

Development of Wireless Communication Tool Holder for Smart Factory in Next Generation and Its Application of Self-Monitoring of Spindle Equipped with Machine Tools

Takamasa YAMAMOTO*, Ryo MATSUDA**, Masatoshi SHINDOU***
Toshiki HIROGAKI⁺ and Eiichi AOYAMA⁺⁺

(Received April 9, 2019)

Nowadays, a 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 developed a novel tool holder equipped with a wireless communication function to monitor a cutting process. In the present report, we discuss the relationship between a concept of cyber physical system (CPS) including connected industries and a purpose of developing wireless communication tool holder, and attempt an application of self-monitoring technology to estimate a spindle equipped with machine tools. As a result, we demonstrated that the developed method with a wireless system is also effective to evaluate the dynamic performance of spindle operation.

Key words : smart factory, tool holder, wireless communication, monitoring, machine tools

キーワード: スマート工場, 工具ホルダ, 無線通信, モニタリング, 工作機械

次世代スマート工場に向けた多機能無線ホルダシステムの開発と工作機械 主軸のセルフモニタリングへの応用

山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一

1. 緒言

近年, 製造業に現場に IoT (Internet of Things) に基づく「つながる工場」に関する技術開発が求められてきており, 日本の次世代の製造業を支えるために, それ

らに関連する新しい研究開発が不可欠である. そこで著者らはマシニングセンタなど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んできた. その応用として, エ

-
- * 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: shindou@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

ンドミル加工における工具内部の温度モニタリング¹⁾、さらに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⁾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。その一方で、加工現場における工作機械の変化・劣化や暖機運転の有無の差などのセルフモニタリングや診断についての開発技術の効果の検討には至っていない。特に生産現場では工作機械の主軸において、その変化・劣化や暖機運転の有無による差、さらに機体差や僅かな仕様の違いなどによる差の管理が重要と考えられる。しかしながら、動的な要因に関してはそれらを容易に判別する手法はなく、主軸モータ電流の差に着目したモニタ³⁾が検討されている程度である。

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ホルダの位置づけを検討した後、工作機械の主軸の状態診断を試みる。すなわち2種類の最高回転数の仕様が異なる主軸を有する工作機械において、加工前に主軸を空転させサーボ内部情報も取得しながらホルダ内の回転方向および半径方向の振動振幅の状態モニタを遂行してその診断を遂行する。その後、ボーリング加工時のその差に着目して考察を遂行することで、新たなモニタリングシステムの応用について検討したので結果を報告する。

2. 次世代スマート工場に必要な技術

2.1 デジタルツインに基づくものづくり技術

2011年からドイツで始まったインダストリ4.0、アメリカのインダストリアル・インターネットの潮流は2014年ころから日本でも本格的な検討が開始され、つながる工場・Connected Industriesなどで2016年より第四次産業革命をリードする国策としてSociety 5.0が提唱されてきている。すなわち、狩猟社会(Society 1.0)、農耕社会(Society 2.0)、工業社会(Society 3.0)、情報社会(Society 4.0)に続く、新たな社会を指すもので、第5期科学技術基本計画において日本が目指す未来社会の姿とされてきている。その実現のため、「デジタルツイン(Digital twin)」と称されるサイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステム(CPS: Cyber Physical System)により、経済発展と社会的課題の解決を両立⁴⁾する、人間中心の

社会(Society)やものづくり技術が必要とされてきている。

デジタルツインにおいては、Fig. 1に示すように工作機械の機上などで生じる現象を有するフィジカル空間から収集したデータとその蓄積・解析結果を介して、サイバー空間とフィジカル空間を密接に結ぶ技術が重要となるものと考えられる。

さらに近年、その拡張概念としてサイバー・フィジカル空間に現場の改善活動や勘コツなどの知恵・知識を融合したデジタルトリプレット(digital triplet)も提唱され⁵⁾、人が主役となるものづくり技術として、その発展が一層期待され、その基幹技術の開発の必要性も益々増大してきている。

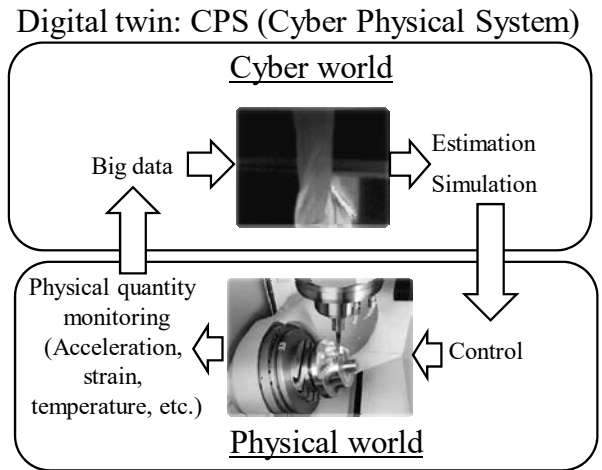


Fig. 1. Concept of digital twin based on cyber physical system.

2.2 つながる工場・Connected Industries

Fig. 2は、CPSを基盤とするデジタルツインやデジタ

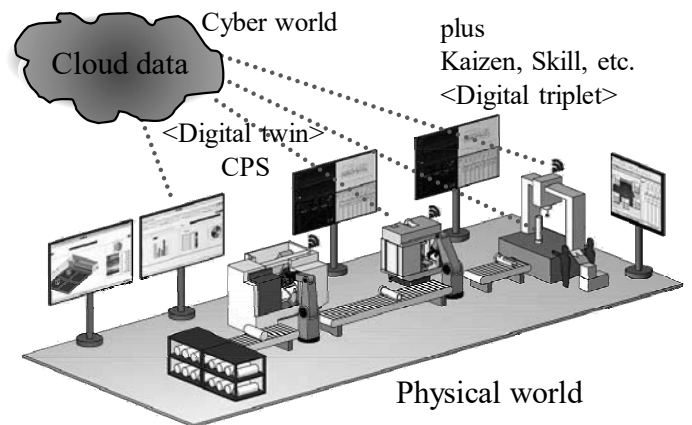


Fig. 2. Smart factory in next generation.

ルトリプレットに基づく次世代のスマート工場概念図である。世の中には、人工知能技術やロボット技術の進歩によって人の行っている仕事が奪われるという議論がある。しかしながら、デジタルツインやデジタルトリプレットにおいてはそれらは人の仕事を代替するのではなく、人の能力を拡張する、あるいは判断を助けるための情報を提供することなどで、人が主役となる新しいものづくり技術を目指すものである。

2.3 工作機械の機上からの物理情報の取得

デジタルツインやデジタルトリプレットに基づくシステムのドライビングフォースは、フィジカル空間からの現場情報であり、すなわちモニタリング・収集の技術開発にあるものと考えられる。近年、スマートフォンに多くのセンサが搭載され普及したこともあり、各種のセンサの小型化や低価格化が進展して、工場内の工作機械、ロボット、搬送機などからのセンサによる物理量のモニタリングと情報収集が容易になってきた。さらにそれらを制御する CNC においてもオープン化が進展し、サーボの内部情報の収集も容易になってきた。その一方で、マシニングセンタに代表される主軸で工具を回転させるタイプの工作機械においては、加工点に近い回転工具からの加工情報・物理量の取得ができない状況にあった。

そこで著者らは、MEMS の回路小型化の技術を用いて工具ホルダ内部に無線 LAN の通信回路を搭載した、Fig. 3 に示す無線多機能ホルダを開発した。本ホルダにおいては、最高回転数 2 万 rpm においてサンプリング周波数 60Hz でデータの転送が可能である。また主軸サイズとしては BT40 番および BT30 番に対応可能な仕様である。

Fig. 4 は、工具の刃先の温度情報を取得する場合のシ

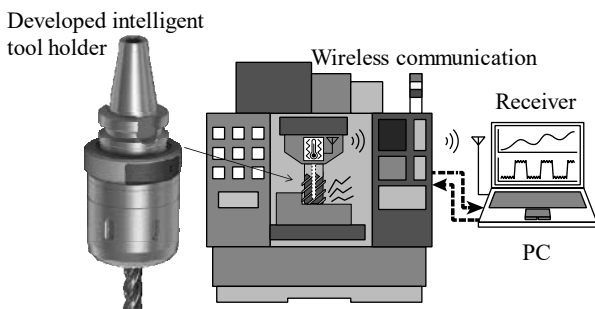


Fig. 3. Developed intelligent tool holder equipped with wireless communication.

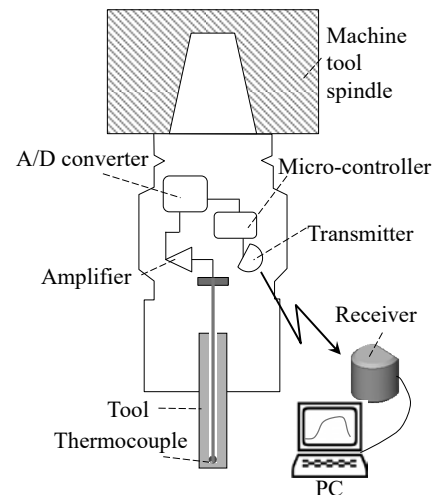


Fig. 4. Developed holder system to monitor tool temperature.

ステム構成図である。工具の軸芯に細穴放電加工の技術でガイド穴を加工して、熱電対センサを埋め込み、その信号をアナログ回路アンプで増幅した後、その信号を A/D 変換してマイコンを介して無線 LAN で送信して、工作機械の機外に設置したレシーバでその信号を受信して PC に転送する手法である。BT40 番の主軸を対象としてドリルやエンドミル工具において、現場の加工情報の取得の手法として有効となることが判明¹⁾している。工具にガイド穴をあける必要があるが、近年は細穴放電加工の技術が向上しており、数分程度で工具にガイド穴をあけることが可能である。したがって現場における実用性としても問題ないものである。

以上より、提案する多機能無線ホルダシステムは、デジタルツインやデジタルトリプレットにおけるフィジカル空間からの現場情報の収集技術として有望であることがわかった。

3. 多機能無線ホルダを用いたセルフモニタリング

3.1 振動加速度のモニタリング方法

Fig. 5 は、BT30 番の主軸を対象としてホルダ内で振動加速度の情報を取得する場合のシステム構成図である。ホルダ内に MEMS の圧電型の加速度センサを 2 個、軸方向にゲージラインより 45mm の位置、かつ回転方向には直径 11mm で 180 度対向に接線方向に感度を有するように埋め込んでいる。加速度センサの固有振動数は約 20kHz である。各センサーからの振動加速度の信号はアナログ回路アンプで加算および減算をして、回転方

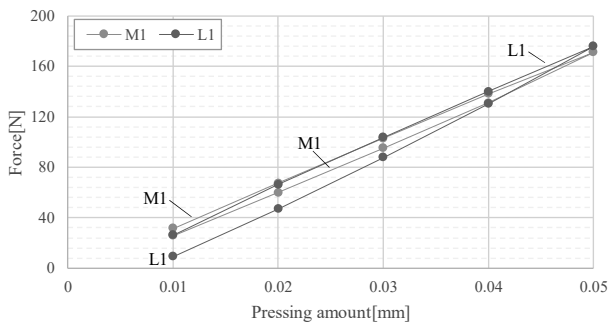


Fig. 7. Estimation of static stiffness in spindle bending.

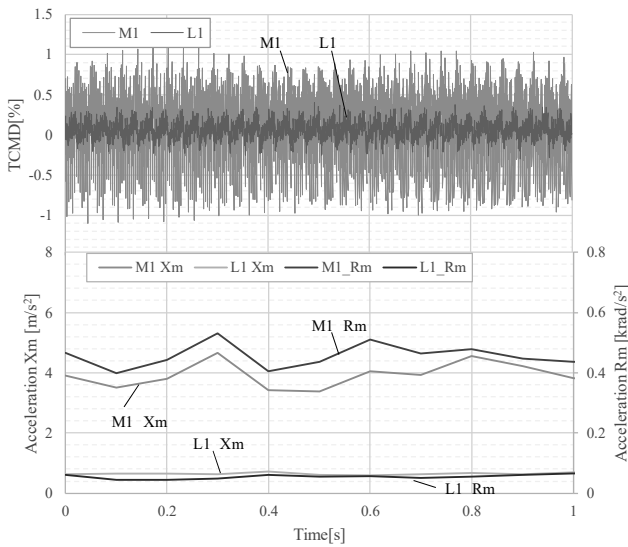


Fig. 8. Monitor of spindle motor current and tool holder vibration (2000rpm).

抵抗値を取得した。その結果を Fig. 7 に示す。押付開始の0.01mm 時点と0.05mm 押し付けた後の同位置でヒステリシスはL1 が17Nであったのに対し、M1 は5Nであった。すなわち L1 の静剛性でのヒステリシスが大きい、軸受け隙間が大きいことが予想される結果であった。すなわち、主軸の最高回転速度が高く設定されている仕様で工具の曲げ方向の静剛性が低い結果であった。

次に空転で主軸の回転数 2000rpm の定常回転中の 1s 間の主軸モータ電流値とホルダ振動加速度のモニタリング結果の時間波形を Fig. 8 に示す。対象とするデータは、主軸を 3000rpm で 30 分以上暖気運転させてから取得した。また図中のモータ電流値は定格電流で無次元化している。Fig. 8 より、最高回転数 24000rpm の仕様 (L1) の方が最高回転数 10000rpm の仕様 (M1) より、主軸モータ電流の変動およびホルダの回転方向振動 Rm、

半径方向振動 Xm が小さな値を示すことがわかる。モータ電流に関しては、ベアリングの隙間が少なく予圧が高く剛性も高い M1 の主軸でしゅう動抵抗が大きく、結果としてモータ電流の変動 (トルク変動) 成分が大きいものと考えられる。一般に転がり軸受けにおいて、回転時の軸受け音が極小となる軸受け隙間が存在する現象が知られている⁸⁾。すなわちその隙間付近では軸受け隙間が増大すると振動も減少する現象が生じる場合が存在すると考えられる。したがって、モータ電流の変動 (モータからのトルク変動) により生じる回転方向振動の外乱の増大の現象とも重畳して、軸受け隙間が小さな M1 の仕様で振動が増大したものと考えられる。

3.4 主軸空転の回転数の変化とセルフモニタリング

Fig. 9 は、主軸を空転で定常回転させた場合の回転数と主軸モータ電流の平均値およびホルダの回転方向振動 Rm、半径方向振動 Xm の関係を示す。図より、M1 において主軸回転数 5000rpm 以上で主軸モータ電流の平均値が顕著に上昇する現象が生じることがわかる。L1 においても主軸回転数 8000rpm 以上で主軸モータ電流の平均値が若干であるが上昇する現象が生じることがわかる。これらは軸受け発熱により生じる主軸の伸びにより、予圧が上昇してしゅう動抵抗が増大した影響と考えられる。一方、ホルダの回転方向振動 Rm、半径方向振動 Xm の値

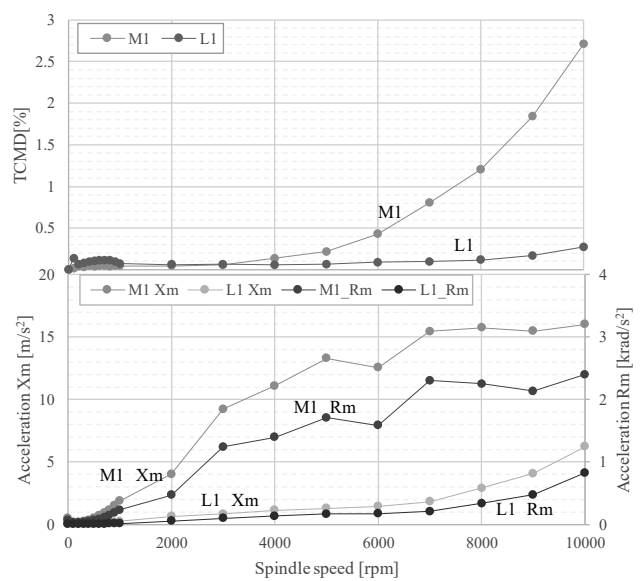


Fig. 9. Influence of spindle speed on average spindle motor current and tool holder vibration.

に着目すると、M1 では2000rpm, L1 では6000rpm 付近よりその値の上昇が確認できる。すなわちホルダでのモニタリングは、モータ電流より低い回転数より感度良く主軸の状態の変化を検出していることがわかる。したがって、主軸モータ電流などのサーボの内部情報に比べホルダの振動の出力は、高い精度で主軸の状態変化のセルフモニタリングを可能とすることが示された。

3.5 主軸仕様の違いとボーリングバーのびびり振動

主軸仕様の異なるM1 とL1 による加工実験として、材質 JIS S50C 素材を対象に、ボーリング工具による穴仕上げ加工を遂行した。

ボーリング工具による穴仕上げ加工では、φ14.8mm に事前に仕上げた穴に対し、 $D=φ15mm$ にセッティングしたボーリング工具 (1 刃, 突き出し長さ $L=84mm$, $L/D=6$) にて穴仕上げ加工 (切削速度 50~260m/min, 送り量 0.06mm/rev, 深さ 20mm) を施した。実験時のセットアップと工具刃先と半径方向振動加速度 X_m の検知方向, 回転振動加速度 R_m の検知方向の関係模式図を Fig. 10 に示す。 X_m の検知方向はボーリング刃先の向きと平行となるように工具をセッティングし, 加工実験を行った。またあわせて, 工作機械のテーブル上に設置した動力計により切削力 (X 軸方向の F_x) のモニタリングも遂行した。

Fig. 11 に切削速度 50m/min (回転数 1000rpm), 120m/min (5500rpm) の場合を示す。1 刃工具による加工であるため, 工具が1回転する毎に切削力 F_x の時間波形は三角関数の1周期を示す様子がわかる。工作機械の差

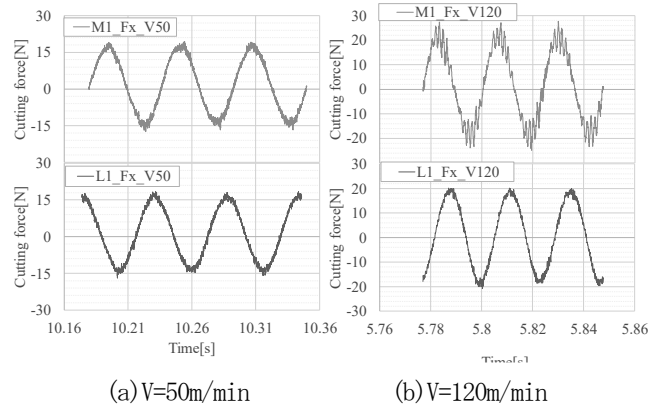


Fig. 11. Cutting force F_x in boring process.

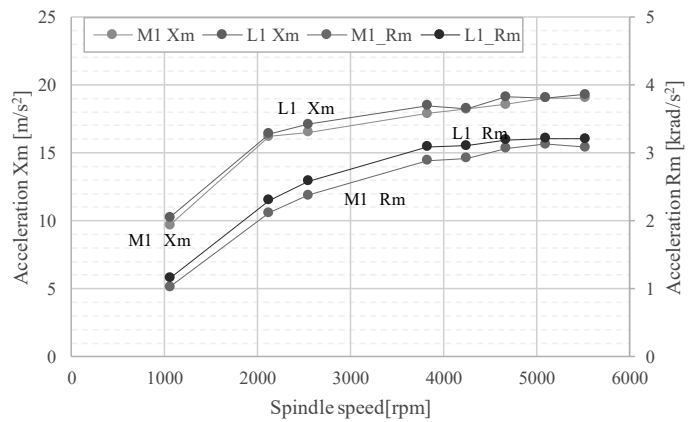


Fig. 12. Influence of spindle speed on tool holder vibration.

(主軸の仕様の差)に着目すると, 切削速度 50m/min において両者はほぼ同様である。一方, 切削速度 120m/min において M1 の方で三角関数波の中にさらに高周波のびびり振動波形が観察され, その周波数分析を遂行すると 650Hz 程度であった。BT30 番マシニングセンタ主軸の曲げ固有振動数は 300~800Hz 程度とされており⁹⁾, 主軸の曲げに起因するびびり振動であるものと考えられる。一方で L1 の方にはその切削速度でもびびり振動は生じない結果であった。同じ主軸構造でも, 軸受けの予圧が変化すると動剛性 (コンプライアンス) が変化して, びびり振動の安定ポケットが変化すること¹⁰⁾が知られており, 本現象も同様に主軸の動剛性が異なることによる実加工への影響と考えられる。

Fig. 12 に, ボーリング加工中の回転数とホルダの回転方向振動 R_m , 半径方向振動 X_m の関係を示す。Fig. 9 における回転数 1000~6000rpm までのホルダの振動と比較すると, M1 の方の両者は比較的近い値を示す一方, L1 の方は加工中のホルダ振動が M1 に近いレベルにまで増

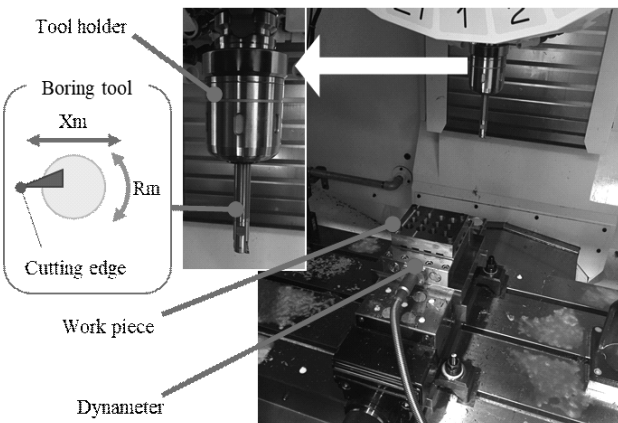


Fig. 10. Setup for boring process.

大する変化を示していることがわかる。3.3 節の主軸の静剛性の特性の評価結果で示されているように、L1 の主軸には軸受け隙間が大きく、そのために実加工時には顕著にホルダ振動が増大したものと考えられる。したがって、加工前の空転時および加工中のホルダ振動特性の両者の差を比較することで、主軸の仕様差による動特性の特徴を明確にできることが判明した。

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、多機能無線ホルダシステムを開発し、その新たな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) マシニングセンタに代表される主軸で工具を回転させるタイプの工作機械において、加工点に近い回転工具からの加工情報の取得のため、提案するホルダシステムは有効である。したがって提案するホルダシステムは、デジタルツインやデジタルトリプレットに基づく人が主役となる新しいものづくり技術の具現化のためのフィジカル空間からの現場情報の収集方法として新たなドライビングフォースとなる可能性が十分にある。
- (2) 同一機種の工作機械においても主軸の最高回転数が異なる仕様では、主軸の剛性が異なる場合があることが判明した。さらにその場合には、同一回転数で空転させた場合に支持軸受けの予圧が高い低い最高回転数仕様の主軸で、回転のしゅう動抵抗および回転変動が大きかった。
- (3) 開発した多機能無線ホルダシステムを用いることで、主軸の仕様差に起因する空転時の動特性の変化をセルフモニタリングすることが可能であり、その感度はサーボの内部情報である主軸モータ電流によるモニタリングより感度が高いことがわかった。
- (4) 同一機種の工作機械においても主軸の最高回転数が異なる仕様で加工時のびびり振動特性が異なることが判明した。剛性の高い主軸が必ずしもびびり振動が生じにくいだけでなく、その固有振動数により、それぞれの安定性が変化することもわかった。

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) 高澤拓也, 前田敏男, 天谷浩一, 矢野宏, “MT システムによる主軸寿命予知システムの開発—不具合の検出方法—”, 品質工学, **20**[6], 761-770 (2012).
- 4) 富田浩治, “安川電機における新生産システム実現へ向けた取り組み”, 日本ロボット学会誌, **35**[2], 114-117 (2017).
- 5) 市川直樹, “次世代のものづくりへの橋渡しを目指して”, 金属系材料開発センター, JRCM, NEWS, [386], 2-6 (2018).
- 6) 井通隆正, “一体型転がり軸受け解析”, 精密工学会誌, **64**[11], 1599-1602 (1998).
- 7) 奥村太史, 堤正臣, “マシニングセンタ用高速主軸の回転中の振れと振動の抑制 (3 面バランス修正の効果)”, 精密工学会誌, **69**[9], 1327-1331 (2003).
- 8) 飯田幸作, “ころがり軸受の音響”, 精密機械, **31**[361], 139-146 (1965).
- 9) S. Oouchi, H. Nomura, K. D. Wu, Y. R. Chen, J. P. Hung, “Variation of the Dynamic Characteristics of a Spindle with the Change of Bearing Preload”, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, **8**[10], 1680-1683 (2014).
- 10) 柴原豪紀, 熊谷幹人, 大西賢治, “工作機械の高剛性可変予圧主軸の開発”, 砥粒加工学会誌, **62**[2], 101-103 (2018).