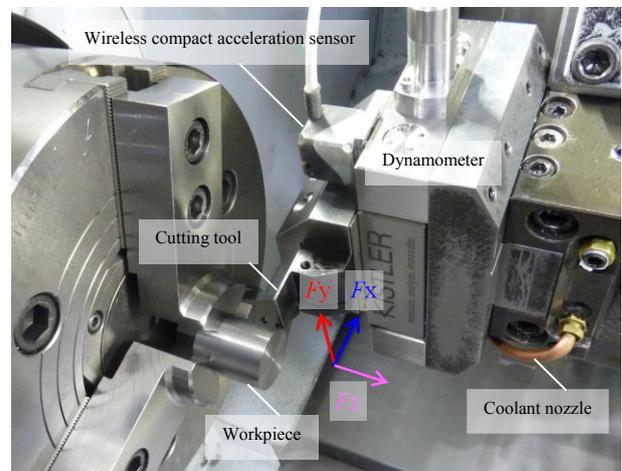


Fig. 5. Experimental set-up for the continuous parting-off.

Table 1. Cutting conditions.

・ $\phi 30 \text{ mm} \rightarrow \phi 5 \text{ mm}$	
Cutting speed	130 m/min
Revolution speed	Max. 3500 min^{-1}
Feed	0.05 mm/rev
Step (feed / back)	1 mm / 0.05 mm
・ $\phi 5 \text{ mm} \rightarrow \phi 2.1 \text{ mm}$	
Revolution speed	3500 min^{-1}
Feed	0.02 mm/rev
Step (feed / back)	0.3 mm / 0.01 mm

3.3 工具摩耗と切削抵抗の動的成分の関係

ここで工具摩耗の進行と切削抵抗の動的成分の関係について検討する。Figure 6(a) は刃先が十分に鋭利な新品工具を用いた場合に対する、工具と工作物と切り屑の流出状態を示す模式図である。切り屑はせん断変形を生じてすくい面側に排出され、また逃げ面と工作物との接触面は非常に小さい。一方で工具摩耗が進行すると、一般に Fig. 6(b) に示すように刃先部に丸みが生じ、その結果として押しならし作用で一部の切り屑の流れが逃げ面側に分離する。さらに逃げ面と工作物の接触面積

も増大して、大きな押しならし力で凝着現象が生じる。凝着面では不安定な癒着と離脱を繰り返し、切削抵抗に動的成分を生じることが知られている⁸⁾。したがって逃げ面摩耗が進行すると凝着作用が増大して、工具に生じる振動加速度も増大すると考えられる。さらに押しならし作用も増大して、切削抵抗の静的な成分も増大するものと考えられる。そこで本報では、開発した無線式コンパクト加速度センサを工具の極近傍に取り付け振動加速度のRMS値のモニタを遂行しながら、切削抵抗の静的成分も同時に計測した。

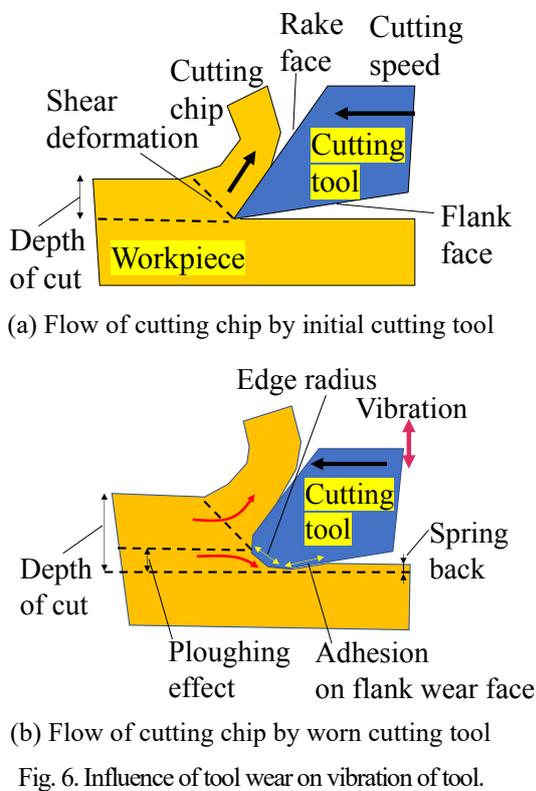


Fig. 6. Influence of tool wear on vibration of tool.

3.4 旋盤での実験結果および考察

Figure 7に加工数と最大逃げ面摩耗幅の関係を示し、同グラフ内に225回加工後の刃先観察画像も示す。本評価では加工数5回で初期摩耗が進行した後、加工数の増加とともに逃げ面摩耗幅が単調に増加する結果となった。また、摩耗は主に勝手の反対側のコーナ部で進行し、小さな欠損とアブレイブ摩耗が混在する定常的な摩耗形態であった。

Figure 8に計測した振動加速度と切削抵抗の静的成分の関係を示す。両方ともX, Y, Zの3軸成分を計測しているが、すべての方向に対して同様の傾向が見られた

ため、ここではY軸（主分力）方向の結果のみを示している。グラフより振動加速度と切削抵抗には極めて良好な相関が得られており、工具の極近傍に無線式コンパクト加速度センサを取り付ける手法が有効であることがわかった。この結果からステップによる突切り加工においては、振動加速度により切削抵抗の変化を間接的に把握することが可能であり、振動加速度により工具の定常的な摩耗状態を十分に把握することが可能であると考えられる。

Figure 9に異なるインサート切削工具で同様にS55Cを70回連続突切り加工した場合のX軸（背分力）方向に対する振動加速度と切削抵抗の変化を示し、Fig. 10に70回加工後の刃先逃げ面およびすくい面の観察画像を示す。Figure 10(a)より70回加工後のすくい面側の刃先は摩耗の進行に起因して丸みが生じており、Fig. 10(b)よりインサート正面の逃げ面側に大きなフレーク欠損が生じていることがわかる。特に逃げ面で生じた大きな欠損はFig. 9中の矢印で示すように、切削抵抗の突発的な変化から62回目に発生しているものと考えら

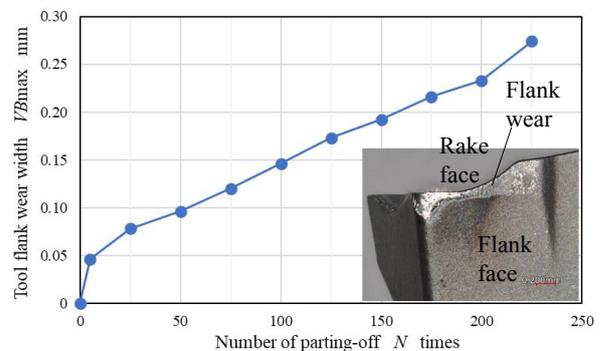


Fig. 7 Relationship between the number of parting-off and the maximum tool flank wear width.

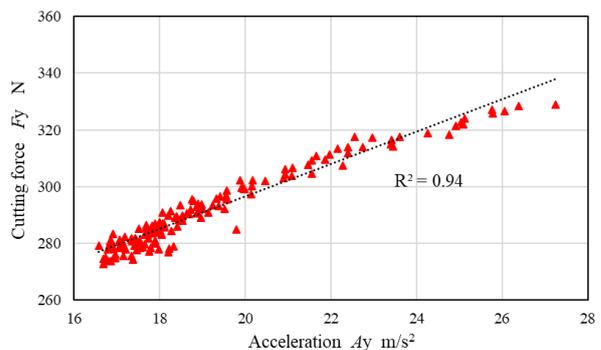


Fig. 8. Relationship between the acceleration and cutting force in the Y-axis direction.

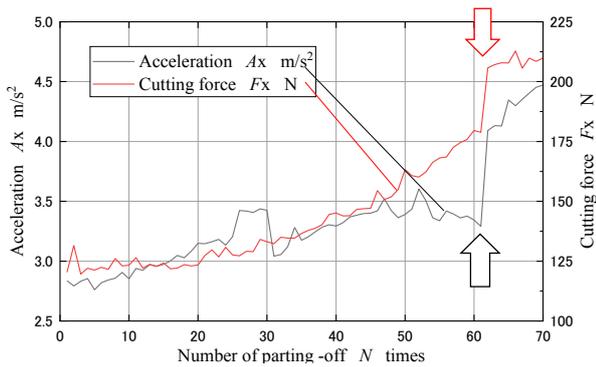


Fig. 9. Variation of the acceleration and cutting force with the number of parting-off in the X-axis direction.

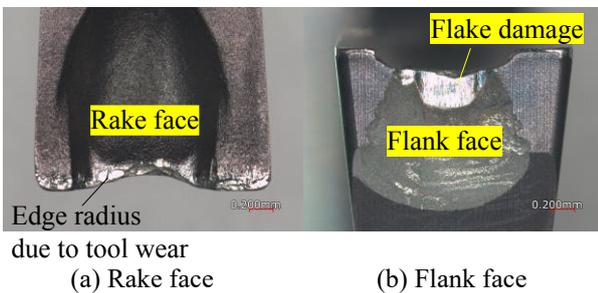


Fig. 10. Images of worn tool.

れる。また、62回目の切削抵抗の増加とともに振動加速度の値も急激に増加していることがわかり、これは振動加速度により刃先の欠損検知も可能であることを示すものと考えられる。すなわち、逃げ面側にフレイク欠損が生じ、そのフレイク面は微小な凹凸を有するため、工作物との接触が不安定となり、切削抵抗に動的成分が生じたためと考えられる。

以上の結果より、刃先が定期的に摩耗する場合や突発的に欠損する異常事態の場合等において、工具の極近傍に開発した無線式コンパクト加速度センサを設置する手法は、切削工具の状態把握に非常に有効であることを示すことができた。

4. 結 言

人が主役となる新たなものづくり技術を目指した次世代のスマート工場の構築に向け、無線式コンパクト加速度センサを開発し、その活用方法について検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 旋盤の旋削加工において、新たに開発した無線式コンパクト加速度センサで加工点の極近傍からの加工情報を取得し、その情報を用いて高度な加工状態の診断が

具現化できる可能性を示すことができた。

(2) 無線式コンパクト加速度センサを用いて炭素鋼S55Cの連続突切り加工を行い、振動加速度と逃げ面摩耗幅および切削抵抗との関係を考察した。その結果、振動加速度と切削抵抗には密接な相関があり、振動加速度により工具の定常的な摩耗状態を把握できることがわかった。

(3) 刃先に欠損が生じた場合には、切削抵抗の増加とともに振動加速度も顕著に反応することがわかり、刃先の突発的な異常検知も可能であることがわかった。

(4) 開発した加速度センサは25mm立方と小型であり、無線でのデータ取得が可能であることから、製造現場における工具管理のセンシング技術として、非常に有効であることを示すことができた。

参考文献

- 1) 新堂正俊, 松田亮, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察”, 日本機械学会論文集, **81**[826], 00046, 1-15 (2015).
- 2) 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解明”, 砥粒加工学会誌, **61**[12], 674-680 (2017).
- 3) 尾崎信利, 廣垣俊樹, 青山栄一, 松田亮, “エンドミル加工面による高振動数のびびり振動の逆解析と無線工具ホルダを用いた検証”, 砥粒加工学会誌, **67**[2], 87-94 (2023).
- 4) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダシステムによるボールエンドミル自由曲面加工の振動モニタとその効果”, 砥粒加工学会誌, **65**[4], 201-206 (2021).
- 5) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “エンドミル荒加工のインプロセス情報と協働ロボットの仕上げ作業工程における内部および外部センサ情報取得の統合の考察”, 日本機械学会論文集, **88**[913], 00091, 1-14 (2022).
- 6) 藤澤政泰, “機械孔加工の極限”, 精密工学会誌, **78**[6], 448-452 (2012).
- 7) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “5軸マシニングセンタからの加工情報と協働ロボットによる仕上げ作業の統合”, 砥粒加工学会誌, **67**[3], 157-163 (2023).
- 8) 手塚亮, 關谷克彦, 山田啓司, 山根八洲男, “切削抵抗動的成分による工具-被削材間の凝着性評価”, 精密工学会誌, **76**[8], 926-932 (2010).