



# 切削加工の DX を加速させるセンサ搭載 切削工具

Sensors-Embedded Cutting Tool to Accelerate Digital Transformation in Cutting Processes

栗山 裕介\*  
Yusuke Kuriyama

香西 孝司  
Koji Kosai

原田 真志  
Masashi Harada

小池 雄介  
Yusuke Koike

吉田 高太  
Kota Yoshida

村上 大介  
Daisuke Murakami

切削加工では加工中の刃先を直接見ることができないため、加工条件の最適化には熟練作業者の勘や経験に頼ることが多かった。近年、工作機械に内蔵された各種センサから総合的に切削力などの加工状態を監視する技術が実用化されている。しかし、切削点から測定点が遠く、その感度や精度は十分ではない。そこで、当社では切削点に最も近いインサートやドリル、エンドミルを保持するホルダにひずみセンサを組み込みデータを無線で機外に転送することで、加工中の切削力が測定できるセンサ搭載切削工具、センシングツール Sumi Force を開発した。Sumi Force は工作機械に簡単に取り付けられるため、顧客実機、実製造ラインでも切削力の測定が可能である。本稿では、Sumi Force を活用して、顧客の加工を最適化するソリューションサービスと、切削力の変化から工具摩耗や工具の欠損などの異常を検知する技術の開発について報告する。

During cutting processes, the cutting tip cannot be directly observed, leading to reliance on skilled workers' intuition and experience for optimizing cutting conditions. In recent years, sensors integrated into machine tools have been utilized to comprehensively monitor machining status including cutting forces. However, their sensitivity and accuracy are not enough due to the distance between the cutting point and the measurement location. To address this challenge, we developed "Sumi Force," a sensing tool that measures cutting forces in real-time by placing strain sensors on the tool holder, where inserts, drills or end mills are held, closest to the cutting point. The measured data is wirelessly transmitted outside the machine tool, enabling easy integration into various machines and production lines used by customers. This paper introduces KKDX machining support, a service that leverages Sumi Force to optimize machining processes for customers, and discusses the development of techniques to detect anomalies such as tool wear and cutting tip breakage based on changes in cutting forces.

キーワード：切削加工、加工監視、センサ、切削抵抗、異常検知

## 1. 緒 言

切削加工は生成される切りくずや切削液により、加工点を直接見ることができない。このため、加工条件の最適化や工具の欠損などの確認は、作業者の感覚に頼る部分が多かった。しかし、近年、熟練作業者の不足に伴い、作業者に代わり加工状態を監視する技術の開発が進んでいる。例えば、工作機械の主軸電流値や駆動系モータ電流値などから総合的に切削力などの加工状態が見える化する技術が実用化されている<sup>(1)~(3)</sup>。しかし、加工点から測定点が遠いため、それら技術の感度や精度は十分ではない。

そこで、当社では加工点に最も近いインサートやドリル、エンドミルなどを保持するホルダ部にひずみセンサを組み込んで、データを無線で工作機外に転送することで、加工中の切削力が測定できるセンサ搭載切削工具、センシングツール Sumi Force を開発した。刃先に近いホルダ上にセンサを搭載することで、高感度かつ高精度な加工監視が可能となる<sup>(4), (5)</sup>。

センシングツール Sumi Force は工作機械に簡単に取り付けられるため、顧客実機、実製造ラインでも切削力の測

定が可能である。当社ではKKD（勘・経験・度胸）にDX（見える化）をプラスして、トラブル原因の究明や、加工条件の最適化を図るKKDX加工サポートを展開している。また、センシングツールは切削力の変化から工具摩耗や工具欠損も検知できる。本報告では、センシングツールを活用した顧客での加工条件最適化や工具摩耗推定、異常検知技術の開発について報告する。

## 2. 加工サポートによる加工条件最適化

### 2-1 旋削用センシングツール概要

図1に開発した旋削用センシングツールの概要を示す。

旋削用センシングツールはホルダ底面と背面の2ヶ所にひずみセンサを、正面にデータを送受信するための無線通信・制御基板と電池を内蔵し、寸法・仕様は通常ホルダと同じとなっている。これにより、現状使用しているホルダをセンシングツールに置き換え、工作機械の窓部に受信機を設置すれば、加工中の切削力の変化を簡単に測定することができる。測定できる切削力は主分力、送り分力、背分

力の3分力ではなく、ホルダに垂直、水平方向に加わる2分力である。図2のように、底面に搭載したひずみセンサは主分力による曲げひずみを主として、背分力による曲げひずみと圧縮ひずみとの合成値を検出するが、工具垂直方向に荷重をかけて検定することで垂直荷重として出力している。同様に背面に搭載したひずみセンサは送り分力による曲げひずみに、背分力による曲げひずみと圧縮ひずみとの合成値を検出、この合成値を工具水平方向に荷重をかけて検定することで水平荷重として出力している。

サンプリング周波数は約2kHz、無線はBluetooth LE<sup>\*1</sup>を使用している。センサや無線等を埋め込む部分を掘り込んでいるが、通常の突出し量で加工する場合、剛性は通常ホルダの99%を確保した。



図1 旋削用センシングツール概要

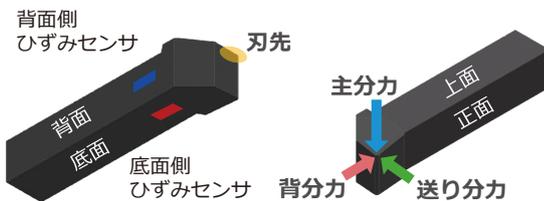


図2 センサ位置と3分力の関係

### 2-1 センシングツールを活用した加工サポート

図3に自動車部品を製造する顧客の実製造ラインでセンシングツールを活用した事例を示す。同図に示すように旋盤の加工室内のタレットにセンシングツールを設置して、機外の窓部に受信機を設置することで簡単に切削力が測定可能である。

図4に加工パスと切削力の測定結果を示す。パス①では取り代一定で加工するため、切削力は安定して推移したあと、図中A付近の壁面に工具が接する部分で急増する。このような切削力の急増は、工具が欠損する大きな要因の一つであり、センシングツールにより、顧客の実製造ラインでは垂直荷重が1.3倍、水平荷重が2倍になっていることが

定量的に把握できた。また、パス③では取り代の変動にあわせて切削力が変化しており、センシングツールにより加工状態をよく見える化できていることがわかる。本事例では、パス①の切削力が急増するA区間の送り速度を落として欠損を防止することで、より耐摩耗性重視の工具材種を選択、工具寿命延長を実現した。

図5にパス③のB区間における平均水平荷重の加工ワーク数量に対する変化を示す。加工ワーク数量の増加に伴い、工具摩耗が進展、切削力が増加していることがわかる。さらに従来材種に対して、提案した新工具材種では切削力増加の傾きが小さく、耐摩耗性が向上している。



図3 実製造ラインでのセンシングツール設置

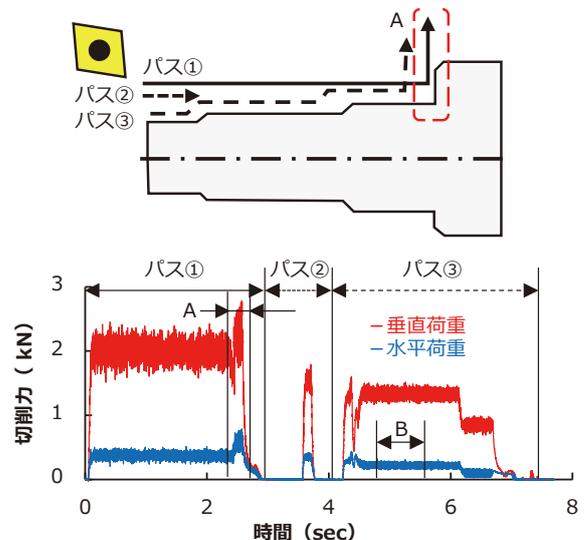


図4 加工パスと切削力の変化

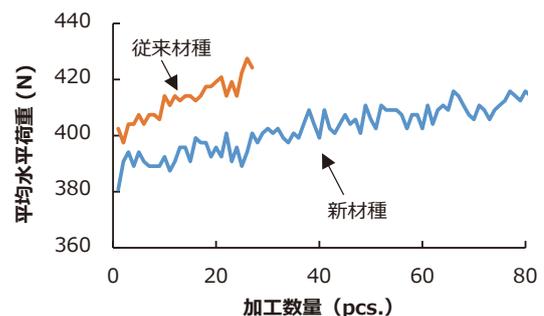


図5 加工数量に対する平均水平荷重の変化

本事例では切削力急増対策について紹介したが、その他、伸びた切りくずが刃先と被削材の間に噛みこみ切りくずの噛みこみやびびりと呼ばれる加工時の異常振動を検知することも可能であり、簡単に顧客実機に装着可能なセンシングツールは、顧客実製造ラインでの定量的加工条件最適化に有用である。

### 3. 小型旋盤での工具摩耗監視

#### 3-1 小型旋盤用センシングツール概要

図6に小型旋盤用センシングツールを示す。小型旋盤では工作機械内のスペースが狭い上、ホルダが細いためセンサを埋め込むために掘り込み加工を行うと剛性が大きく低下してしまう。そこで、小型旋盤用センシングツールはくし刃型刃物台を想定して、ホルダの背面にセンサと無線通信・制御基板を配置した。これにより、刃先に加わる水平荷重が測定可能である。本稿では、本ツールにより工具刃先摩耗の進展を検知できるか検証した。

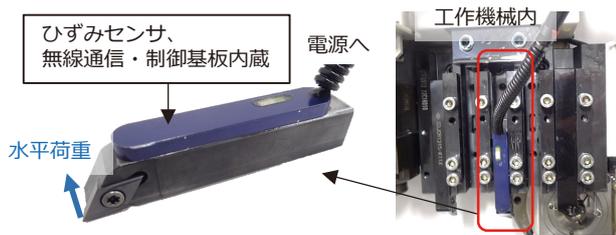


図6 小型旋盤用センシングツール概要

#### 3-2 ひずみ量による工具刃先摩耗の監視結果

表1に実験条件を示す。実験は主軸移動型の小型旋盤で行い、14mmの範囲を2パス加工した後、突切り加工を繰り返した。インサート材種には、サーメット (P10) とコーテッド超硬 (P40-PVD) の2種類を用いて、両者の摩耗とセンシングツールで測定される水平荷重の相関関係を調査した。なお、今回は水平荷重としてひずみ量で代用した。

図7にホルダのひずみ量の2パス分の波形変化を示す。測定されたひずみは圧縮ひずみで負の値であるが、絶対値

表1 実験条件

	工 具：DCGT11T302R-FX サーメット (P10) コーテッド超硬 (P40-PVD) 被削材：SUS316L 切削速度：vc=120 m/min 送り：f=0.05 mm/rev. 切込み：ap=1.0 mm 切削長さ：l=14 mm/pass 雰囲気：Wet, 不水溶性
--	--

化した正の値で表記している。加工開始直後に切削力に伴うひずみ量は増加し、ほぼ一定となる。また、2パス目の加工終了間際に不安定にひずみ量が急増していることが確認された。これは切りくずの噛みこみによるものと推定される。

図8にホルダのひずみ量と逃げ面摩耗幅の変化を示す。図のようにひずみ量の変化と逃げ面摩耗幅の変化はよく一致しており、いずれのインサートでも相関係数は0.98を超えている。さらにサーメットとコーテッド超硬を比較すると、コーテッド超硬のほうが摩耗、ひずみ量ともに小さく、インサートの違いによる摩耗進展速度の違いも可視化されている。

以上より、センシングツールを活用することで、小型旋盤でも工具刃先摩耗の進展を監視できることが示された。

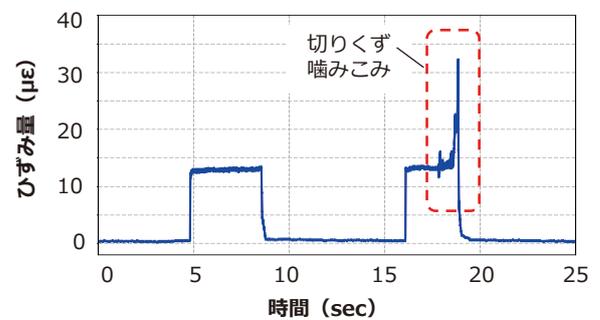


図7 ひずみ量の測定結果

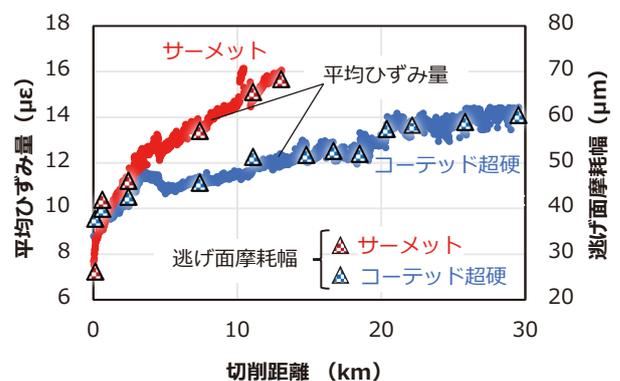


図8 平均ひずみ量と逃げ面摩耗幅の変化

### 4. エンドミル加工時の刃先状態監視

#### 4-1 転削用センサ搭載ホルダ概要

図9に開発した転削用センシングツールを示す。転削用センシングツールでは、切削抵抗によってツールホルダに発生するひずみを変換することで、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ および $F_z$ の4成分が取得できる。なお、本稿では刃先に発生する切削抵抗の方向を直感的にわかりやすくする目的で、図9のよう

にモーメント荷重の方向が曲げの原因となる切削抵抗の方向と一致するように、モーメント荷重  $M_x$ 、 $M_y$  の軸、方向を入れ替えたものを  $M'_x$ 、 $M'_y$  として定義しなおしている。

センシングツールでは、センサと工具が一体となって回転することから、切削工具の回転座標系での測定が可能である。また、測定されるモーメント荷重  $M'_x$ 、 $M'_y$  について工具先端のみに切削抵抗が作用していると仮定した場合、モーメントの長さにあたるセンサから工具先端までの距離で除することで、切削抵抗  $F'_x$ 、 $F'_y$  を求められる。この  $F'_x$ 、 $F'_y$  をプロットすることで、図10に示すような、工具回転軸に垂直な平面内の切削抵抗変化に対応した特徴的な幾何形状を示すグラフを取得できる。なお、切削抵抗  $F'_x$ 、 $F'_y$  とモーメント荷重  $M'_x$ 、 $M'_y$  は比例関係にあることから、いずれのグラフも同じ幾何形状を有する。以下、この幾何形状をグラフ幾何形状とよぶ。このグラフでは、工具1回転以上の時間幅で測定された定常加工時の切削抵抗をXY平面にプロットしている。このグラフ幾何形状は工具刃先状態によって変化することから、工具摩耗や欠損などの異常検知に活用できる可能性がある。そこで、本稿ではセンシングツールで測定されたグラフ幾何形状を、正常状態における理論的グラフ幾何形状と比較し、その類似度の変化から工具刃先摩耗の進展を監視できるか試みた。

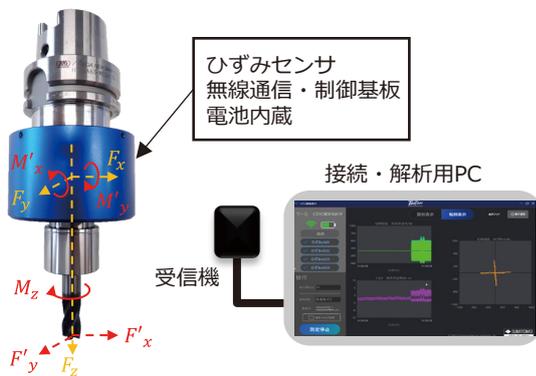


図9 転削用センシングツールの概要

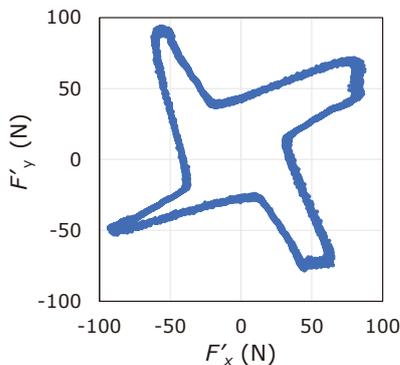


図10 切削抵抗XYグラフ

#### 4-2 瞬間切削力モデルによる幾何形状の推定

グラフ幾何形状の測定結果との比較対象として用いる正常状態における理論的グラフ幾何形状を取得するために、瞬間切削力モデル<sup>(6),(7)</sup>に変更を加えて、切削加工中の各切れ刃が工作物と接触する切削断面積を計算し、グラフ幾何形状の推定を行う。このモデルでは、図11に示すように、エンドミルを工具軸に垂直な平面で微小薄板要素に分割し、ある瞬間において各微小薄板要素における任意の切れ刃  $i$  の先端に微小切削抵抗が作用すると仮定する。モデルはホルダ内のセンサ部を原点とし、切削工具回転座標系におけるモーメント荷重として算出、比切削抵抗を用いずに計算するため簡略化した。さらに、各切れ刃における半径方向の刃先位置変動を静的に測定し、切り取り厚さの変化として考慮する。

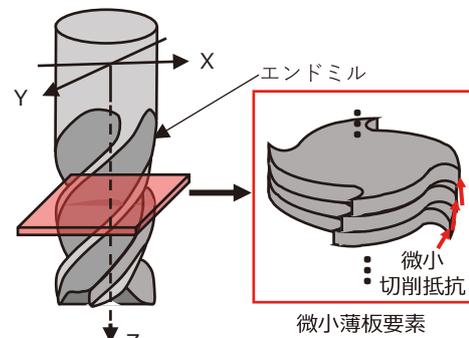


図11 瞬間切削力モデルの概念

上記変更を加えたモデルにおいて、切削工具に作用するモーメント荷重ベクトル  $M'_{tool}$  は、任意の切れ刃  $i$  全体に作用するモーメント荷重ベクトル  $M'_i$  の総和として以下の式で算出される。

$$M'_{tool} = \sum_{i=1}^N M'_i = \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{L-a_p}^L z R_i(z) K_c E \cdot (h_i(z) + r_i) dz \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$N$  は刃数、 $L$  はひずみセンサから工具先端までの軸方向距離、 $a_p$  は軸方向切込み深さ、 $z$  はひずみセンサと微小薄板要素との軸方向距離、 $R_i(z)$  は、ねじれ角と刃先位置による切れ刃  $i$  の位相の変化を示す回転行列、 $K_c$  は刃先での比切削抵抗の大きさを示すスカラー値、 $E$  は工具刃先における切削抵抗ベクトルの方向、 $h_i(z)$  は半径方向の刃先位置変動を無視したときに幾何的に計算される半径方向切り取り厚さ、 $r_i$  は半径方向の刃先位置変動に伴う切り取り厚さの変化である。ここで、 $a_p$  が小さい範囲であれば  $z \approx L$  と近似でき、式 (1) を次式のように簡略化できる。

$$M'_{tool} = LK_c \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{L-a_p}^L R_i(z) E \cdot (h_i(z) + r_i) dz \right\}$$

$$= LK_c \sum_{i=1}^N A_i = LK_c A_{tool} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$A_i$ は切削断面積の大きさを持つ切削断面積ベクトルと定義する。上式は、各切れ刃での切削断面積ベクトルの和 $A_{tool}$ を導出している。 $a_p$ が小さい範囲であれば $A_{tool}$ は $M'_{tool}$ と同じグラフ幾何形状を描き、比切削抵抗 $K_c$ を用いずに算出できる。また、前述の通りセンシングツールで測定される切削抵抗 $F'_x, F'_y$ もモーメント荷重と同じグラフ幾何形状を有する。したがって上記方法によって計算、描画した $A_{tool}$ の推定グラフを正常状態における理論的グラフとし、センシングツールによる測定グラフとの比較に用いた。

4-3 グラフ幾何形状による工具摩耗の監視結果

表2の条件でエンドミルによる工具寿命試験を行い、切削断面積 $A_{tool}$ の推定グラフ幾何形状と、センシングツールで測定した切削抵抗の測定グラフ幾何形状の類似度変化から工具刃先摩耗の監視を試みた。類似度は図12に示す画像処理技術にて定量的に評価した。まず、各グラフにおいて、最大値を基準にグラフのサイズをそろえてから幾何形状を抽出し、グラフを二値化した画像に変換する。このとき幾何形状によって閉じられた領域を1、それ以外を0とし、それぞれ白色、黒色で表現する。推定グラフと測定グラフの内、片方の画像を重ね合わせ、1と0が一致しない排他的論理和の領域を示す白色領域の面積を計算する。この白色領域の面積が小さいほど、両画像の類似度が高いことを意味する。

表2 実験条件

工 具 : GSX4120C-2D (住友電工ハードメタル製)
Φ12、4枚刃、ねじれ角30°、等ピッチ
突 出 し : 35 mm
被 削 材 : S50C
切削速度 $v_c = 80$ m/min
送り $f = 0.02$ mm/tooth
軸方向切込み $a_p = 1.0$ mm
半径方向切込み $a_e = 0.362$ mm
切削距離 $L = 30$ m (1パス0.15 m × 200パス)
切削方向 : Down-cut
雰囲気 : Dry

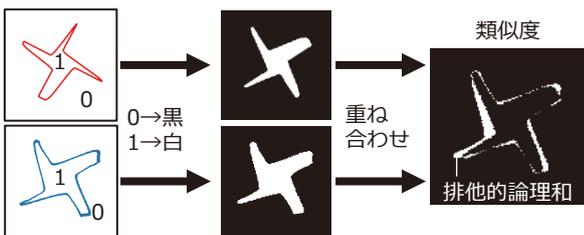


図12 排他的論理和による類似度の計算方法

図13に20、200パス加工後に観察した刃先逃げ面の写真と、 $A_{tool}$ 推定グラフと切削抵抗測定グラフ、および排他的論理和の画像を示す。測定グラフ内の数値は、\*を付記した刃を基準としたときの各刃における半径方向の刃先位置変動量である。逃げ面摩耗幅拡大とともに、測定グラフにおいて、各刃に対応した線の幅が十字の各線中央部分からグラフ中心付近にかけて広がっていることがわかる。この変化は、工具摩耗進行に伴い半径分力方向の力が強まったことに起因すると推定される。

図14に、切削距離3m (20パス) ごとに測定した逃げ面摩耗幅と排他的論理和の領域の面積を示す。比較対象として、定常加工中の切削抵抗の最大値と、回転軸周リトルクの最大値も測定し、逃げ面摩耗幅以外はそれぞれ1パス目の値で除して正規化している。図14から、切削抵抗やトルクの最大値と比べ、排他的論理和の領域の面積は切削距離9m以降も漸増し、30mでやや急増するなど、逃げ面摩耗幅と同様の傾向を示している。したがって、推定グラフと測定グラフの幾何形状類似度から工具刃先状態を監視する手法の有効性が示された。

	刃先写真 (逃げ面側)	$A_{tool}$ 推定グラフ	測定グラフ	類似度
1 パス目				
20 パス目 (3 m)				
200 パス目 (30 m)				

図13 推定グラフと測定グラフの類似度

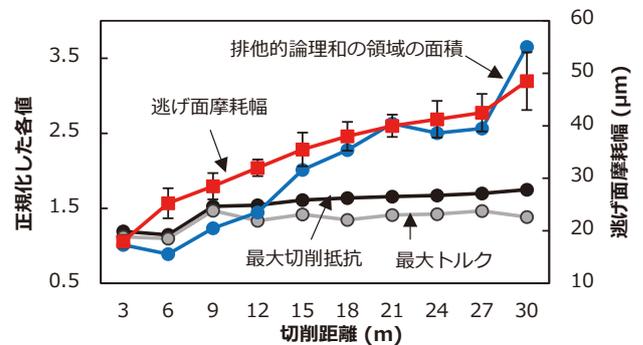


図14 逃げ面摩耗幅と各種測定結果の変化

## 5. 結 言

本稿では工具ホルダにセンサ搭載したセンサ搭載工具、センシングツール Sumi Force、およびその活用事例を紹介した。Sumi Force は加工点に近いホルダにセンサを搭載することで、より高感度かつ高精度な加工状態の見える化を実現する。これにより、顧客の実製造ラインでの加工条件改善や、小型旋盤やエンドミル加工での工具刃先摩耗の監視など、異常検知技術としても広く活用できることを見出した。

今後は、本技術をさらに進化させ、機械加工の自動化やロスの低減、高能率加工による電力消費量低減などを実現し、幅広く社会に貢献していく。

### 用語集

#### ※1 Bluetooth LE (Low energy)

PC や IoT デバイス間の低電力、近距離無線通信に使用される Bluetooth の一種で、バッテリー消費を抑えつつ、一定の通信範囲内でデータを送受信することができる。

- ・ Bluetooth 及び Bluetooth Low Energy は、米国 Bluetooth SIG, INC. の米国ならびにその他の国における商標または登録商標です。
- ・ Sumi Force は住友電気工業(株)の商標です。

### 参 考 文 献

- (1) S. Bombiński, K. Błażej, M. Nejman and K. Jemielniak, "Sensor signal segmentation for tool condition monitoring," Procedia CIRP, vol. 46, pp. 155-160 (2016)
- (2) R. Sato, M. Hasegawa and K. Shirase, "Cutting Force Monitoring based on the Frequency Analysis of Feed Motor Torques," Journal of SME Japan, vol.2, pp. 7-12 (2013)
- (3) T. Watanabe, I. Kono and H. Onozuka, "Anomaly detection methods in turning based on motor data analysis," Procedia Manufacturing, vol. 48, pp. 882-893 (2020)
- (4) H. Shizuka, K. Sakai, K. Honda, R. Okada, and K. Miyajima, "In-situ tool wear monitoring using semiconductor strain sensor in diamond cutting," euspen's 20th International Conference & Exhibition (2020)
- (5) M. Z. Asadzadeh, A. Eiböck, H.-P. Gänser, T. Klünsner, M. Mücke, L. Hanna, T. Tepperneegg, M. Treichler, P. Peissl and C. Czettl, "Tool damage state condition monitoring in milling processes based on the mechanistic model goodness-of-fit metrics," Journal of Manufacturing Processes, vol. 80, pp. 612-623 (2022)
- (6) J. W. Sutherland and R. E. DeVor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," Journal of Engineering for Industry, vol. 108, pp. 269-279 (1986)
- (7) 金子和暉、西田勇、佐藤隆太、白瀬敬一、「傾斜切削理論に基づくエンドミル加工の切削力モデル」、日本機械学会論文集、vol. 83, no. 856 (2017)

### 執 筆 者

栗山 裕介\* : アドバンストマテリアル研究所 主査



香西 孝司 : アドバンストマテリアル研究所  
博士 (工学)



原田 真志 : アドバンストマテリアル研究所



小池 雄介 : 住友電工ハードメタル(株) グループ長  
博士 (工学)



吉田 高太 : 住友電工ハードメタル(株)



村上 大介 : フェロー  
アドバンストマテリアル研究所 室長  
精密工学会フェロー  
博士 (工学)



\*主執筆