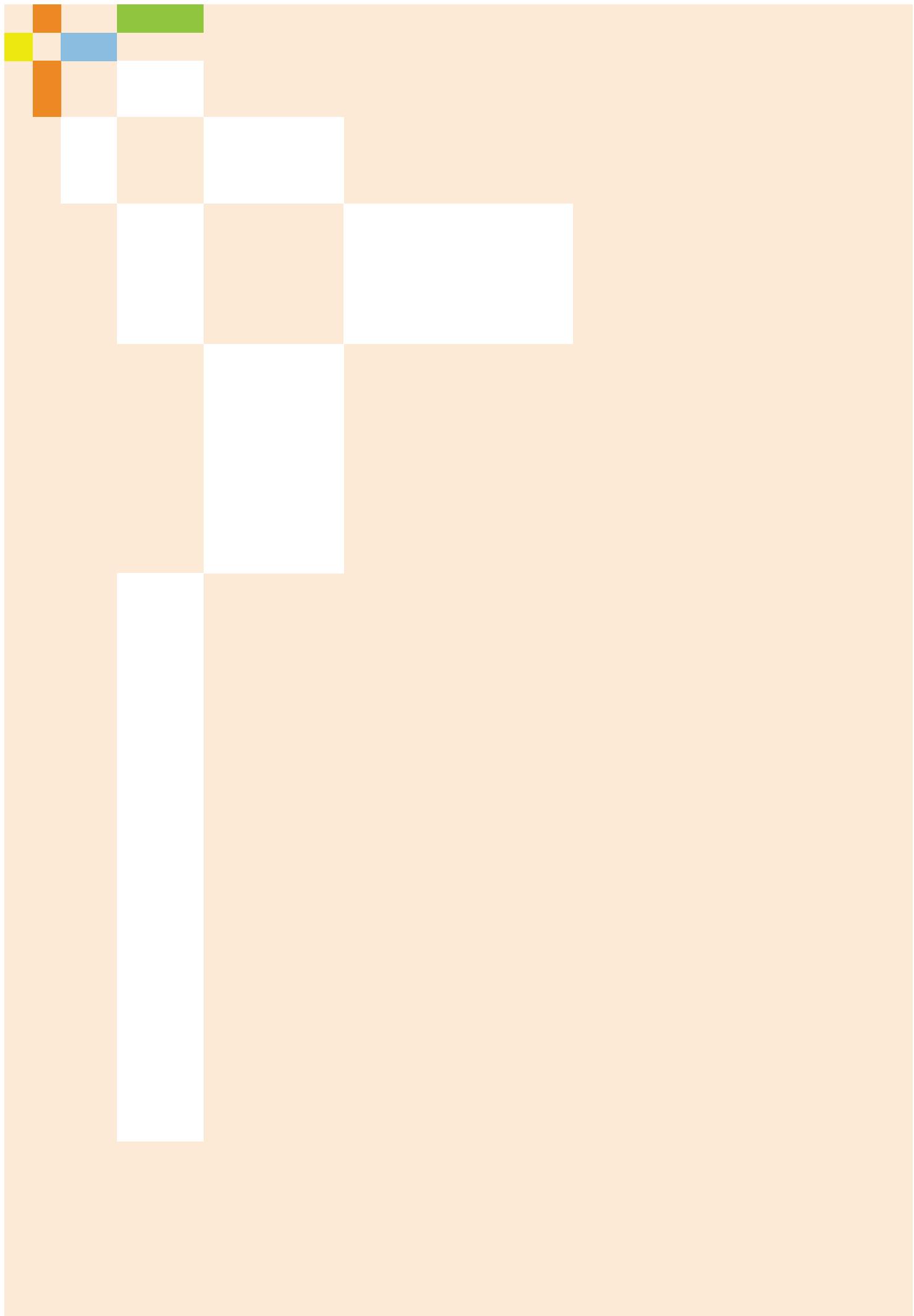


acatech DISCUSSION

# 社会の発展のための 人と機械のインタラクション の再構築

ドイツと日本の視点

H・カガーマン、野中洋一(著)



acatech DISCUSSION

# 社会の発展のための 人と機械のインタラクション の再構築

ドイツと日本の視点

H・カガーマン、野中 洋一(著)



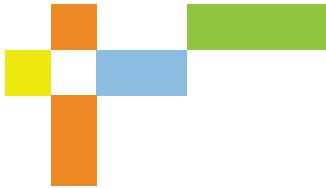
## acatech DISCUSSIONシリーズ

本シリーズは、ドイツ工学アカデミーが主催したシンポジウム、ワーキンググループ、ワークショップなどのイベントを文書化してまとめたものです。本シリーズの出版物の内容に対する責任は、当該編集者および執筆者にあります。

acatechの過去の出版物はすべて、<https://en.acatech.de/publications>からダウンロードできます。

# 目次

まえがき	4
要旨	6
プロジェクトチーム	7
1 はじめに	9
2 スマートマニュファクチャリングにおける新たな問題	10
3 労働の将来	11
3.1 人口変動、労働市場、生産性、仕事の質	11
3.2 デジタルトランスフォーメーションによる労働力構造変化の推定	17
4 多様性によって生じるギャップと、 持続可能な革新を促進する施策	25
4.1 多様性によって生じる新たなギャップ	25
4.2 現実世界とサイバー世界の管理	28
4.3 多様性による持続可能な革新	28
5 人と機械の協調の新たなパラダイムにおける挑戦	34
5.1 現状	34
5.2 今後の展開	35
5.3 人と機械協調における新しいパラダイム	35
6 結論	45
参考資料	46



## まえがき



ヘニング カガーマン教授(博士)、プロジェクトリーダー

acatech(ドイツ工学アカデミー)

理事会委員長、元プレジデント  
Plattform Industrie 4.0  
グローバル代表・アドバイザー

Industrie 4.0は、2009年の世界的な経済危機とその広範囲にわたる経済的および社会的影響に対するものとして考案されました。その目的は、製品、プロセス、および組織構造の適応性を高めることによって経済の競争力と回復力を確保するために、デジタル化の第二の波という機会を利用することでした。

また、経済的影響だけでなく、循環経済など生態学的な課題や労働の将来など社会的課題に対処する持続可能

な成長の段階を確立しようとしたものでした。もちろん、第4次産業革命の変革プロセスでは、まず個々のユーザーと市民が具体的に利益を得なければなりません。このプロセスで、特に自然と人工知能(AI)の相互作用の増加により、人と機械のインタラクション(HMI)が極めて重要な中心的役割を果たしています。

acatechインパレス・イノベーションでは「人と機械のインタラクション(HMI)に関する焦点はユーザーである人に移っている」と2016年に既に述べています。<sup>1</sup> この背景もあり、今回、日本のパートナーの提案によって、社会的課題を解決するという視点で人と機械のインタラクション(HMI)を検討できたことを私達は嬉しく思います。

日本とドイツは、高齢化、スキル不足など同様の社会的問題に直面していますが、社会的な傾向や文化的背景から解決策を探る方法は両国で異なっています。これらの違いを分析し、理解していくことが大切です。

本書の重要な成果の一つは、人と機械のインタラクション(HMI)に関して、2つの国でそれぞれ固有の観点の類似点と相違点を明確にしたことであり、将来の日独活動の協力分野を明らかにしたことです。



野中 洋一(博士)  
プロジェクトサブリーダー  
株式会社 日立製作所  
研究開発グループ  
生産イノベーションセンター  
主管研究長

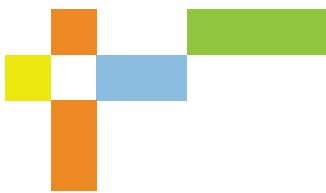
資源の枯渇、環境への負荷、出生率の低下、人口の高齢化などは、持続可能な社会を確立するための世界的な課題となっています。日本では、操作ミスや機械の劣化に関する産業上の事故などが社会的な問題となっており、これら社会課題への注目が高まっています。

第四次産業革命にあるこの時代では、現在および将来における社会問題とその影響を定義するだけでは不十分

です。また多くの書籍はAI、ソフトウェア制御、5G通信など最新の技術を紹介するにとどまり、社会的な視点からみたときの課題や施策について論じたものは多くなく、これが本プロジェクトに集まったドイツと日本のメンバの動機となりました。

この動機に基づいて、本書ではドイツと日本から提供されたケーススタディの定量的研究と仮説を取り上げ、課題と施策に焦点を当てています。そして、課題をどのように認識するかについてドイツと日本の考え方の類似点と相違点を理解することは、同じ目標を目指しているにもかかわらず両国それぞれの歴史的背景と社会構造がそれら類似点と相違点を生んでいるということに気づかされ、私たちにとって非常に貴重な経験でした。

本書が日々私たちが直面している問題の社会的影響を浮き彫りにする機会となることを期待しています。そして、私たちの日々の活動が、持続可能な社会の構築に向けて積極的に貢献していくことを願っています。



# 要旨

ドイツや日本のような国では、労働力の成熟化および機械やインフラの老朽化によって社会的な問題が発生する可能性があります。これらの問題を解決し、生産効率を高く維持したまま持続可能な社会を構築するために、両国はサイバーフィジカルシステム(CPS)、AI、ロボティクスなどのデジタル技術にますます注力するようになっています。こうした次世代の成長エンジンは、ドイツではIndustrie 4.0、日本ではSociety 5.0と呼ばれるイニシアティブによって支えられています。

デジタル社会においては、機械を操作することと人とやり取りすることにそれほど違いないものになってきており、その結果として、人と機械の間のギャップが縮まり続けています。現在の技術的発展におけるこの変革力は生活の隅々にまで行き渡り、人と機械のインタラクション(HMI)に大きな影響を及ぼしています。また、一般的な仕事の手順や雇用条件にも影響を与えています。本書では、日本とドイツがこうした進歩にどう対処しているかについて、以下のような疑問点についてそれぞれ検証します。

- 仕事(および職場)が将来どのように進化する可能性があるか?
- 企業は、どのように従業員を進化させる必要があるのか?
- 企業は、どのように組織とプロセスを進化させる必要があるのか?

これらの疑問点を解明するため、本書は以下のような構成となっています。

第1章では、まず本書の背景と対象について簡単に説明します。

第2章では、スマートマニュファクチャリングにおける新たな課題を示します。具体的には、ドイツと日本の社会的な受容条件および状況に言及します。

第3章では、Industrie 4.0の観点から将来の働き方を考察し、雇用、働き方、人材育成等の社会的問題について検討します。ここでは、労働人口、品質、生産性に関する統計データのほか、ドイツと日本における労働力構造の変化を評価したものを紹介します。

第4章では、近い将来、人と機械の双方で想定される多様化に着目し、製品とサービスのライフサイクルを通して持

続可能な変革のための解決策を提起します。この観点から、多様化で発生する新たなギャップを考察し、現実世界とサイバー世界を管理する際の機会と課題について議論します。また、各国固有のケーススタディを利用し、多様化を伴う持続可能な革新を示します。

第5章では、スマートマニュファクチャリングの観点からの人と機械の共生、および将来の製造業に与える影響について議論します。有望な解決策は、人と機械の新しいインタラクション(HMI)が生まれる可能性があります。さらに、人と自己学習機械の統合による運用管理の柔軟化と適応化を提唱します。結果として、より望ましい、やりがいのある仕事が創造される可能性があります。

最後の第6章で結論を示します。

一般に、デジタル技術によって社会的課題が解決すると考えられていますが、それまで人が行っていた定型的な認識作業を代替していくため、デジタル技術による社会的課題の解決には社会の変革が必要となります。本質的に、持続可能な社会を確立するためには、人が付加価値の高い仕事を継続的に創造し、かつ、時代遅れになりそうな仕事から高付加価値の仕事にいつでも移行できるようになることが必要です。さらに、機械が付加価値が低い仕事を行うだけでなく、人とやり取りすることによって付加価値の高い仕事を生み出していく仕組みになることも必要です。こうした要件によって、デジタルトランスフォーメーションは、人が生涯を通してスキル向上に専念し、付加価値の高い仕事を継続的に創造する、人間中心のまったく新しい製造システムを実現できます。本質的に、このシステムにより人と機械のインタラクション(HMI)を再構築し、人と機械の両方がデジタル社会を構築する役割を担うことができるようになります。

最終的には、私たちは、デジタル社会における公共性を強化し、人と機械のインタラクションから得た知識を社会的に共有し、人の幸福に貢献する持続可能な社会の構築に取り組む必要があります。私たちは、その未来に対してシナリオとアクションと一緒に考え、議論していくことを勧告します。

この日独共同プロジェクトは、当面の課題にどう対処するかに関し、ドイツと日本の類似点および相違点を認識することを考慮に入れているため、価値の高いプロジェクトといえます。この2カ国はよく似たゴールを目指してはいるものの、その歴史的背景と社会構造から、解決策を見い出すまでの方法論とスコープは同じではありません。最後に、持続可能な社会を構築するため、多くの国でオープンな議論が行われることを期待します。

# プロジェクトチーム

## リーダー/サブリーダー

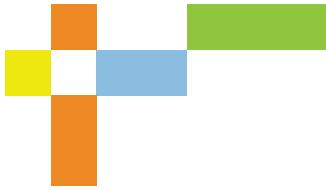
- ヘニング カガーマン教授(博士)、acatech、Plattform Industrie 4.0グローバル代表・アドバイザー
- 野中 洋一博士、株式会社 日立製作所、ロボット革命イニシアティブ協議会会員

## コアプロジェクトチーム

- Reiner Anderl教授(工学博士)、TU Darmstadt、Research Council of the Plattform Industrie 4.0会長、Plattform Industrie 4.0運営委員会委員
- Elisabeth André教授(博士)、アウクスブルク大学
- 新田目 めぐみ氏、明治大学

- Andreas Dengel教授(博士)、DFKI
- Sarah Haas氏、インフィニオン
- 岩本 晃一氏、独立行政法人経済産業研究所(RIETI)
- 太田 順教授(博士)、東京大学
- Matthias Peissner博士、フランツホーファーIAO
- Sabine Pfeiffer教授(博士)、フリードリヒ・アレクサンダー大学エアランゲン＝ニュルンベルク、Research Council of the Plattform Industrie 4.0委員
- Carsten Polenz博士、SAP、Plattform Industrie 4.0運営委員会委員
- Peter Post教授(博士)、フェスト、Research Council of the Plattform Industrie 4.0委員、Plattform Industrie 4.0運営委員会委員
- Joachim Sedlmeir氏、acatech
- Xiaonan Shi博士、三菱電機株式会社
- Tanja Smolenski氏、IG Metall
- 堤 大輔氏、株式会社 日立製作所





## 協力者

- Sheraz Ahmed博士、DFKI
- Mohammad Al-Naser氏、DFKI
- 馬場 丈典氏、三菱電機株式会社、ロボット革命イニシアティブ協議会会員
- Martin Eckert博士、株式会社 日立製作所
- 藤島 光城氏、三菱電機株式会社、ロボット革命イニシアティブ協議会会員
- Josef Haid氏、インフィニオン
- Lisa Hubrecht氏、acatech
- 河合 和哉氏、情報処理推進機構(IPA)、ロボット革命イニシアティブ協議会会員
- 木村 文彦名誉教授(博士)、東京大学、ロボット革命イニシアティブ協議会会員
- 高本 仁志博士、産業技術総合研究所(AIST)、ロボット革命イニシアティブ協議会会員
- Matthias Lieske氏、株式会社 日立製作所
- 松田 三知子名誉教授(博士)、日本規格協会(JSA)、ロボット革命イニシアティブ協議会会員、神奈川工科大学
- 中島 一雄氏、ロボット革命イニシアティブ協議会
- 新倉 雄大博士、株式会社 日立製作所
- Tobias Paulus氏、インフィニオン
- Natalie Schnelle氏、SAP、Plattform Industrie4.0構成員
- 高橋 清隆博士、株式会社 日立製作所
- 上野 裕美子氏、株式会社 日立製作所
- 梅田 靖教授(博士)、東京大学

# 1 はじめに

これまでの3度の産業革命を通じてグローバル化が加速し、多くの人々が雇用を求めて国境を越えて移動するようになりました。このように移動できるようになったことが、ドイツと日本両国の急速な経済成長の基礎となりました。経済は、総人口に占める子供(0~14歳)の割合が30%未満、高齢者(65歳以上)の割合が15%未満の場合に、劇的に成長すると考えられています。このような成長の可能性がある期間のことを飛躍的経済成長の機会と呼びます。米国国家情報会議(2012年)によれば、ドイツの飛躍的経済成長の機会は1950年以前に始まり1990年に終了し、日本は1965年から1995年まで、米国は1970年から2015年まで、中国は1990年から2025年までとなっています。この分析に基づくと、ドイツや日本などの先進国は、既にこのウインドウの期間は終了してその後の時期にあり、この機会とは別の経済成長のエンジンが必要となります。<sup>2</sup> 現に両国の社会は、労働力の成熟化および機械やインフラの老朽化といった社会的な問題を引き起こしかねない課題に直面しています。また、高齢化が進むと、視力低下、反応能力低下、体力低下などにより、生産性が低下するおそれがあると予想されています。例えば、日本では機械の操作ミスや機械の劣化などにより発生する事故が増加しています。

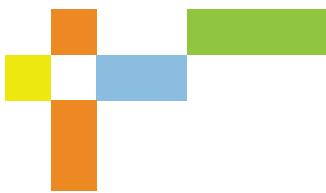
これらの課題を解決し、効率を維持して持続可能な社会を構築するために、CPS、AI、ロボット工学などのデジタル技術に両国は注力するようになっています。こうした次世代の成長エンジンは、ドイツではIndustrie 4.0、日本ではSociety 5.0と呼ばれる活動によって支えられています。ど

ちらのイニシアティブも、社会的な課題を解決し、経済成長を促すことを目標とし、最終的にはサイバー空間と物理的空間を融合した人間中心の社会の創造と、国連(UN)の持続可能な開発目標(SDGs)の達成を目指しています。<sup>3</sup> そして、より高度なデジタル化はエネルギー消費の増加とも関連があるため、社会の持続可能な開発のためには二酸化炭素の排出量など関係する環境への影響も考慮に入れる必要があります。

本書では、労働者の高齢化・多様化、出生率の低下、若年労働者のスキル、およびそれによって発生する将来の工場における課題を中心に、これらの問題をどのように定義すべきか、人と機械のインタラクション(HMI)における新しいアプローチが持続可能な社会という目標の達成に寄与できることは何かについて論じます。人と機械のインタラクション(HMI)において、人の行動および個々の能力は、標準化されたマシンインターフェースに基づいて、従来の構造とシステムによってしばしば制限されます。そして、人と機械の質的な変化を背景に、高齢者と若年者、障害者、および文化的背景の異なる人々のような様々な人のグループ、新型や旧型の機械、多様な仕様を持つ機械など様々な機械のグループに対して、人と機械の共生を新たな形態で定義しなければならないという仮説を立てます。さらに、人と機械のインタラクション(HMI)を調和、再構築するために、新しい戦略および技術も必要です。

本書は、ドイツと日本の産学のパートナーが協力してこれらの問題に取り組み、議論のためのいくつかの側面を提示し、各国の観点から問題解決に向けた様々なアプローチを示すことを目的としています。

2 | 米国国家情報会議(2012)を参照  
3 | Akaish(i 2018)、国連(2019)を参照



## 2 スマートマニュファクチャリングにおける新たな問題

今日の技術革新の中で、私たちの生活を最も変化させ、また私たちに最も注目を集めているものが、デジタル化という波です。この現象によって経済全体が変化し、私たちの働き方さえも変化させます。<sup>4</sup>

生産分野の様々な領域で技術革新を伴う変化は、「Industrie 4.0」という概念に含まれます。CPS(センサ、アクチュエータ)の統合は、構成要素の1つ1つと生産システム全体との包括的な(相互)接続をもたらします。その結果、従来の生産手順に最適化の可能性があればそれを活用することができるだけでなく、柔軟性の高い付加価値の創造および革新的なビジネスモデルを実現することができます。この変化は、特にAIおよび機械学習によってさらに加速されます。<sup>5</sup>

しかし、私たちは今のところ、強力で革新的な変革へとつながり、労働者と彼らの周囲にある機械との関係にも影響を与えるこの道のりのまだ出発点にいます。このような進歩の本質として、機械は人と社会に貢献するものとして認識される必要があります。HMIにおいて注目される対象が人にシフトしており、(自己)学習機能により、事前に厳密に定義された制御スキームに準拠するよう労働者に求めるのではなく、労働者の個々の能力、タスクの特性、およびニーズに柔軟に適応できるようになってきています。<sup>6</sup>

その結果、人と機械とのやり取りが、人と対話することとあまり変わらないものになり、したがって、人と機械との間のギャップは、これまでになく小さくなっています。私たちにとっても、日常生活において、すでにHMIが身近なものとなっています。補聴器やウェアラブルセンサ、協働するロボットなどは、日常生活において機械とのインタラクションが広く普及していることを示すほんの一例に過ぎません。<sup>7</sup>

しかしながら、AI技術の革新やこれまでにない新しいHMIの応用など技術革新は、私たちの生活の様々な領域に適用が期待されています。従来の(生産)設備またはシステムに、処理機能と通信機能を取り付けることにより、システムと機械の間のインタラクションが変化します。さらに、人と技術の間のインタラクションも大きな影響を与え、最終的には従業員の一般的な仕事の手順や労働環境にも影響を及ぼします。<sup>8</sup>

これらの結果はすべて、個々の社会環境や状況に大きく左右されます。本論文では、様々な例とケーススタディで日本とドイツの状況を紹介し、この2つの社会がやがて来る変化とどのように向き合っているかを明らかにします。

以降の3つの章では、以下のような疑問点についてそれぞれ検証し、日本とドイツがどのように対応しているかを説明します。

- 仕事(および職場)が将来どのように変化する可能性があるか?
- 企業は、どのように従業員を成長させる必要があるのか?
- 企業は、どのように組織とプロセスを発展させる必要があるのか?

4 | Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg (2017) を参照

5 | PLS (2019) も参照

6 | acatech (2016) を参照

7 | acatech (2016) を参照

8 | Goreckyら (2014) を参照

### 3 労働の将来

ドイツでは、Industrie 4.0<sup>9</sup> を背景とした働き方のことを「Arbeit 4.0 (Work 4.0)」と呼びます。ここでは、デジタル化、およびグローバル化や人口統計学上の変化、文化的変化、社会的変化などの動向を、従業員の研修や労使間の協定の側面も含めて考慮しています。<sup>10</sup> 企業の経営層だけでなく、職場協議会あるいは労働組合などの社会的パートナーと呼ばれる組織は、仕事の将来が従業員や協業、さらに企業の組織にも大きく影響することを理解しています。デジタル化による変革の結果として、従業員は、自分たちの仕事の進め方や他の人々や機械とどのように協働するかに関して、大きな変化に直面しています。<sup>11</sup> また、デジタル化による変革は仕事の質、働きがい、健康、技量にも影響を及ぼします。<sup>12</sup>

そこで本章では、雇用、働き方、および人材育成に関する社会的課題に注目し、労働人口、品質、および生産性に関する統計データと労働力構造の変化に関する予測を示します。

#### 3.1 人口変動、労働市場、生産性、仕事の質

日本とドイツでは、世界的な水準に比べて全体出生率が低いことから、人口減少と社会の高齢化が急速に進んでいることが分かります（表1）。<sup>13</sup> 労働人口の減少はすでに始まっているのです。

これには、以下のような理由があると考えられます。

- ・ ドイツでは、1970年代前半以降、人口の増加が比較的小さい、あるいはマイナスになるという傾向があった。<sup>14</sup>
- ・ 64歳以上の人口が20%を超えた国は日本が最初であった。<sup>15</sup>
- ・ どちらの国も、関連する社会的な問題への対処法を学んでいるところである。

国名	人口[単位:千人]		
	2016	2060	増減率[%]
米国	322,180	403,504	25.2
中国	1,403,500	1,276,757	-9.0
日本	127,749	86,737	-32.1
ドイツ	81,915	71,391	-12.8
英国	65,789	77,255	17.4
フランス	64,721	72,061	11.3
インド	1,324,171	1,745,182	31.8
イタリア	59,430	54,387	-8.5
ブラジル	207,653	236,014	13.7
カナダ	36,290	45,534	25.5
韓国	50,792	47,926	-5.6
ロシア	143,965	124,604	-13.4
オーストラリア	24,126	35,780	48.3
スペイン	46,348	43,114	-7.0
メキシコ	127,540	166,111	30.2
全世界	7,466,964	10,165,231	36.1

表1: 主要各国における人口の推移  
(出典: Atkinson 2019, 24ページに基づき自作)

- ・ 2カ国で異なる点の1つは移民の状況である。ドイツでは人口の23%を超える人が移民だが、<sup>16</sup> 日本ではこの数字が2%に満たない。<sup>17</sup>

一般に、デジタル化による変革によって社会は根本的に変わる可能性を含みますが、OECD発行の景気見通しによれば、ここ数年の間、ほとんどのOECD加盟国で全体的な労働生産性の伸びが鈍くなりました。日本とドイツに関しても、わずかな低下が認められます（図1を参照）。

この生産性の鈍化には、特に金融危機の影響やその後で世界経済の回復が遅れたことなど、様々な要因が絡み合っています。<sup>18</sup>

9 イノベーションポリシーに関して、ドイツでは「Strategic Project Industrie 4.0」で整備が行われている（Kagermannら（2013）も参照）。  
10 BMAS（2017）、Hoose（2018）を参照

11 Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg（2017）を参照

12 Botthof/Hartmann（2014）を参照

13 Atkinson（2019）を参照

14 世界銀行（2019）を参照

15 国連（2017）238ページを参照

16 Destatis（2018a）35ページを参照

17 MIC（2019a）を参照

18 OECD（2019）56fページを参照

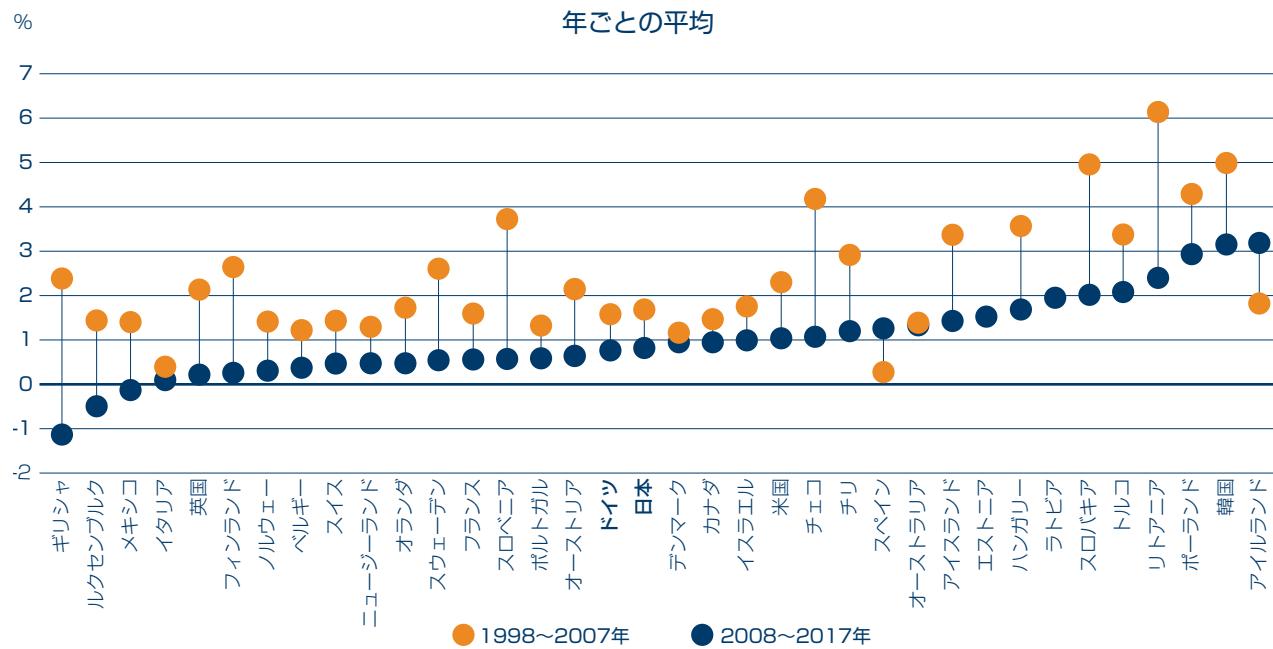
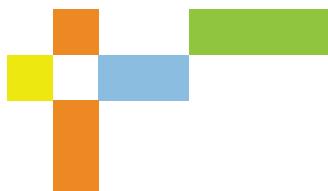


図1: OECD加盟国の労働生産性の成長率(出典: OECD 2019、57ページに基づき自作)

図2に、製造業における各国の単位労働コストの比較を示します。<sup>19</sup> これは(ドイツを基準の100とする)指数方式の比較ですが、それによるとドイツは単位労働コストが高いのに比べ、日本はドイツの水準よりも18%程度低くなっていることが分かります(2016年)。生産性が非常に高い水準にあるドイツですが、競争力の妨げになる可能性がある、このような単位労働コストの高さからくるデメリットに対処しきれていません。<sup>20</sup> これに対し、日本の製造部門では生産性の低下が見られ、円安および他国で技術的発展が進行した時期に、世界的に見てじわじわと下落しています。<sup>21</sup>

表2は、人材の質に関するランキング表です(日本は4位、ドイツは11位)。<sup>22</sup>

ランク	国	評価点
1	フィンランド	85.86
2	ノルウェー	84.54
3	スイス	84.51
4	日本	83.44
5	スウェーデン	83.29
6	ニュージーランド	82.79
7	デンマーク	82.47

ランク	国	評価点
8	オランダ	82.18
9	カナダ	81.95
10	ベルギー	81.59
11	ドイツ	81.56
12	オーストリア	81.52
13	シンガポール	80.94
14	アイルランド	80.79
15	エストニア	80.63
16	スロベニア	80.33
17	フランス	80.32
18	オーストラリア	80.08
19	英国	80.04
20	アイスランド	79.74
24	米国	78.86
32	韓国	76.89
34	イタリア	75.85
44	ギリシャ	73.64
45	スペイン	72.79

表2: 人材の質  
(出典: Atkinson 2019、80ページに基づき自作)

19 | Schröder (2017) 78ページを参照  
20 | Schröder (2017) 75、78ページを参照  
21 | Nikkei Asian Review (2017) を参照  
22 | Atkinson (2019) を参照

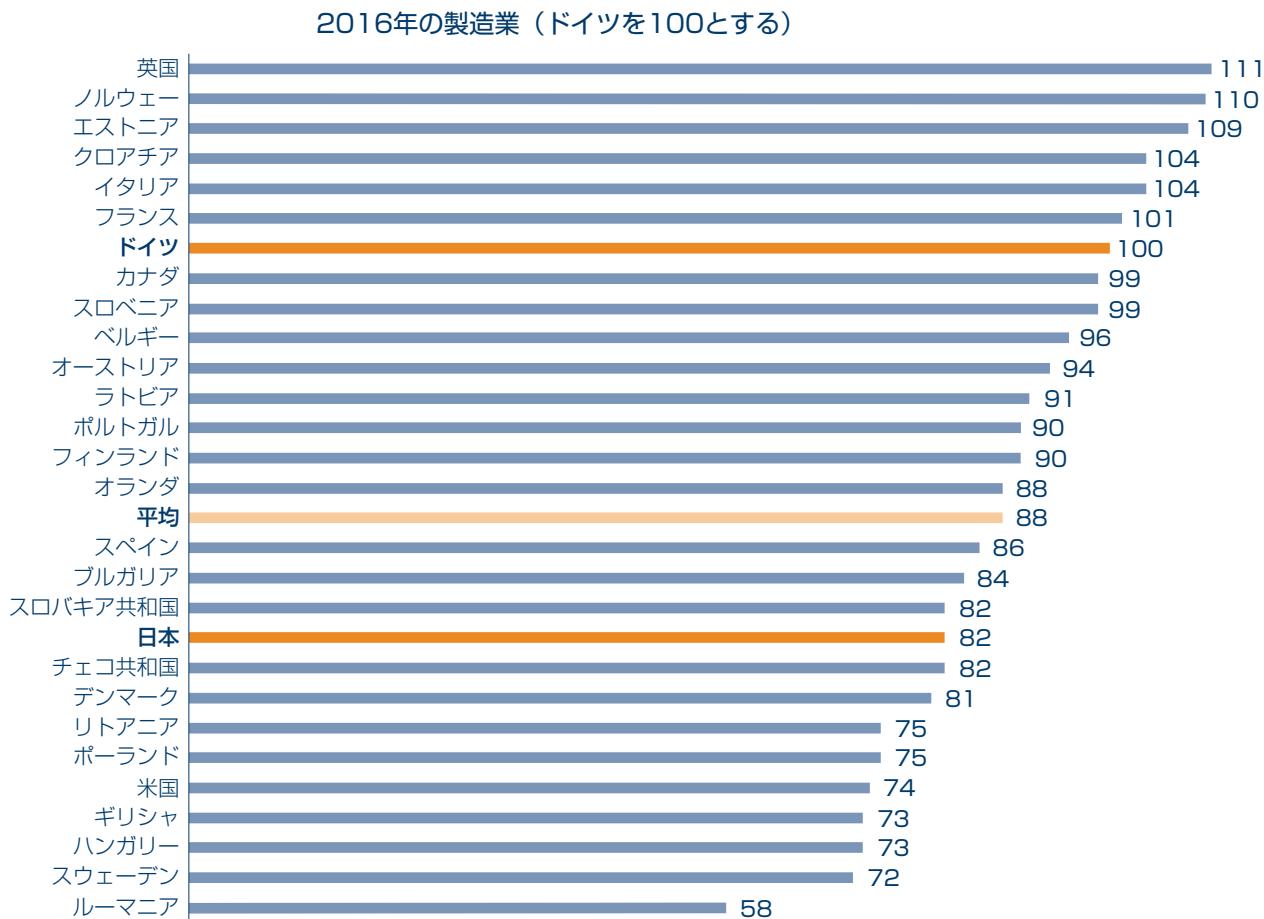


図2: 製造業における単位労働コストの国際比較(出典: Schröder 2017、78ページに基づき自作)

### 代替のリスクと自動化のリスク

OECDのArntzらによれば、2016年時点で労働者には、50～70%の「作業の変化」リスクと、70～100%の「作業の自動化」リスクという2種類のリスクがあります。<sup>23</sup> 2018年には、NedelkoskaおよびQuintiniがOECD加盟国における各リスクの試算を改訂し、発表しました(図3)。

ドイツでは16%、日本では13%、米国では9%、OECDでは平均14%の労働者に対し、これまでの作業が代替されるリスクが70-100%となっています。<sup>24</sup>

この試算は、世界各国の専門家たちの間でコンセンサスを得ています。

日本については、総務省が2017年に行った労働力調査によると、その労働力人口は6,720万人でした。つまり、870万人の労働者に代替されるリスクがあると推定されます(計算式: 6,720万人 × 0.13 = 870万人)。

日本とドイツは労働者のスキルセットを向上させ、その労働生産性を高める必要があります。この状況においては、人口の減少および労働人口の変化があっても、デジタル化によって労働者のスキルを向上させ、各産業の競争力を確保することができる考えます。

23 | Arntzら(2016)を参照

24 | Nedelkoska/Quintini(2018)を参照

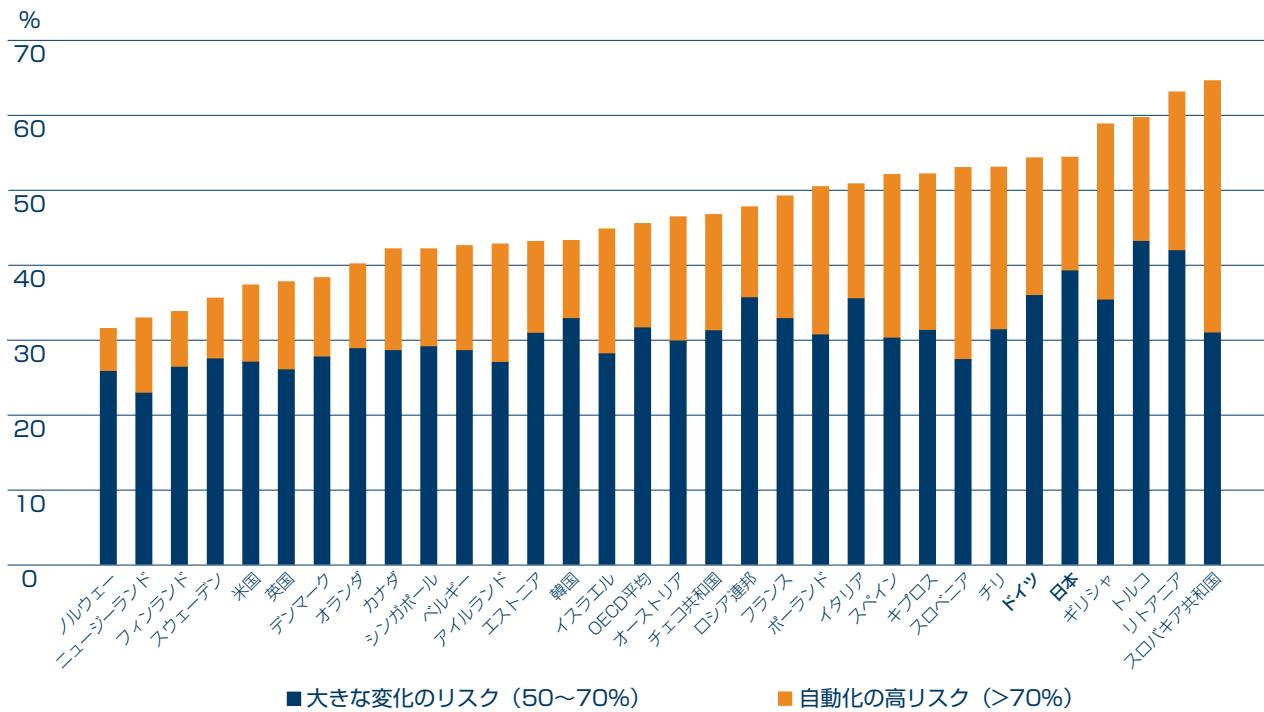
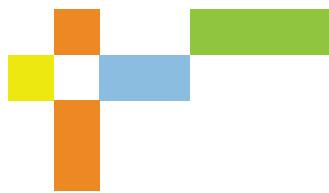


図3: 仕事の自動化可能性における各国の違い、リスクの程度別で見たリスクのある仕事の割合  
(出典: Nedelkoska/Quintini 2018、49ページに基づき自作)

持続可能な成長を効果的に実現するには、イノベーションを進展させ、投資額を引き上げる必要があります。

デジタル化は、潜在的な従業員に、より付加価値の高い仕事を提供し、業界自体に高い価値をもたらす一助になる可能性があります。機械のほうがうまく遂行できそうな作業を人にではなく機械に割り当てれば、創造性と人的資本を解放することができます。

人と機械が調和した形でともに発展する機会を得られるよう、社会はこうした変化を支援しなければなりません。そのような労働環境がどのようなものになるかを考える必要があります。以降のケーススタディでは、両国の労働力構造の状況および必要となるスキルの変化について説明します。

#### 日本のケーススタディ: ICT投資による経済格差 - 米国の研究の影響

米国に関しては、マサチューセッツ工科大学のDavid H. Autor教授により、雇用の構造変化につながる仕組みと

プロセスが明らかにされています。労働者が機械に代替されるプロセスと、それにより発生する経済格差は、情報通信技術(ICT)に対する活発な投資が原因です(図4を参照)。<sup>25</sup> 日本には比較可能な分析結果がありませんが、雇用の構造変化を示す仕組みとプロセスおよび人が機械に代替されるプロセスは、米国とさほど変わらないものと考えられます。この調査は、「仕事の将来」という一連の研究活動から得られた最も重要な成果であり、それ以降は多くの後発研究がその影響を強く受けています。

Autorは、活発なICT投資により、13年以上にわたって雇用構造が変化したと説明しています。これまでに定型的なタスクはコンピュータに置き換えられていましたが、今後も同様な置き換えは続くでしょう。定型的なタスクは、それが非常に難しいものであっても、あるいは人が習得するのに長年の訓練が必要なものであっても、ロジックに基づいてプログラムすることができます。(注: 学問的に、定型タスクは認識タスクと手仕事タスクに分けられます。前者はコンピュータで置き換えられ、後者はロボットで置き換えられています。)

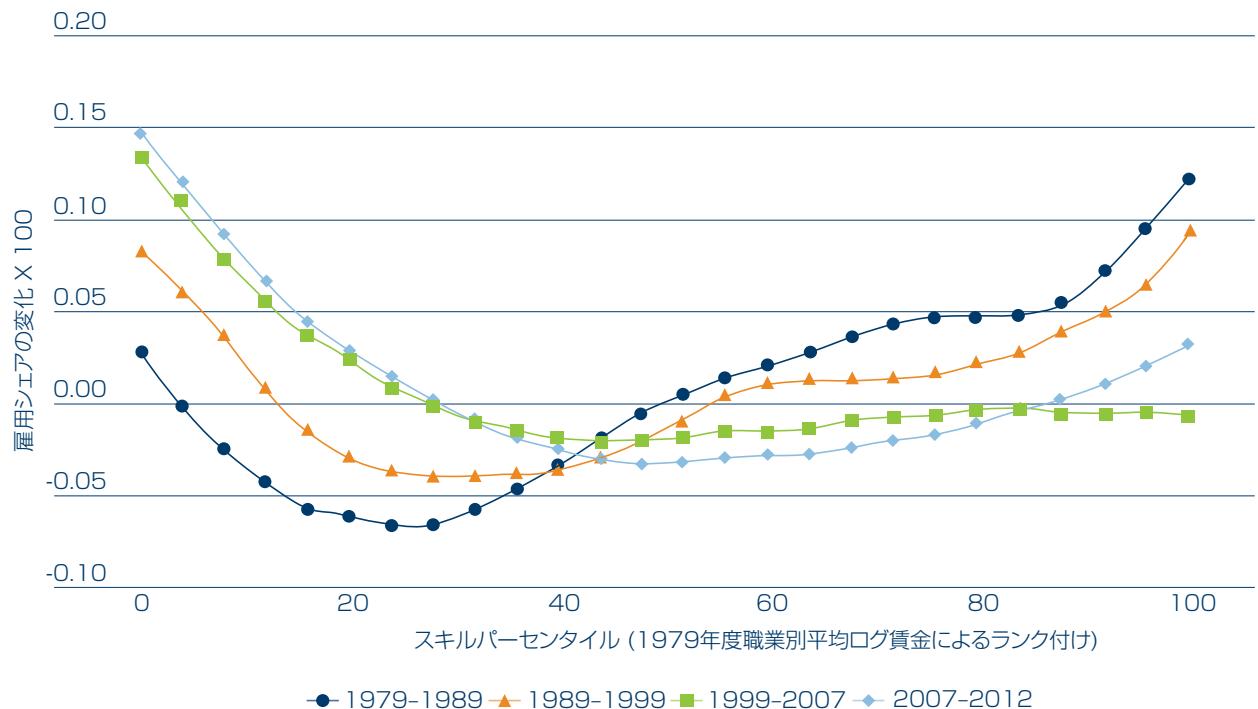


図4: 職業能力パーセンタイルによる雇用の推移(平滑化済み、1979～2012年)

(出典: Autor 2015、20ページに基づき自作)

データ: Autor (2015) は、1980、1990、および2000 Census Integrated Public Use Microdata Series (IPUMS) を使用して計算した。

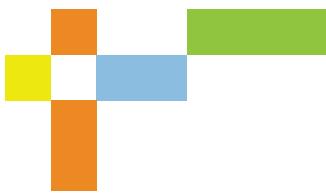
Autorは「能力パーセンタイル」を次のように定義している。図は、「能力パーセンタイル」ランク別のプロットで、部分的に重み付けた平滑化回帰(バンド幅0.8、100観測値)を使用している。ここで、「能力パーセンタイル」は、Census IPUMS 1980の5パーセント抽出で職業の平均対数賃金を雇用で重み付けしたパーセンタイルランクとして計算した。このサンプルは、施設に入居していない労働年齢(15～64歳)にある一般市民で、年間48週以上、週35時間以上労働する者を対象としている。週給は、年収を労働した週数で除算したものとして計算した。また以降では、「低スキル」または「経験不足」を能力パーセンタイルが低いなどという意味で用いている。

米国では、ICT投資により中スキルを有する従業員がコンピュータに置き換えられており、より高いスキルが必要な仕事でも雇用が消失するおそれが出てきています。

経験不足の労働者の数が増加し続けると、ICT投資が行われて代替が加速します。高スキル労働者もその数が増え続けますが、その速度は鈍くなります。この点については、次のように分析することができます。技術の進歩に伴い、高スキル労働者に対する企業の需要は急速に高まりますが、労働市場において、企業のニーズを満たす高スキル労働者の供給量は低下します。投入できる高スキル労働

者の数が少なくなると、賃金は上昇します。失業した中スキル労働者の大部分は低スキルの仕事に移行しますが、低スキルの仕事の総数に変化はなく、結果として賃金は低い水準に落ち着き、雇用状況も不安定になります。

また、Autorは、「自動化は労働力を補完するものとなり、労働力に対する需要がさらに高まるように生産高が上昇し、労働力供給の調整と相互に影響しあう」<sup>26</sup>とも説明しています。その主張によれば、労働市場の二極化は「将来的に継続する可能性は低い」<sup>27</sup>ようです。



## ドイツのケーススタディ:雇用の将来

FreyおよびOsborne (2013) は、その著名な研究「雇用の将来」において、米国では定型タスクが代替されるという結論を導いています。<sup>28</sup> さらに、米国の全雇用の47%はすでに70%超のリスクと評価されており、これは今後数十年で自動化される可能性があると推定しています。<sup>29</sup> FreyとOsborneの結論では、次の2つの点に留意する必要があります。1点目は、技術的な可能性を示すことです。例えば、自動運転技術が利用できるようになったとしても、米国内の職業運転手全員が置き換えられるまでに数十年はかかるでしょう。とはいっても、これらの事例は機械による置換の可能性を示すものの1つとしてカウントされました。2点目は、新しい産業から生まれる新たな雇用が考慮されていないことです。FreyとOsborneは、現在は仕事があるのに将来的に失業するおそれのある労働者の実数を計算により推定しましたが、これには将来の新産業で新たに生み出される職の数が含まれていませんでした。

FreyとOsborneの推定が発表されると、ドイツ政府の連邦労働・社会省は「Arbeit 4.0 (Work 4.0)」に着手しました。同省がZEW、すなわちドイツにある欧州経済研究センターに分析を依頼したところ、2015年6月の時点でドイツには12%のリスクがあるという報告を受けました。<sup>30</sup> しかし、米国については、FreyおよびOsborneの47%に対し、ZEWが示した値は9%でした。この差異が生まれた理由は推定方法の違いにあります。

ZEWでは仕事とタスクを区別し、仕事を一連のタスクに細分化しました。そして、機械が実施するタスクの分量が徐々に増加し、最終的に1人の人間の仕事が機械で置き換えると仮定しています。FreyおよびOsborneによる推定と差異があるのは、彼らは1人の人間の仕事が1つの段階で置き換えると仮定しているからです（これは過大評価だと考えられます）。

人が機械に置き換えるプロセスについては、フランホーファー産業工学研究所（フランホーファーIAO）が詳細な研究と分析を行っています。同研究所では、まずドイツの様々な企業を調査しましたが、一貫性を見出すことはできませんでした。次にドイツ企業の動向を調査したところ、次のような一貫性が見つかりました。

1. 機械は従業員をサポートするために使用される。
2. 従業員はスキルの向上に努め、企業は従業員にスキル

研修を実施する。ただし、技術の進歩が速いと、コスト削減のため従業員を機械に置き換える企業が現れる。

3. 最終段階になると、従業員と企業の両方が人のスキルを向上させる努力を断念する。

## 日本のケーススタディ: 雇用の将来

一連のタスクを、機械が実施するものと人が行うものに分けるということがすでに始まっています。分離が進むにつれて、人には人が行うべきタスクが割り当てられるのですが、こうしたタスクは通常、非常に細かく、気配りが必要で、非定型かつ創造的なものになります。したがって、人には高いスキルが要求されます。AIエンジニアたちは、人の創造性の結果であると考えられていた芸術的、文化的、および機密性の高い活動を実施するための技術の開発に、何年にもわたって取り組んできました。しかし、その活動をよく観察すると、多くの定型的な（経験的知識に基づき手作業の）タスクが含まれていることが分かりました。

技術の進歩に伴い、かつては人が行っていた定型的な（手仕事）タスクや肉体的負荷の高い仕事、重労働の仕事を、機械が引き受けができるようになりました。これは技術が歩んできた道であり、これからも続くことになるでしょう。こうした変化に備えるため、人はその生涯において自らを訓練し続けなければなりません。

独立行政法人経済産業研究所（RIETI）の岩本晃一上席研究員は、日本企業へのインタビューを多数実施したうえで、人が機械に置き換えるプロセスに関して次のような仮説を立てています。

1. 第一段階では、重労働で人が好まない仕事が機械に置き換える。機械の導入目的は人をサポートすることだが、それにより人はさらに機械を増やしたくなる。
2. 機械の数が増えるに従い、人はより高度な熟練作業を行うことを求められ、企業は人材開発への投資を進める。
3. 機械の導入が加速する。人が機械に置き換えられ始め、レイオフが始まる。
4. 最終的に、すべての人が機械に置き換えられる。

28 | Frey/Osborne (2013)、Hirsch-Kreinsen (2018) 17ページを参照  
29 | Ittermann/Niehaus (2018) 43ページを参照  
30 | Boninら (2015) を参照

世界に目を向けた場合、マッキンゼー・グローバル・インスティテュート (MGI) が2017年に行った推定によれば、2030年までに4億～8億人の仕事が自動化され、7,500万～3億7,500万人の労働者（全世界の労働人口の3～14%）に再訓練、新しい仕事の習得、または新しい技能の獲得が必要になります。<sup>31</sup>

RIETIの仮説とフラウンホーファーIAOの調査結果はどちらも、日本とドイツのそれぞれで、人が機械に置き換えられるプロセスが似ていることを説明しています。

――――――

全体として、将来の雇用の研究および分析は次の3点に基づいて行われます。

1. 技術が進歩するにつれ、さらに高度な定型的なタスクが機械で代替される。
2. 低スキル労働者の数は増加を続ける。機械の能力向上と同じ速さで労働者がスキルアップできない場合、労働者が機械に置き換えられる可能性が高い。そのため、人と機械のために調和の取れた制度を設計する必要がある。そこでは、後れを取らずにスキルアップできるよう機械が低スキル労働者をサポートする。これにより、人が機械とともに成長するという状況が生まれる。
3. 高スキル労働者の数は増加を続けるが、同様に高スキル労働者に対する企業の需要も増大する。需要が高スキル労働者の供給を上回る場合は、賃金格差の拡大が続く。

### 3.2 デジタルトランスフォーメーションによる労働力構造変化の推定

定型タスクの割合の計測は、世界各国の専門家によって行われています。De La RicaおよびGortazarは、2016年に

OECD加盟国の定型業務集約度 (RTI) の集計を公表しました。<sup>32</sup>

このRTIは次のように定義されます。

$$RTI_i = R_i - A_i - M_i$$

（ここで、 $R_i$ 、 $A_i$ 、 $M_i$ は、それぞれ定型（定型認識および定型手仕事）、抽象（非定型認識および非定型対人）、および手仕事（非定型手仕事）のタスクに対応しています。<sup>33</sup>） RTIは、各国の非定型化過程の段階を特徴付けるもので、例えば、米国のRTI=-0.39は非定型化がかなり進んでいることを表します。ドイツは他の中央ヨーロッパ諸国に近いRTI=-0.12で、非定型化の段階は中程度の国と特徴付けられます。しかし、日本はRTI=0.26で、いわゆる非定型化があまり進んでいない国のグループに位置付けられます。<sup>34</sup>

最も深刻な問題は、一連の再訓練および再学習を受けているにもかかわらず、技能の向上に消極的、あるいは技能向上できない低スキル労働者にどのように対応するかということです。日本でもドイツでも、社会的に許容される問題解決策を探っています。

#### ドイツのケーススタディ: 人の労働力の一部が代替される可能性

人の労働力の一部が代替される可能性があるという仮定は、欧州のマクロ経済的な労働市場の研究においても取り上げられており、新しい取り組みによる短期的な対策では効果的ではないと見込まれるため、雇用は減少するであろうと結論付けています。<sup>35</sup>

同様の結果がドイツの場合にも見受けられます。<sup>36</sup> 一般に代替リスクは、タスクの遂行に必要な知識レベルが高くなるほど低下します。<sup>37</sup> 図5は、どの要求レベルの人の仕事が技術システムによって置き換えられる可能性が高いかを示すものです。<sup>38</sup> 2013～2016年の間に、高要求レベルと低要求レベルの差がさらに広がりました。

31 | マッキンゼー・グローバル・インスティテュート (2017) VIページを参照

32 | De La Rica/Gortazar (2016)

33 | De La Rica/Gortazar (2016) 7ffページ

34 | De La Rica/Gortazar (2016) 10ページ

35 | Ittermann/Niehaus (2018) 43ページ、Bowles (2014) を参照

36 | Dengler/Matthes (2018) を参照

37 | Dengler/Matthes (2018) 1ページを参照

38 | 各要求レベルの定義は次のとおり。専門的熟練なし: 職業訓練を受けていない、または1年間の職業訓練を受けた助手、専門的熟練あり: 2年以上の職業訓練を受けた、あるいは専門学校または大学の職業資格を有する社会人、専門家: 修士または技術者教育あるいは高度な工業学校または学士号、熟練者: 4年制以上の大学の学位 (Dengler/Matthes (2018) 5ページ)

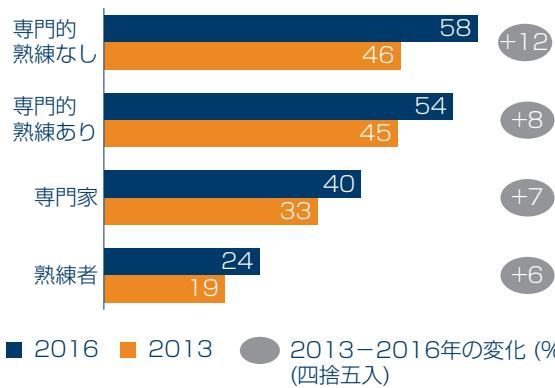
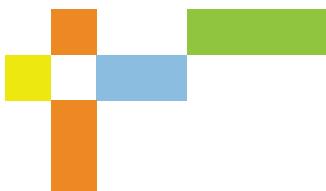


図5: 2013～2016年(ドイツ)における要求レベル別代替可能性(%) (出典: Dengler/Matthes 2018、1ページに基づき自作)

また、様々な研究により、高いレベルの創造性と連携を特徴とする、高スキルの非定型職が代替されるという潜在的なリスクも(少なくとも短期的な観点から)予測されています。これには産業分野の工場に関するものだけでなく、運営、開発、経営管理の職も含まれます。<sup>39</sup> ドイツには、雇用の60%近く(ほとんどが定型職)の減少可能性を予想するシナリオさえあります。<sup>40</sup> 職種別に代替可能性を推定したものの概要については、図6を参照してください。ここでも、Industrie 4.0における製造プロセスの仕事だけでなく、サービス分野にも影響があることが分かります。<sup>41</sup>

デジタルトランスフォーメーションにより、顧客ニーズの変化や新しい市場条件に対する企業の対応がより速く、より正確になります。国際競争の中で成功を収めるには、データに基づくビジネスモデルを素早く導入し、組織とその従業員の柔軟性、適応性、および変化しようとする意欲のレベルを高く保つことが極めて重要であると認識されています。<sup>42</sup> Industrie 4.0の導入を成功させるための主な要因は、従業員が新技術を受け入れること、および魅力的な働き方をデザインすることです。<sup>43</sup>

同時に、柔軟性が高くなれば、労働者がより高い水準のワークライフバランスを実現し、個人個人に合わせたスキル再教育策およびスキル向上策による長期の雇用可能性を確保する可能性が開かれることになります。このよ

うな場合、労働者がそのキャリア期間全体を通して学習(再訓練)する能力が、将来の雇用可能性を確保するための鍵となります(生涯学習)。企業は、対応する教育および訓練を提供することで責任をはたし、その従業員はそれらの施策から確かな恩恵を受けることになります。<sup>44</sup>

日本の医療分野におけるAIの適用に関する以下のケーススタディを見ると、置き換えられるかもしれないリスクがあるのは、最小限の能力しか必要としない定型の仕事やタスクだけではないことがよく分かります。

### 日本のケーススタディ: 医療へのAIの適用

日本医師会学術推進会議の第9次学術推進会議報告書に関する本ケーススタディは、病院へのAIの適用についてまとめたものです。<sup>45</sup> AIは世界中から治療結果を「学習」し、患者の治療について医師にアドバイスを行います。AIの役割はあくまで人への「アドバイス」であり、最終的な判断は人に委ねられます。

本報告書では、未曾有の高齢化を迎える日本は、AIを利活用した最先端医療を先駆けて実施することで、世界に貢献できる可能性があるとしています。また、医師とAIの協力により、誤診率が85%減少したとも報告しています。2016年に実施された転移性乳癌の診断コンテスト(Camelyon Grand Challenge)において、AIの誤診率は7.5%、病理医の誤診率は3.5%でしたが、さらにAIと病理医が協力することで0.5%まで低下しました。

また、同報告書では、「個別のAI技術の開発が進んだ場合であっても、AIの有効性・安全性の確保が十分でなければ、実用化されるべきではない。特に、医療は人の生命に関わる分野であり、有効性・安全性の確保は極めて重要である。いかにAI技術が進んでも、医師の存在は必要であり続ける。しかし、医師が何をするかは大きく変わるかもしれません。」<sup>46</sup> と述べています。同報告書において島根大学の津本教授は、AIが医療ビジネスを支援すると、ビジネスそのものが変化するとしています。

工場についても同じことがいえます。AIから「アドバイス」を受け、人が最終的な判断を行うというようなシナリオにより、AIと人の良好な関係を築くことができるはずです。

39 Hirsch-Kreinsen (2018) 17ページを参照

40 Ittermann/Niehaus (2018) 43ページ、Brzeski/Burk (2015) 3ページを参照

41 Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg (2017) を参照

42 Jacobsら (2017) 9ページ、Lanzaら (2018) を参照

43 Abelら (2019) を参照

44 Jacobsら (2017) 9ページを参照

45 JMA (2018) を参照

46 JMA (2018) 38ページを参照

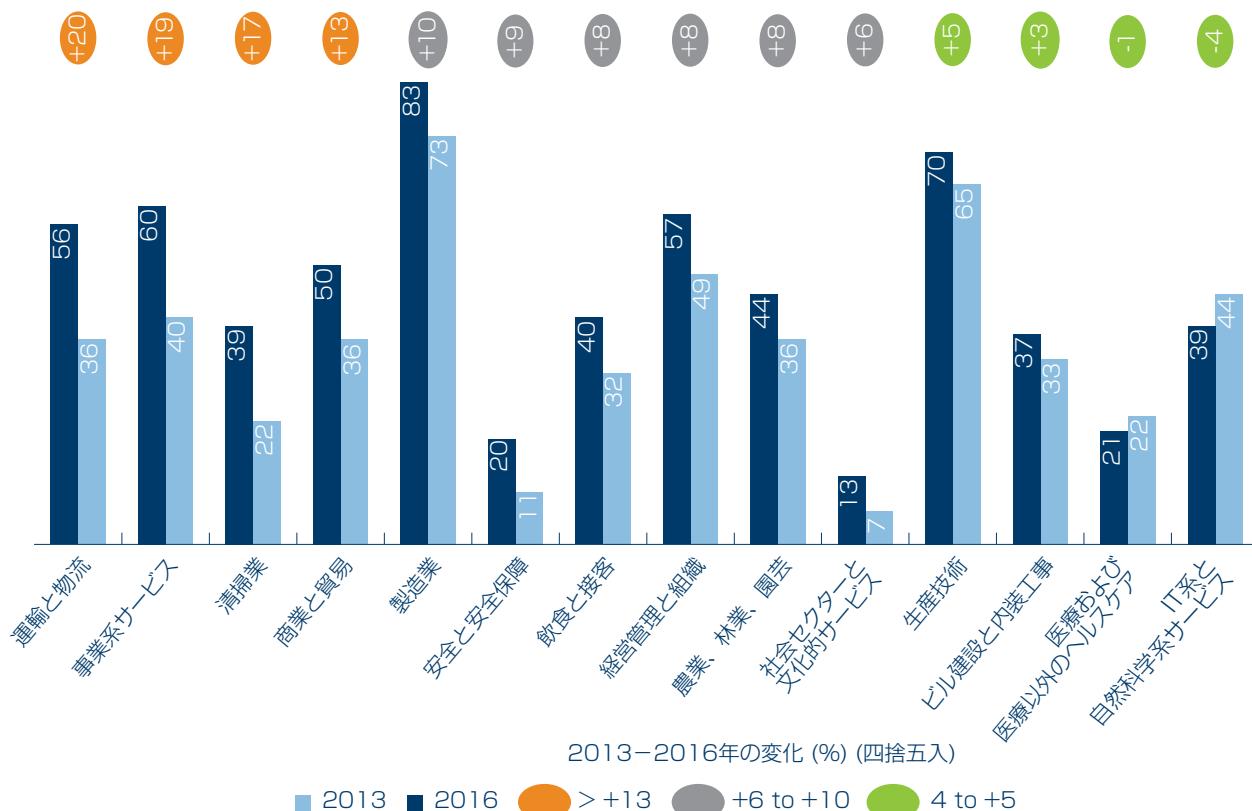


図6: 2013~2016年(ドイツ)における職業別代替可能性(%)  
(出典: Dengler/Matthes 2018、6ページに基づき自作)

上記のAIまたはロボットが、人の「より高いスキルを要する定型認識タスク」に取って代わると、社会の経済格差は拡大します。これにより、低スキル低賃金の労働市場で従業員の総数が増加し、賃金が伸び悩み、雇用が不安定化するという現象が起こります。この現象は、低スキルの仕事の総量は変わらないのに、中スキル従業員の仕事が失われ、彼らが低スキルの職に就くと起こります。低いスキルしか必要としない職業の従業員の数は増加を続け、しかもさらに加速しています。

### 日本のケーススタディ: 人の労働力の一部が代替される可能性

日本では、政府機関の内閣府が、2018年2月に実施された企業意識アンケート調査の結果を含めた「経済財政白書2018年版」を公表しました。同白書によると、モノのインターネット(IoT)やAIの導入により、仕事が増減すると予想されています(図7)。

AIによって置き換えられると企業が考える職業を図8に示します。日本企業の管理職は、IoTやAIが進歩すると、工場の熟練労働者、次いで事務員を削減する必要が出てくると予想しています。

日本のジニ係数によれば、<sup>47</sup> 先進国の中では経済格差の時間変化がこれまでのところ比較的小さいですが、ロボティックプロセスオートメーション(RPA)の完全普及の時代が到来すると、経済格差が一気に拡大する可能性があります。

### 日本のケーススタディ: オフィスワーカーに必要なスキルの変化

現在、日本企業の管理部門では定型認識タスクがRPAへと置き換えられているところであり、特に銀行および金融業界が最も大きな影響を受けています。3大メガバンクによる最近の報道発表によると、ICT投資は約3万人の人員削減につながると考えられています。定型認識タスクを行

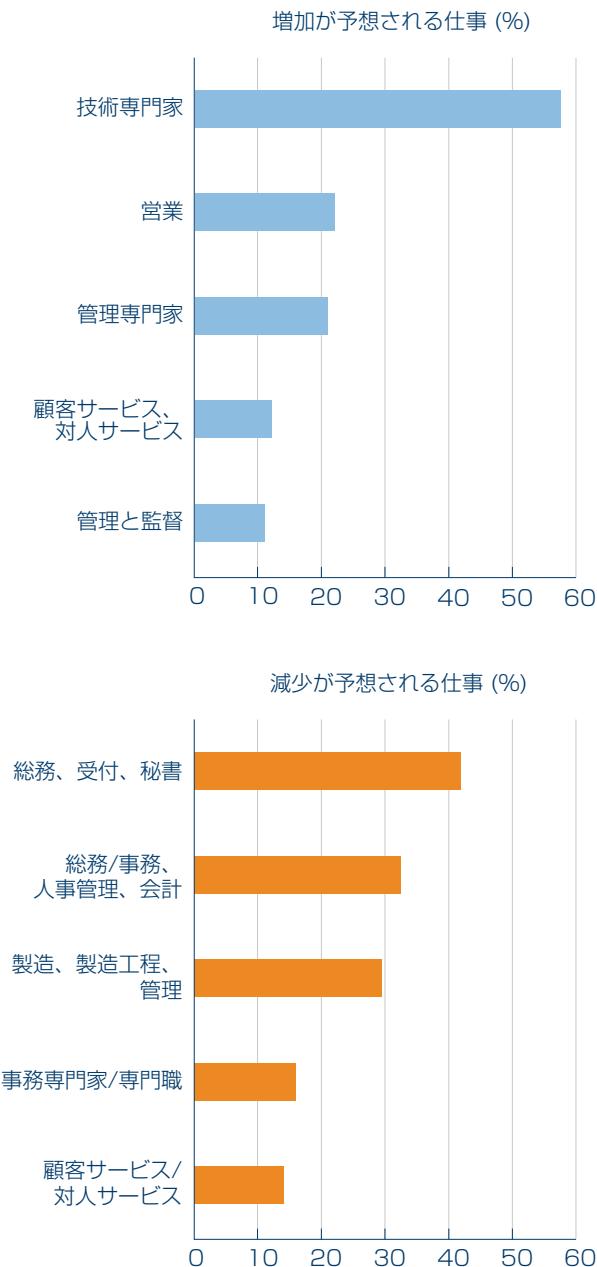


図7: AI・IoT導入の進展により増減が予想される仕事  
(出典: 内閣府2018、141ページに基づき自作)

\*管理専門家とは、調査分析や法律等の専門家を指します。技術専門家とは、研究開発、システム設計などの専門家を指します。管理専門家/専門職、顧客サービス/対人サービスに関して、企業は増加と減少の両方を予想しました。したがって、両方の図にそのカテゴリが存在します。

う人員は、主に、事務作業を担当する正規の従業員および非正規の従業員です。RPAが進展するにつれて、日本の企業は人員の配置転換によって正規の従業員を保護する一方、非正規の従業員を解雇すると考えられます。

2019年春の新卒採用に関する雇用統計を見ると、銀行業界では事務職の正規従業員の採用が大幅に減少したことが分かります。

銀行や金融業界のほか、地方自治体もRPAの実施に積極的です。地方自治体には、様式化された書式を扱う定型認識タスクが多数存在し、その多くはRPAに置き換えることができます。地方自治体は予算が不足しているため、人件費を削減する必要性に迫られています。

RPAは、現在、日本の製造会社へと拡張されています。例えば、日東電機は150名の従業員数を持つ、配電盤メーカーですが、それまでは設計技術者が行っていた設計図面の印刷工程にRPAを導入したところ、月あたり20時間の印刷時間が削減されました。<sup>48</sup> この例は、製造会社でさえも、定型的なオフィス業務のプロセスをRPAに置き換えることができる示しています。

このように、日本では銀行や金融業界のほか、地方自治体もRPAの導入を始めています。この状況はやがて製造業など他の産業にも拡大し、より高度な定型認識オフィス業務もまもなくコンピュータで置き換えられるでしょう。置き換えられた従業員は、生計を立てるためだけに熟練度の低い低賃金の仕事を求めて労働市場に参入すると予想されます。この低スキル低賃金の労働市場では、失業した日本人が仕事の機会を求めて在留外国人労働者と争うことになります。

#### ドイツのケーススタディ: 工場労働者に必要なスキルの変化

単調な日々のジョブスケジューリング業務のような特定の領域では、自律システムによって人のオペレータが不要になる可能性がありますが、その反面、複雑なタスクの量は増加しています。その結果、要件の変化に対応するために、様々な支援システムあるいはさらなる資格プログラムや概念などを介して、新たなスキルを獲得しようとする意欲を示す人が出てきました。生産プロセスに関与するすべての従業員は、ますます、分野を超えた作業形態に適応することが必要となります。それは、特にITとの連携が求められるという事実があるからです。また、需要が現場の監督者からIT専門家へと移ることは明らかです。<sup>49</sup>

48 | 岩本(2018)を参照

49 | BMWi/BMAS(2016) 14ページを参照

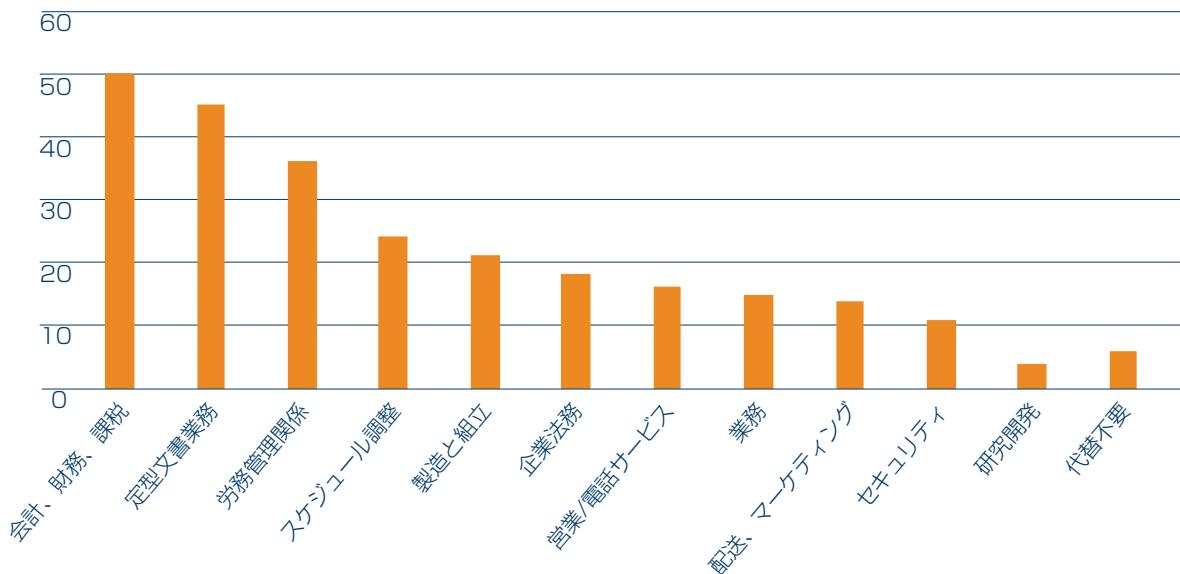


図8: AIに置き換えられると考えられる職業(%) (出典: 内閣府2018、142ページに基づき自作)

これまで、技術的な発展や進歩には、ほほどのような場合も新しいスキルが必要とされました。デジタルトランスフォーメーション、Industrie 4.0、および新たな形態のHMIが起こる状況の中、企業は、こうした要件が加速度的に変化しているという事態に直面しています。さらに、大半の活動がその影響を受けています。<sup>50</sup> イノベーションのサイクルが短く、また要件が変化することから、従業員の研修活動に調整を加える必要があります。したがって、個々の労働者または従業員が所有するスキルの包括的な分析が不可欠です。第2のステップでは、必要となるスキルが特定されなければなりません。適性および教育に関するすべての学習測定値は、個々の労働者のニーズと会社全体のニーズの両方を満たす、体系的かつ個別調整された専門的な育成手段を保証するよう修正されるべきです。<sup>51</sup> 適切な(再)資格付与および学習戦略を概念化する一方で、(特に若年者と高齢者の)潜在的な多様性が考慮されなければなりません。<sup>52</sup> 技術関連スキルの観点からは、IT、特にAIに関する能力の開発が必要です。<sup>53</sup> しかし、このような考え方は、ドイツ経済全体を見ても、また労働力全体を見ても到底認められているとはいえない。『Industrie 4.0』という言葉の普及により、デジタル化が大

きな注目を集めていますが、スキルや技能という点での育成促進に関して、企業はまだ行動の必要性を把握できていません。そのため、配置、雇用可能性、および「優れた仕事」への転換を成功させるには、迅速かつ適切に基礎が築かれた訓練および再訓練が重要です。<sup>54</sup>

労働力(および将来の労働力としての学生)により大きな能力を付与するために、様々な戦略および対策(セミナー、ワークショップ、ビジネスゲーム、または実践関連のケーススタディなど)を実施することができます。さらに、ここ数年の間に、学習型工場<sup>55</sup>と呼ばれる有望なアプローチの開発が進みました。特にヨーロッパでは、特有の形態、焦点、および目的を持つ様々な学習型工場が設立されています。しかし、どの学習型工場にも、理論と実践を集約した実践的な能力という共通の要素があります。<sup>56</sup> 学習型工場の主な利点は、実際の生産環境と比較して、生産休止期間のリスクなしに特定のトレーニングおよびデモンストレーション活動を実行することができることです。最近では、Industrie 4.0関連のトピックに注目する学習型工場や研究室がますます増えています。しかし、人と機械の両方の学習面を結び付けることのできるアプローチはほとんどありません。<sup>57</sup>

50 | Jacobsら(2018)27ページを参照

51 | Jacobsら(2017)9ページを参照

52 | Majkovicら(2018)を参照

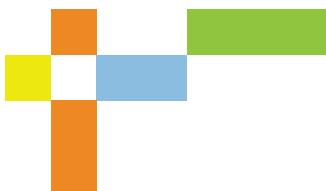
53 | PLS(2019)も参照

54 | Jacobsら(2018)27ページを参照

55 | Schallockら(2018)28ページを参照。「ドイツのケーススタディ: 学習型工場」(第5章)も参照

56 | Schallockら(2018)、Elbestawiら(2018)を参照

57 | Ansariら(2018a)、Schallockら(2018)を参照



## 日本のケーススタディ: 工場労働者に必要なスキルの変化

日本では、工場の熟練した現場労働者を大切にしてきた歴史があります。現在、工場に導入されている新しいデジタル技術は、人の作業をコンピュータで置き換えるものではなく、これらの熟練労働者を最大限に活用するためのものです。IoTの導入時、労働者はほとんど訓練を受けないまま新たなスキルを習得するため、日本では現場労働者の再教育や再訓練の問題は明白になっておらず、むしろ数年後に導入されるAIに注意が向いています。日本の工場に現在導入されている新しいデジタル技術は「見える化」のシステムで、依然として視覚化されたデータの表示を見ること、生産機械の故障の原因を調査すること、および対策を考案することが熟練労働者の役割となっています。しかし、前例に基づく操作（例えば、前例を学習すること）や表示されたデータから対策を判断することは、近い将来、AIが担当することになります。

日本では、工場に新技术を全面導入し、その生産実績を向上させている大手メーカーはまだ少数です。富士通株式会社の幹部によれば、<sup>58</sup> 新しいデジタル技術を活用した「人力強化」と、それによる従業員の負担軽減に重きが置かれています。さらに、同社のIoTシステムは、高齢化による現場労働者の不足とそのスキル低下を補うものであり、同時に多品種少量の製品増加に直面する労働者をサポートしています。三菱電機株式会社の幹部によると、1990年の投資は機械化、<sup>59</sup> 自動化、および工場での省力化への対策に集中していましたが、現在では、機械に適した仕事は機械に置き換え、人に適したその他の仕事を維持することに焦点が移っており、それが「人と機械の調和」を生むといわれています。株式会社デンソー（トヨタ自動車株式会社のサプライヤー）の幹部<sup>60</sup> は、「デンソーのIoTシステムのコンセプトは人間が中心であること」だ

と強調しています。同社は、熟練労働者を、競争力を創出するための会社の貴重な財産と位置付けています。デジタル技術による「見える化」だけでは熟練労働者が現場で十分な実力を発揮するには足りないという指摘には価値があります。また生産設備の不備な点を実際に評価し、熟練労働者がそれをどのように解決するかを形式化することが重要だと述べています。三菱電機株式会社のe-F@ctoryと株式会社日立製作所のLumada<sup>61</sup> は日本の代表的なIoTプラットフォームであり、同じ考え方で設計されています。また、日本製鉄株式会社の幹部<sup>62</sup> は、「熟練労働者の数が工場で急速に減少しつつあり、製造品質の確保が困難である領域があり、そこに対する投資を続ける」と強調しています。これらの例から分かるように、人の能力の維持と発展が、日本企業におけるデジタル投資の主な目標の1つとなっています。

RIETIでは、日本の産業におけるIoTの動向を把握するため、2017年8月～10月に日本企業10,075社を対象として調査を実施し、1,372社から回答を得ました（回収率13.62%）。<sup>63</sup> 新しいデジタル技術の導入により従業員数が「減少」したと回答した企業が34社、「増加」したと回答した企業が43社ありました。新しいデジタルシステムの操作には、データエンジニアなどの技術エキスパートが必要です。この調査では、技術エキスパートだけでなく、そのエキスパートを管理する管理者やエキスパートをサポートする事務員のニーズが高まっていることが明らかになりました。一方、銀行・金融産業等の管理部門では、定型認識タスクの電子化が進んでおり、事務作業員の削減が進められています。現在の増減を比較すると、減少より増加のほうが多くなっているため、日本企業はオフィスより工場のデジタル化に注力していると推測できます。いずれにせよ、今後の傾向を慎重に観察する必要があります。

58 岩本(2018)を参照

59 岩本(2018)を参照

60 岩本(2018)を参照

61 <https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/sols/> および <https://www.hitachi.co.jp/products/it/lumada/index.html>を参照

62 岩本(2018)を参照

63 岩本/Tanoue(2018)を参照

## ドイツのケーススタディ:これまでの議論に対する楽観的なシナリオ

ドイツには、代替可能性がそのまま発生可能性になることはないというシナリオがあります。また、現代の技術またはIndustrie 4.0ソリューションの現行の実装およびHMI分野の自動化プロジェクトから、今日の活動を合理的なコストで完全に自動化することはできないことが示されています。<sup>64</sup> 悲観的な見方をすると、人間労働力の代替可能性の影響と産業労働の地位低下が気になりますが、楽観的な見方をすれば、競争力、生活の質、ワークライフバランスなどの改善に注意が向くので、現代の技術およびIndustrie 4.0システムを実装した場合の可能性の側面または結果がよく見えてきます。<sup>65</sup>

したがって、この楽観的なシナリオのコンテキストでは、肯定的な労働市場効果が期待されます。これは、ボストンコンサルティンググループの研究などで予想されていることであり、ドイツでは今後10年内に6%の雇用増加が想定されています。このプラスの効果は、主に機械工学、自動車部門、および電気工学で高い技術を要する産業労働者の需要が高まるために発生します。<sup>66</sup> 産業界における比較的中程度の技術的变化、および新しい技術による作業および生産プロセスの継続的な強化は、このことが発生するための基礎とみなされることがよくあります。<sup>67</sup> さらに、熟練度の低い労働者の必要性は変わらず、ほぼすべての種類の定型作業にも、技術システムによる代替が困難な、経験ベースの知識のような非定型要素が必要となるとも述べられています。<sup>68</sup> さらに、技術的な可能性や影響を全体として過大評価していると、悲観的または楽観的なシナリオで説明したような、結果として誤解を招く結論に到達する可能性があるとも述べられています。<sup>69</sup>

楽観的なシナリオは、HMIでの新しい観点と、技術システムおよび人事システムの関連する制御や責任の配分も特徴としています。技術システムのオーケストレータとして

て、高スキルを有する人々および熟練した人々は産業生産システムの中心に置かれます。問題または故障が発生すると、彼らはそれまでの経験を用いて、問題または故障に介入することができます。全般的に、高スキルの労働者は作業全体および生産プロセスを完全統括することになっており、必要に応じて、技術支援システムから柔軟かつ適切なサポートが提供されます。<sup>70</sup>

新しい形態のコミュニケーションやコラボレーションにより人とテクノロジーのインタラクションが変化した結果、仕事を再構築する必要が出てきます。また、変化するCPSを制御するのに必要なスキルを従業員が保持するように、生涯学習を実践する必要があります。このような支援システムは、人の身体的および精神的なパフォーマンス能力を維持し、継続的に改善するための前提条件となっています<sup>71</sup>

今日では、一般に各人の生産性は、主に実年齢ではなく生物学的年齢に左右されることが認められています。特に、支援システムによって機械が人とインタラクションすることで、仕事の負担が軽減されます。<sup>72</sup> 職業設計に関わる活動と能力開発に関する取り組みと併せて、人と技術システムが対話的にコラボレーションすることで、企業が人口構造の変化をうまく活用するための新たな機会が発生します。熟練労働者が不足し、従業員の多様性（年齢、性別、文化的背景）が高まる中で、Industrie 4.0により、多様かつ柔軟なキャリアモデルとそれによる生産性の維持が可能になります。<sup>73</sup>

結論として、楽観的なシナリオは、活動と能力のアップグレードを提唱する予測にも支持されています。Ittermann/Niehaus (2018, 40ページ)によると、アップグレードとは、従業員のどのグループにも影響すると考えられる、活動および能力を強化するプロセスとして理解することができます。

64 | Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg (2017) を参照

65 | Ittermann/Niehaus (2018) 39fページを参照

66 | Ittermann/Niehaus (2018) 39fページ、BCG (2015) を参照

67 | Ittermann/Niehaus (2018) 40ページ、Voglerら (2016) を参照

68 | Pfeiffer/Suphan (2015) を参照、Ittermann/Niehaus (2018) 53ページを参照

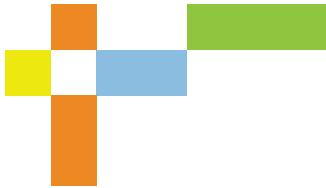
69 | Hirsch-Kreinsen (2018) 17ページを参照

70 | Ittermann/Niehaus (2018) 41fページを参照

71 | Becker (2015) 25ページを参照

72 | Becker (2015) 26ページを参照

73 | acatech (2016) 16ページを参照



## ドイツのケーススタディ: 生産環境における人、ロボット、仮想エージェントの混成チーム<sup>74</sup>

[下記リンクから入手可能なコンセプトビデオ: <https://robotik.dfki-bremen.de/de/mediathek/videoarchiv/hysociatea-ausgewaeh.html>]



ドイツでは、「サイバーフィジカル環境における長期的コラボレーション実現に向けた社会混成チーム (HySociaTea)」プロジェクトにより、どの代替リスクとも対照的に、HMIの最近の進展から混成チームの新しい形態の連携が実現されています。このプロジェクトでは、ドイツ連邦教育・研究省 (BMBF) の資金提供を受けたドイツ人工知能研究センター (DFKI GmbH) の専門家が、自立型ロボットや仮想的人々、SoftBotと人とのコラボレーションを研究、実現し、共通タスクの達成と、高い複雑度と柔軟性を特徴とする

今後の生産要件を満たすことを目指しています。

技術的な実現可能性だけでなく、(ロボットの) チーム適性およびインテリジェントなマルチエージェント動作の開発が研究されています。生産プロセスにおいて労働者を積極的に支援するので、直接指示を受けなくてもパートナーになると考えられています。これは、チームの組織と構成に関する(将来の) 判断に対して重要な意味を持ちます。

高いレベルの認知能力と柔軟性が特徴である人は混成チームの中心に位置付けられる一方、ロボットは肉体的にきついタスクを担当することになります。さらに、仮想エージェントのインターフェースにはデジタル的に利用可能な情報が与えられ、SoftBot<sup>75</sup> は他のチームメンバーが作成したデータを集約し、データベースを更新して、意味のある洗練されたデータを提供する役割を担います。

74 | 本ケーススタディの記述については、Schwartzら (2016) を参照。

75 | SoftBotは、仮想世界で自律的に行動可能な、純然たるソフトウェアベースのエージェントまたはコンピュータプログラムと定義できる。

## 4 多様性によって生じるギャップと、持続可能な革新を促進する施策

本章では、近い将来に予想される人と機械の多様性の拡大について論じ、製品とサービスのライフサイクル全体にわたる持続可能な革新を促進する施策を提言します。

### 4.1 多様性によって生じる新たなギャップ

産業革命以降、企業は生産の拡大と高速化を実現するために、生産の標準化に努めてきました。しかしながら、標準化はその限界に達しています。人口の減少により、製造分野では様々な能力を有する労働者が増え、労働者の多様化が進んだほか、機械に関しても、AIロボットと並行して古い工作機械が使用されています（図9）。

このような状況により、労働者と機械の実際の能力とタスクの間に不均衡が生じ、それがビジネスチャンスの喪失につながる可能性が出てきています。

日本では、人口減少に伴って労働力の多様化が進み、雇用市場に登場する女性、高齢者、外国人の数が増加しています（表3を参照）。同時に、製造では自動化が進展し、製造現場における仕事内容やHMIの様子が変化してきています。

さらに、多くの企業では、設備の使用年数が年々増加して

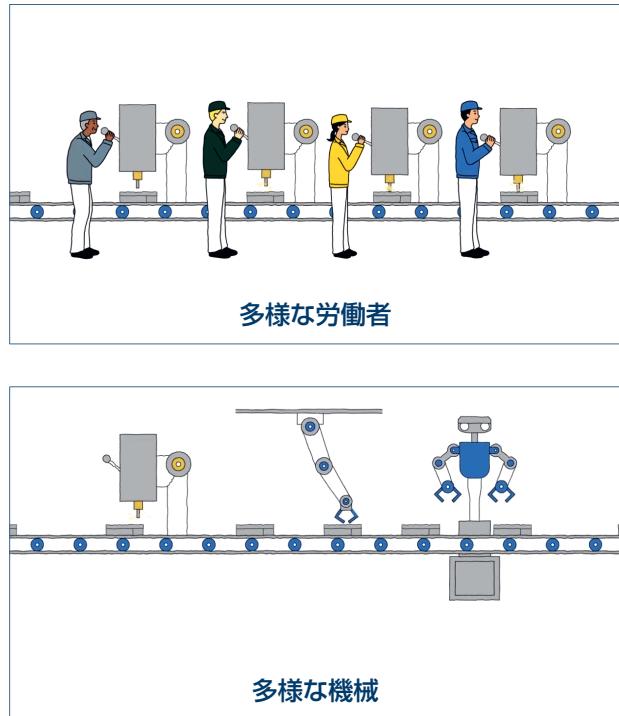


図9: 工場内の労働者・機械にもたらされる可能性のある変化（出典: 日立ブランドチャネル2019）

います。特に、表4に示すように、1990年以降、製造設備の平均寿命は16年を超えるまでに長くなりました。

ドイツもいくつかの社会的および技術的課題に直面しており、雇用が変化してきています（表5を参照）。さらに企業は、障害者、移民、高齢者など、これまで職場から敬遠されがちだった人たちを考慮する必要性が高まっています。

	推移
女性の雇用率 (年齢範囲: 25~44歳)	61 [%] (2000) 66 [%] (2010) +0.5 [%]/年 72.7 [%] (2016) +1.1 [%]/年
高齢者の雇用率 (年齢範囲: 65~69歳)	36.2 [%] (2000) 36.4 [%] (2010) +0.02 [%]/年 44.3 [%] (2017) +1.1 [%]/年
外国人数	486k (2008) 718k (2013) +50k/年 1279k (2017) +140k/年

表3:日本の雇用動向（出典: MIC 2019b, MHLW 2019に基づき自作）



	推移		
平均寿命	8[年] (1971)	10[年] (1991) +2[年]	16[年] (2016) +6[年]

表4: 日本の設備の平均寿命の推移  
(出典: 浜銀総合研究所2016に基づき自作)

また、科学、技術、工学、数学(STEM)の熟練者も、介護分野と同様に不足していますが、こうした傾向は、Industrie 4.0が導入される相当前から現在に至るまで、かなりの間続いてきました。仕事の内容と要件は変化する可能性がありますが、だからといって必要なスキルを持つ労働者が見つからなくなったり、現在の職業訓練が不十分な状

態になるということではありません。とはいっても、変化するスキル需要に労働者が追従していくことが重要です。ドイツの職業訓練制度は柔軟で適応性があるため、わずかな調整によって仕事内容へ対応できます。<sup>76</sup>

HMIにおいては、人や機械がどのように学習できるかだけでなく、互いに学習することでどのようにそのスキルを向上させるかにも焦点を当てる必要があります。現在、人と機械はまったく異なる学習概念に従っていますが、将来的には相互学習がうまく行えるように、学習概念の統合化が必要となります。

	推移		
女性の雇用率 (年齢範囲: 20~64歳)	60.8 [%] (2000)	69.7 [%] (2010) +0.89[%]/年	75.2 [%] (2017) +0.79[%]/年
高齢者の雇用率 (年齢範囲: 65~69歳)	3.9 [%] (2010)	5.9 [%] (2015) +0.40[%]/年	7 [%] (2017) +0.55[%]/年
ドイツ人以外の人数	2219k (2012)	2919k (2015) +233k/年	3470k (2017) +275k/年

表5: ドイツの雇用動向  
(出典: EU統計局2019、ドイツ連邦統計局2018b、連邦雇用庁2018に基づき自作)

能力	変動	状況	人	機械
			特徴	特徴
能力	質的変動	機械的に行う作業	<ul style="list-style-type: none"><li>個人間の相違性と多様性が高い</li><li>トレーニングと仕事満足度により改善可能</li><li>問題解決能力、技能、経験、および能力レベルにより個人間の相違性と多様性が高い</li><li>個人的、社会的、および組織的な利害に人の意思決定が左右される可能性がある</li><li>判断の複雑さおよび感度(リスク)に意思決定が左右される可能性がある</li><li>比較的高い(個々の能力、モチベーション、およびコミットメントにより異なる)</li><li>作業による疲労および仕事への不満足感が出る可能性が高い</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>非常に低い</li><li>維持管理が不適切だと時間の経過とともに劣化する可能性がある</li><li>低から高。データの品質(障害やノイズの影響を受ける)、アルゴリズムの精密性、人による準備の度合い、および問題領域の複雑さにより異なる</li><li>(比較的大きな)データセットを使用してシステムを訓練することで品質改善が可能</li><li>非常に低い(耐用期間と関連する劣化率、サービス品質により異なる)</li></ul>
		意思決定		
		パフォーマンス変動		
		タスクの遂行		

表6: 質およびパフォーマンスの違いに基づく人と機械の能力比較  
(出典: Ansariら、2018a、119ページに基づき自作)

Ansariら(2018a)は、相互学習を「人と機械のコラボレーション内の相互交換、相互依存、相互作用、または相互影響を伴う双方向のプロセスであり、その結果、新しい意味または概念が生まれ、既存の意味または概念が豊かになり、各学習者グループに関連する技能および能力が向上するもの」と定義しています。<sup>77</sup>

表6に示したとおり、これは異なるタスクを実行する際に、人と機械の能力の違いに影響を受ける可能性があります。

この学習プロセスは、独立的(グループ毎の個別トレーニング)にも依存的(共通タスクの実行による学習の共起)にもすることができます。現在のところ、個別のトレーニングが偏重される傾向が強く、ヒューマンマシンラーニングの共起に関する研究は十分に進んでいません。

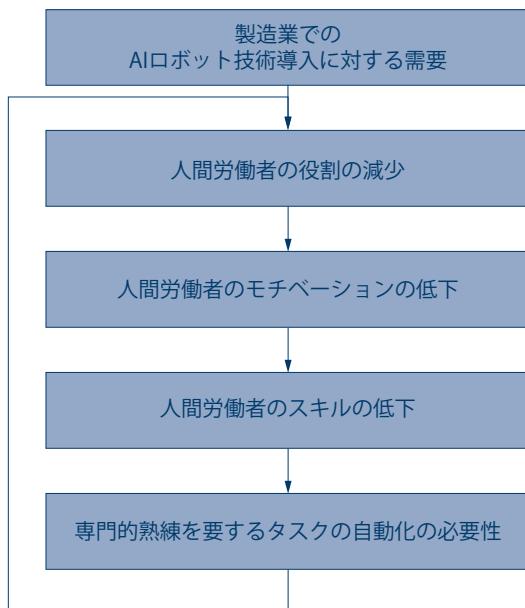
## 日本のケーススタディ: 製造における学習性不使用現象

今後は、高品質で低成本な製品を高いパフォーマンスで生産するために、製造システムへのAIロボット技術の導入が一層進みますが、AIロボット技術は長い目で見て人にどの程度の影響を与えるでしょうか。AIロボット技術を安易に導入すると、人の習熟度が低下するおそれがあります。これは、製造プロセスの中でスキルを使用する必要のない状況に人が慣れてしまうために発生します。私たちは、AIロボット技術による悪循環と、それに付随する人のスキル低下(図10の左側のサイクル)が発生する可能性を考慮しなければなりません。

脳科学の分野では、実質的な神経学的損傷は、通常、悪循環の生成につながり、その結果、影響を受けた末端の「学習性不使用」が起こります。<sup>78</sup> 自動化と人との関係についても、同様の議論が行われています。<sup>79</sup>

脳科学およびリハビリテーション医学における学習性不使用現象を克服するための方法論に関しては、拘束誘導

### 悪循環



### 好循環

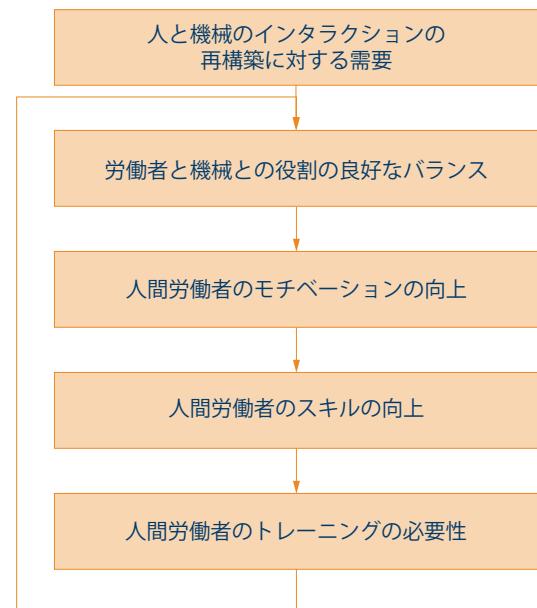
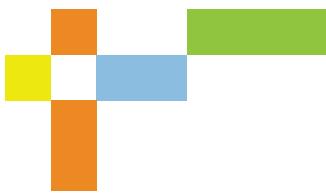


図10: 人間・AIロボットシステムにおける悪循環と好循環(出典: 東京大学に基づき自作)

77 | Ansariら(2018a) 119ページ

78 | Taubら(2002)を参照

79 | Carr(2014)などを参照



運動療法(CI治療)が提案されています。これは、トレーニング手順に従い、損傷した上肢を数週間連続して使用するための系統的な治療を患者に施すものです。

また、損傷していない上肢の使用を制限するため、結果として被験者は損傷した上肢を使用しなければならなくなっています。製造現場でも同様の取り組みが可能ですが、将来的な製造現場で人とAIロボットが連携するには、2つの要件を満たす必要があります。

1. 人とAIロボットの連携による効率的なタスクの実施。
2. トレーニングによる労働者のスキル向上。可能性の1つとして、両者を解決できるHMIを体系的に調和させるために(図10の右側のサイクル)、管理システム(AIベースを想定)の構築が挙げられます。

## 4.2 現実世界とサイバー世界の管理

とりわけ研究開発(R&D)に関して、製造会社は従来、特に機械工学や電子工学といった伝統的なエンジニアリングの役割が主流でした。実際に、19世紀以降、機械工学および電子工学は製造における革新活動の中核であり、今日私たちが認識しているように、産業に大きな影響を与えてきました。

しかし、ここ数十年は、ソフトウェアが機械および電気・電子製品の革新のための重要な役割となってきています。ソフトウェア革新は、主に、物理的には単一の機械に限定されるよう組込みシステムで起きています。

一方、ソフトウェア産業は、ここ数十年にわたって絶えず加速しながら著しく成長し、日常生活およびビジネスの様々な場面においてますます存在感を増しています。

ソフトウェア自体は抽象的実体であり、その内部動作を理解するには、機械工学における問題よりも抽象度を高くする必要があります。複雑化と新しいソフトウェアの階層化により、独自の方法およびツール、ならびに独自のプロセスおよび組織的手順を有する、ソフトウェアエンジニアリングの分野へと移行しました。

Industrie 4.0の出現は、2つの世界が接続され、融合されることを告げるものです。このことにより、従来のエンジニアリングノウハウに加えて、サイバー世界のやり方や手順

も同様に活用されるこの世界で、まったく新しい革新領域が生まれることになります。

現在、製造会社はウォーターフォール手法および詳細なエンジニアリング仕様とは異なる、アジャイル開発、スクラム開発、およびペアプログラミングなどの方法に取り組んでいます。それに加えて、ソフトウェア企業では10名ほどのチームやフラット階層のチームのような組織構造が一般的であり、製造企業はアジャイル化を進める(潜在的なソフトウェア開発能力を認識する)ために、これらの組織構造を採用する必要があります。従来のアプローチと、製造企業の長期にわたる繁栄の歴史を考えると、この調整の実施が大きな課題となります。しかし、こうした変化が生じることは明白であるため、企業は、従業員、組織構造、および管理手順を用いてそれらの変化に積極的に対処しなければなりません。

ソフトウェア開発自体は、コンピュータおよびサーバの仮想世界に限定されたデスクトップベースの活動ですが、これにより、これまで労働力から大幅に除外されてきた人々がキャリアを積む機会が開かれます。次の章では、その一例を示します。さらにいえば、機械に組み込まれるソフトウェアの開発には、ソフトウェアのスキルに加えて、ソフトウェアの組み込み先となる生産機械への深い造詣が求められます。そのため、機械と生産技術におけるその知見と長い経験から、ソフトウェア開発のスキルも獲得した熟練労働者は特に貴重です。

ここまでをまとめると、現実世界とサイバー世界は、Industrie 4.0で新たな革新的な領域へと統合されます。そこでは、新たなツール群、方法、原理が成功への基盤を形成しますが、それらの新しいツール群を既存のプロセス、技術的経路、および貴重な製造スキルや経験と組み合わせる必要があります。製造企業は積極的にこれらの課題に関する情報を収集し、新技術を適用するとともに、その企業独自の製造に関する専門的知識を活用しなければなりません。

## 4.3 多様性による持続可能な革新

ドイツと日本はいずれも熟練労働者の不足と労働人口の高齢化に直面しており、年齢、性別、スキルに関して産業の労働力構成が多様化してきています。包括的な労働環境は、逼迫した労働市場において最も有能な従業員を引きつけることから、競争力のある差別化要因として重要性がより一層高まり、ビジネス成功の推進力となります。

包括性は、従業員のエンゲージメントおよび創造性を高めることができます。さらに、従業員構造が顧客の社会的階層を反映する場合、そのニーズはよりよく理解され、満たされます。そして結局、異なる視点を持つ同僚たちとのコラボレーションにより、革新を促進するアイデアがより大きく融合します。

### ドイツのケーススタディ: SAP - Autism at Work

[下記リンクから入手可能なコンセプト  
ビデオ: <https://www.sap.com/corporate/en/company/diversity/differently-abled.html?source=social-atw-mailto&sharedId=9e6909ee-6a7c-0010-82c7-eda71af511fa>]



このケーススタディは、ヨーロッパ最大のソフトウェア会社であるSAPにおいて、多様性と社会的包摶を尊ぶ企業文化に基づき、自閉症の人々を労働力に組み込むための基盤をどのように整備したかを説明するものです。SAPのプログラムは、他の企業にとって、人材プールを拡張する方法の手本になっています。また、SAP (Industrie 4.0への移行に賛成する主要パートナー) などのソフトウェア会社で維持されている従業員構造を、製造企業が取り入れられるようになります。

ソフトウェア業界は、急速な変化にさらされる分野であり、当初から急速な成長率を特徴とし、人材獲得が成功のための重要な要素となっています。この「人材獲得戦争」において、SAPは初期のICT分野で労働力が不足するという可能性に直面していました。不安定な市場傾向に対処し、有能な従業員を獲得するという2つの必要性から、同社は多様な労働力を確保するための包括的で理解しやすい労働環境を整備することに尽力しました。従業員の多様性による幅広い視点の獲得は、革新の重要な源であり、複雑な技術的課題に対処するために必要であることは疑問の余地がないと考えられています。さらに、SAPソフトウェアは世界中の様々な社会で使用されているため、異なる能力やニーズを有する顧客の多様性を労働力に反映せることの利点が、採用戦略を進めるためのビジネス上のさらなる推進力となりました。

このオープンな考え方が重要な前提条件としてあったからこそ、自閉症の人々を同社の労働力に組み込むというAutism at Work制度を開始できたのです。これにより、SAPはこれまで労働市場にほとんど対処されていなかつ

た人材層に接触することができました。

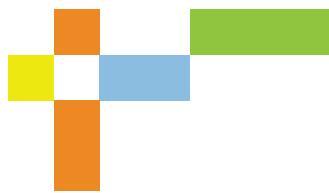
Autism at Work制度は2013年に公式スタートしました。2019年第2四半期の時点で、SAPは13カ国から155名以上の自閉症従業員を採用し、26の職務を担当させており、その定着率は90%を超えていました。この制度はSAPインドのローカルプロジェクトを通じて開始されたもので、そのときに初めて自閉症を持つ層の人々に関する経験が得られました。彼らのパフォーマンスが優れていたことから、自閉症の人々がソフトウェア開発に大きく貢献できると同社は確信しました。

自閉症とは、社会的、感情的、およびコミュニケーションのスキルに関して症状が発生する可能性のある神経障害で、世界人口のおよそ1%が罹患しており、その90%が雇用されていないか、または不完全雇用であると推定されます。自閉症の人々は定型性および同一性に注意が向くことが多く、慣れない環境や定型性の変化に順応するのが困難です。しかしこれは、自閉症スペクトラム障害の従業員に対するSAP独自の経験に示されるように、状況の一面に過ぎません。自閉症の従業員のニーズに応える環境を構築することで、とりわけ、ほかにはない以下のような強みとスキルが得られます。

- 詳細およびパターン認識に細心の注意を払うこと
- 長時間にわたって1つのタスクに持続的に集中する能力
- 分析および論理的思考
- 不規則性を検出するスキル

自閉症の従業員に受け入れられていると感じてもらうためには、安定したオープンな仕事環境を整備することが重要な前提条件となります。これは、とりわけ、本制度に対応する各職場内外の人々が自閉症の人を採用し、その人に出社してもらい、支援と指導を行うことで実現します。これには投資が必要ですが、自閉症を持つ社員のほとんどは新しい職場ですぐに自立し、投資分に対応する収益を生み出します。社会保障費を削減し、社会的なつながりを強化することになるため、会社だけではなく社会全体にもメリットがあります。結局、持続可能かつスケーラブルな方法でプログラムを実行するには、安定した構造が重要です。

しかし、必要な調整はすでに採用段階で始まっています。主な採用プロセスでは、コミュニケーション能力に優れた、チームプレイヤーである人々が主に求められます。自閉症の候補者は通常、チームプレイヤーという条件を満



### SAPの「Autism at Work」支援サークル

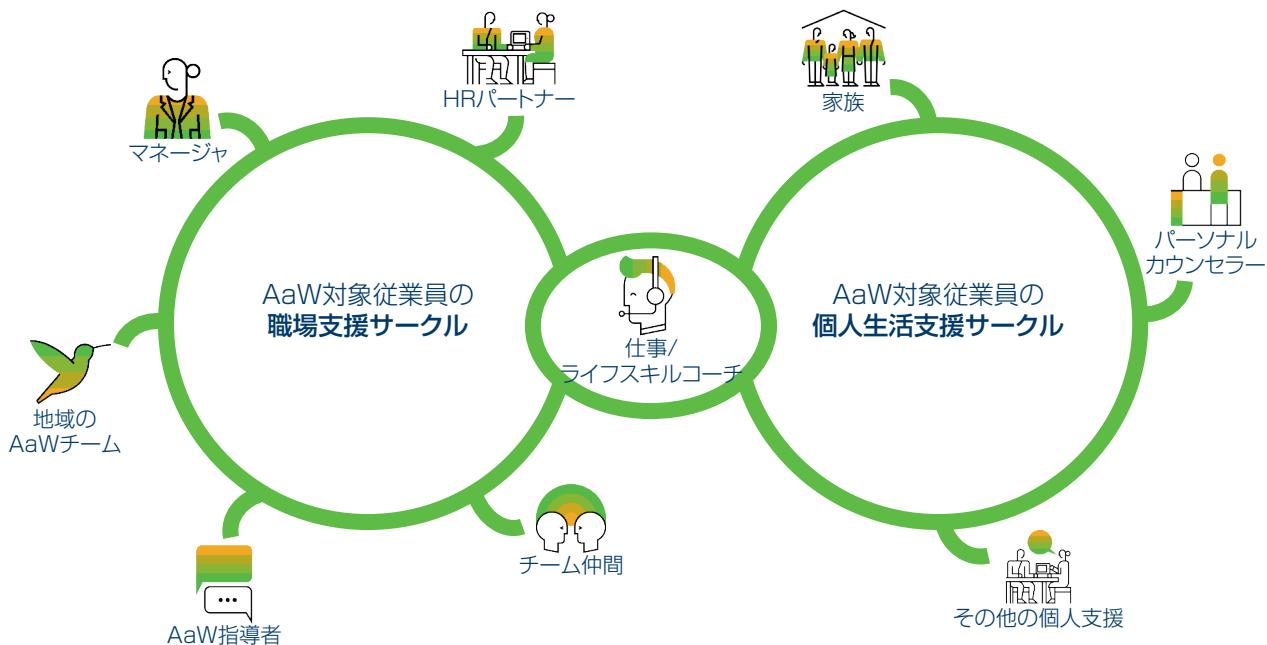


図11: SAPのAutism at Work制度(出典: SAP)

たしません。そのため、SAPでは、自閉症を持つ求職者の熱意に注目しながら、面接手順の中に実践的なタスクを組み込んだ採用活動を行っています。

この制度を成功させるため、SAPはNGO、研究機関、政府機関を含むパートナーのネットワークを構築し、自閉症を持つ求職者に連絡を取れるよう支援を受けています。これらの利害関係者は、可能性のある候補者の特定を支援するとともに、自閉症を持つ従業員が会社にうまく受け込むためのサポートに関して、SAPにアドバイスを行っています。SAPでは、今後の従業員の流れを踏まえ、指定の高校や大学との連携も開始し、自閉症を持つ学生に同社の職業機会を与えて紹介しています。自閉症を持つ人々の多くは、従来の採用制度から除外されることに慣れているため、彼らのスキルが求められているという事実を彼ら自身に認識してもらうことが不可欠です。

— — —

様々な人と機械の間のインタラクションを「調和」させることは、単に足りない機能を補完したり、同調したりすることではありません。お互いの個性を尊重し、互いに助け合い成長することで興味深い結果につながる可能性もあります。

持続可能な経済成長を達成するには、人が仕事に満足できると同時に、機械と力を合わせて成長できる世界を実現する必要があります。これに対応するHMIの変化について、図12を用いて説明します。

過去のモデル(図12の左側)は、基本的に人に適用される従来の技術モデルで、熟練者が若手を教育するものです。適切な熟練者がいなければならぬため、潜在的にスケラビリティが問題となります。

#### 日本のケーススタディ: 技術の伝承

日本では、漆器などの伝統的な手工業は、まだ主に徒弟制度を利用して習得が行われていますが、熱交換器(エアコンの主要部品)に必要なろう付け作業などの製造プロセスにも、同じことがいえます。薄手の銅管と銅管をろう付けする作業は非常に難易度が高く、熟練者が初心者を効果的に訓練させる方法が大きな課題となっています。<sup>80</sup>

現在のインタラクションモデル(図12の中央)は、機械が人を支援するモデルであり、人は以前と同じような訓練を積む必要がありません。人のスキルギャップを補完するために、機械が関連する指示を出し、自動的に支援を行ってくれます。しかし、コンピュータが支援しすぎると学習性不使用現象が増加し、人が重要なスキルを失うリスク

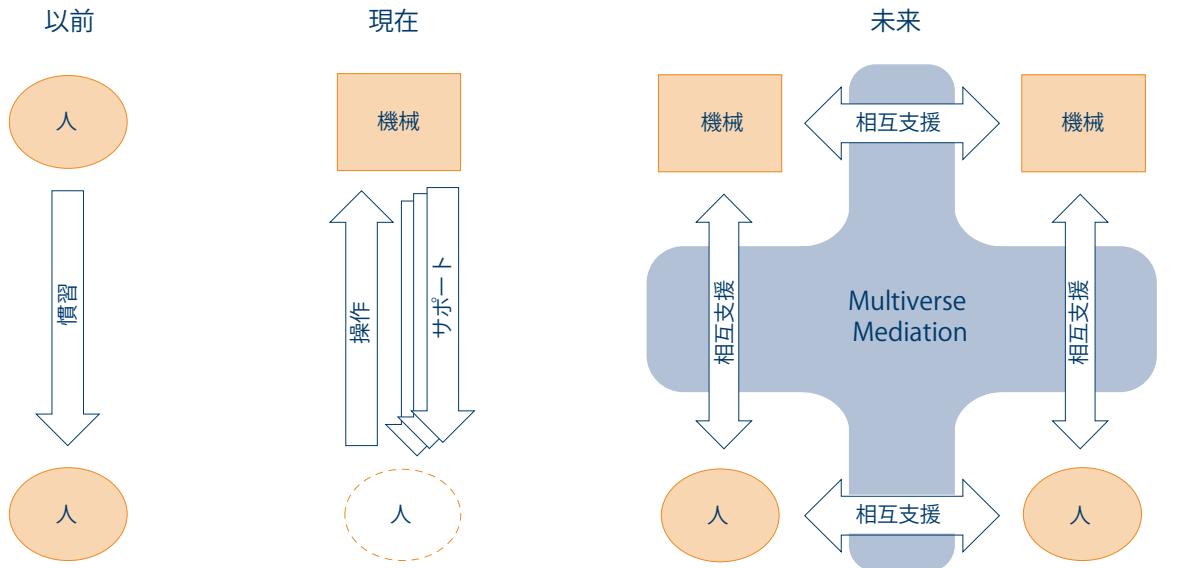


図12: 相互作用モデルの変化(出典: 株式会社日立製作所に基づき自作)

クが発生することになります。

### 日本のケーススタディ: 過度の支援の問題

日本では、穿孔や旋削などの機械加工プロセスの多くが数値制御(NC)で操作されていますが、熟練オペレータや導入済みのAIが設定した切削工具の送り量や切削量などのパラメータの設定理由を、オペレータがほとんど理解できない場合があります。<sup>81</sup> 産業用ロボットは、家電製品の組み立て、自動車の車体のスポット溶接のような様々なケースで利用されていますが、ロボットのプログラムを変更すると、熟練オペレータやAIが設定したプログラムパラメータの意味をオペレータが理解できないことから、プロセスチェーン内のボトルネックにつながることがあります。<sup>82</sup>

――――――

したがって、HMIを体系的に調和させるための将来のモデルでは、人と機械の間にMultiverse Mediationという多元的な調停プロセスを持つことになります(図12の右側)。デジタル化された知識に基づいて、人一人、人一機械、および機械一機械の間の相互支援としてのインタラクションが調整されます。その結果、人と機械の両方で持続可能な改善が行われます。

この将来のモデルでは、人一人、人一機械、および機械

一機械の間のインタラクションが観察されるだけでなく、その観察された情報が蓄積されます。熟練労働者の場合、調停プロセスで相互支援の調整につながる改善の可能性が特定されます。

この将来のモデルに基づいて(1)人一人および(2)人一機械のインタラクションに注目し、企業は以下のように戦略を取り入れる必要があります。

1. 従来の労働力構成を再検討し、現在の従業員ベースの主流とは異なる特性を持つ有能な従業員を幅広く含む包括的な環境を作り出す。
2. 同じ工場内の人および機械のスキルと能力を体系的に評価し、その後、タスクプランを調和させ、機械に対応する人を最適に支援できるようにプログラムを調整できるようにする。

最初の段階では、企業の中に調停プロセスが生まれ、データの共有が行われなければなりません。その次の段階として、この手順を社会全体へと移します。人の幸福に目を向けた持続可能な社会に向けては、知的財産が侵害されない限りにおいて、人と機械のインタラクションから得られた知識を社会に公開できます。

81 | 野中(2019)を参照  
82 | 日立ブランドチャネル(2019)を参照



次のケーススタディは、マルチバース・バリアフリーと呼ばれる、日立の体系的なHMI調和活動について記述したもので<sup>83</sup>す。

### 日本のケーススタディ: 日立 - マルチバース・バリアフリー

[下記リンクから入手可能なコンセプトビデオ: <https://www.youtube.com/watch?v=5ZC0j94dTal>]



日本では、出生率の低下や高齢化が主な原因で、労働者の多様化が進行しています。また、機械の多様化も進行していますが、これはつまり、高度経済成長期に導入されて

老朽化の進んだ機械と、最近導入された最新型ロボットがともに工場で使用されているということです。日立では、人とロボットの間の作業の割り当てを最適化し、人とロボットが連携する、<sup>84</sup>柔軟性の高い生産システムの開発を進めています。

従来の作業現場では、作業者は熟練者から仕事を教わり、その熟練者を手本として作業を行います。しかし、作業者の多様化が進むと、その能力も同様に多様化します。したがって、例え同じ作業と指示を与えられたとしても、作業者の職務遂行能力には大きなばらつきがあります。その結果、指示どおりに作業を進められず、ストレス、作業負荷の上昇、生産性の低下、成長機会の損失といった問題が発生するおそれがあります。

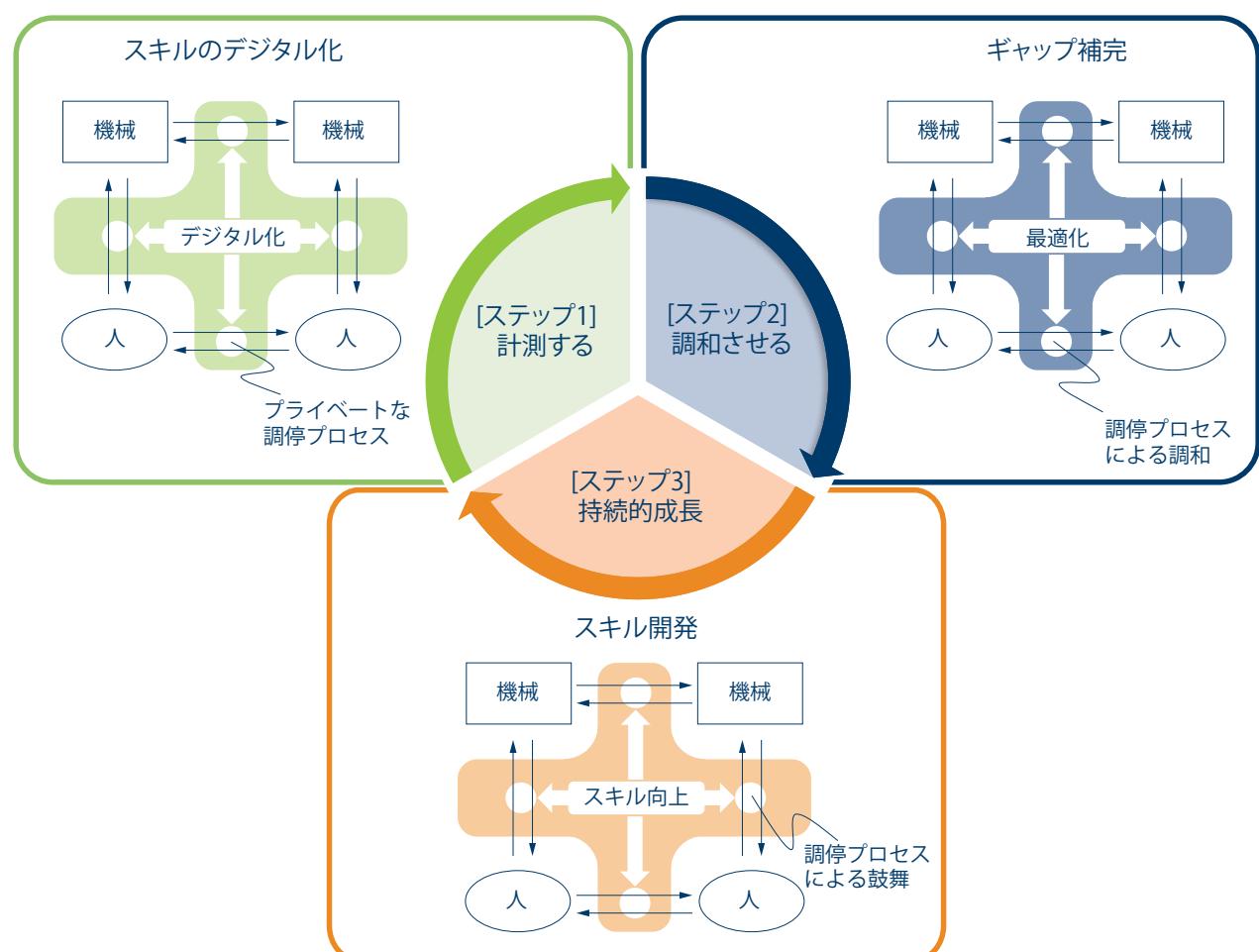


図13: 日立のマルチバース・バリアフリーの主要3段階 (出典: 株式会社日立製作所に基づき自作)

83 | 日立ブランドチャネル(2019)を参照  
84 | 日立R&Dグループ(2017)

機械の多様化が進行する工場には、人の仕事が機械で置き換えられるというリスクが潜んでおり、結果として作業者のやる気が低下する可能性があります。さらに、製造における学習性不使用現象のケーススタディで説明したように、機械が作業者をサポートしすぎると、作業者の能力が停滞し成長の機会が妨げられるという問題もあります。

こうした問題を受け、日立からマルチバース・バリアフリーの概念が提案されました。これは、お互いを過剰にサポートしあうのではなく、持続可能な成長を推進するための仕組みであり、多様な人と機械のそれぞれの特徴を有効に活用するものです。この概念では、人一人、人一機械、および機械一機械のインタラクションのために、図13に示す3段階で調停プロセス(図12で説明したもの)が作成されます。

#### ■ 第1ステップ: 測る

人と機械のインタラクションの特性がデジタル化され、インタラクションごとに個別の調停プロセスが発生します。日立では、HMIが4M(Man,Machine,Material, and Method)という実体から構成されており、4M動作のクロス分析により、HMIの重要なヒントを抽出できると考えています。さらに、オーネックマ株式会社と協力し、生産効率最大化のための工作機械製造の重要なヒントを得ています。<sup>85</sup>

#### ■ 第2ステップ: 合わせる

この段階では、パフォーマンスのボトルネックを補うために、適切なインタラクションの方針を策定します。例えば、あるタスクを達成するための人と機械の編成プランの最適化、機械から人への適切な支援メニューの提示、人から機械への適切な作業内容の移行などを推進します。また、機械の状態などの要素を考慮に入れる必要があります。日立はこの方針に基づいて、生産ライン構成と製品設計の両方を最適化する

技術を開発しました。<sup>86</sup> 部品の質量や精度などの製品設計仕様に対して人やロボットなどの生産リソースが割り当てられるため、既存の人やロボットの作業能力によって製品設計仕様が制限されることから、製品設計仕様と生産リソースの作業能力を調和させる技術を確立し、自動車デバイスなどの製造において検討しました。

#### ■ 第3ステップ: 高める

人と機械の成長を実現するために、それぞれの人や機械に相互支援を提供する必要があります。日立では、この方針に基づいて、ダイキン工業株式会社との協力のもと、ろう付け作業におけるHMIの持続的な成長に向けた取り組みを行っています。<sup>87</sup> その中で、エアコンの熱交換器にある銅管用の既存のろう付け装置に、工程を可視化する新たな機能を追加し、その機能に作業者のろう付け技能向上プログラムを設けました。

まとめると、日立のマルチバース・バリアフリーの基本的価値は以下のようなものとなります。

1. 人間と機械の創造性を継続的に発展させる。
2. 時代遅れとなった操作をできる限り自動制御で置き換える、退屈な作業から人を解放する。
3. 継続的な創造性の発揮により、持続可能な社会でも機械の維持と発展に貢献する。

日立ソーシャル・イノベーション・フォーラム2018<sup>88</sup>にて、日立はこのマルチバース・バリアフリーのコンセプトを発表し、YouTube<sup>89</sup>でコンセプトビデオをリリースしました。日立は、多様な人と機械がともに成長する社会の創造に貢献しています。

85 | 野中(2019)を参照

86 | Tsutsumiら(2018)を参照

87 | 日立ブランドチャネル(2018)を参照

88 | 日立ソーシャル・イノベーション・フォーラムの詳細は、<http://hsiftokyo.hitachi/en/>を参照

89 | 日立ブランドチャネル(2019)を参照



## 5 人と機械の協調の新たなパラダイムにおける挑戦

デジタルトランスフォーメーションの産業や社会に与える影響は今や明らかです。予想される人口の増加と豊かさの拡大にともない製品やサービスの世界市場全体の規模拡大が予想されます。顧客の需要に合わせカスタマイズされた製品の需要は拡大するでしょう。しかしその一方で製造における労働力は世界的に減少することが予想されます。

このような社会情勢に対処するため、産業全般は多様化、複雑化を深める方向に変化しています。

例えばIndustrie 4.0は製造工程の完全な自動化をビジョンに掲げるのではなく、たとえ小さなバッチサイズであっても製造業における次世代のHMIを必須として、工程を最適化・個別化することに立脚しています。

工業生産におけるこの新しいパラダイムは、顧客の要求に基づき即座にサイバーフィジカルシステム(CPS)を変化させて適合させることを可能にします。顧客に応えるこ

とが、より生産的で企業が新しい競争上の優位性を獲得する機会を提供する際の人と機械の協調において最も顕著にあらわれます。ところで、人と機械はいかにしてインタラクションし、人の考えはどのような役割を果たすのでしょうか。

本章ではスマートマニュファクチャリングの文脈における人と機械の協調、その将来の製造業にあたえるインパクトに注目します。有望な解決策があれば、新しいインタラクションのスタイルが生まれる可能性があります。加えて人と自己学習する機械の統合には柔軟で適応性のある運用やマネジメントが要求されます。これらの結果により、より望ましい、やりがいのある仕事が創造されるでしょう。

### 5.1 現状

これまでにセンサ技術を備えた機械や高度知能化や自己学習を行うAIなど多くの取り組みが行われてきました。現状について図14に示します。認知的作業においては、先進的な機械やロボットは適用ルーチンを有し有効率的に対応できるのに対し、従来の機械では多くの手間が必要です。加えて、労働者は機械の高度化についていく必要があり、管理者は変化の早い生産プロセスに備えなければなりません。

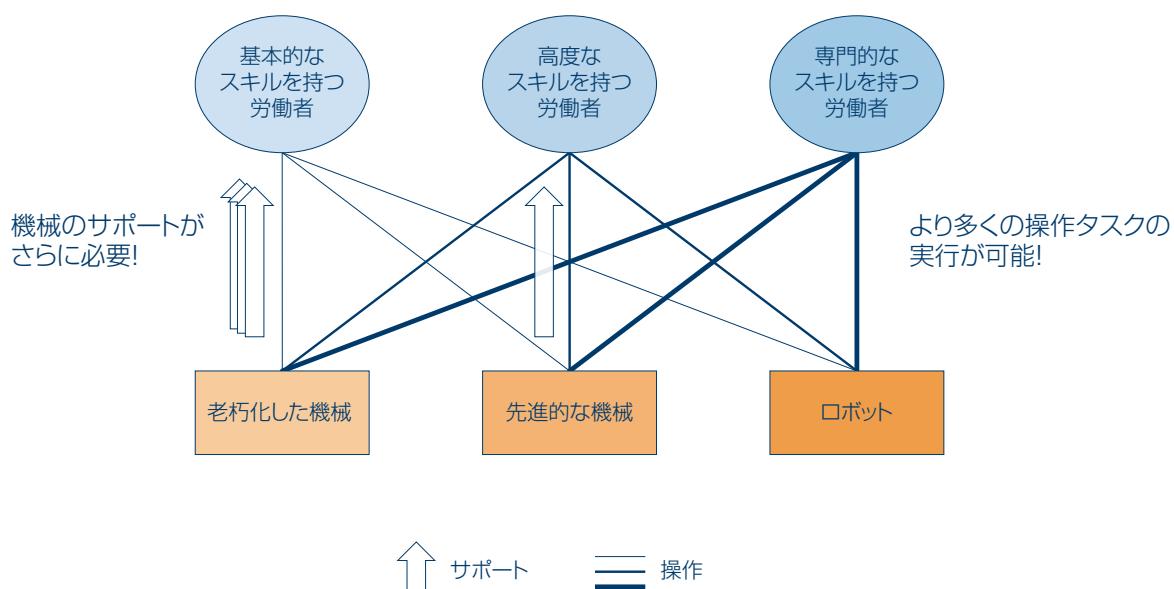


図14: 製造の現状(出典: 三菱電機株式会社に基づき自作)

## 5.2 今後の展開

これまでに述べた課題に適切に対処するには次に示すようなアプローチが推奨されます。

- 認識技術およびHMIの精度向上、適用拡大を行う。
- 生産現場レベルにおいて、知識共有管理により人の知恵を集めることを可能にする。
- プロセス管理においてCPSや機械学習に人の知恵を統合する。
- 協働ロボティクスおよび高スキル労働者のための活動認識方法について研究を進める（「ドイツと日本の

コラボレーションにおけるケーススタディ: DFKIおよび日立 - 労働者活動の認知・評価・移転」を参照）。

- 労働者の能力を引き出すような指導能力の向上、および管理者による企業の可視性の拡大。

## 5.3 人と機械協調における新しいパラダイム

このパラダイム（図15）は、図13を一般化して解釈したものです。

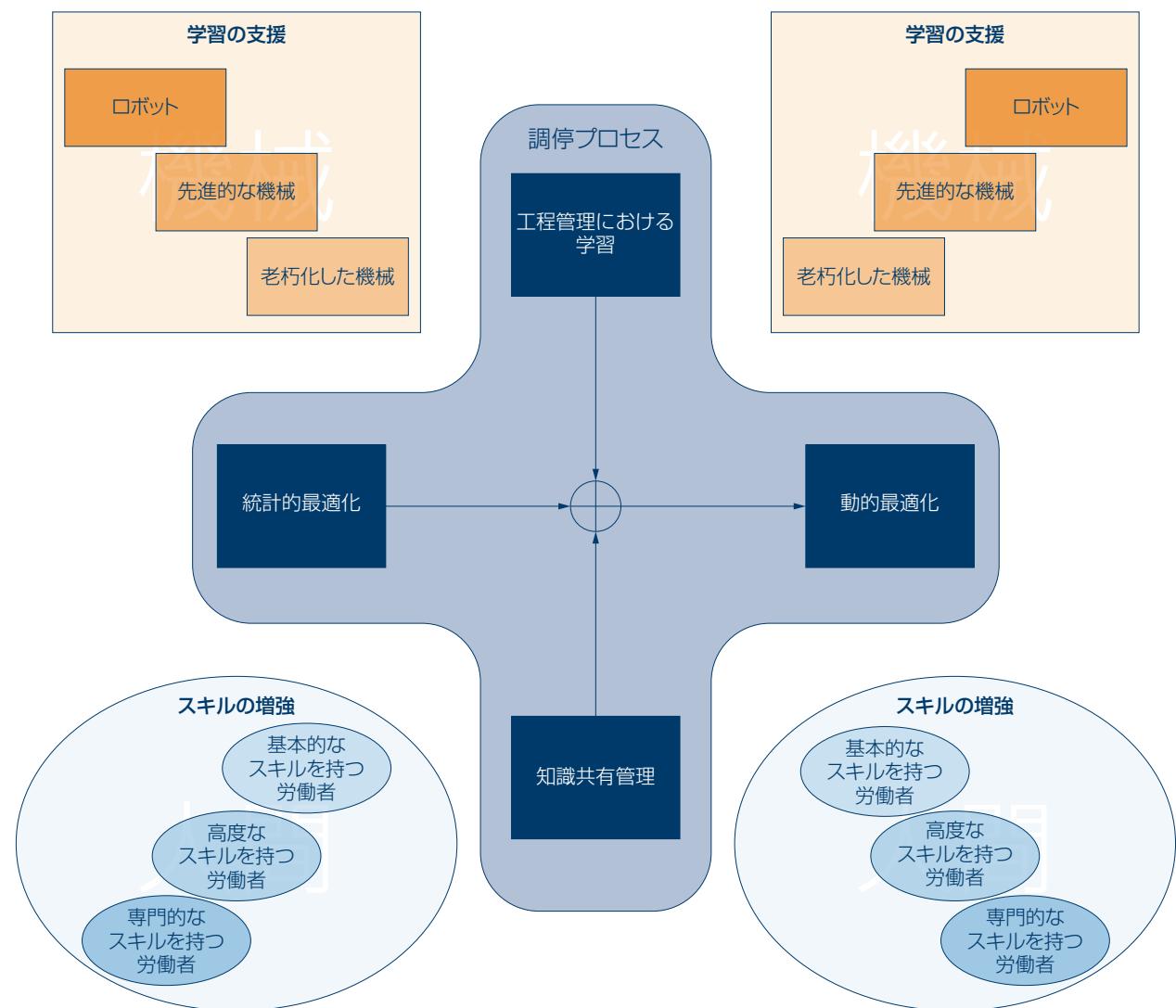


図15: ヒューマン-マシン・コラボレーションの新しいパラダイム (出典: 三菱電機株式会社に基づき自作)



自己学習機械の導入が進められている生産現場では、そのような技術システムを扱う従業員が、統計的および動的最適化に熟達し、プロセス管理、およびデジタル技術に支えられた知識共有管理を習得する必要があります。そのため、企業が人と機械の協調の新しいパラダイムを採り入れることが不可欠です。

以降のケーススタディでは、その新しい側面のいくつかを紹介します。

### 日本のケーススタディ: 三菱電機 -集合知-

集合知は、社内、組織、社会のメンバーから収集した知見やアイデアに基づくものであり、「カイゼン」(製品および生産の継続的な改善)だけでなく水平思考<sup>90</sup> やTRIZ<sup>91</sup>に示されるように、イノベーションにも貢献します。

しかし、生産年齢人口が減るということは、生産現場から収集される知識の量が減り、知見やアイデアの数が少なくなるため、「カイゼン」とイノベーションが減速することになります。将来的に、製造プロセスが複雑化する中、その中にいる作業者には、製造においてより高度な適応力と効率的なオペレーションを遂行する能力が重要となります。

さらに、この生産年齢人口の減少により、企業は、職場で長期的に能力を開発するための手段を講じることができなくなります。またこれは何よりもまず職場ごとに固有の手法で職場文化を構築する取り組みに影響します。また一方で現在のビジネス環境で劇的かつ大きな変化が起きていることを考慮すると、従業員から労働環境に関する最新のフィードバックを受け、最先端の訓練をできるだけ早く導入することが成功の鍵となります。

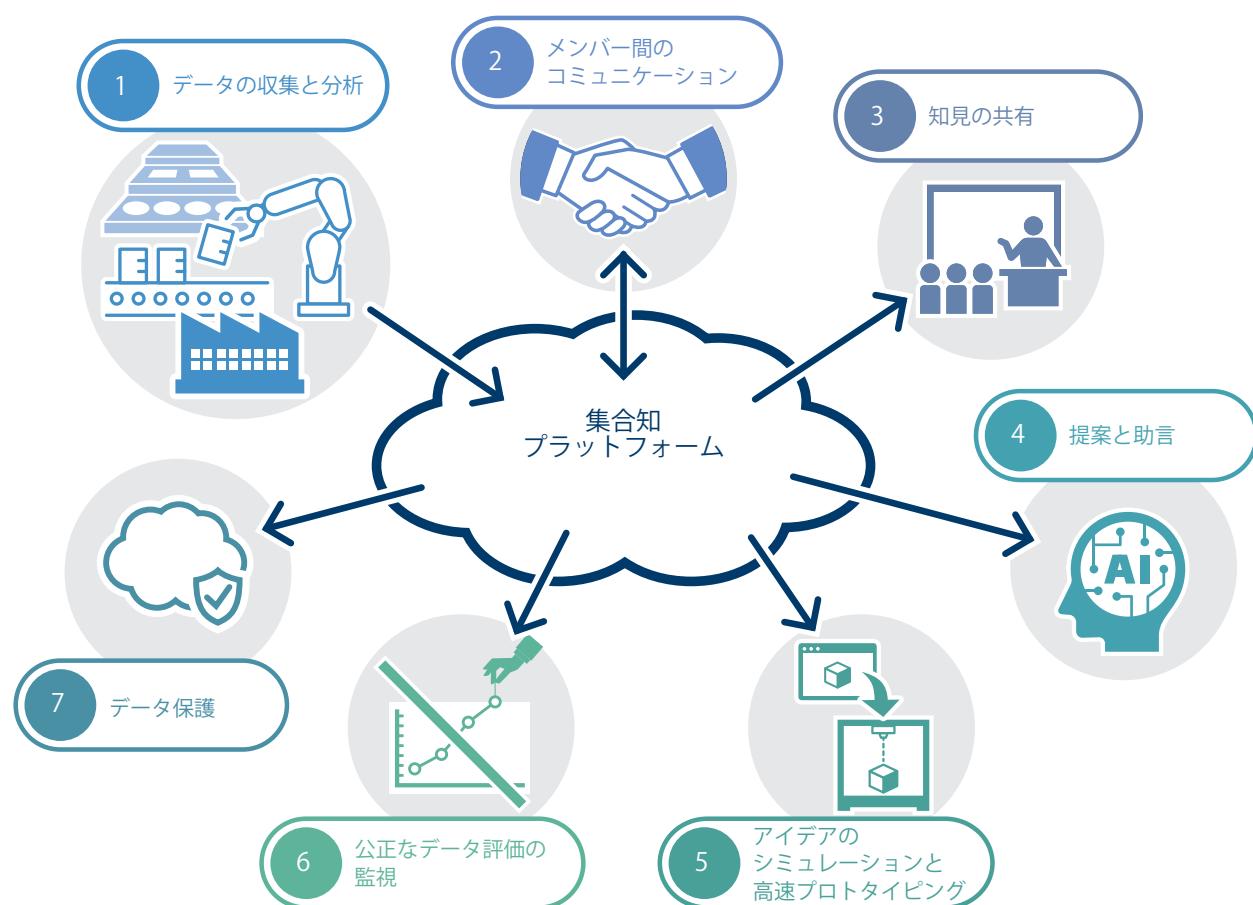


図16:コレクティブ・インテリジェンス・プラットフォーム(出典: 三菱電機株式会社)

90 | de Bono (1967) を参照

91 | TRIZは、ロシア語で「創造的な問題解決理論」を意味する頭字語。Altshuller/Shapiro (1956) を参照

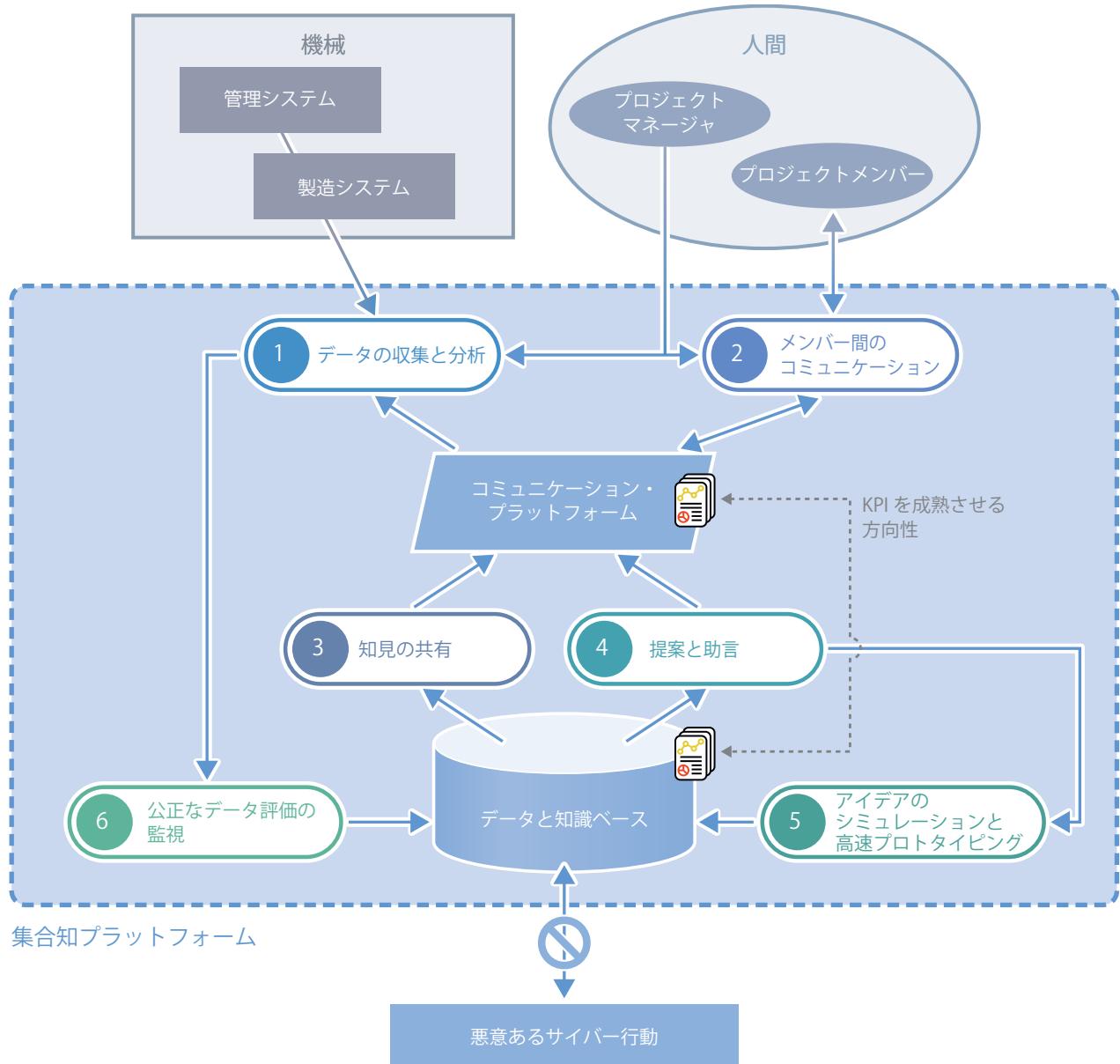
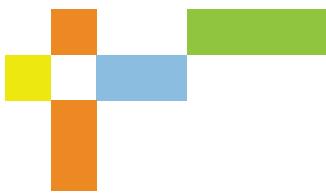


図17: 集合知プラットフォームの利用(出典: 三菱電機株式会社)

この障壁を克服するために、集合知(図16)は追求するに足る価値のある目標といえます。集合知の目的は、職場で収集された知見やアイデアが継続的に実践され、調査されることです。これは、実際の製造環境において、進行する製造の多様化や、プロセスの加速を反映した集合知プラットフォームを通じて行われます。そのようなプラットフォームでは、データの利用と効率的なスキルや知識の活用を支援して、生産現場におけるコラボレーションと人間の訓練に貢献し、より創造的で付加価値のあるタスクに集中することができます。

図17に示すとおり、集合知プラットフォームは、機械シス

テムからだけでなく、拡大する知識ベースのデータに基づいて知見とアイデアを解釈し、提案と助言を行うコミュニケーションプラットフォームを通じて、人からもデータを収集します。AIはこのプラットフォームに組み込まれ、データの評価と関連付け、手法の比較、およびアイデアのプロトタイプ化を行います。AIによる分析から得られた情報は、スキルおよびナレッジとして注目され、ナレッジベースにユースケースとして蓄積されます。このスキルや知識は、オンデマンド教育、アイデア評価、シミュレーションのためのコミュニケーションプラットフォームを通じて、メンバーとして関与する人が共有します。その結果、メンバーによるアイデアの創出が促進されます。さらに、集



合知プラットフォームで重要業績評価指標(KPI)の点からスキルと知識を分類することで、スマートマニュファクチャリングの成熟度をうまく高めることを目的として、手引きを提供し、スキルと知識の実際の変換サイクルに対応することができます。<sup>92</sup>

集合知を用いて製造の多様性に対応することで、企業におけるブレイクスルーを起こすことができます。例えばセル生産システムです。三菱電機の電磁開閉器組み立てにおいては、<sup>93</sup> 複数のロボットと連携する1人の作業者が、より広範囲の製造プロセスを担当することで、組み立て作業を遂行します。このとき、それらのロボットはその作業者の弱点を補います、作業者はプロセスの中で判断を行うことでその価値を発揮します。1つのセルから得られた知識は、集合知を通して直ちに実践されます。経営陣は、投資回収率および時間計画を評価することができます。

集合知プラットフォームのサポートにより、生産現場の人は、革新的な製品製造を行うためにスキルと知識を効果的に活用することができます。

### 日本のケーススタディ: 東京大学 – デジタル・トリプレット

人間中心の製造活動を推進する重要なアプローチとして、現場のエンジニアや技能者が、マニュアルや監督者から指定された定型作業に加えて、自ら率先してエンジニアリング活動を実施する新たな方法を作り上げるように促す、というものがあります。これが、日本の製造業者が行ってきた伝統的な「カイゼン」の方法です。サイバーフィジカル生産システム(CPPS)にこの機能が搭載されていなければならないということになりますが、これはまだ実現されていません。本節で述べるデジタル・トリプレットの考え方は、この機能をCPPSに取り入れるというものです。

リーン生産を追求するために、製造エンジニアや生産現場の技能者が行う継続的な改善活動(「カイゼン」)は、製造の高品質化にとって重要ですが、多くのエンジニアや技能者がデジタルトランスフォーメーションについていけないため、継続的な改善活動はCPPS<sup>94</sup>の「スマート」化に向けてデジタル化されていません。生産システムのデジタル化が進むにつれて問題となるのは、エンジニアの活動を「自動化」するだけではなく、生産の中で最大限の価値を生み出すようにエンジニアを支援するには、どのような次世代システムが必要になるかということです。

ここでは、一般的な日本の製造業で見られるように、生産システムエンジニアが現場に常駐し、作業者と一緒に生産システムを継続的に改善する状況を想定します。こういった作業者は、生産システムの運用、何らかのトラブルが発生した場合の問題解決、リーン生産を追求するための「カイゼン」、生産システムの新規開発などのエンジニアリング活動を行っています。

この問題を解決するために提案されているのが、「デジタル・トリプレット」です。<sup>95</sup> デジタル・トリプレットは、エンジニアが問題を解決し、製品のライフサイクルを通じて価値を創造するための支援を目的としています。デジタル・トリプレットはCPPSの一種ですが、<sup>96</sup> エンジニアに自ら率先してエンジニアリング活動を実施する新たな方法を作り上げるように促すものです。

図18に示すように、エンジニアリング活動は、データ収集、情報分析、エンジニアによる意思決定、および物理的な世界における計画実行で構成され、これを「エンジニアリング・サイクル」と呼びます。エンジニアがサイクルを実行すると、データから価値が創造されます。図18にある角丸長方形の部分は、従来のCPPSで表現されています。しかし、生産システムエンジニアがエンジニアリング・サイクルの構築を支援する場合に重要な点は、この図の長方形の部分に含まれています(収集するデータの選択、分析方法および分析ツールの選択など)。これらは、従来のCPPSにはありませんが、デジタル・トリプレットでは主役となる部分です。すなわち、本節の対象とする生産システムエンジニアは、自ら主体的に、エンジニアリング・サイクルを構築することで、改善を実行します。デジタル・トリプレットは、このプロセスを支援することを目的とします。人間中心のCPPS<sup>97</sup>はこのフレームワークの良い比較対象です。人間中心のCPPSとデジタル・トリプレットの主な違いは、エンジニアリング・サイクルを構築する主体にあります。人間中心のCPPSでは専門家となりますが、デジタル・トリプレットでは現場の生産システムエンジニアとなります。

私たちは、これらのエンジニアリング・サイクルを再利用可能なプロセス知識として記述しようとしています。言い換えれば、生産システムエンジニアが行うプロセス知識の形式化、収集、およびアーカイブ化、知識の再利用、展開、共有による人間活動のサポート、および教育への知識の活用を目指しています。このプロセス知識を利用することにより、HMIのやり方を含むエンジニアリング・サイクルを改善することが可能になります。これは、熟練者から新人エンジニアへの知識移転の新しい形態となりま

92 | Shiら(2019)を参照

93 | 三菱電機のe-F@ctoryのコンセプトを参照。URL: <https://us.mitsubishi-electric.com/fa/en/solutions/efactory>

94 | Monostoriら(2016)、Geisberger/Broy(2014)を参照

95 | Umedaら(2019)を参照

96 | Monostoriら(2016)、Geisberger/Broy(2014)を参照

97 | Ansariら(2018b, 2018c)を参照

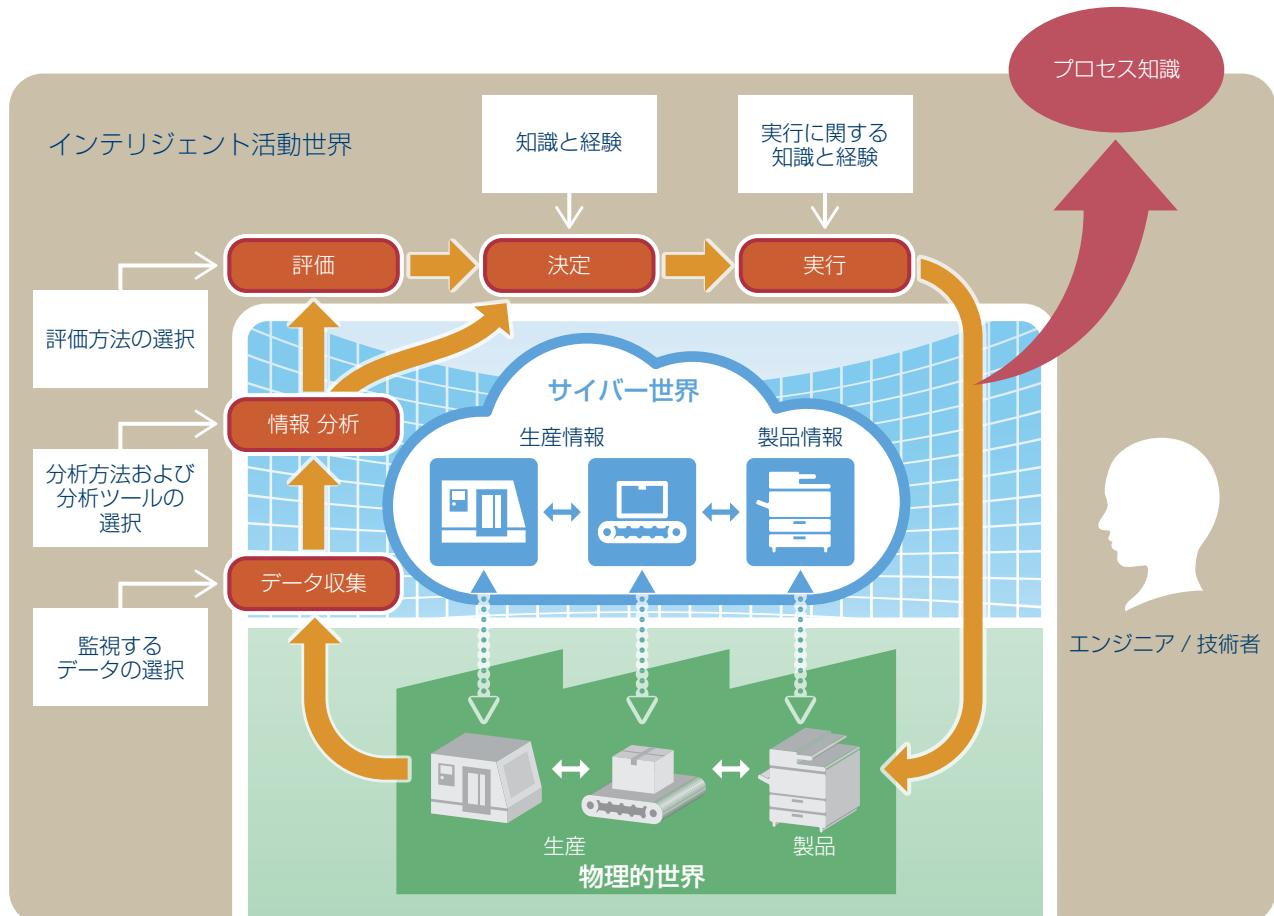


図18: デジタル・トリプレットのエンジニアリング・サイクル(出典: 三菱電機株式会社および東京大学)

す。熟練エンジニアが特定の問題(生産システムの生産性を高めるためなど)のためのエンジニアリング・サイクルを構築すると、デジタル・トリプレットは、データ収集、複数のAIツール、シミュレータなどのソフトウェアの利用、およびエンジニアによるアクションの実行を1つのプロセスとして、このエンジニアリング・サイクルを記録します。このプロセスの記録を再現することによって、新人工エンジニアは熟練者のアプローチと、問題解決のための方法を学ぶことができます。

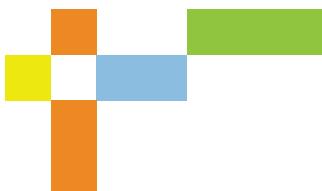
デジタル・トリプレットはCPPSを拡張したものであり、エンジニアが自動的に様々なエンジニアリング・サイクルを構築、実行する「カイゼン」をCPPSに統合することに焦点を当てています。また、熟練者から新人エンジニアへの円滑な知識移転が可能となり、スマートマニュファクチャリングにおける新人研修の役にも立ちます。すなわち、デジタル・トリプレットにより、多様な生産システムエンジニアの各種能力を最大限に活かし、それを尊重することで価

値を創造し、そのスキルと能力を向上させるスマートマニュファクチャリングシステムを構築できるようになります。

#### ドイツのケーススタディ: インフィニオン - 協働ロボティクス

最新世代の協働ロボット(コボット)においては、ロボットと協働する人へのリスクより利点のほうが大きいことが実証されています。さらに、半導体ソリューションと高度なアルゴリズムを正しく組み合わせることで、これらのリスクを最小限に抑えたり、ほとんど排除することが可能です。第一かつ最優先に、コボットは、高度な安全性およびセキュリティ性能のみならず、最大限の精度で周囲をスキャンする能力を必要とします。

従来の産業用ロボットとは異なり、コボットは安全ケージなしで動作し、人と直接対話します。しかし、安全ケージが



無いことで、人および生産資材への安全リスクが著しく増加します。ロボットを安全ケージから解き放ちたい場合は何より、人の不注意あるいはロボットの誤動作によって、人が高速動作するロボットの危険領域に入らないように、そして負傷しないようにしなければなりません。ロボットの感度は、高度なセンサ技術でしか十分に高めることができません。基本的には、人とロボットの間だけではなく、ロボット同士の領域も安全性を高めなければなりません。その方向性は保護ゾーンをより柔軟にすることで実現されます。例えば、はるかに小さい保護ゾーンが可動式ロボットアームの動きに合わせて動的に変化するなどの方法です。ゾーンの概念は仮想フェンスを実装するために使用されます。人がそのゾーンの外周にかかると警告信号が発せられますが、ロボットは全速で動作し続けます。人がより近くに近づくと速度が低下し、それに応じて警告が発せられます。コボットは、人が実際に危険領域に入ろうとした場合にのみ停止します。

安全とセキュリティは一見ともに似ているように見えますが、明白な違いがあります。安全は人を保護することです

が、セキュリティはデータを保護することで、最終的にはサイバー攻撃からロボットを保護することを目的としています。データセキュリティの観点からしかるべき安全性を持つシステムのみが機能的にも安全であり、Industrie 4.0およびIoTの文脈ではその点がますます重要となってきています。暗号化システムは操作側からロボットに送信されるコマンドを保護し、認証機構がロボットが誤ったコマンドを実行しないように保護します。また、セキュリティ機構は、製造プロセスの一部としてのロボットが、有線またはリモートでのソフトウェア更新中に操作されないようにすることを目的とします。また、不正アクセスを防止するために、ユーザおよび新規追加コンポーネントに対するセキュリティ認証も必要です。

ロボットが正しく機能するには、ロボットにも較正が必要です。しかし、例えば攻撃者が不正に較正を操作した場合、ロボットはプログラムされた動作の限界を超えるおそれがあります。

安全性とセキュリティがともに必要となる状況はまさに

## 制御ボックス



## マニピュレータ

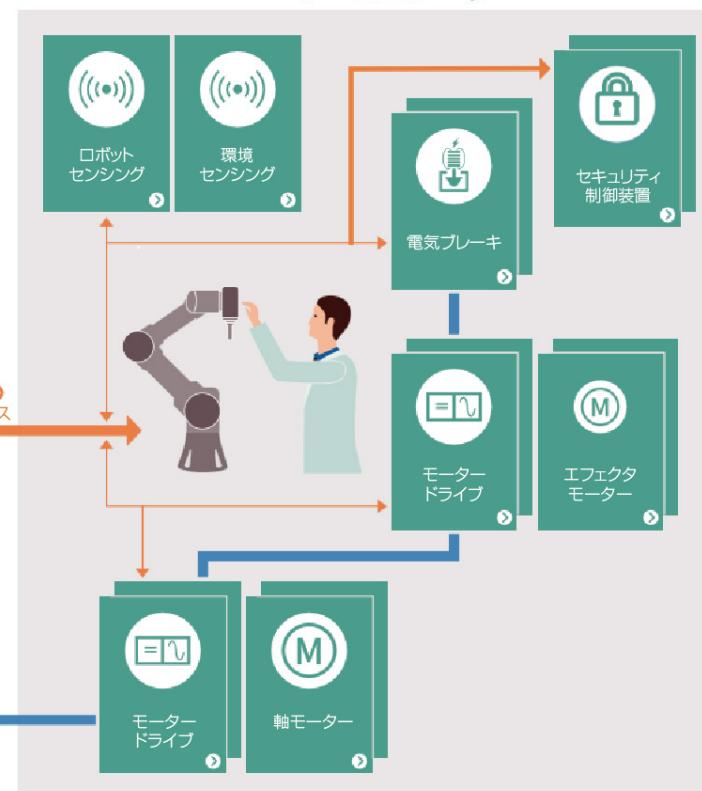


図19: センシングとセキュリティのコンポーネントを含むコボットの構造(出典: インフィニオン)

これであり、効果的なセキュリティ保護なくして機能的な安全性は存在しません。これは、将来のシステムにとって重要な要件であり、ハードウェア・セキュリティ・モジュール(HSM)などの機能を有する特殊なセキュリティコントローラまたはマイクロコントローラによって実現されています。セキュリティ機能はハードウェアに実装されるので、ユーザは暗号化技術については最低限の知識しか必要としません。さらに、既存のソフトウェアにはほとんど影響がありません。

使用される自動化装置およびロボットは、これらが完全に機能したときにしか作業を完遂することができません。作業を完遂させるには、定期的に保守をおこなう必要があります。しかし、保守を行うためにこれらの機械を停止すると、生産活動から貴重な時間が奪われてしまいます。さらに、自動化機器の保守担当チームは、生産プロセス内に特定の負荷プロファイルがあるせいで、まだ十分に機能する部品を交換してしまう可能性があります。このとき相当なコストが発生することがあります、これは本来避けられるものです。

ロボットは様々な信号を発しますが、私たちはそれを利用してロボットの「健全性」を診断することができます。例えば、ウィーンという音の変化やわずかな振動などは、モーター、ギアボックス、またはベアリングの修理あるいは保守点検が必要だという前兆です。また例えば電力消費がわずかに、しかし着実に増加する場合、それは機械抵抗が増加していることを示しています。これは、ベアリングが壊れかけており、それによって電気システムが通常より多くの電流を引き込んでいることに起因している可能性があります。半導体産業は、シリコンの独特の特性を利用して、多種多様な信号を測定するための安価で小さなセンサを作成してきました。この低コストでありながら高品質の感知能力を活用し、様々なセンサをロボットに搭載してその健全性を監視するのは当然のことといえます。例えば、温度、振動、ノイズ、位置決め、運動、加速度、および力覚といったセンサをロボットの関節に組み込むことができます。それらの多くは、ロボットなどの機械を意図したように機能させるために必要とされ、すでに組み込まれています。しかし、それに加えてこれらすべてのセンサを統合的に監視することで、人間の直感のように、潜在的な不具合の予兆を検知することもできるかもしれません。

このような連続的なセンシングを使用する場合、未対処の障害を明らかにするために、即座に評価が行われる必要があります。マイクロコントローラはデータの収集、前処理、および評価に用いられます。このようなセンサーに接続するために必要なすべてのデータインターフェイスを備えた小型演算装置はロボットの関節内に統合するこ

ともできます。この統合されたセンサ情報は演算装置上で評価することができます。あるいはIndustrie 4.0データネットワークを介して中央コンピュータに渡すこともできます。このロボットからの信号を継続的にレビューすることにより、AIはこれらのパラメータが想定範囲から外れ始めたタイミングを、後から容易に明示することができます。これによりロボットの過度の損耗を検査する保全のきっかけをメンテナスチームに知らせることができます。AIシステムによる連続的なセンシングとデータ分析を組み合わせると、ロボットシステムおよびその他の生産システムにおいて、状態監視と予測保全ソリューションが実現され、それによって、あらゆるタイプの機器でも高可用性を実現できるようになります。したがって、ロボットはその周囲を検出するセンサを備える必要があります。飛行時間型(TOF)のレーダーまたは3Dイメージャーのような技術は「目」として機能し、MEMSマイクロフォンは機械および圧力センサに「耳」を与え、「感覚」のようなものを提供することができるでしょう。このように環境を確実に「理解」することで、一緒に働く人間の安全性が向上します。

### ドイツのケーススタディ: 学習型工場

一般的に、学習型工場とは、高度な生産環境の整備に必要な新しいスキルを獲得するために、作業者の教育・訓練を行うよう設計、構築された工場のことです。<sup>98</sup> 生産技術には、アディティブマニュファクチャリングや協働ロボティクスなどの新しい生産パラダイムばかりでなく、情報通信技術の考え方がすぐに取り入れられます。将来的には、生産工程に変化が発生する頻度は増えていくでしょう。そのため生産環境における能力開発の必要性がさらに高まり、HMIの新しい形として影響を及ぼすようになります。

学習型工場は、高等教育および産業訓練というこれまでの教育訓練の考え方を補完する、新しい教育・訓練アプローチを提供するものです。このアプローチでは、両者の

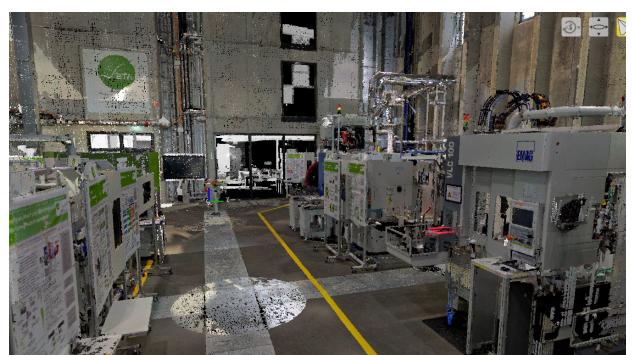
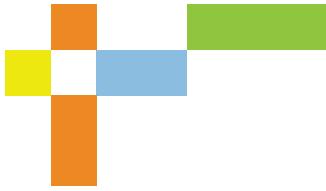


図20: サイバーフィジカル教育・訓練環境  
(出典: ETAファクトリー、ダルムシュタット)



考え方を組み合わせ、最先端の研究主導型ソリューションに生産競争力を維持するための産業戦略を統合するものです。その主な目標は高度なバリューチェーンの中で人間の役割を強化することです。

ICTが生産技術に与える影響が大きくなるに従い、ICT主導型生産環境下での高い開発ダイナミクスと、新しい形のHMIに対応するために、作業者にトレーニングを提供することの重要性がますます高まっています。

Society 4.0では、生涯学習と、教育やスキルアップの場での高度な柔軟性が重要な役割を果たします。生涯学習もまたスキルを更新し、能力をさらに伸ばす場所が必要ですが、そのような場所は物理的、またはサイバースペースに設置する、あるいは両者を組み合わせてサイバーフィジカル教育・訓練環境を構築する必要があります。学習型工場は、そのような生涯学習のサポートに特化した、サイバーフィジカル教育・訓練環境であるといえます。

学習型工場の実例の1つとして、ETAファクトリーがあります。これは、ダルムシュタット工科大学 生産管理・技術・工作機械研究所の学際研究機関である Energy Technologies and Applications in Production (ETA) が設置したものです。実践的な研究手段として、ETAファクトリーは優れた研究の場を設けるだけでなく、産業界や学術界で得られた知見を移転する学習環境としての機能も果たしています。ETAファクトリーの生産ホールは、小規模で、市場投入可能な製品を生産できる、2つの完全なバ

リューチェーンで構成されています(図20を参照)。<sup>99</sup>

最近では、多くの学習型工場または学習型ラボが設立されています。ドイツにおいても同様に学習型工場の概念がすでに採用され、実践が始まっています。例えば、Plattform Industrie 4.0により提供されているMap Industrie 4.0には、Industrie 4.0の観点すでに実現済みのユースケース、テストベッド、サポートサービスがリストアップされています。これには企業(SAP、Festoなど)あるいは学術機関や公共機関(カールスルーエ工科大学のwbk、Fraunhofer IGCVなど)が始めた学習型工場の様々なイニシアチブ、活動、および実装が示されています。<sup>100</sup>

一般的に、学習型工場の考え方は生産現場の技能養成に限られるものではありません。いわゆる学習型ラボ、および学習グループなどにも移転することができます。そのため、HMIに関するテーマが重要な学習にこの考え方を普及させることができます。

#### ドイツと日本のコラボレーションにおけるケーススタディ: DFKIおよび日立 - 労働者活動の認知・評価・移転

ヨーロッパや日本などの成熟した社会では、高齢化社会や出生率の低下が最大の社会問題となっています。特に、製造会社の場合、強力な産業の根幹を支えてきた、経験豊富な労働者の退職は深刻な問題です。したがって、新人

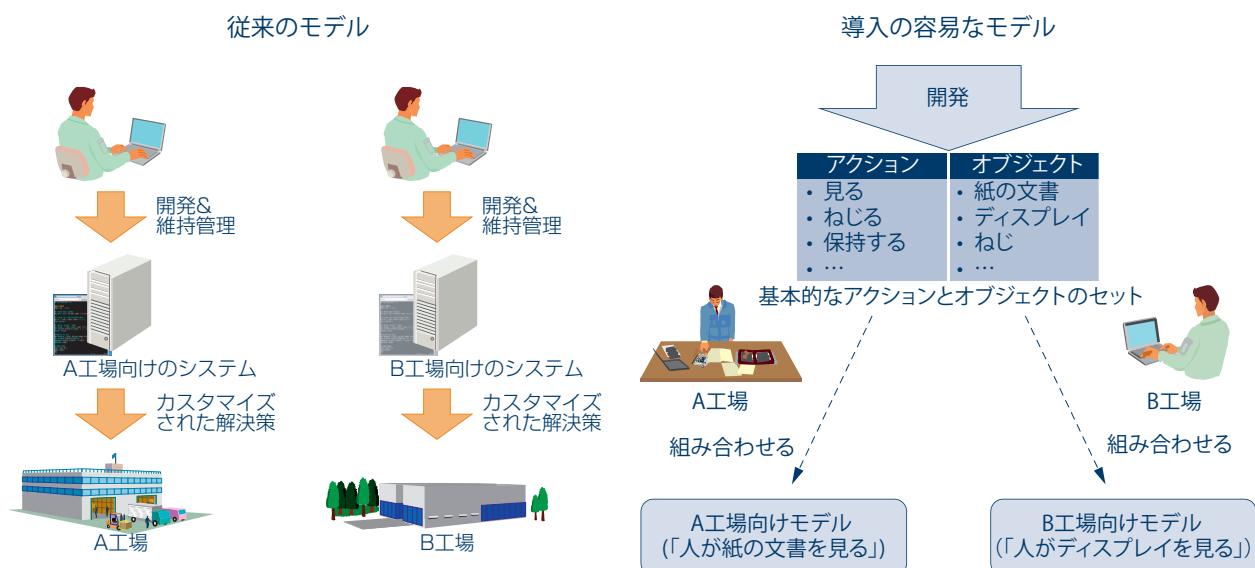


図21:従来のモデルと導入の容易なアクティビティ認識モデル(出典: DFKI)

99 | <https://eta-fabrik.de/bildung/lernfabrik/>も参照

100 | ドイツのPlattform Industrie 4.0の「Map Industrie 4.0」については、<https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-anwendungsbeispiele-formular.html>を参照

労働者をサポートするために、熟練者の知識を活用できる技術の必要性の高さは計り知れないものがあります。作業者（人または機械）のアクティビティ認識は、例えば品質管理、事故リスクの低減、作業者の健康維持、および機械、専門家、新人の間での知識移転など、工場内の作業者をサポートする重要な役割を果たすことがあります。

アクティビティ認識モデルを異なる工場に適用するのが難しいのは、これらの工場間のアクティビティに多様性が存在することです。ある工場と別の工場では、認識されている重要なアクティビティが違っており、対象とされるアクティビティも工場によって変わってきます。また、たとえ対象となるアクティビティが複数の工場で同一であっても、各工場で表現している内容が異なる場合があります。例えば、「マニュアルを確認する」というアクティビティの場合、A工場では作業者が紙の書類を読むような状況を指すかもしれません、B工場では作業者が（デジタル化されたマニュアルを読むために）ディスプレイを見るような状況を指しているかもしれません。この場合、従来の方法では、対象アクティビティが「マニュアルを確認する」と同じ名前であっても、ある工場向けに作成されたモデルを別の工場で使用できないため、他の工場対しては個別の認識モデルを作成しなければいけません。言い換えれば、従来の方法では、個々の顧客ごとにカスタマイズされたモデルを作成する必要があります。

さらに、カスタマイズされたモデルがうまく開発されたとしても、その後の修正を柔軟に加えることは困難です。例

えば、カスタマイズされたモデルの開発後、デジタル化されたマニュアルを読むためのディスプレイを工場Aに導入する場合、新たな「マニュアルを確認する」アクティビティのために多くのデータを収集する必要があります、カスタマイズされた新しいソリューションの開発も必要となります。同様に、これらのシステムが行った判断の根拠を示す説明（すなわち、なぜその判断が行われたか）もありません。このような説明は、特に人と機械の協調が不可欠な環境では重要なものです。

この研究の目的は、導入の容易な人間活動認識モデル、（導入時のコストを抑えるべく限られたカスタマイズ、<sup>101</sup>あるいはカスタマイズ不要の標準ソリューションとして各種工場に適用できるもの）を開発することです。また、機械の判断を人に説明することも、このアプローチの極めて重要な構成要素です。

ここで重要なのは、そのアクティビティに含まれるアクションおよびオブジェクトのような、より単純なコンポーネント<sup>102</sup>の組み合わせに基づいて複雑なアクティビティを認識し、その認識を視覚的<sup>103</sup>およびテキスト形式<sup>104</sup>の両方で人に説明するというアイデアです。

今回は、2つのウェアラブルセンサを使用しました。1つは作業者の視界を写すカメラを備えたスマートグラスもしくはアイトラッカー、もう1つは身体に取り付けたモーショントラッキングセンサ（アームバンドセンサまたはフルボディセンサ）です。これらのセンサを使用して、それぞれ視

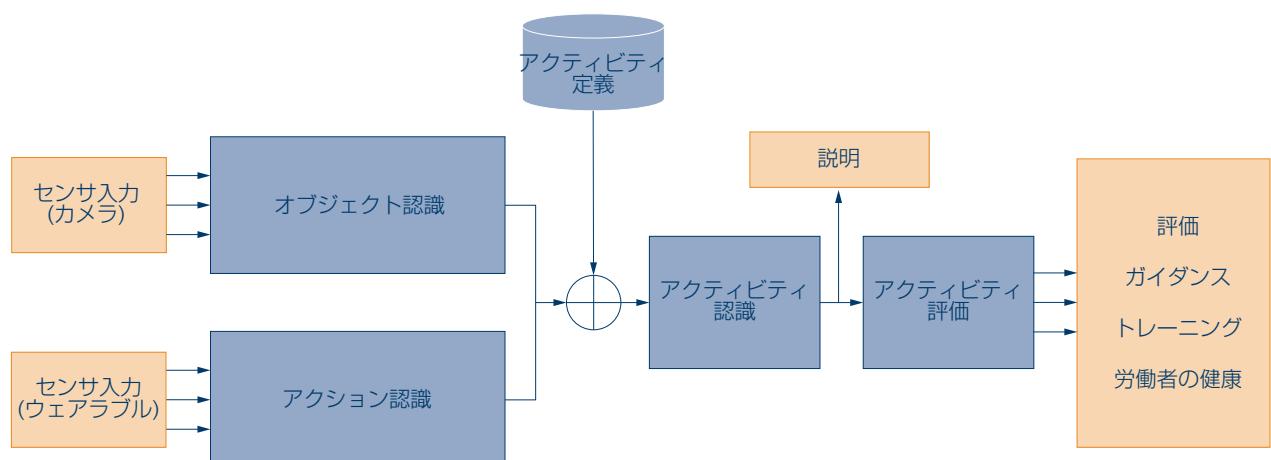


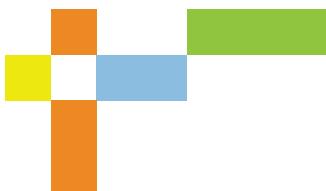
図22: フレームワークの概要（出典: DFKI）

101 | Al-Naserら (2018) を参照

102 | Al-Naserら (2018) を参照

103 | Palacioら (2018)、Siddiquiら (2018) を参照

104 | Ohashiら (2017) を参照



線を向けたオブジェクトおよび基本的なアクションを認識します。<sup>105</sup> 従来のシステムでは固定カメラをセンサとして使用することが多いですが、固定カメラは遮蔽や画角によって制限があることが多く、複雑な工場環境では ウェアラブルセンサのほうが適しています。

アクティビティの表現が工場ごとに異なる場合であっても、アクションたちやオブジェクトたちがどのように組み合わされるかは異なるものと仮定します(以下、これらをまとめて「基礎」と呼びます)。つまり、アクションとオブジェクトと名付けた基礎の認識モジュールは、工場が変わっても共通して使用できると考えます。

図22に、提案されたモデルの概要を示します。<sup>106</sup> このフレームワークにより、事前定義された基礎となるアクションとオブジェクトの組み合わせによって新しいアクティビティを表すことができると仮定すれば、時間のかかる再トレーニングのプロセスがなくとも新しいアクティビティを認識できるようになります。ここで、「アクション」は「腕を上げる」や「かがむ」などの身体部分の単純な動きとして、また「アクティビティ」は基礎となるアクションとオブジェクトの組み合わせとして定義されます。視線誘導型のオブジェクト検出も同様に、両方のアクションの認識判定は、視覚的<sup>107</sup> および文字による説明<sup>108</sup> の両方でサポートさ

れます。これらの説明は、人と機械が近接して働く状況において、機械に対する信頼を構築するために極めて重要な役割を果たします。

上記に示した「マニュアルを確認する」アクティビティの例では、想定されるアクションは「見る」であり、オブジェクトはA工場では「紙の文書」、B工場では「ディスプレイ」となります。複雑なアクティビティをより単純なアクションと関連するオブジェクトに分解することで、「見る」という中間認識モジュールを両方の工場で使用することができます。このフレームワークを使用すると、カスタマイズすることなく十分なレベルの説明を提供し、様々な工場において多くのアクティビティを認識することが可能になります。

このシステムでは、アクティビティを認識するためにウェアラブルセンサおよび視線誘導型オブジェクト認識<sup>109</sup> を用いて、説明可能性を有するアクション認識方法を基にした、ディープニューラルネットワーク(DNN)が用いられています。実験の結果、90%以上の精度で従来の方法と同等のパフォーマンスがあることが示されました。

導入が容易で説明可能性を有するアクティビティ認識システムを開発することにより、トレーニング、指導、品質管理、およびリスク低減の観点から、様々な製造工場で大勢の作業者をサポートすることができるようになるでしょう。

105 | Al-Naserら (2018)、Ohashiら (2017, 2018) を参照

106 | Al-Naserら (2018)、Ohashiら (2017, 2018) を参照

107 | Palacioら (2018) を参照

108 | Ohashiら (2017) を参照

109 | Al-Naserら (公開予定)、Munirら (2019) を参照

## 6 結論

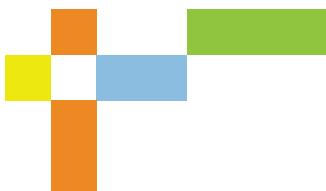
本書では、労働力の成熟化、機械やインフラの老朽化といった要因に関連する社会的な問題に着目し、これらの問題をどのように定義すべきかについて議論し、ドイツと日本のユースケースを通じて人と機械のインタラクションの新たなアプローチを検討しました。そして、CPS、AI、ロボティクスなどのデジタル技術がこうした問題の解決に役立つと期待されていますが、これらの技術はこれまで人が担ってきた定型的な認識タスクを代替することになるため、解決には社会的な変革が必要となります。

持続可能な社会を築くためには、人が付加価値の高い仕事を継続的に創造し、かつ、付加価値の低い仕事から付加価値の高い仕事へといつでも移行できるようになる必要があります。さらに、機械が付加価値の低い仕事を行うだけでなく、人と常にやり取りすることで付加価値の高い仕事を創造する仕組みになることも必要となります。こうした要件によって、デジタルトランスフォーメーションは、人が生涯を通してスキル向上に専念し、付加価値の高い仕事を継続的に創造する、人間中心のまったく新しい製造システムを実現できます。本質的にこのシステムにより人と機械のインタラクションを再構築し、人と機械の両方がデジタル社会を構築する役割を担うことができるようになります。

最終的には、私たちは、デジタル社会における公共性を強化し、人と機械のインタラクションから得た知識を社会的に共有し、人の幸福に貢献する持続可能な社会の構築に取り組む必要があります。本書では、Multiverse Mediationと呼ぶ調停プロセスを提唱し、その未来に対してシナリオとアクションと一緒に考え、議論していくことを勧告します。

そして、各国固有の様々なケーススタディに基づいて、ドイツと日本がデジタル技術を利用して従来の人と機械のインタラクションを変革する事例を観察しました。その結果、本書で述べた人と機械が相互に助け合う社会的な調停プロセスが発展途上であることを検証しました。ただし、人と機械のインタラクションの経験を社会的集団知識として蓄積する仕組みと、その仕組みを利用して人と機械のパフォーマンスを向上させる試みは、両国では取り組まれていませんでした。この可能性を実現するには、個人、地域、企業、国家、世界など、様々なレベルで経験を共有するための仕組みとルールを確立する必要があります。

この日独共同プロジェクトでは、当面の課題にどう対処するかに関し、ドイツと日本の類似点および相違点を認識することを考慮に入れているため、価値の高いプロジェクトといえます。この2カ国はよく似たゴールを目指しているものの、その歴史的背景と社会構造から、解決策を見い出すまでの方法論とスコープは同じではありません。最後に、持続可能な社会を構築するため、多くの国でオープン議論が行われることを期待します。



## 參考資料

acatech 2016

acatech (Ed.): *Innovation Potential of Human-Machine Interaction*. acatech IMPULSE-Executive Summary. This summary is based on: acatech (Hrsg.): *Innovationspotenziale der Mensch-Maschine-Interaktion* (acatech IMPULS), Munich: Herbert Utz Verlag 2016.

Abel et al.2019

Abel, J./Hirsch-Kreinsen, H./Steglich, S./Wienzek, T.: *Akzeptanz von Industrie 4.0* (acatech, Research Council of the Plattform Industrie 4.0). 2019. URL: [https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/akzeptanz-industrie40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/akzeptanz-industrie40.pdf?__blob=publicationFile&v=4) [as at: 02.09.2019].

Abele et al.2018

Abele, E./Metternich, J./Tisch, M. (Eds.): *Learning Factories – Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, Cham: Springer International Publishing, 2018.

Akaishi 2018

Akaishi, K.: "Strategic Plan toward Society 5.0 – Entering into Next Stage –". In: *7th International Cybersecurity Symposium*, November 29th, 2018.

Al-Naser et al.2018

Al-Naser, M./Ohashi, H./Ahmed, S./Nakamura, K./Akiyama, T./Nguyen, P./Sato, T./Dengel, A.: "Hierarchical Model for Zero-shot Activity Recognition Using Wearable Sensors". In: *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence* - Volume 2: ICAART, 2018, pp. 478–485.

Al-Naser et al. forthcoming

Al-Naser, M./Siddiqui, S. A./Ohashi, H./Ahmed, S./Nakamura, K./Sato, T./Dengel, A./Gaze, O.: "Gaze Prediction in Egocentric Videos for Attentional Object Selection". In: *PLOS ONE*, forthcoming.

Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg 2017

Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg (Hrsg.): *Arbeit in der Industrie 4.0 in Baden-Württemberg (Kurzstudie)*, 2017. URL: [https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/Kurzstudie\\_Arbeit-4.0\\_BW-1.pdf](https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/Kurzstudie_Arbeit-4.0_BW-1.pdf) [as at: 19.08.2019].

Altshuller/Shapiro 1956

Altshuller, G. S./Shapiro, R. B.: "О П с и х о л о г и и и з о б р е т а т е л ь с к о г о т в о р ч е с т в а (On the Psychology of Inventive Creation)". In: *В о п р о с ы П с и х о л о г и и (The Psychological Issues)* (in Russian), 6: 1956, pp. 37–39.

Ansari et al.2018a

Ansari, F./Erol, S./Sihn, W.: "Rethinking Human-Machine Learning in Industry 4.0: How Does the Paradigm Shift Treat the Role of Human Learning?". In: *Procedia Manufacturing*, 23: 2018, pp. 117–122.

Ansari et al.2018b

Ansari, F./Khobreh, M./Seidenberg, U./Sihn, W.: "A Problem-Solving Ontology for Human-Centered Cyber Physical Production Systems". In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 22: 2018, pp. 91–106.

Ansari et al.2018c

Ansari, F./Hold, P./Sihn, W.: "Human-Centered Cyber Physical Production System: How Does Industrie 4.0 Impact on Decision-Making Tasks?". In: *2018 IEEE Technology and Engineering Management Conference*, 2018.

Arntz et al.2016

Arntz, M./Gregory, T./Zierahn, U.: "The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis". In: *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, No. 189: 2016, OECD Publishing.

Atkinson 2019

Atkinson, D.: *Nihonjin no Shousan (Chance of Winning for Japanese)*, TOYO KEIZAI INC (Published in Japanese), 2019. URL: <https://str.toyokeizai.net/books/9784492396469> [as at: 19.08.2019].

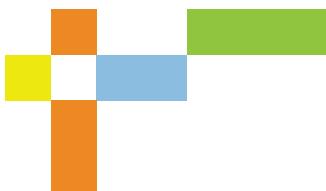
Autor 2015

Autor, D. H.: "Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation". In: *Journal of Economic Perspectives*, 29:3, 2015, pp. 3–30.

Becker 2015

Becker, K.-D.: "Arbeit in der Industrie 4.0 – Erwartungen des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft e.V". In: Botthof, A./Hartmann, E. A. (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, pp. 23–30.

- BCG 2015  
 Boston Consulting Group (BCG) (Ed.): *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, 2015.URL: [https://www.bcg.com/de-de/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/de-de/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx) [as at: 27.05.2019].
- BMAS 2017  
 Federal Ministry of Labour and Social Affairs (BMAS): *Weiβbuch Arbeiten 4.0*, 2017, p. 18ff.URL: [https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/a883-weissbuch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/a883-weissbuch.pdf?__blob=publicationFile) [as at: 19.08.2019].
- BMW/BMAS 2016  
 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMW)/Federal Ministry of Labour and Social Affairs (BMAS) (Eds.): *Working in the Digital World: People, Organisation, Technology*, 2016, URL: [https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/autonomik-arbeiten%20in%20der%20digitalen%20welt-engl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/autonomik-arbeiten%20in%20der%20digitalen%20welt-engl.pdf?__blob=publicationFile&v=6) [as at: 19.08.2019].
- Bonin et al.2015  
 Bonin, H./Gregory, T./Zierahn, U.: Übertragung der Studie von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland – Endbericht –.Forschungsbericht 455, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH, 2015.URL: [https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb-455.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb-455.pdf?__blob=publicationFile&v=2) [as at: 26.08.2019.]
- Botthof/Hartmann 2014  
 Botthof, A./Hartmann, E. A. (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- Bowles 2014  
 Bowles, J.: *The Computerisation of European Jobs – Who Will Win and Who Will Lose from the Impact of New Technology onto Old Areas of Employment?*, 2014.URL: <http://bruegel.org/2014/07/the-computerisation-of-european-jobs/> [as at: 26.05.2019].
- Brzeski/Burk 2015  
 Brzeski, C./Burk, I.: *Die Roboter kommen. Folgen für den deutschen Arbeitsmarkt*.INGDiBa, Economic Reserach, 2015.URL: <https://www.ing.de/binaries/content/assets/pdf/ueber-uns/presse/publikationen/ing-diba-economic-analysis-die-roboter-kommen.pdf> [as at: 26.05.2019].
- Cabinet Office 2018  
 Cabinet Office, Government of Japan (Ed.): "Chapter 2 Human Capital and Work Styles in the Era of the 100-Year Life".In: *Annual Report on the Japanese Economy and Public Finance 2018 – White Paper: Toward The Economy of Society 5.0*, 2018.URL: [https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/pdf/all\\_02.pdf](https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/pdf/all_02.pdf) [as at: 19.08.2019].
- Carr 2014  
 Carr, N.: *The Glass Cage: Automation and Us*, New York, NY: W.W.Norton & Company, 2014.
- De Bono 1967  
 De Bono, E.: *New Think: The Use of Lateral Thinking in the Generation of New Ideas*, 3rd Edition, University of Michigan 1967.
- De La Rica/Gortazar 2016  
 De La Rica, S./Gortazar, L.: "Differences in Job De-Routinization in OECD Countries: Evidence from PIAAC".In: *IZA Discussion Paper*, No. 9736, 2016.URL: <http://ftp.iza.org/dp9736.pdf> [as at: 15.08.2019].
- Dengler/Matthes 2018  
 Dengler, K./Matthes, B.: "Substituierbarkeitspotenziale von Berufen in Deutschland – Weniger Berufsbilder halten mit der Digitalisierung Schritt".In: *IAB Kurzbericht*, 4:2018.URL: <http://doku.iab.de/kurzber/2018/kb0418.pdf> [as at: 19.08.2019].
- Destatis 2018a  
 Statistisches Bundesamt (Destatis): *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit – Bevölkerung mit Migrationshintergrund – Ergebnisse des Mikrozensus 2017 –, 2018*.URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Migration-Integration/Publikationen/Downloads-Migration/migrationshintergrund-2010220177004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Migration-Integration/Publikationen/Downloads-Migration/migrationshintergrund-2010220177004.pdf?__blob=publicationFile) [as at: 15.08.2019].



- Destatis 2018b  
Statistisches Bundesamt (Destatis): *Statistisches Jahrbuch 2018*. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-arbeitsmarkt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-arbeitsmarkt.pdf?__blob=publicationFile&v=7) [as at: 19.08.2019].
- Elbestawi et al.2018  
Elbestawi, M./Centea, D./Singh, I./Wanyama, T.: "SEPT Learning Factory for Industry 4.0 Education and Applied Research". In: *Procedia Manufacturing*, 23: 2018, pp. 249–254.
- Eurostat 2019  
Eurostat: *Employment Rate by Gender, Age Group 20-64*, 2019. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=2020\\_10&language=de](https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=2020_10&language=de) [as at: 20.08.2019].
- Federal Employment Agency 2018  
Federal Employment Agency (Bundesagentur für Arbeit): *Labor Market for Foreigners (Monthly Figures)*, 2018. URL: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Statistikdaten/Detail/201807/analyse/analyse-d-arbeitsmarkt-auslaender/analyse-d-arbeitsmarkt-auslaender-d-0-201807-pdf.pdf> [as at: 20.08.2019].
- Frey/Osborne 2013  
Frey, C.B./Osborne, M.A.: "The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation?" In: *Oxford Martin School Working Paper*, No. 18, 2013.
- Geisberger/Broy 2014  
Geisberger E./Broy, M. (Eds.): *Living in a Networked World. Integrated Research Agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS)* (acatech STUDY), Munich: Herbert Utz Verlag 2014.
- Gorecky et al.2014  
Gorecky, D./Schmitt, M./Loskyll, M./Zühlke, D.: "Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era". In: *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, July 27–30 Porto Alegre, Brazil, 2014. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6945523/> versions [as at: 04.09.2019].
- 浜銀総合研究所2016  
浜銀総合研究所:「企業の設備年齢上昇による更新投資の行方」, 2016. URL: <https://www.yokohama-ri.co.jp/html/report/pdf/ev002.pdf> [as at: 19.08.2019].
- Hirsch-Kreinsen 2018  
Hirsch-Kreinsen, H.: "Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit". In: Hirsch-Kreinsen, H./Ittermann, P./Niehaus, J. (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit – Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen*, 2.Auflage, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, 2018, pp.13–32.
- Hitachi Brand Channel 2018  
Hitachi Brand Channel: *Taking the Skills of Experts to the World through Collaborative Creation between Daikin and Hitachi*. Online Video on YouTube, 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=hNu-zcxWPNw> [as at: 19.08.2019].
- Hitachi Brand Channel 2019  
Hitachi Brand Channel: *Multiverse Barrier Free - Revitalize Human-Machine Collaboration*. Online Video on YouTube, 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fKjN3PPBUhk> [as at: 19.08.2019.]
- Hitachi R&D Group 2017  
Hitachi R&D Group: *Flexible Production System Utilizing Human and Robot Cooperation*, Development Story, May 29, 2017. URL: <https://www.hitachi.com/rd/portal/contents/story/cobot/index.html> [as at: 19.08.2019].
- Hoose 2018  
Hoose, F.: "Digitale Arbeit – Strukturen eines Forschungsfeldes". In: *IAQ-Forschung – Aktuelle Forschungsberichte des Instituts Arbeit und Qualifikation*, 2018. URL: <http://www.iaq.uni-due.de/iaq-forschung/2018/fo2018-03.pdf> [as at: 19.08.2019].
- Ittermann/Niehaus 2018  
Ittermann, P./Niehaus, J.: "Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit – revisited: Forschungsstand und Trendbestimmungen". In: Hirsch-Kreinsen, H./Ittermann, P./Niehaus, J. (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit – Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen*, 2.Auflage, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft 2018, pp. 33–60.
- Iwamoto 2018  
Iwamoto, K: "Impact of Employment by Artificial Intelligence and Social Policies". In: Managi, S. (Ed.): *The Economics of Artificial Intelligence: How Our Lives, Our Work and Our Society Will Change*, RIETI Books, Minerva Publishing, 2018, pp. 19-45.
- Iwamoto/Tanoue 2018  
Iwamoto, K./Tanoue, Y.: "Digitization, Computerization, Networking, Automation, and the Future of Jobs in Japan." In: RIETI (Ed.): *RIETI Policy Discussion Paper Series*, 18-P-013: 2018. URL: <https://www.rieti.go.jp/jp/publications/pdp/18p013.pdf> [as at: 19.08.2019].
- Jacobs et al.2017

Jacobs, J. C./Kagermann, H./Spath, D. (Eds.): *The Future of Work in the Digital Transformation – Agility, Lifelong Learning and the Role of Employers and Works Councils in Changing Times*. A paper by the acatech and Jacobs Foundation Human Resources Working Group – Forum for HR Directors on the Future of Work (acatech DISCUSSION), Munich: Herbert Utz Verlag 2017.

Jacobs et al.2018

Jacobs, J. C./Kagermann, H./Sattelberger, T./Lange, T./Depiereux, P./van Alphen, C./Greve, A./Lohmann, T./Bruckner, L./Werther, S.: "Aktuelle Studien zur Zukunft der Arbeit". In: Werther, S./Bruckner, L. (Hrsg.): *Arbeit 4.0 aktiv gestalten – Die Zukunft der Arbeit zwischen Agilität, People Analytics und Digitalisierung*, 2018, Berlin: Springer-Verlag, pp. 23-46.

JMA 2018

Japan Medical Association (JMA), Academic Promotion Council: *AI and Medical Care, 9<sup>th</sup> Academic Promotion Council Report*, 2018. URL: [http://dl.med.or.jp/dl-med-teireikaiken/20180620\\_3.pdf](http://dl.med.or.jp/dl-med-teireikaiken/20180620_3.pdf) [as at: 23.08.2019].

Kagermann et al.2013

Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J.: *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0" (Final report of the Industrie 4.0 Working Group)*, 2013. URL: [https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final\\_report\\_\\_Industrie\\_4.0\\_accessible.pdf](https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf) [as at: 19.08.2019].

Lanza et al.2018

Lanza, G./Nyhuis, P./Fisel, J./Jacob, A./Nielsen, L./Schmidt, M./Stricker, N.: *Wandlungsfähige, menschzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0* (acatech, Research Council of the Plattform Industrie 4.0), München: Herbert Utz Verlag 2018.

Majkovic et al. 2018

Majkovic, A.-L./Werkmann-Karcher, B./Gundrum, E./Birrer, J./Genner, S./Probst, L./Huber, R./Pfister, A.: *IAP Studie 2017 – Teil 2. Der Mensch in der Arbeitswelt 4.0. Ergebnisse der qualitativen Interviews*, Zürich: IAP Institut für Angewandte Psychologie der ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, 2018. URL: [https://www.zhaw.ch/storage/psychologie/upload/iap/studie/IAP-Studie\\_Teil-2\\_Bericht.pdf](https://www.zhaw.ch/storage/psychologie/upload/iap/studie/IAP-Studie_Teil-2_Bericht.pdf) [as at: 28.08.2019].

McKinsey Global Institute 2017

McKinsey&Company, McKinsey Global Institute: *Jobs Lost, Jobs Gained: What the Future of Work Will Mean for Jobs, Skills, and Wages*, 2017. URL: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/featured%20insights/Future%20of%20Organizations/What%20the%20future%20of%20work%20will%20mean%20for%20jobs%20skills%20and%20wages/MGI-Jobs-Lost-Jobs-Gained-Report-December-6-2017.ashx> [as at: 27.08.2019].

経済産業省 2017

経済産業省: *Trade White Paper 2017*. URL: [https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2017/whitepaper\\_2017.html](https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2017/whitepaper_2017.html) [as at: 18.08.2019].

MHLW 2019

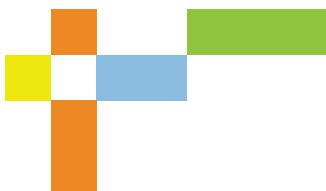
厚生労働省:「外国人雇用状況の届出状況」, 2019. URL: <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000192073.html> [as at: 19.08.2019].

MIC 2019a

総務省, Statistics Bureau: *Japan Statistical Yearbook 2019, Chapter 2: Population and Households*, 2019. URL: <http://www.stat.go.jp/english/data/nenkan/68nenkan/1431-02.html> [as at: 23.08.2019].

総務省 2019b

総務省:「労働力調査結果」, 2019. URL: <http://www.stat.go.jp/data/roudou/longtime/03roudou.html> [as at: 19.08.2019].



Monostori et al.2016

Monostori, L./Kádár, B./Bauernhansl, T./Kondoh, S./Kumara, S. R./Reinhart, G./Sauer, O./Schuh, G./Sihn, W./Ueda, K.: "Cyber-Physical Systems in Manufacturing". In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65:2, 2016, pp. 621-641.

Munir et al.2019

Munir, M./Siddiqui, S. A./Küsters, F./Mercier, D./Dengel, A./Ahmed, S.: "TSXplain: Demystification of DNN Decisions for Time-Series Using Natural Language and Statistical Features". In: *28<sup>th</sup> International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, 2019.

National Intelligence Council 2012

National Intelligence Council: *Global Trends 2030: Alternative Worlds*, 2012. URL: <https://www.dni.gov/index.php/who-we-are/organizations/mission-integration/nic/nic-related-menus/nic-related-content/global-trends-2030?highlight=WyJnbG9iYWwiLCJnbG9iYWxpemF0aW9uliwiZ2xvYmFsbHkiLCJnbG9iYWxpe mVkliwiZ2xvYmFsaXplliwiZ2xvYmFsJ3MiLCJnbG9iYWxpemluZylslnRyZW5kcylslnRyZW5kliwidHJlbmRpbmciLCJnbG9iYWwgdHJlbmRzI0=> [as at: 19.08.2019].

Nikkei Asian Review 2017

Nikkei Asian Review: *Japan Falls to 14<sup>th</sup> in Manufacturing Productivity: Survey*, 2017. URL: <https://asia.nikkei.com/Economy/Japan-falls-to-14th-in-manufacturing-productivity-survey> [as at: 21.08.2019].

Nonaka 2019

Nonaka, Y.: *Navigation Scheme of Smart Manufacturing System Development for Each Maturity Level Enterprise – An Activity of German-Japan IoT Collaboration* PJ. Presentation at Forum Industrie 4.0, Hannover Messe 2019. URL: [http://files.messe.de/abstracts/91524\\_uni\\_0204\\_1600\\_Y\\_Nonaka\\_Hitachi.pdf](http://files.messe.de/abstracts/91524_uni_0204_1600_Y_Nonaka_Hitachi.pdf) [as at: 19.08.2019].

Nedelkoska/Quintini 2018

Nedelkoska, L./Quintini, G.: "Automation, Skills Use and Training". In: *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, No. 202: 2018. URL: <https://doi.org/10.1787/1815199X> [as at: 04.09.2019].

OECD 2019

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): *Economic Outlook, Volume 2019, Issue 1*, 2019. URL: <https://doi.org/10.1787/b2e897b0-en> [as at: 15.08.2019].

Ohashi et al.2017

Ohashi, H./Al-Naser, M./Ahmed, S./Akiyama, T./Sato, T./Nguyen, P./Nakamura, K./Dengel, A.: "Augmenting Wearable Sensor Data With Physical Constraint For Dnn-Based Human-Action Recognition". In: *ICML 2017 Times Series Workshop*, Sydney, Australia, 2017. URL: <https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/publikationen/publikation/9676/> [as at: 04.09.2019].

Ohashi et al.2018

Ohashi, H./Al-Naser, M./Ahmed, S./Nakamura, K./Sato, T./Dengel, A.: "Attributes' Importance for Zero-Shot Pose-Classification Based on Wearable Sensors". In: *Sensors*, 18(8): 2018. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2485> [as at: 19.08.2019].

Palacio et al.2018

Palacio, S./Folz, J./Hees, J./Raue, F./Borth, D./Dengel, A.: "What do Deep Networks Like to See". In: *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-2018)*, June 18-22 Salt Lake City, Utah, United States IEEE, 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8578426> [as at: 04.09.2019].

Pfeiffer/Suphan 2015

Pfeiffer, S./Suphan, A.: "Industrie 4.0 und Erfahrung: Statt vager Prognosen zu technologischer Arbeitslosigkeit morgen, heute das Gestaltungspotenzial der Beschäftigten nutzen und anerkennen". In: Hirsch-Kreinsen, H./Ittermann, P./Niehaus, J. (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit*. Baden-Baden, 2015, S. 205–230.

Pfeiffer et al.2016

Pfeiffer, S./Lee, H./Zirnig, C./Suphan, A.: *Industrie 4.0 – Qualifizierung 2025*. VDMA Study, 2016. URL: <https://www.sabine-pfeiffer.de/files/downloads/2016-Pfeiffer-Industrie40-Qualifizierung2025.pdf> [as at: 22.08.2019].

## PLS 2019

Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz (PLS) (Hrsg.): *Arbeit, Qualifizierung und Mensch-Maschine-Interaktion – Ansätze zur Gestaltung Künstlicher Intelligenz für die Arbeitswelt*. Whitepaper. AG Arbeit/Qualifikation, Mensch-Maschine-Interaktion. URL: [https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/AG2\\_Whitepaper\\_210619.pdf](https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/AG2_Whitepaper_210619.pdf) [as at: 05.09.2019].

## Schallock et al.2018

Schallock, B./Rybski, C./Jochem, R./Kohl, H.: "Learning Factory for Industrie 4.0 to Provide Future Skills Beyond Technical Training". In: *Procedia Manufacturing* 23: 2018, pp. 27–32.

## Schröder 2017

Schröder, C: "Lohnstückkosten im internationalen Vergleich". In: Institut der Deutschen Wirtschaft Köln (Hrsg.): *IW-Trends Nr. 4*: 2017. URL: [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/IW-Trends/PDF/2018/IW-Trends\\_4-2017\\_Lohnstueckkosten.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Trends/PDF/2018/IW-Trends_4-2017_Lohnstueckkosten.pdf) [as at: 19.08.2019].

## Schwartz et al.2016

Schwartz, T./Feld, M./Folz, J./Hevesi, P./Hutter, D./Kiefer, B./Lüth, C./Mronga, D./Spieldenner, T./Wirkus, M./Zinnikus, I./Straube, S.: "Hybrid Teams of Humans, Robots and Virtual Agents in a Production Setting". In: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Environments. International Conference on Intelligent Environments*: 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7723506> [as at: 04.09.2019].

## Shi et al.2019

Shi, X./Baba, N./Osagawa, D./Fujishima, M./Ito, T.: "Maturity Assessment: A Case Study Toward Sustainable Smart Manufacturing Implementation". In: *2019 IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial & Logistics Engineering*, April 19–21, 2019.

## Siddiqui et al.2018

Siddiqui, S. A./Mercier, D./Munir, M./Dengel A./Ahmed, S.: "TSViz: Demystification of Deep Learning Models for Time-Series Analysis". In: *IEEE Access* 2018. DOI:10.1109/ [as at: 19.08.2019].

## Taub et al.2002

Taub, E./Uswatte, G./Elbert, T.: "New Treatments in Neurorehabilitation Founded on Basic Research". In: *Nature Reviews Neuroscience* 3(3): 2002, pp. 228–236.

## Tsutsumi et al.2018

Tsutsumi, D./Gulyai, D./Kovács, A./Tipary, B./Ueno, Y./Nonaka, Y./Monostori, L.: "Towards Joint Optimization of Product Design, Process Planning and Production Planning in Multi-product Assembly". In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67(1): 2018, pp. 441–446.

## Umeda et al.2019

Umeda, Y./Ota, J./Kojima, F./Saito, M./Matsuzawa, H./Sukekawa, T./Takeuchi, A./Makida, K./Shirafuji, S.: "Development of an Education Program for Digital Manufacturing System Engineers Based on 'Digital Triplet' Concept". In: *Procedia Manufacturing*, 31: 2019, pp. 363–369.

## UN 2017

United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs: Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Volume I: Comprehensive Tables*, 2017. URL: [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_Volume-I\\_Comprehensive-Tables.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf) [as at: 23.08.2019].

## UN 2019

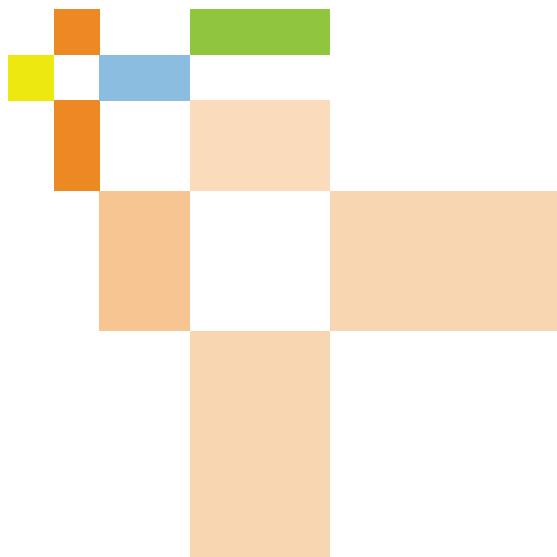
United Nations (UN): *17 Goals to Transform Our World*, 2019. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [as at: 19.08.2019].

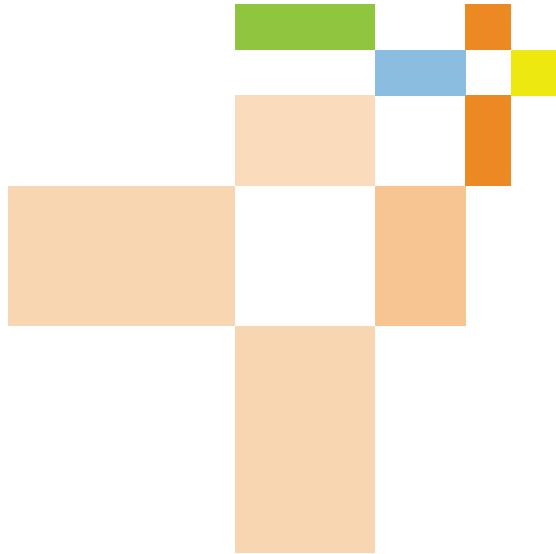
## Vogler et al.2016

Vogler-Ludwig, K./Düll, N./Kriechel, B.: *Arbeitsmarkt 2030 Wirtschaft und Arbeitsmarkt im digitalen Zeitalter – Prognose 2016*, 2016. URL: <https://www.arbeitenviernull.de/fileadmin/Downloads/arbeitsmarktprognose-2030.pdf> [as at: 27.05.2019].

## World Bank 2019

The World Bank.: *Population growth (annual %)*, 2019. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW> [as at: 23.08.2019].





## acatech (ドイツ工学アカデミー)

acatechは、各種科学技術分野の利益を国際的に代表する機関であり、政策立案者や社会に対する助言および革新を推進する政策の支援を行っています。ドイツ連邦政府および各州からの委任に応じ、科学的根拠に基づいて、公共の利益に関わる独自の助言を提供します。技術的な発展に関わる可能性やリスクの解説を行い、様々な発想が、さらなる繁栄や福祉、生活の質の向上につながるイノベーションになるよう支援しつつ、産学間の協力関係を築いています。本アカデミーには、工学、自然科学、医学のほか、人文科学や社会科学の分野からも優秀な科学者が参加しています。理事会は、主要な科学系団体、技術系の企業や団体の有力者で構成されています。ミュンヘンのacatech FORUMに本部を置き、またベルリンおよびブリュッセルにもオフィスが設置されています。

詳細は、[www.acatech.de](http://www.acatech.de)を参照してください。



編集者:

ヘニング カガーマン教授(博士)  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin  
ドイツ

野中 洋一博士  
株式会社 日立製作所  
研究開発グループ  
生産イノベーションセンター  
244-0817 横浜市戸塚区吉田町292  
日本

シリーズ編集者:

acatech – ドイツ工学アカデミー (2019)

ミュンヘンオフィス  
Karolinenplatz 4  
80333 Munich | Germany  
T +49 (0)89/52 03 09-0  
F +49 (0)89/52 03 09-900

ベルリンオフィス  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin | Germany  
T +49 (0)30/2 06 30 96-0  
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

ブリュッセルオフィス  
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brussels | Belgium  
T +32 (0)2/13 81-80  
F +32 (0)2/13 81-89

info@acatech.de  
www.acatech.de

Board acc. to § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl, Prof. Dr. Hermann Reckhardt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Martina Schraudner

推奨される引用時の表記:

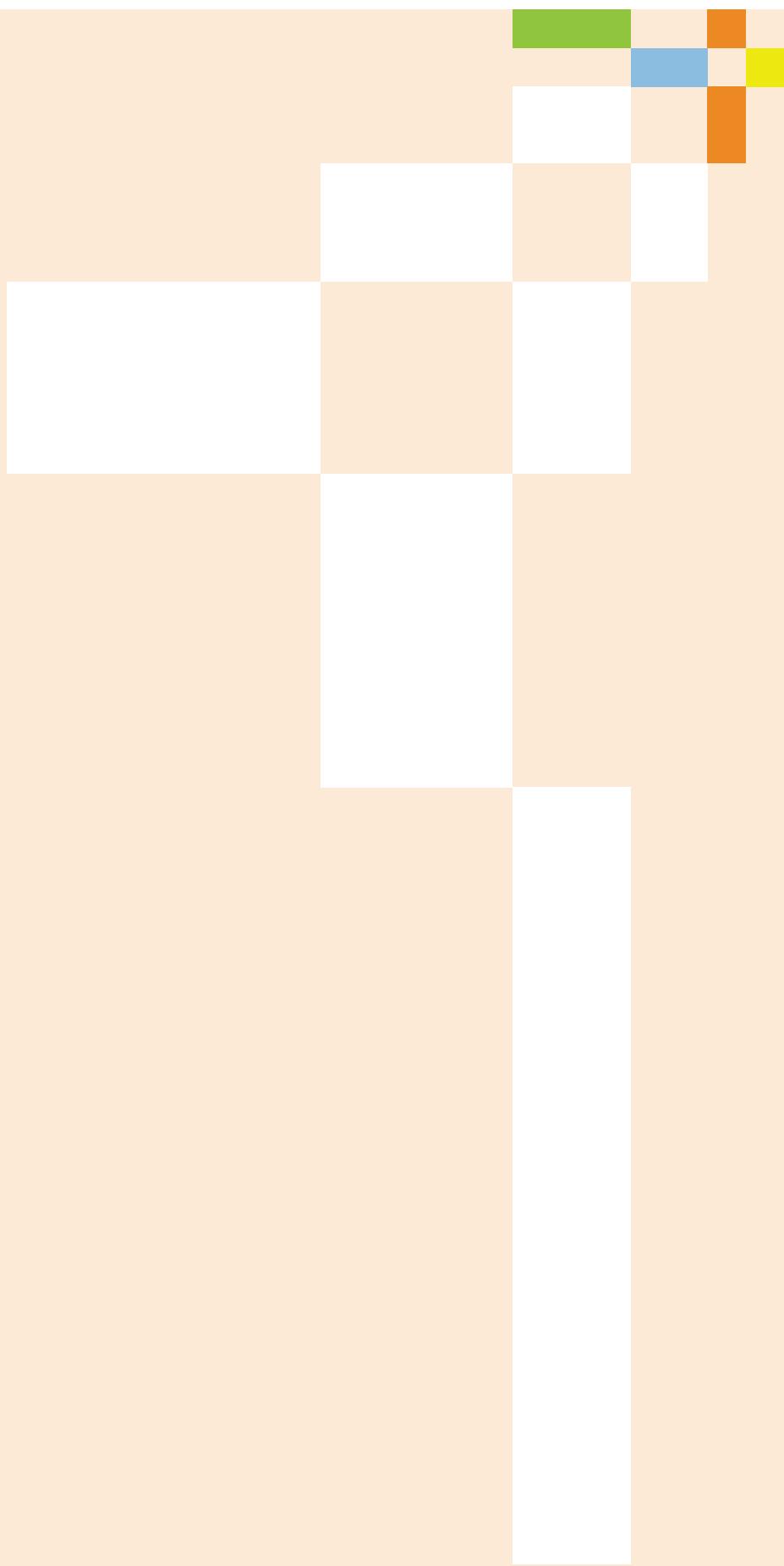
Kagermann, H., Nonaka, Y. (Eds.): *Revitalizing Human-Machine Interaction for the Advancement of Society. Perspectives from Germany and Japan* (acatech DISCUSSION), Munich 2019.

本書は著作権により保護されています。無断複写・転載を禁じます。本書の全部または一部を、データ処理システムを用いて特に翻訳、転載、図解、写真製版およびその他の方法により複製および保存することはできません。

Copyright © acatech – National Academy of Science and Engineering • 2019

協力: Joachim Sedlmeir (acatech)、Lisa Hubrecht (acatech)  
編集: Alexander Chavez  
構成案: Groothuis, Hamburg  
変換および製版: フラウンホーファーIAIS (ザンクト・アウグスティン)

本書の原本はwww.acatech.deにてご覧いただけます。



近年、ドイツや日本のような国では、労働力の成熟化、機械やインフラの老朽化といった社会的な問題に直面しています。また、人口の高齢化が進むと、身体能力や反応能力の低下により、生産性が低下するおそれがあると予想されています。サイバーフィジカルシステム(CPS)、人工知能(AI)、ロボティクスなどのデジタル技術がこうした社会的問題の解決に役立つと期待されていますが、これらの技術を適用すると、これまでには人間が行っていた定型認識タスクをその技術が肩代わりすることになり、社会的な変革が促されます。

本acatech DISCUSSIONでは、これらの問題をどのように定義すべきか、人と機械のインタラクション(HMI)の新しいアプローチが持続可能な社会という目標の達成に寄与できることは何かについて論じます。また、人と機械の質的な変化を背景として、デジタルトランスフォーメーションによって人が生涯を通してスキル向上に専念し、付加価値の高い仕事を継続的に創造する、人間中心のまったく新しい製造システムが可能になるということを提言します。