

(解説)

IoTプラットフォームを用いた機械加工工場の統合管理

浅井新輔*¹・北 一貴*²・池田英生*³

Integrated Management of Machining Factory Using IoT Platform

Shinsuke ASAI・Kazuki KITA・Hideo IKEDA

要旨

多品種混流生産の加工工場において、一人の作業者が複数の工作機械を掛け持ちする体制を整えてきたが、従来の人に依存した管理方法では工場全体を効率よく稼働させることが困難な状況にある。このような課題に対してIoT技術を活用して、工作機械の状態を把握するIoTプラットフォームを構築し、工作機械から得られるプロセスデータを用いて、課題解決を試みた。解決事例として、工作機械から得られるプロセスデータをリアルタイムで分析し、異常を検知して機械停止指令まで自動化したシステム構築と工作機械への実装、作業者位置情報と機械稼働情報を組み合わせた分析と活用事例について詳細に紹介する。

Abstract

In a processing plant with a multiple-variety mixed-flow production system, a single worker handles multiple machine tools. The traditional human-dependent management method, however, is facing difficulty in efficiently operating the entire factory. As an attempt to solve such issues using process data obtained from machine tools, an IoT platform has been constructed to monitor the status of the machine tools by utilizing IoT technology. This paper details the construction of a system that analyzes process data from machine tools in real-time and detects abnormalities for automation, including the machine-stop command. It also discusses the implementation of this system on machine tools and provides examples of analysis and utilization by combining worker position information with machine operation information.

検索用キーワード

工作機械, IoT, 多品種混流, 可視化, プロセスデータ, 異常検知, 作業者位置情報

まえがき = 日本では、ものづくりが高度化するいっぽう、人材不足が顕著で大きな課題となっている。21世紀に入り、AI、IoT、ロボティクスなどのデジタル技術が実用化する中、様々な分野で自動化、効率化が進んでいる。その反面、熟練技能や人手に頼ったものづくりも多く残っており、これらの課題を解決する技術の実現が望まれている。

当社の高砂機械加工工場では、多品種混流生産を行っており、一つの部品を完成させるための工程数も多く、1工程あたりの所要時間が数時間～数百時間と非常に幅がある。加えて、客先ごとに異なる詳細仕様に応えるべく、類似形状の部品は多いが全く同じ部品は少ない特徴があり、操業は複雑である。これまで生産性向上のため、機械の自動化を進め、1人の作業者が複数の工作機械を掛け持ちする体制（以下、多台持ちという）を整えてきた。しかし、繰り返し品ではないこと、および形状、被削材質、要求精度の面でも高い加工技術が要求されることから監視作業も多く、機械稼働状況と作業者の状況の組み合わせが複雑になるにつれて、監督者による操業状況の全体把握が困難となり、現場での生産性向上に対する障害要因となっている。

昨今、IoTの進化とともに工作機械の様々な情報がリアルタイムで取得可能な通信機能が搭載されているた

め、工作機械全体（または群）の状態を把握するIoTプラットフォーム（以下、PFという）を構築し、工作機械から取得された操業データを活用することにより、上記課題の克服が試みられている。

製造現場における付加価値の定量化と改善効果の測定は、IE手法により、主に人作業の付加価値生産性の分析として多くの試みがなされており¹⁾、近年は様々なセンサ技術の発展により、作業者の位置情報や画像情報から直接作業分析を行おうという試みもなされている²⁾。また、工作機械のIoT化も進展が著しく、NC制御やPLCの情報から詳細な稼働状況が取得できるようになってきており、とくに切削加工分野は稼働情報取得のための標準プロトコルMTConnectなどもあり、様々な事例が報告されている³⁾。

そのような中、作業者の位置情報と設備の稼働情報を組み合わせ、人と設備を組み合わせ付加価値の可視化を行おうという試みもみられている⁴⁾。

本稿で紹介するPFは、このような取り組みを組み合わせ、切削加工工場の生産状況を作業者や設備を含め統合的に管理しようという試みである。

以下、1章では取り組みの中心的役割を果たす工作機械IoTプラットフォームについて解説し、続く2章でPFを用いて工作機械から取得したプロセスデータの活

*¹ 機械事業部門 生産本部 機械工場 *² 技術開発本部 材料研究所 (現 技術開発本部 企画管理部) *³ 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

用事例を紹介する。最後にPFで取得した機械稼働情報に作業者の位置情報を組み合わせ、人と機械を統合して生産性を評価した結果を報告する。

1. 工作機械IoTプラットフォーム

当社工場では、様々なメーカーの工作機械を保有しており、多様な工作機械と連携できる汎用性の高いデータ収集システムが必要となる。当工場に保有している工作機械の多くがファナック(株)の制御盤を使用していること、および他メーカーの制御盤やロボットとの通信も可能なことから、MT-LINK i (ファナック(株)製の工場稼働管理ソフトウェア)を採用した。可視化ツールは、自由度が高くカスタマイズが継続的に行えることから、MotionBoard Cloud (ウイングアーク1st(株)製のBIダッシュボード)を使用し、コベルコシステム(株)と連携してPFを構築した。本PFにより、データ収集→可視化→分析→最適化のサイクルを回すことが可能となる。

1.1 システム構成

図1にシステム構成を示す。MT-LINK iは、ファナック(株)製のCNCを搭載した工作機械だけでなく、ファナック(株)製のロボットコントローラ、OPC UA通信対応のPLCやMTConnect通信対応の工作機械などの機器情報を収集することが可能で、他メーカーの工作機械(当工場ではヤマザキマザック(株)、オークマ(株)で実績あり)は、MTConnectを介してMT-LINK iに接続されている。このシステム構成では、ファナック(株)製の制御盤を使用している機械は0.5秒ごと、MTConnectを介した場合は、2.0秒ごとにデータ取得が可能となる。

1.2 取得可能な情報と可視化画面

工作機械から取得可能なデータの一例を表1に示す。機械稼働状況、プログラム情報、回転数・送りの指令値と実測値、主軸負荷、各軸サーボ負荷および位置偏差といった多くの情報を得ることができる。

工作機械から得られる情報を活用しやすくする目的で、可視化画面を構築し、試験的に運用開始したので、可視化画面とその活用方法について紹介する。

図2に稼働状況可視化画面を示す。この画面は、作

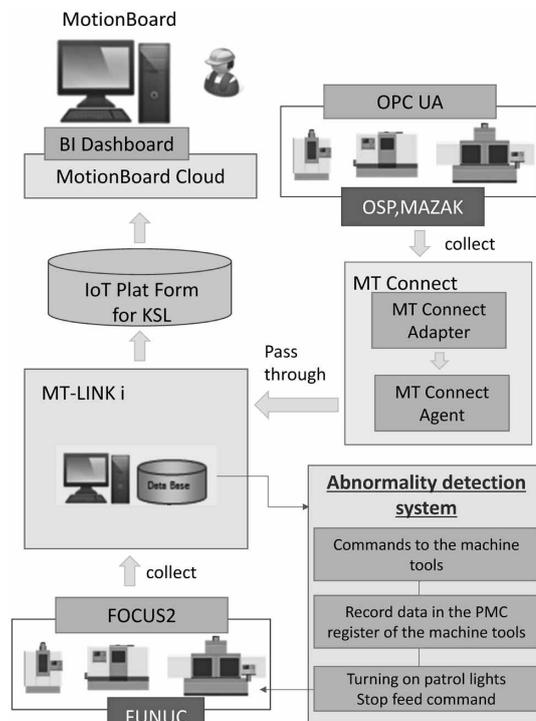


図1 システム構成
Fig.1 System Configuration



図2 稼働状況可視化画面
Fig.2 Operation status visualization screen

表1 工作機械から取得可能なデータ
Table 1 Signal data from machine

No	Signal data	Description	No	Signal data	Description
1	SigOP	Automatic operation signal	31	Override	Override of federate
2	SigSTL	Automatic operation starting signal	32	SigNP	Inposition signal
3	SigSPL	Automatic operation stop signal	33	AbsPos	Absolute position
4	SigAL	Alarm signal	34	RelPos	Relative position
5	EMG	Emergency stop signal	35	McnPos	Machine position
6	Mode	Mode	36	SpindleLoad	Spindle road
7	MainProgram	Main program	37	SigENB	Operating spindle road signal
8	ActProgram	Running program	38	SpindleSpeed	Spindle speed
9	Sequence	Sequence no	39	SpindleTemp	Spindle motor temperature
10	MainComment	Main program comment	40	ServoSpeed	Servo speed
11	ActComment	Running program comment	41	ServoTemp	Servo temperature
12	ActS	Actual revolutions	42	ServoError	Servo position deviation amount
13	ActF	Actual feed rate	43	ServoLoad	Servo road
14	ActFdec	Measured feed rate	44	ServoCurrent	Servo current
15	ModalS	Command value of revolutions	45	ServoCurrentPer	Servo current rate
16	ModalF	Command feed rate	46	PulseCodeTemp	Servo pulse code temperature
...

業者がスマートフォンなどのMobile端末で自分が担当する機械の稼働状況をリアルタイムに確認するための画面であり、作業中の機械操作完了後に、つぎにどの機械に行くべきかをこの画面を見て判断することにより、機械停止時間の短縮を図るものである。緑の機械は自動運転中であるので、フォローは必要ないが、黄色の機械はプログラム運転がSTOPしていることを示しており、人介入が必要な状態である。赤色の機械はアラームSTOPの状態であり、即座に機械状況の確認が必要である。

図3に自動計測結果可視化画面を示す。運用は、量産品加工時と限定的になるが、加工後に機上でタッチセンサを用いて被加工物の寸法を自動計測した結果を時系列でみることができる。縦軸が自動寸法計測の結果であり、公差の上限および下限をあらかじめセットしておけば、測定値が公差範囲内にあるかが一目で分かる。トレーサビリティ強化や寸法安定性の傾向管理に活用できると考えている。

図4にプログラム運転状況可視化画面を示す。当工場では、以前から自動運転、停止、アラームの3パターンのみを稼働状況表示灯から情報収集するシステムがあったが、本画面では稼働状況だけでなく、運転モードごとの時間割合が分かる。EDITはプログラム編集作業中、HANDLE、JOG、MDIは操作内容は異なるもののいずれも作業者介入での運転、MEMORYが自動運転となる。この運転モード割合をNCプログラムごとに分析し、自動運転以外のモードの中身を精査し削減することにより、自動運転比率を高めることが可能となる。加えて、類似部品のNCプログラムを比較することで、NCプログラマごとの自動運転比率の差異も確認でき、自動運転がしやすいプログラムとなっているか比較検討が可能となる。

2. プロセスデータを活用した工具異常の予知・検知

部品Aの加工では、深いポケットをエンドミル工具にて削り出す必要がある。この加工では工具直径に対し、突き出しが長い工具を使用するため、加工振動や工具のたわみなどにより工具欠損が発生しやすく、生産量増大や無人化/省人化の阻害要因となっている。そこで当社では、機械加工のIoT化技術を活用して工具異常の予知・検知技術および適応制御システムを開発、実ラインへ適用することにより、工具異常の発生を未然に防止することを試みた。

2.1 対象ワークおよび加工工程

本加工において、図5に示すような工具の大きな損傷が生じることがあり、場合により、加工部品が廃棄となることがある。そこで完全に工具が折損する前段階、つまりチップの欠損や溶着を工作機械から収集できるプロセスデータの変化から検知して装置を停止すること

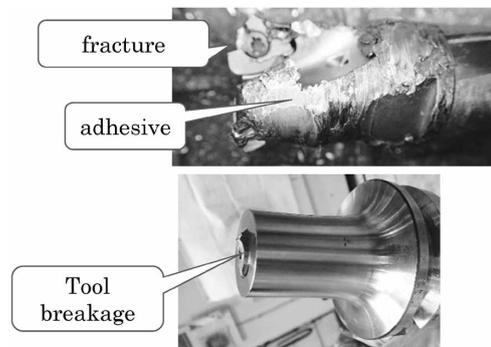


図5 破損工具写真
Fig.5 Pictures of damaged tools

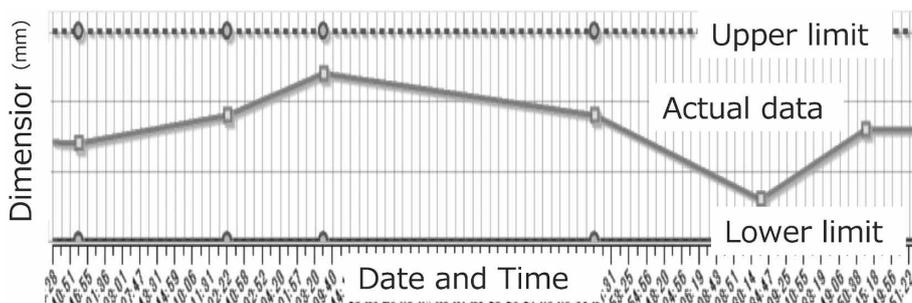


図3 自動計測結果可視化画面
Fig.3 Automatic measurement result visualization screen

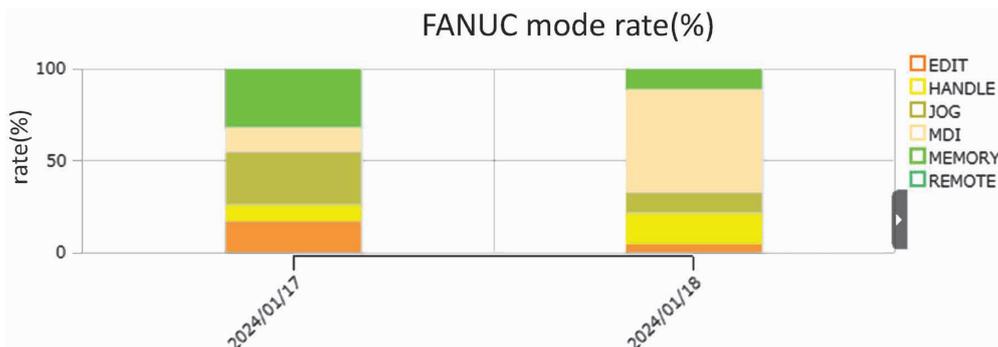


図4 プログラム運転状況画面
Fig.4 Program operation status screen

で、工具の折損を防止するシステムの開発を試みた。工具異常の検知に関しては、シミュレーションとの比較による異常検知技術⁵⁾や、加工音、アコースティックエミッション、主軸電流などの正常時のデータのみを学習して異常を判別する手法^{6), 7)}などが検討されているが、これらはあらかじめシミュレーションデータや類似加工条件における正常データが必要になることが実用化の課題となっていた。そこで、本取り組みでは、事前の学習データを必要とせずに、加工機から得られる負荷データのみを使用する手法を検討した。具体的には、過去に工具異常が発生した工程においては、**図6**に示すように、異常発生前に主軸負荷（主軸モータの負荷）の急増もしくは主軸およびZ軸サーボモータの負荷振動量（負荷の振れ幅：一つ前のデータとの差の絶対値）の増加が発生していることに着目し、負荷および負荷の変動を加工異常の予兆として検知する異常検知アルゴリズムを開発した。なお、主軸負荷や各負荷変動量は、それぞれの軸の駆動モータの定格出力に対する割合（%）で示している。

2.2 異常検知アルゴリズム

図7に示す主軸負荷データを用いた検知アルゴリズムを説明する。まず、工具回転開始前後や加工開始前後で大きな負荷変化が生じやすいプログラム開始40秒間の加工を検知対象から除外するとともに、さらに、異常判定の直近20秒間の平均値（以下、平滑化値という）

を用いることにより、意図した工具異常以外の突発的な加工負荷の変動による誤検知の発生を抑制できるようにした。具体的には式（1）に示すように、各対象工程の加工開始40秒後から異常判定時刻の20秒前までの各区間における平滑化負荷の最大値を基準値として、過去の実績から導出した係数をかけた値にオフセットを加えた閾値を平滑化値が超えた場合に、異常が発生する予兆と判定する。

$$\text{平滑化値} > \text{閾値} = \text{係数} \times \text{基準値} + \text{オフセット} \dots (1)$$

これらの異常検出手段の妥当性を評価するため、過去の対象工程2年分のデータを用いて、異常検知システムの検出性能を検証した結果を**図8**に示す。**図8**中の各プロットは、過去に加工した全加工オーダーにおいて逐次算出される平滑化値と基準値の比（平滑化値/基準値）が最大となるタイミングの基準値と平滑化値（当該加工オーダーの中で最も異常リスクが高いデータ）を示している。また、各グラフ中の閾値となる紫線よりも上では、システムが“異常”と判定したことを意味している。左のグラフは主軸負荷による判別結果を示しており、異常があった加工のうち、ここで検知された点はオレンジ色の星としている。中央のグラフはZ軸負荷振動による判別結果を示しており、異常があった加工のうち、ここで検知された点は赤い星としている。右に示すグラフは主

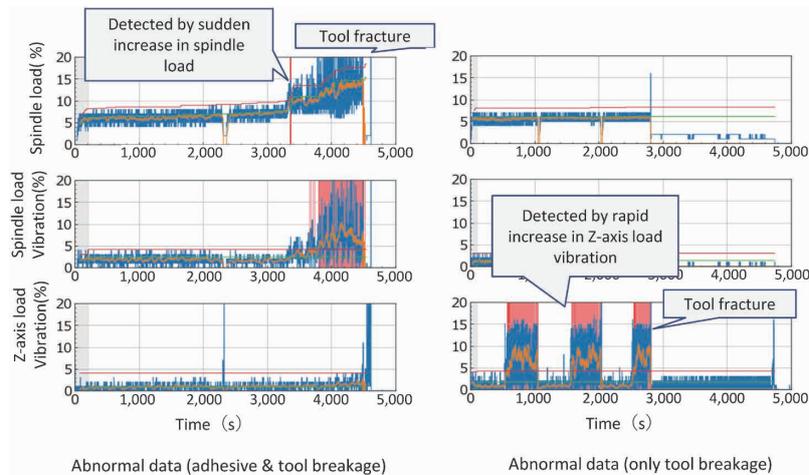


図6 異常発生時のプロセスデータ
Fig.6 Process data when an abnormality occurs

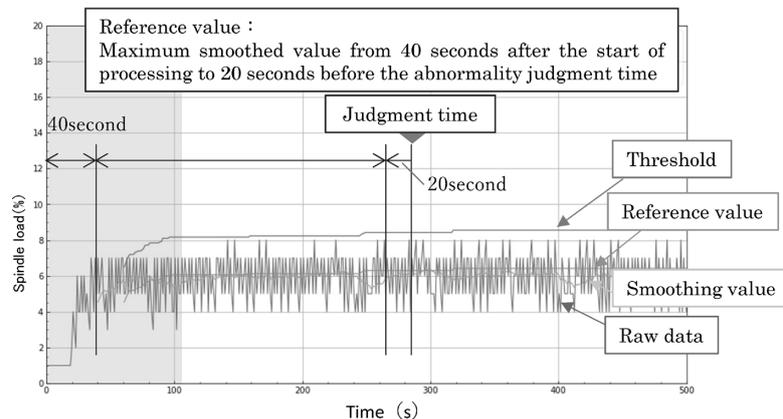


図7 主軸負荷に関する異常検知用の特徴量
Fig.7 Features for abnormality detection related to spindle load

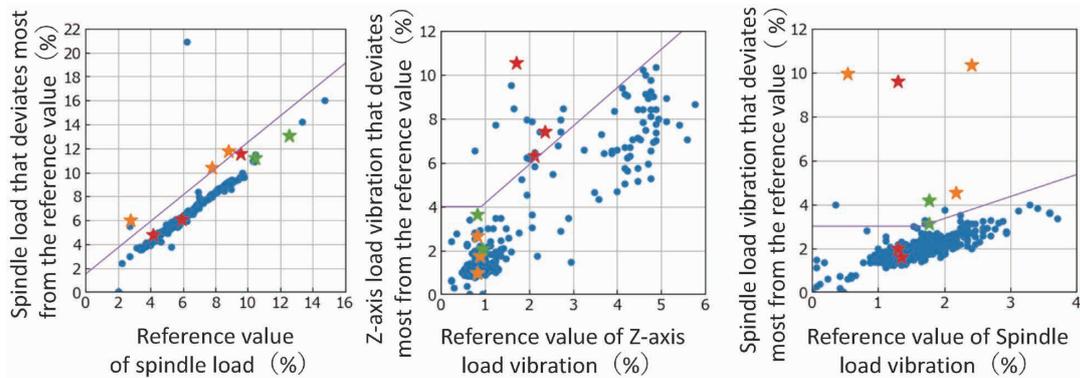


図8 過去の異常状態に対する検知シミュレーション結果
Fig.8 Detection simulation results for past abnormal conditions

軸負荷振動量による判別結果を示しており、前述の二つの基準で検出されなかったプロットのうち、ここで検出されたものを緑の星としている。三つの判定基準のいずれかに該当したときに異常と判定することで、過去に生じた加工異常は見落とし無しで、すべて検出できていることが分かる。いっぽう、異常が無かった加工も検出している点が複数あるが、これらは問題なく加工できている反面、もう少しで異常となった点も少なからず含まれていると考えており、工具折損による部品の廃却を確実に回避するという点ではこの検出方法で問題ないと考えている。

本システムを実加工プロセスに実装する際には、工具が折損し膨大な損害が生じることを防止することが必要となる。本取り組みでは、異常の予兆が検知されると、自動的に工作機械が安全に停止するシステムを構築し、実装したところ、作業者を加工機の傍に常駐させることなく、工具の異常監視を継続して実施することができている。

3. 機械稼働情報と作業員位置情報の組み合わせによる生産性分析

加工機の自動化が進むにつれ、一人の作業員が複数の加工機を担当して操業する「多台持ち」が増えてきた。当社のような多品種混流生産では、加工前後の段取り作業や新規加工品や難加工品の加工中の確認作業などが不定期に発生し、これら担当する複数の加工機の「人介入作業」と加工機の操業とをどのように組み合わせるかが生産性を左右する要因となるが、従来網羅的、継続的に分析する仕組みがなかった。

そこで、加工機の稼働データ、作業員位置データを組み合わせ、生産性（無駄時間）を可視化するシステムを開発した。

3.1 システム概要

本システムでは、加工機の稼働状況と作業員位置で加工機の状態の可視化を試みた。加工機の稼働データはMT-LINK iや稼働状況可視化システムなどで取得し、作業員位置情報は、加工機の操作盤や段取り場に設置したBLEビーコンの信号を作業員が携帯するスマートフォンで受信し、受信できたBLEビーコンの信号強度より作業員位置を推定する方式とした。

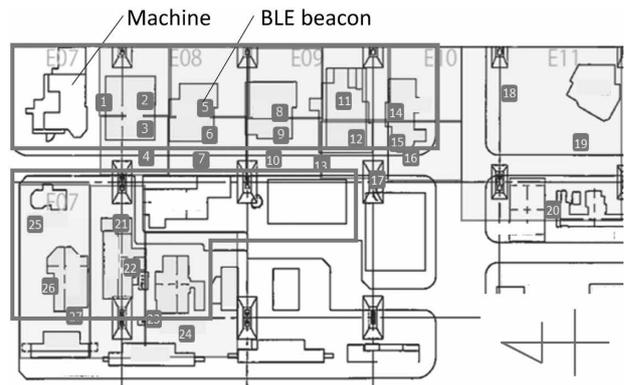


図9 実験対象現場
Fig.9 Experimental site



Machine operation status	Worker position status	Situation status
Stop	Absence	00_Waiting for worker
Operation	Absence	01_Automatic Operating
Operation	Control panel	02_Operating while Control
Operation	Setup location	03_Operating while Setup
Stop	Control panel	04_Waiting for control
Stop	Setup location	05_Waiting for setup

図10 状況可視化の例
Fig.10 Example of visualizing operational status

実験対象の現場を図9に示す。約1,800 m²（東西32 m × 南北56 m）のエリアに設置された12台の加工機周辺に27個のビーコンを設置し、昼夜勤あわせて9名の作業員にスマートフォンを携帯させ、データを収集した。

3.2 分析手法と実験結果

状況可視化の例を図10に示す。加工機の稼働状態としては「加工・停止・異常」の3種類とし、作業員の位置情報も各加工機に対して「不在」「操作盤側」「段取り場側」の3種類にラベリングして、それらの組み合わせに対して状況を整理した。例えば、作業員が不在で加工機が停止している場合は「人待ち」で、作業員が来れば加工できる可能性があり、改善可能性のある状態、作業員

Machine	Operating rate	(Automatic op. rate)	Worker waiting rate	Other (setup, etc.)
A	76%	(100%)	21%	3%
B	59%	(100%)	41%	0%
C	28%	(66%)	48%	24%
D	72%	(21%)	7%	21%

図 11 稼働実績データの例
Fig.11 Example of operational performance data

が不在で加工機が稼働している場合は「自動稼働中」で最も生産性の高い状態、などと定義し、可視化を行った。可視化の実験結果を図 11 に示す。自動稼働率が高い加工機 A, B は、自動加工しているか人待ちをしているかであり、いかに切れ目なく稼働させるかが改善ポイントであることが推定されるのに対し、稼働や段取りなどで多くの人手を割いている機械 C, D については、人作業の生産性向上が課題であることが分かる。

むすび = 当社の多品種混流生産であるが故の多台持ちが難しいという課題を紹介し、その課題に対して IoT 技術を活用し工作機械から得られるプロセスデータを用いて、異常を検知して自動的に工作機械を停止する適応制

御システムを構築し、実装した成功例を示した。多台持ちの生産性分析では、機械稼働情報に作業員位置情報を組み合わせることにより、より詳細に分析可能なことを示せたものの、作業員へのタイムリーな情報提供までは至っていない。今後も多品種少量混流生産は続くだけでなく、労働力の確保も年々難しくなっていることから、いかに少ない人数で多くの機械を安定的に稼働させるかという課題はますます重要になってくることが予想される。このため、本 PF の活用幅を広げ、作業員へタイムリーに最適な動きを指示できるような人・機械の生産ラインをトータルにとらえた統合システムを実現し、ものづくり現場を変えていく DX (システム化 = D, 業務フロー変革 = X) を目指していきたい。

参 考 文 献

- 1) 終 紫乃ほか. 原価計算研究. 2017, Vol.41, No.1, p.76.
- 2) 石田明久ほか. 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム. 2019, Vol.9, No.3, p.10-19.
- 3) 榎本俊一. 商学論纂(中央大学). 2018, Vol.60, No.3-4, p.391-474.
- 4) 妻鳥陽子ほか. 日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集. 2019, p.611.
- 5) 西田 勇ほか. 日本機械学会論文集. 2018, Vol.84, No.857, p.17.
- 6) 村越智弘ほか. 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. p.408.
- 7) 西川顕二ほか. 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集. p.235.