

**MMRC**  
**DISCUSSION PAPER SERIES**

No. 535

**ものづくり現場におけるロボットの導入をどう推進するか？  
ローコスト・ロボット導入の含意**

東京大学大学院 経済学研究科 大木清弘  
okik@e.u-tokyo.ac.jp

株式会社島津総合サービス 池尻正尚  
ikejiri@shimadzu.co.jp

2020年8月

 **MONOZUKURI** 東京大学ものづくり経営研究センター  
**MMRC** Manufacturing Management Research Center (MMRC)

ディスカッション・ペーパー・シリーズは未定稿を議論を目的として公開しているものである。  
引用・複写の際には著者の了解を得られたい。

<http://merc.e.u-tokyo.ac.jp/mmrc/dp/index.html>

**How to promote the introduction of robots in a manufacturing site?  
Implications of introducing low-cost robots**

The University of Tokyo, Faculty of Economics

Kiyohiro Oki

okik@e.u-tokyo.ac.jp

Shimadzu General Services, Inc

Masanao IKEJIRI

ikejiri@shimadzu.co.jp

**Abstract**

**With Industry 4.0 attracting worldwide attention, the introduction of robots in manufacturing sites has become an important management issue for Japanese companies. However, this initiative has not progressed smoothly enough, except for those companies with abundant management resources, because of combined problems on account of both the robot and the manufacturing sites. Therefore, this paper conducted a case study at Shimadzu Corporation to answer the research question: What kind of activities can be effective in promoting the introduction of robots at manufacturing sites? From the case study, this paper elucidates how a "low-cost robot" can be an effective solution. The time taken for robot installation can be shortened by introducing low-cost robots first as a tool for improvement (Kaizen), which can be used by production engineers at the site. These employees will thereafter start carrying out Kaizen activities using these low-cost robots at the production site, thus making the introduction of robots successful as a result. This paper also discusses at length the impact of introducing these low-cost robots to the Japanese industry from the perspective of disruptive innovation.**

**Keywords: Robot, Manufacturing, Industry 4.0, Kaizen, Disruptive innovation, Japanese companies**

ものづくり現場におけるロボットの導入をどう推進するか？  
ローコスト・ロボット導入の含意

東京大学大学院 経済学研究科 大木清弘  
okik@e.u-tokyo.ac.jp

株式会社島津総合サービス 池尻正尚  
ikejiri@shimadzu.co.jp

要旨

Industry 4.0 の議論が行われる中で、ものづくり現場のロボット化は日本企業においても重要な経営課題とされてきた。しかし、ロボットの導入はロボット側の問題と現場側の問題が合わさり、経営資源の豊富な一部の企業を除いて、順調に進んでいるわけではない。そこで、本研究は「ものづくり現場におけるロボット化を推進するために、どのようなマネジメントが有効なのか」を問題意識にした。そのうえで、「ローコスト・ロボット」の導入が有効なマネジメントの一つとなることを、島津製作所を対象とした事例研究から明らかにした。本稿は明らかにしたメカニズムは以下である。ローコスト・ロボットを現場改善のツールとして導入することによって、ロボットの導入スピードを短縮でき、さらに現場に近い生産技術者に活用の権限を付与しやすくなる。そのため、改善が行われてきた現場であれば、ローコスト・ロボットを使った創意工夫が生まれ、現場にロボットが導入されるようになっていく。さらに本研究は視野を拡張し、ローコスト・ロボットの導入が日本の産業全体に与える影響について、「破壊的イノベーション」の観点から議論を行った。

キーワード: ロボット化、ものづくり、industry4.0、改善、破壊的イノベーション、日本企業

## 1. はじめに

本論文の目的は、ものづくり現場におけるロボット化を推進するために、どのようなマネジメントが有効なのかを議論することである。特に、「ローコスト・ロボット」の導入に注目し、その効果、およびそれが持つ含意を議論する。

ものづくり分野において IoT という言葉が使われだして久しい。現場を含めた様々な情報をセンサーで迅速に捉え、それを迅速に活用することで、パフォーマンス向上を図ることを各企業は狙っている(奥, 2018)。その際の一つの手段として、ロボットなどの自動機の活用も議論されている。

JISの定義(JISB0134:2015)に基づくと、ロボットとは、「二つ以上の軸についてプログラムによって動作し、ある程度の自律性をもち、環境内で動作して所期の作業を実行する運動機構」のことである。藤本 (2001)によると、いくつかの関節を持ち、他の設備よりも自由度を持った機械が、ロボットである。こうした「ロボット」も活用しながら、データを用いて無駄のない生産をしていくというのが、「industry 4.0」という言葉が描く一つの未来である。そのため、日本政府としてもロボットの活用を後押ししている。

しかし現状、industry 4.0 の進展に対して懐疑的な論調も多い。少なくとも、ロボットが導入され、人の数が劇的に減って、無駄のない生産ができるという状態には至っていない(藤本, 2020)。例えば、industry 4.0 において主導的な立場にいとされているドイツでさえも、その実態は必ずしも理想的ではないことも報告されている(光山・中澤, 2017)。

日本においてロボットの導入が進まない理由を調査したものとして、近畿経済産業局次世代産業・情報政策課が 2015 年に行った調査がある<sup>1</sup>。ここでは、「ロボットを導入する場合に想定される課題(Q7)」と「今後、ロボットのさらなる普及に向けて、ロボットにはどのような改善が必要だと考えるか(Q8)」という二つの質問から、各企業の課題感を明らかにしている。結果最も多い回答が、ロボットのコストに関するものだった。Q7 でも上位はコストや費用対効果の課題が占め、Q8 では「ロボット本体の低価格化」という回答が 7 割近くを占めていた。例えば多関節ロボットの値段は 100 万円を超えるものが多く、資金に余裕のない中小企業などでは導入が難しいと言われている<sup>2</sup>。

また、ロボットの使い勝手の問題も指摘されている。上記の Q7 では「導入できるだけのスペースがない」というような回答も行われている。また、Q8 では、「多品種少量への対応」が 43.9%、「汎用性の高さ」が 42.5%とロボットの能力についての改善要求があげられている。また、Q8 では合わせて、「プログラミングの容易さ」が 40.0%、「操作の容易さ」も 38.6%といった使いやすさに関する改善要望も含まれていた。ロボットは人よりも汎用性が低く、使いにくいということが、導入を妨げる一つの理由として挙げられている。

---

<sup>1</sup> <https://www.kansai.meti.go.jp/3jisedai/report/robot.pdf>. 該当の質問は pp.17-18 に記載されている。

<sup>2</sup> ロボットのコストの高さの問題は、一般社団法人日本機械工業連合会の「平成 28 年度関西地域の産業におけるロボット導入状況と今後の活用分野に関する調査報告書」でも、指摘されている。[http://www.jmf.or.jp/content/files/houkokusho/28nendo/28osk\\_robo.pdf](http://www.jmf.or.jp/content/files/houkokusho/28nendo/28osk_robo.pdf)

以上はロボット側の問題だが、一方で現場側の問題も示唆されていた。Q7では、「導入後に、ロボットの調整・保守点検・プログラム変更ができる人材がいない」「操作できる人材がいない」といった人材面の問題点があげられていた。これは、ロボットの使い勝手とも関連するが、ロボットを使いこなせる人材がいないという問題も指摘されているのである。また「現場の意識改革が難しい」といった現場の意識面も指摘されている。ロボットを入れるということは、日々のルーチンを変えることになるため、現場の人間には抵抗感が持たれる可能性がある。さらに、ロボットを人間に置き換えるものと受け止められれば、現場で働く人にとって使用するのに抵抗感があるかもしれない。

こうした調査をベースにすれば、ものづくり現場へのロボットの導入が進まない主な理由は、ロボット側の理由（高すぎる、使い勝手が悪い）と現場側の理由（うまく使えない、使うことに抵抗がある）といった二つの問題に集約できる。たとえ経営陣がロボット化を進めようとしても、これら二つの理由があると、ロボットの導入はうまくいかない。さらに両者は独立ではなく、「ロボットの使い勝手が悪い」ため、現場は使いたがらない」「高級なロボットを購入するくらいなら現場にむくいてほしいと思われるために現場がモチベーションを低下する」というように関連する可能性もある。こうした問題をどのように解決し、ものづくり現場におけるロボットの導入を進めていくかは、実務的に重要なテーマであると言えるだろう。

そこで本研究は「どのようにすればものづくり現場においてロボットの導入を進められるのか」を問題意識にした事例研究を行う。その際に本研究が注目したのは近年一部の企業で行われているローコスト・ロボットの活用である。これは、従来のものよりも安価でかつ汎用的なロボットを現場に導入することである。従来よりも10分の1の価格のロボットであるため、コストは抑えられる。コストが抑えられている分、その機能は必ずしも高度ではないが、単純であるがゆえに現場で扱いやすい。そのため、ロボットを改善活動の延長上の道具（ツール）の一つとして位置づけることで、現場の創意工夫を促し、現場にとって使いやすい形で導入することが可能になる。すなわち、ローコスト・ロボットを、これまでも行われてきた改善活動の延長上のものとして導入することで、現場側の問題を抑えることができる可能性が示唆されている。本稿の第一の目的は、このようなローコスト・ロボットの導入の効果について事例から説明することである

さらに本稿は、ディスカッションにおいてこれらの議論を発展させ、このようなローコスト・ロボットの導入が、単体企業に利するだけでなく、ものづくりIoT時代における日本の新たな優位性の源泉となりえる可能性も議論する。ローコスト・ロボットの導入には改善活動で培ったノウハウが活用される。それが濃厚に蓄積しているのが日本の現場である。とすれば、ローコスト・ロボットのリードユーザー(von Hippel, 1986)が多数いるのが日本であり、よりよいローコスト・ロボットを開発するための土壌を持っていることになる。よってローコスト・ロボットの開発において立地優位性を持つようになり、ローコスト・ロボットを開発する企業にとっては注目すべき立地となりえる。また、ローコスト・ロボットをどう使いこなすかのノウハウを蓄積できれば、その使い方のノウハウを輸出することもできる。こうして、ローコスト・ロボットの質向上と使いこなすノウハウの蓄積を進めていけば、高級なロボットを代替できるようなものに変化していくかもしれない。そうなれば、ものづくりIoT時代におけるオートメーションの推進において、ローコスト・ロボットが「破壊的イノベーション」となる可能性もある

と言えるだろう。こうしたポテンシャルを議論するのが、本稿の第二の目的である。

本稿の構成は以下である。次節では経営学におけるものづくり現場のロボット導入の議論を簡単に振り返り、現状のロボットの導入の課題、本稿の問題意識、および明らかにしたいメカニズムを説明する。続く第三節では、本稿の研究方法を議論する。本稿では、「ローコストのロボットの導入が、ものづくり現場でのロボットの導入を促進する」というメカニズムを明らかにすることが目的なので、事例研究を行う。第四節では、島津製作所の事例を説明し、ローコスト・ロボットの導入によって、既存研究で議論されたようなロボット導入の問題が解消されることを明らかにする。第五節では事例分析をうけて、ローコスト・ロボットの導入が企業にもたらす効果、さらに日本の産業全体に与える影響について議論する。最後の第六節では本稿のインプリケーションを、学術研究者、実務家、政策担当者に分けて議論する。

## 2. ものづくり現場におけるロボット導入の議論

### (1) ロボット導入の課題

ものづくり現場におけるロボット導入の議論は必ずしも最近の議論ではない。藤本 (2001)によると、製造現場の「自動化」の文脈の中で、20 世紀の後半にはロボットが用いられてきたという。藤本 (2001)によると、日本企業における自動化は欧米と比較した時に、「ローコスト・オートメーション」と位置付けることができる可能性を主張している。日本企業の自動化は、欧米のようなハイテクなものではなく、競争力を重視し、必ずしも設備に過剰な機能を持たせなかった。Tidd (1997)の調査によると、日本企業は多関節のロボットを導入するのではなく、スカラや直交座標といった比較的安く単純なロボットを使っていた。このようにロボットを用いたオートメーションは近年に限った現象ではない。

しかしこうした議論が、近年活発化しているのも事実である。これは IoT の活用や、industry 4.0 といった議論の中で、工場へのロボット導入が含まれているからである。特に日本の場合、人手不足の問題とも関連し、ロボットの導入が進められてきた背景がある。例えば平成 27 年 2 月 10 日に日本経済再生本部は「ロボット新戦略」を策定し、ロボット利活用による様々な分野における人手不足の解消や生産性の向上等の社会的課題の解決に向けて、国を挙げて取り組む方向性を目指している<sup>3</sup>。実際に「ロボット導入実証事業」への補助金など、様々な支援を行っている。

しかしこのように支援をしてきたにもかかわらず、ロボットの導入は進んでいない。その理由は前述のとおり、ロボットの問題、現場の問題、その双方にかかわる問題が存在している。

まず、ロボットのコストの問題がある。表 1 は多関節型ロボット、直交座標型ロボットの値段をまとめた一例である<sup>4</sup>。多関節ロボットは 200 万円近く、直交座標型ロボットでも 50 万円する。これらはもちろんそれに見合った機能を持ち合わせているとはいえ、資金力が豊富な企業以外は導入に積極的にはなれないだろう。

---

<sup>3</sup> <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf>

<sup>4</sup> こうしたロボットの呼称は楠田 (2004)を参考にしている。

表 1 ロボットの値段例

メーカー	商品名	値段(円)	製品概要	データソース
Denso	Cobota	1,996,500	多関節型ロボット、ペイロード 500g、繰返し精度±0.05mm、5+1 軸ロボットアーム	AMAZON
三菱電機	RV-2F-Q	1,800,000	多関節型ロボット、ペイロード 3,000g、繰返し精度±0.02 mm 、垂直多関節形 6 軸	三菱電機HP
IAI	門型 TTA-A3G	500,193	直交座標型ロボット、ストローク(mm) (X 軸)300/(Y 軸)300/(Z 軸)150 可搬運質量 (Z 軸)(kg) 6 位置決め精度(mm) ±0.02	「ものたろう」HP より

出所)筆者作成。データは 5 月 30 日時点

また、これらのロボットを現場に導入するためには、各現場に合わせて導入しないとイケない。しかし、ロボットの物理的な大きさなどから、そもそも導入が難しいケースもあるだろう。外から買ってきたロボットでは、自社の部品を加工、運搬するのに適していないこともあり、そのような場合ロボットの導入が進まない。どんな現場でも使えるといった、「汎用性」をロボットが持っていないこともあり得るのである。

これに加えて、現場側の問題もあり得る。ここでの現場とは、実際にロボットを製品の生産に使う部署や、そのための方策を考える部署を指している。まず、現場側がロボットの導入に十分な知識を持っていないければ、ロボットの導入は進まない。ロボットの基本的な操作方法はもちろん、メンテナンスの方法、製品や工程が変わった時の調整の仕方などを理解しなければ、現場でロボットを使いこなせない。これは現場側に十分な吸収能力 (Cohen & Levinthal, 1990) が備わっているかどうかの問題と言えるだろう。

また、現場側の能力だけでなく、意識の問題もある。これまで自らで作上げてきた工程に対して、新たにロボットを導入するというのは、心理的に抵抗感がある可能性がある。特に経営トップから指示をされて、外注のロボットを導入しなければならない場合、特定の工場において工程開発や改善をしてきた生産技術担当者は、「自分が作ったものではないものを取り入れたくない」という「NIH 症候群 (Katz & Allen, 1982)」に陥る可能性があるだろう。また、ロボットの導入は現場の作業を助けるようなものとして認識されればよいが、人を減らすための道具として見られれば、作業員も含めてその活用意欲はそがれるだろう。

さらに事態を複雑にするのはロボット側の問題と現場側の問題、相互が複雑に関係しあうことである。例えば、ロボットが高機能であるほど現場に知識が必要になって導入が難しくなったり、現場に導入しやすい汎用的なロボットほど値段が高くなったりすることがある。または、値段が高いからこそ、そこに投資するならば自分たちの待遇を良くしてほしい、と現場がモチベーションを下げる可能性もあるだろう。

もちろん、全てにおいてロボットの導入を進める必要があるわけではない。しかし、IoT化や人手不足といった問題に加えて、近年の新型コロナウイルスの影響を踏まえれば、今後ロボットの導入はより求められるようになるだろう。そのため、上記のような問題を解決して、「ものづくり現場にロボットをどのように導入していくべきか」は、現在において実務的に意義のあるテーマであると言える。

そこで本研究は「日本のものづくり現場にロボットをどのように導入していくべきか」を問題意識とする。

## (2) ものづくり現場におけるロボット導入の推進策：ローコスト・ロボットの可能性

ものづくり現場にロボットを導入するというためには、上記のような課題を解決することが重要になる。すなわち、コスト的に安いロボットを、現場に受け入れやすいような形で導入することが考えられる。

まず、コスト的に安いロボットを選ぶことで、導入へのハードルは下がる。近年は安価なロボットも登場している。例えば中国の Dobot 社が販売している Dobot Magician という製品（多関節型ロボット、ペイロード 500g、繰返し精度 0.2mm、汎用4軸ロボットアーム）は、150,000 円程度で購入できる。また、中国の OIMRODITE 社が販売する CNC1419 という製品（直交座標型ロボット、ストローク(mm) (X 軸)140/(Y 軸)190/(Z 軸)40、位置決め精度(mm) 不明）は、37,606 円で購入できる<sup>5</sup>。これらはベンチャー企業や新興国企業が作っている製品であり、日本の伝統的なロボット企業が作る製品よりも、価格が一桁安い。このように、投資コストを抑えられれば、従業員がその投資を疑問視することも少ないだろう。

ただしもちろん、価格が安いということは、精度や機能は低い。そのため、現場に導入するには工夫が必要になる。その際に有効なのは、現場の改善能力である。日本企業の優れた現場では、日々の改善活動の中で、様々な「汎用品」を導入し、生産性や製造品質の向上を図っている（大木, 2014）。例えばイレクターパイプなどは改善活動の中で、棚、作業台、台車、からくりなどの製作に使われている。そのため改善活動が行われてきた現場では、外からのものをうまく組み合わせて使うノウハウがある。NIH 症候群のような状況にならず、うまく受け入れられれば、それを使いこなせるようなポテンシャルがあると言えるだろう。

特に元々日本企業はローコスト自動化戦略を取ってきた（藤本, 2001）。その中では、現場主義的改善と両立し、現場の提案を重視しながら、自動化を進めてきた背景がある。そのため、安価なロボットを改善活動のツールとして使ってもらう形で導入するというのは、日本企業の過去の歴史とも矛盾せず、抵抗感は少ないと考えられるだろう。

以上から、日本企業においては、「コスト的に安いロボットを改善活動のツールとして使用してもらうことで、ものづくり現場へのロボットの導入が進む」と考えられる。こうしたメカニズムの妥当性を、本研究では事例研究から検証する。

---

<sup>5</sup> いずれも 5 月 30 日時点。

### 3. 方法論

本研究が事例研究を選んだのは、仮説の検証ではなく、新たな発見を主目的とする調査だからである。本研究では、ものづくり現場へのロボット導入のマネジメントを明らかにすることを目的に、「コスト的に安いロボットを改善活動のツールとして使用してもらうことで、ものづくり現場へのロボットの導入が進む」というメカニズムの妥当性を検証するものである。事例研究はメカニズムを明らかにすることに適しているため、事例研究が望ましいと考えた。

本稿の事例対象は、株式会社島津製作所である。島津製作所は計測機器などの製造・販売を行う企業である。島津製作所では、1980年代から工場でのロボットの導入が進められていたが、当初順調にロボットの導入が進んだわけではなかった。しかし、近年になって、ローコスト・ロボットを改善活動のツールとして導入することで、ロボットのコストを下げ、現場の抵抗感を減らし、現場の担当者が積極的にロボットを用いるようになってきた。よって、本研究の問題意識を扱うにふさわしい先端事例であると考えられるため、この事例を選択した。

データとしては、島津製作所の内部資料を中心に用いた。それらを元に、島津製作所におけるロボット化の動きを整理した。

### 4. 事例

#### (1) 島津製作所におけるロボット導入の背景

島津製作所においてはじめて自動化が目指されたのは、1980年代である。当時は経済成長を遂げる中、1980年代の活発な設備投資、労働力不足(人件費の高騰)を受けて、日本の多くの製造業企業がロボット導入を始めた時期であった。こうした世の中の風潮と同じく、島津製作所でもロボットの導入が進められた。

具体的な取り組みとしては、本社の生産技術部(当時)<sup>6</sup>の取り組みがある。全社横断的な組織である生産技術部が中心になり、工場で使用するロボットを作製した。当時の金額で二百万円程度のスカラロボットを購入し、自分たちの用途に合ったものにカスタマイズすることが行われていた。このロボットを部品の組立工程に導入したが、人手の方が組み立て速度が速かったため、生産への寄与は小さかった。

また、計測機器のコア部品の自動調整装置も作製した。この部品の生産は協力会社で行われており、島津製作所の生産技術部が作った調整装置が現場に投入されることになった。しかし作製した装置は、自動調整の機能はついているものの、速度が早くなかったため、協力会社で使われることはあまりなかった。協力会社のメンバーはロボットに直接否定的なことを言うことはなかったが、導入した翌月に訪問してみると、工程は従来と同じ手作業で行われており、自動調整装置は使わ

---

<sup>6</sup> 現在では生産技術部という部署はない。以下では本社に所属して各工場や子会社を支援する担当者を本社の生産技術担当者、各工場や子会社でロボットの導入などを行う担当者を現場の生産技術担当者として表現する。

れていなかったという。

このように、業界の設備投資のトレンドに従い、ロボットを投入したが、技術面の不十分さもあり、活用されるにはいたらなかった。また、現場でも見ても、ロボットを受け入れるマインドが醸成されておらず、ロボットの導入はうまくいかなかったという。

こうした自動化導入の動きは、その後活発には行われなかった。それは、島津製作所の作る製品が1日30台生産レベルの多品種少量生産であり、1品目の1工程の効率化のために多額の自動化投資をすることがなじまなかったからである。また、1990年代に行われた海外生産拠点の拡大、および2000年代に行われた協力会社からの自社への生産回帰では、従来の手作業工程の移転が行われたため、新しく自動化をするという機運は高まっていなかった。

その一方、自動化の運動と同時期に始まり、その後も継続したのが小集団活動である。島津製作所では、1985年に当時の分析工場以小集団活動が始まった。1989年にこの活動をDIO (Do It Ourselves、自分のことは自分のために自分でやろう)活動という名称に変更された。1995年にこの活動は全社に水平展開し、「全社DIO活動」となった。さらに翌年の1996年には営業DIO活動として営業も活動を開始した。

さらに2005年に「人材育成と会社業績に貢献する活動」として、DOI活動は再定義され、現在まで活発な活動が継続されている。この活動は現在、6ヶ月サイクルで行われている。具体的には、1) 各サイクルの中盤に推進委員長が開催する中間報告会、2) 活動終了後に各事業部・部門で発表会、3)発表会から選ばれた優秀なチームが全社発表会に参加するという形式をとっている。

島津製作所では生産品目が多岐にわたるため、生産上の課題や改善点も多岐にわたっている。そのため、仕事を進めるうえでの課題や改善案は、現場作業員やそのスタッフに任せる方が効率的であった。そのため、小集団活動が停滞することなく継続的に進められてきた。

## (2) ロボット導入の再推進

このようにして島津製作所のものづくりは行われていったが、2017年に転機が訪れる。経営トップが「AI化、ロボット化を進めよ」という方針をだしたのである。当時の業界では、AI化やロボット化の重要性が議論されていた。例えば、2016年9月12日、政府はロボットと人工知能を切り口とした「Society5.0」を目指す方針を議論している。また、当時は景気が良くなり、人材の獲得競争が始まっていたため、技術革新による生産性向上は島津製作所でも課題となっていた。こうした状況を受けて、島津製作所でも、IoT、AI、ロボット、3Dプリンタなどの新技術の活用を進めるよう、方針が出たのである。

AI化、ロボット化を進めるにあたり行われたのは2つである。1つは、実際にAIやロボットを導入される各現場の状況の共有である。2つ目は、具体的にどのようなAIやロボット化が存在するのかの把握である。AIやロボットのシーズとニーズの両方を明らかにし、組織として共有することが必要だと考えられた。

そのため、島津製作所は、画像認識分科会、ロボット分科会、AGV分科会を立ち上げた。これら分科会は、各工場や生産子会社から、画像認識、ロボット・AGVに経験がある担当者約20名を集

め社内の情報交換や、社外の専門家の話を伺う場だった。開催頻度は1.5か月に1回である。参加メンバーは分科会参加者には、部長級もいれば、新人もおり、役職に関係なく、フラクに社内外の情報共有を進めてきた。

その一方で実際にロボットの導入を進めるためには、現場レベルでの落とし込みが必要であった。各工場や生産子会社には、生産技術のスタッフ(現場の生産技術担当者)が常駐しており、AI化、ロボット化を進めるには、そのスタッフが行うのが望ましいと考えられた。しかし、現場の生産技術担当者は、彼らの業務の範囲でロボットの導入を行うことはあっても、普段は新製品の立ち上げ、既存生産工程のメンテナンス、顧客対応などに追われていて、ロボットに割ける資源は豊富ではなかった。そのため、全社製造組織の中に「Robo&画像チーム」という組織をつくり、AI化、ロボット化を進めるようにした。この組織が、各工場や生産子会社を支援するという体制が考えられたのである。

### (3) 導入方法

この新たなロボット化にあたって、島津製作所では過去とは異なる工夫が行われた。

まず、高価なロボットの導入が「収益面」「開発期間面」から望ましくないと考えられた。前述のとおり、島津製作所は多品種少量生産を行っている。主力の製品でも1日30台程度の生産である。そのため、一つの製品の工程に大規模な投資をしても、生産台数が少なく、投資対効果が低いと考えられたのである。また、開発期間面で見ると、高価な設備投資には稟議承認が必要であり、そのためには月レベルの時間がかかってしまう。さらに高価なロボットのソフト開発は、専門外注に委託することが多く、そうした外注との打ち合わせにも時間が割かれてしまう。そのため、生産現場で少量の生産の改善を行うシーンとなかなかマッチせず、敏速なPDCAを廻す阻害容認になっていると考えられた。

また、工場にいる作業員や生産技術担当者のマインド面への配慮がみられた。島津製作所ではロボットを現場改善のツールとして扱うように、現場に働きかけた。島津製作所のような多品種少量企業は、問題の所有者が作業員やその直近のスタッフであることが多いため、ロボットの導入が彼らの問題意識とつながらないことがある。また、本当はロボットと相性が良い課題だとしても、いまままで作業習熟などで培ってきた工程を乱されたくないという思いもある。そこで、今まで行ってきた改善活動の延長上にロボットを位置付けた。特に、安価なロボットは安価ゆえに必ずしも精度を担保できない「ホビー用」であることを理解したうえで、自己責任で使っていくように、現場に促した。そのため、現場では、信頼性や精度を自らで確認し、実力を把握した上で、適用可能な用途で使っていくことが求められた。また、メンテナンスも工場側で実施するように進めている。まさに「現場改善」の一環に位置づけて、ロボットを導入したのである。

こうした工夫は、1980年代の自動化からの動きを経験してきた、本社の生産技術担当のマネジャーによって考え出された。彼は1980年代のロボット化導入において、ロボットが現場に使われない実情を目の当たりにしてきた。その一方で1990年代以降、国内拠点の現場の改善力が高まるのを見てきた。また、島津製作所における多品種少量生産ラインでは、一つのラインにおいて大規模な

投資をしても回収が難しいという実情も理解していた。そこで、現場に適用しやすい、安価なロボットの導入が必要であると考えたのである。

以上を踏まえて、島津製作所は、「高価で、稟議承認に時間がかかり、稼働まで長時間を要する大掛かりなロボット」でなく、「イレクターパイプのような改善部材として、誰でも、すぐに倉庫から取り出し、問題の所有者が自ら、改善活動に資するような低価格なロボット」を導入することにした。収益面、開発期間面だけでなく、現場の従業員のマインド面を重視した結果であった。

もちろん、島津製作所の中で高価なロボットも使われている。しかし、今までロボット化や自動化が進んでこなかった工程でも、「ローコスト・ロボット」の活用によって、現場の生産技術担当者や現場作業者を中心に、ロボットの導入を進める環境が整えられると考えて、取り組みが行われた。

具体的な取り組みとしては、**Dobot Magician**と呼ばれる安価なロボットの導入があげられる。

**Dobot Magician**は中国Dobot社という中国のベンチャー企業が出している製品である。前述のとおりその価格は他社の同種の製品に比べて一桁安い。この金額であれば、ロボット導入の際の決済が容易であり、ロボットをいち早く導入し、PDCAサイクルを廻すことが容易であった。

島津製作所ではこの**Dobot Magician**を加工品整列や手挿入電子部品小分けで利用した。以下ではそれぞれの事例を説明する。

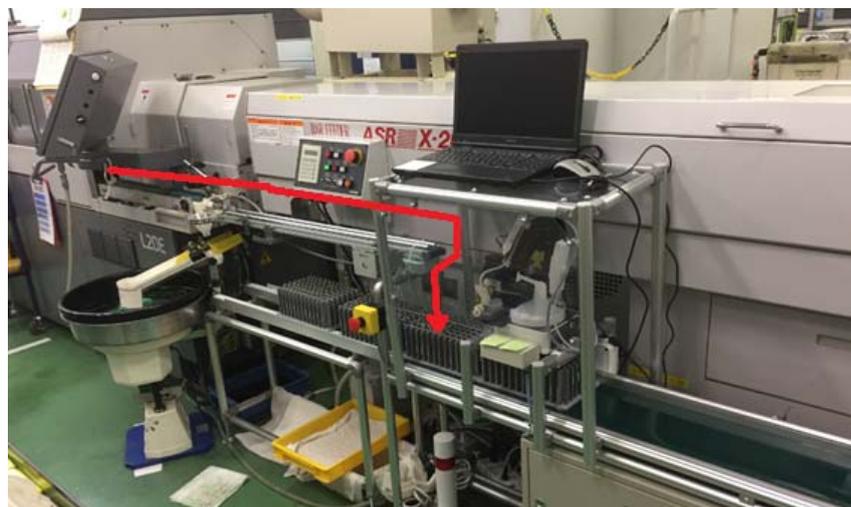
#### ①加工品整列

ここでは、CNC(コンピュータ数値制御)旋盤で加工した分析機器に使う金属加工品の整列を行う。元々は、旋盤からコンベヤで搬出された加工品を、人工芝を敷いたシューターに重力で収集していた。しかし、加工品同士がぶつかって傷つく恐れがあるため、回収後にひとつずつ目視検査をしていた。この工程がボトルネックとなって、製造の効率が下がっていたのである。

これに対して、2017年から**Dobot Magician**の導入が行われ始めた。本社の生産技術担当のマネジャーがこのロボットの導入を発案した。このマネジャーは過去の経験から、ローコスト・ロボットの導入が必要であると考えていた。彼は、現場から何とかしたいという声が寄せられていた加工品整列の工程に注目し、その工程をローコスト・ロボットで克服できないかを検討した。結果、半年程度かかって新しい工程を作り出した。その写真が図1である。

新しい工程では、コンベヤから流れてきた部品を、**Dobot Magician** がつかみ、マガジンラックに入れていくという作業をしている。まず、加工後の同部品は左から右へと幅の狭いベルトコンベヤの上を流れる。加工品がコンベヤの端にくると、**Dobot Magician**のエンドエフェクターに入っていく。この加工品を納めるマガジンラックを、**Dobot Magician**の下の幅広のベルトコンベヤ上に配置しておく。そして、**Dobot Magician**のエンドエフェクターで受け止めた加工品を、マガジンラックの所定場所に投入していく。こうした取り組みによって、部品が傷つかなくなり、目視検査が不要になった。

図1 改善後の工程の写真(右下に見えるのがDobot Magician)



この取り組みによって、改善前は1個あたり0.5分かけて目視検査をしていた工程がなくなった。この製品を月1,500個程度生産しているので、月当たり750分の目視検査の工数を削減することができた。トータルの投資額は数十万円であり、1時間の検査員の人件費からしても、大きな投資対効果が認められている。

## ②手挿入電子部品小分け工程

次が、プリント配線板組み立ての、手挿入電子部品小分けの工程である。元々、同社のプリント配線板組み立て工程では、小ロット生産が主流で、大型リード部品は自動機ではなく人手で基板に組み付けていた。この組み付け前には、部品を基板1枚当たりの必要量に小分けする作業があり、制御基板に挿入する部品を必要な数だけ紙コップに取り分ける「ピッキング」の作業を行っていた(図2)。こうすることで、紙コップから部品を取り上げて挿入していけばよいため、作業効率の向上とミスの防止につながっていた。しかし、キッティングに多くの工数を要しているという課題があった。

図2 元々の工程



そこで島津製作所では、2019 年からこの改革に取り組んだ。ここでは、Dobot Magician の他、回転テーブル、非接触スキャナ、カメラ、小型プロジェクターを投入した。その結果生まれたのが下記のような新工程である。

まず、作業者は、小分けしたい部品（リード付きコンデンサ）を、重なり合わないように注意して、多数個まとめて回転テーブル上に載せる。すると回転テーブルに向かって上部から光を投射し、非接触スキャナがテーブルを撮影して、システムが見えている部品 1 個ずつの位置と姿勢を認識する。なお、この際の部品の認識は深層学習技術を用いている。すると、Dobot Magician が部品のリード部分をつまみ、紙コップに所定の数だけ運ぶ。この、運ぶ途中の様子はカメラで撮影し部品を正確につまめているかを調べている。こうしたシステムも全て安価なものが使われている。Dobot Magician だけでなく、画像認識用機械学習ライブラリはオープンソースの「ChainerCV」(Preferred Networks 製)を用いている。また、約 6 万円の安価な OA 用 2 次元スキャナ(解像度は 600dpi)も用いている。一般的な 3 次元スキャナは 300 万円もする中で、安価なスキャナ用いている。こうした結果、GPU 入りのサーバーやノートパソコンを除いて約 30 万円程度の投資、ノート PC を入れても 50 万円程度でこのシステムを作り上げた。

主要な取り組みはこの二つだが、これらの取り組みに感化されて、島津製作所ではローコスト・ロボットを用いた改善が自律的に広まってきている。例えば、生産現場を直接支援する現場の生産技術担当者が、上司の指示を待つことなく自律的に、PCBAの目視検査の補助装置を導入しだしている。この装置、XYテーブルにカメラを取り付け、CADと関係する形で低価格な直交座標ロボットが導入されている。このような状況について、本社の生産技術担当者は「現場の生産技術担当者が趣味のような形で導入している」と評している。現場の生産技術担当者が、ロボットを本社の生産技術担当者から押し付けられたものであると捉えるのではなく、ロボットを改善の道具ととらえ、気軽に使うようになっているのである。その結果、現場での自動化、ロボット化の土壌が出来上がってきているのである。

かつて高価なロボットを導入する場合は、手段が目的化することもあった。しかし、こうした取り組みを経て、そうしたことがなくなってきた。安価なロボットであるがゆえに、アイデアがすぐ試せて、課題が早くわかるようになり、短サイクルのPDCAが回るようになってきた。その結果、現場生産技術スタッフが、改善を進める手段のひとつとして、ロボットの選択肢を考慮するようになってきたのである。すなわち、現場においてロボットへの抵抗感の少ない導入に近づいてきていると、本社の生産技術の担当者は感じている。

また、改善ツールのひとつとしてロボットを導入することで、多くのメンバーがロボットプログラムを学習するようになってきている。例えば、Dobot Magicianを動かすために必要なDobot Studioなどのプログラムを、ロボットを扱う現場の生産技術担当者が学ぶようになってきている。これまで島津製作所で使ってきたロボットのプログラムに使われていた言語は、そのロボットの会社ごとにカスタマイズされており、現場の生産技術担当者からは取っつきにくいという印象が持たれていた。しかし、前述の

直交座標ロボットやDobot Magicianは、その制御のソフトウェアがオープンソースで公開されており、ユーザー側として学びやすい。そのため、自ら制御などをカスタマイズできるように、プログラミングを学びだしたのである。ロボットの導入というのが新たな刺激となり、自然と人材育成にもつながるという副次効果も表れているのである。さらには、自動機開発の前の試作での課題出しや、実施したい事のプレゼンテーションとして、ローコスト・ロボットが活用された事例も出つつある。ローコスト・ロボットを使うことによって、ロボットを使うことへのハードルが下がり、より多くの担当者が抵抗感なくロボットを使うような土壌ができてきたのである。

## 5. ディスカッション

### (1) ローコスト・ロボットの導入の効果

本稿が研究対象とした島津製作所では、安価なロボットを現場の改善活動のツールとして位置づけて導入することで、ものづくり現場へのロボット導入を促進していた。島津製作所は1980年代からロボットの導入を進めていたが、ロボットの技術的な制約、現場との親和性、生産思想(多品種少量生産)との兼ね合い、国内回帰への注力などから、ロボットの導入が必ずしも進んでこなかった。しかし2017年から改めてロボットを導入するにあたっては、過去の経験を踏まえて、安価なロボットの導入を行った。その際には、安価なロボットを現場の改善のツールとして位置づけ、現場に近い人が、自らの裁量で、自由に使える環境を構築しようとしている。それによって、「やらされ仕事」ではなく、自立的にロボットを使おうという動きが、組織に広がりだして、現場でのロボットの導入が進んでいるのである。

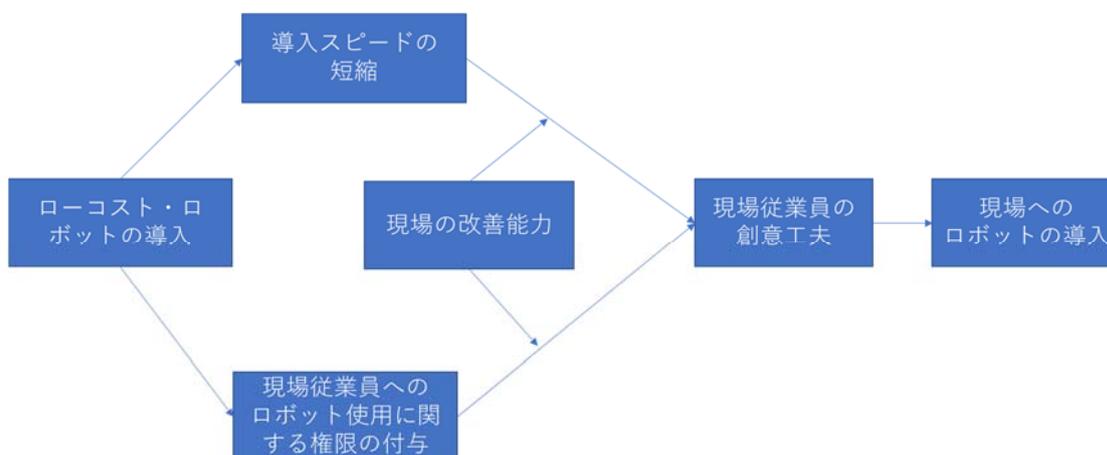
ここから明らかになったのは、「現場の創意工夫を促す形でのロボットの導入は、ものづくり現場でのロボットの導入を推進する」というメカニズムである。もちろん、このメカニズムの成立は、必ずしも安価なロボットでなくても成立しうる。しかし事例で触れられていたように高価なロボットの場合は、その導入に時間がかかり、また高価なロボットである以上、現場で気軽にいじらせる権限を与えることも難しい。結果、現場に導入するための試行錯誤のスピードが遅れてしまう。さらに試行錯誤の回数が減ることで、現場の生産技術担当者や作業員がロボットの扱いになれる機会も少なくなる。「高価なロボットでもすぐに導入し、気軽に現場の人間に使えるようにする」という体制は、よほど資源に余裕のある企業、または高価なロボットを販売している企業くらいにしか取れないため、現実的ではないだろう。そのため、ロボットがローコストであることは、現場の創意工夫を促すための一助となるのである。

しかし、ローコストのロボットを導入すれば、必ず現場の創意工夫が引き出されるとは限らない。ローコストなロボットであっても、現場に自由に使わせる方針を出さなければ、現場の創意工夫は起きず、活発なロボットの導入は妨げられる可能性がある。また、現場側に創意工夫をする基盤、すなわち改善能力(藤本, 1997)がなければ、うまくいかないだろう。

以上の議論から、ローコスト・ロボットの活用が現場へのロボットの導入につながるメカニズムをまとめたものが図3である。ローコスト・ロボットの導入によって、ロボット導入のスピードを短縮し、現場

従業員に権限を与えやすくなる。その際に、現場に改善能力がたまっていると、現場においてロボットを用いた創意工夫が行われ、結果としてロボットの導入が進んでいく可能性があるのである。

図3 本稿のメカニズム



## (2) ローコスト・ロボット化の産業への含意

最後に議論を拡大し、本稿の議論が持つ産業全体への含意を検討する。

現在、工場への情報技術の導入が進められ、ロボットの導入もその延長上として多くの企業に検討されている。しかし冒頭で見たように、ロボット導入のコストがボトルネックとなり、資金的な余裕のない企業（例えば中小企業）への導入は進んでいないのが現実である。ものづくり現場の使用に耐えるようなロボット、すなわち人に置き換えられるようなロボットは技術的にも高度であり、価格が高くなるのは当然である。その結果、一部の企業がロボット化に躊躇していると言えよう。

こうした状況において、本稿で見たようなローコスト・ロボットの導入は、「破壊的イノベーション (Christensen, 1997)」としての位置づけを獲得する可能性がある。破壊的イノベーションとは、既存の顧客の価値ネットワーク（例：評価基準）とは異なる方向性のイノベーションであり、新しい価値ネットワークを提示し、最終的には既存企業を駆逐する可能性のあるイノベーションである。例えば HDD（ハードディスク・ドライブ）産業では、8インチのHDDが主流だった時、5.25インチのHDDは「小型化」という価値では優位性を持つものの、記録容量は小さかった。既存顧客（主に大型コンピューターを製造する企業）は記録容量を重視するため、5.25インチのHDDに価値を見出さなかった。そのため8インチのHDDを製造するHDDメーカーは、5.25インチのHDDの開発を行わなかった。そのため5.25インチは、サイズの小さなコンピュータなどで細々と使われだした。しかしやがて、5.25インチのHDDの記録容量が上がると、もちろんそれでも8インチのHDDの記録容量の方が大きいのだが、「これ以上の記憶容量はいらない」と顧客が感じるようになり、むしろ小型化や消費電力の面で魅力的な5.25インチのHDDを使用するようになった。この結果、8インチのHDDを製造していた企業は業界から駆逐されてしまった。

こうしたストーリーが、ロボットでも起こりえる。現状、高機能のロボットは価格も高く、信頼性の面などで優れている。ゆえに大企業はそうしたロボットを使う。しかしローコスト・ロボットはものづくり現場での創意工夫の促しやすさという意味では、高価なロボットに勝っている可能性がある。コストが安いゆえに現場への導入の意思決定を速めることができ、また現場に自由に使わせることもしやすいのである。そうした特性を持つロボットが今後ある程度のレベルアップをし、高機能ロボットの機能の上昇が顧客（製造業企業）の要求を超えた時、ローコスト・ロボットが市場を席卷する可能性がある。

もちろん、ローコスト・ロボットの「現場で自由に使わせやすい」というのが、コストだけに起因するのであれば、破壊的イノベーションで定義するような「新たな価値」とは言えないかもしれない。しかし、ローコスト・ロボットは、「オープンソース・ハードウェア」の潮流をくむものが多い。「オープンソース・ハードウェア」とは、フリーまたはオープンソースのソフトウェアを使ったハードウェア、またはハードウェアの概要・設計・実装などの情報をフリーライセンスで提供しているハードウェアなどである。例えば、低価格の3Dプリンタや、Arduinoやラズベリーパイに代表されるシングルボードコンピューターなどがある。これらでは、多くの開発者やユーザーが、GIT-HUBなどのネット環境を通じ、情報を共有している。そのため安いだけでなく、かつユーザーの方でカスタマイズしやすくなっている。実際に島津製作所で扱われだしている直交座標ロボットも、これらオープンソース・ハードウェアを使ったものが多い。また、Dobot Magicianも中で使用している部品はオープンソース・ハードウェアだったり、制御にオープンソースソフトウェアを用いたりしている。

特に島津製作所では、これまで使ってきたロボットの言語が、ロボットメーカーによって異なり、現場で使いづらかったという認識を持っていた。また、現場で何かがあると、そのロボットメーカーの営業を通さなければならず、スピードも遅かった。しかし、ローコスト・ロボットの場合、開発に関する情報が、ネット上に豊富に存在し、ソフトウェア、ハードウェアの使い方、バグ情報、Q&A情報を迅速に獲得できる。もちろん信頼性は落ちるものの、自己責任で課題を解決するという側面は、現場の改善活動とも相性が良かったのである。

このように、ローコスト・ロボットが破壊的イノベーションとなるのであれば、日本の産業も対応しなければならない。日本には高機能なロボットを製造する企業も多く、破壊的イノベーションが進むことは、一見ネガティブにうつるかもしれない。しかし、必ずしもそうではない。日本の現場に改善能力が蓄積しているとすれば、ローコスト・ロボットを使ったロボット化が進むのは日本であり、日本の工場がローコスト・ロボットの「リードユーザー (von Hippel, 1986)」となりえるからである。そうであれば、実際にローコスト・ロボットを作るのが中国企業だったとしても、その企業に必要な知見は日本企業にあるため、良い補完関係を築ける可能性がある。他国の企業よりも、「ローコスト・ロボットを使いこなす能力」を磨くことができれば、現場のロボット化の進展はもちろん、ロボット使用のアプリケーション開発などにおいて、日本企業がリードできる可能性がある。

もちろん、こうしたロボットを日本企業で作る企業がいてもよい。日本の製造現場に対して、最も密にコミュニケーションを取れるのは、古くから日本の顧客を相手にしてきた日本のロボットメーカ

一であろう。日本のロボットメーカーは、ローコスト・ロボットを見据えたうえで、長期的な戦略を取ることが求められるだろう。

このように、ローコスト・ロボットを使いこなせる可能性のある日本企業が、ローコスト・ロボットを戦略的に破壊的イノベーションに育てることで、Industry 4.0の文脈におけるものづくり現場のロボット化をリードできる可能性がある。他国と比較した時の日本企業の新たな優位性として、世界に発信できる可能性もあるだろう。

## 6. 結論

本稿は「日本のものづくり現場にロボットをどのように導入していくべきか」というに問題意識に対して、ローコスト・ロボットの活用が一つの答えとなる可能性を示した。ローコスト・ロボットであれば、現場への導入スピードをあげることができ、また現場の従業員に権限を付与することも容易であり、改善ツールとして現場に使ってもらうことができる。特に、既に改善活動が活発に行われているような現場であれば、こうしたロボットの導入はスムーズにいく。その結果、徐々にロボットが導入していく可能性があるのである。本稿の一つ目の貢献はこのようなメカニズムを、実例をもって示したことである。

さらに本稿は一步踏み込んで、このようなメカニズムが存在することによって、ローコスト・ロボットが「破壊的イノベーション」となりえる可能性を示唆した。ローコスト・ロボットは信頼性などでは既存のロボットよりも落ちるものの、現場の使い勝手という、他の側面では既存のロボットを上回る場所もある。そうであれば、やがてローコスト・ロボットが破壊的イノベーションとなる可能性もある。しかし、そうしたイノベーションにおいて、改善能力の蓄積した日本の現場は重要な役割を果たす可能性があり、日本が主導する破壊的イノベーションとなる可能性がある。「Industry 4.0」に代表されるような製造業の変革の議論が行われる中、日本の産業の新たな方向性を示したことが、本稿の二つ目の貢献である。

本稿は様々な示唆に富んでいる。まず、学術的な議論に対しては、現在起きている製造業におけるロボット化の現象に対して、あらためて過去の蓄積と比較して評価することの重要性を議論できたことである。1980年代の時点でオートメーションの議論は行われており、日本企業は日本の現場に相性の良い形でのオートメーションが進められ来たことが示唆されていた。そうであるならば、そうした議論が現在においても起こりうることを、学術研究者は検討しなければならない。現場でのロボットの導入を知識移転論や技術導入論などと関連付けながら、どのようにしてロボットの導入が進むのか、なぜロボットの導入が進まないのかを、改めて検討する余地があると言えるだろう。その際には、本研究が示唆したような日本の現場のコンテキストをより抽象化し、条件変数として扱うことが求められるだろう。

次に実務家に対しては2つの示唆がある。まず、現場へのロボットの導入を考えている担当者は、トップダウンによる高価なロボットの導入が、本当に望ましいのかを議論する必要があるだろう。ロボットを使用するのが現場であるならば、現場にとって受け入れやすい形で導入しなければならない。ロボットを活用する土壌を作るためにも、安価なロボットを改善ツールの一つとして導入すると

いう「ボトムアップ」的アプローチも、検討する価値があるだろう。次に、ローコスト・ロボットが破壊的イノベーションになる可能性を、実務家は注視すべきであろう。ただ破壊的イノベーションに備えるだけでなく、破壊的イノベーションを自ら促し、その中で新たな付加価値を手に入れることも、日本企業は考えるべきであろう。

最後に政策担当者は、本稿が提示したローコスト・ロボット導入のメカニズムを理解したうえで、政策を考慮すべきだろう。本稿が示唆するのは、現場の創意工夫という、日本の現場の強みが発揮される形でのロボットの導入の有効性である。もちろん、コストが高いことがロボットの導入を妨げているだろうが、それに対して補助金をつけて導入しても、もともと高価なロボットである以上、現場では自由に触れない可能性がある。また、そのロボットが現場でいじりやすいものでなければ、結局は使われなくなってしまう。従来の政策を必ずしも否定するものではないが、政策担当者はローコスト・ロボットの導入の効果にも目を配り、その活用事例や効果、そしてそれを活用している人にも焦点を当てた政策を行うべきであろう。

もちろん、本稿にはいくつかの限界がある。まず、1社の事例を扱っただけであり、一般化可能性は保てていない。特に島津製作所における多品種少量生産という条件が、ローコスト・ロボットの導入に適していた可能性は高く、少品種の大量生産の場合は、通常のロボットの導入の方が望ましい可能性もある。また、島津製作所でも取り組みが現在進行形の部分もあり、現場にとって最適なロボット化の状況が達成できているわけではない。そのため、今後は様々な事例を蓄積することが必要である。二つ目に、生産技術担当者レベルに焦点を当てているため、現場の作業員レベルがロボットに対してどのように考えているかを詳細には議論していない。例えば、ローコスト・ロボットであれば、ロボットが人を置き換えることの抵抗感を抑えることができるのかについては、十分な議論はできていない。様々なレイヤーへの調査が引き続き求められる。三つ目に、ローコスト・ロボットを導入することによる負の側面にも十分に焦点を当てていない。ローコスト・ロボットを導入することに、精度が劣ること以外に何らかの副作用があるかもしれないため、それらについては今後注視する必要がある。しかしこのような限界があるとしても、本稿はこれまでとは異なるロボット導入のアプローチを議論することで、ものづくり現場の自動化の議論に対して、新たな視座を提示した。本稿の議論が本分野の発展につながれば幸いである。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K13777の助成を受けた研究成果が含まれています。

## 参考文献

- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152.

- 藤本隆宏 (1997)『生産システムの進化論: トヨタ自動車にみる組織能力と創発プロセス』有斐閣.
- 藤本隆宏 (2001)『生産マネジメント入門 II』日本経済新聞社.
- 藤本隆宏 (2020)「昨今の根拠の怪しいものづくり論議を批判する(2)」『赤門マネジメントレビュー』  
<https://doi.org/10.14955/amr.0200515c>.
- Katz, R., & Allen, T. J. (1982). Investigating the Not Invented Here (NIH) syndrome: A look at the performance, tenure, and communication patterns of 50 R & D Project Groups. *R&D Management*, 12(1), 7-20.
- 楠田喜宏 (2004)「産業用ロボット技術発展の系統化調査」『技術の系統化調査報告書』4,  
<http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/012.pdf>.
- 光山博敏, 中沢孝夫 (2017)「インダストリー 4.0 の崩壊とその先にあるもの」『一橋ビジネスレビュー』 65(3), 108-121.
- 大木清弘 (2014)『多国籍企業の量産知識: 海外子会社の能力構築と本国量産活動のダイナミクス』有斐閣.
- 奥雅春 (2018)『日本版 インダストリー4.X 日本の強みを活かす IoT 革命』ダイヤモンド社.
- Tidd, J. (1997). Key characteristics of assembly automation systems. In Shimokawa, K., Juergens, U and Fujimoto, T. (eds.) *Transforming automobile assembly*, pp. 46-60. Berlin, Heidelberg: Springer.
- von Hippel, E. (1986). Lead users: a source of novel product concepts. *Management science*, 32(7), 791-805.