

研究諮問委員会

第二版

インダストリ 4.0 のテーマ分野

インダストリ 4.0 を成功させるための研究開発ニーズ

Responsible for the translation: Robot Revolution & Industrial IoT Initiative. The Initiative gratefully acknowledges the kind permission of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) to undertake and publish this translation.

翻訳について：この翻訳の責任はロボット革命&産業 IoT イニシアティブ協議会（RRI）にあります。RRI はドイツ連邦教育研究省（BMBF）の翻訳許可に対して深く謝意を表します。

原文は下記を参照ください。

<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Themenfelder.html>

推奨される引用元の表記

Industrie 4.0/acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (ed.): Themenfelder Industrie 4.0 - Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung of Industrie 4.0, 2nd revised version, 2022.3.
DOI: 10.48669/fb40_2022-04

刊記

出版者

プラットフォーム・インダストリ 4.0 研究諮問委員会/
acatech - ドイツ科学技術アカデミー

プロジェクトオフィス

acatech - ドイツ科学技術アカデミー事務局
カロリーネンプラッツ 4
80333 ミュンヘン

著者

ハルトムート・ヒルシュ＝クラインゼン教授
(ドルトムント大学)
ウーヴェ・クーバツハ博士 (SAP SE)
ライナー・シュタルク教授 (ベルリン工科大学)
ゲオルク・フォン・ヴィッシエルト博士
(シーメンス株式会社)
シモン・リツェ (acatech)
ヨアヒム・ゼードルマイア博士 (acatech)
シュテフェン・シュテークリッヒ博士 (acatech)

参加専門家

ライナー・アンデル教授 (ダルムシュタット工科大学)
クラウス・パウアー (TRUMPF 工作機械有限合資会社)
トーマス・パウエルンハンスル教授
(シュトゥットガルト大学/フラウンホーファーIPA)
アンゲリカ・ブーリンガー＝ホフマン教授
(ケムニッツ工科大学)
ヤン＝ヘニング・ファビアン博士 (ABB AG)
ウルズーラ・フランク
(ベッコフ・オートメーション有限合資会社)
ユルゲン・ガウゼマイアー教授 (バーダーボルン大学)
ゲリット・ホルヌク教授 (カッセル大学)
ギゼラ・ランツェ教授 (カールスルーエ工科大学)
ペーター・リッゲスマイアー教授 (カイザーズラウテル
ン工科大学/フラウンホーファーIESE)
フランク・ピラー教授 (アーヘン工科大学)
ペーター・ポスト教授 (フェスト有限合資会社)
ハラルト・シェーニク博士 (ソフトウェア株式会社)
ミヒャエルテン・ホンペル教授
(TU ドルトムント大学/フラウンホーファーIML)

編集・校正

カロラ・クラット (ベルリン)

デザイン・制作

GROOTHUIS
コミュニケーション・メディア・
マーケティング・デザインのためのアイデアと情熱の会社
groothuis.de

画像クレジット

© AdobeStock/j-mel

2022 年 7 月刊行

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

プラットフォーム・インダストリ 4.0 の研究諮問委員会は、戦略的な独立の機関として、プラットフォーム・インダストリ 4.0 とそのワーキンググループ、ならびに関与した連邦省庁、特に連邦教育・研究省（BMBF）に助言を行っています。

研究諮問委員会は、開発動向の**アンテナ**としてインダストリ 4.0 のパフォーマンスプロファイルの展開を観察および評価しており、将来の研究テーマの**イニシエーター**およびインダストリ 4.0 の導入のための**コンパニオン**または**アドバイザー**として位置づけられます。**内容的にはインダストリ 4.0 の文脈**において以下のテーマ分野に焦点を当てており、本書（最新版）においてこれらについて紹介します。

- 変革期の産業価値創造
- 技術開発の展望
- インダストリ 4.0 ソリューションのエンジニアリング
- 労働・企業・社会

研究諮問委員会がこれまでに刊行したすべて出版物は、下記のサイトに掲載されています。

www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/

目次

はじめに	3
1 変革期の産業価値創造	7
1.1 価値創造の経済的変革	7
プラットフォームエコノミー	7
ビジネスネットワークとエコシステム	9
製品とソリューションの複雑性、学際性、自律性の増加	10
新しいビジネスモデルと金融技術	11
1.2 生態学的に持続可能な価値創造	13
垂直統合と水平統合	13
持続可能性の評価	13
再生可能エネルギー	13
1.3 社会的かつ公平である持続可能な価値創造	14
2 技術開発の展望	15
2.1 持続可能でフレキシブルなモジュール生産システムとそのシステムアーキテクチャ	15
2.2 AI（工業用 AI）と自律性	17
2.3 センサとアクチュエータ	18
2.4 通信およびコンピューティング技術	18
2.5 データ主権に基づくデータスペース	19
2.6 技術製品およびシステムにおける生物学化	20
3 インダストリ 4.0 ソリューションのエンジニアリング	22
3.1 インダストリ 4.0 ソリューションの戦略的企画および設計	23
3.2 インダストリ 4.0 ソリューションのテスト	23
3.3 インダストリ 4.0 ソリューション開発のための新しい方法とツール	24
3.4 インダストリ 4.0 ソリューションの運用	27
4 労働・企業・社会	29
4.1 法的枠組み条件の形成	29
4.2 人間中心のシステムと労働の形成基準	30
4.3 能力開発と資格取得の緊急性	31
4.4 組織変革	32
4.5 社会政治的対話	33
要約	34
文献	36

はじめに

インダストリ 4.0 の実現により、デジタル化が第 4 次産業革命を可能にする。この激変は、新しいテクノロジー、労働と企業組織の形態、ビジネスモデルもしくは売上モデル、価値創造ネットワーク、動的なデジタルエコシステムなど、今日でもまだ完全に把握しきれないほどの全社会的な影響をもたらす可能性を秘めている。

技術的な実現手段と、インダストリ 4.0 の本来の目標、特にフレキシブルで自己組織的な製造によりコスト効率の良い個々の単品製品を大量に提供することは区別する必要がある。サイバーフィジカルシステム（CPS）の採用とその包括的なネットワーク化は、この変革の技術的基盤となっている。それは供給、生産、保守、配送、顧客サービスを互いに連携させ、硬直したバリューチェーンをフレキシビリティの高い企業横断的な価値創造ネットワークに変革することを可能にする。

インダストリ 4.0 は、市場サービスの新しいアイデアの開発に始まり、新しいタイプの生産および製造ソリューション、ライフサイクル全体を通じた情報の収集に至る価値創造全体の組織化と制御の新しいレベルを表しており、その基礎の上に個別化された製品および製品サービスシステム（PSS）がパーソナライズ可能になる。たとえば、インテリジェントなコンポーネントや機械やシステムが生産工程を能動的に誘導する。装置が自発的に動作を誘発して、次の作業ステップを決定する。その際に生じる大量のデータを用い、進歩した分析と人工知能（AI）により、プロセスをリアルタイムに分析して最適化することができる。ここで基準となるのは、たとえばコスト、可用性、資源消費量などである。この場合に技術的な観点から新しいのは、すべての物理的な物体や PSS がいわゆるデジタルツイン¹を持つことである。さらに、インダストリ 4.0 を実施する際の焦点は、革新的なビジネスモデルの構想と実現の広範囲に及ぶ可能性に、また、持続可能性の観点から特に循環型経済の実現に置かれている。

インダストリ 4.0 の現状

2010 年にインダストリ 4.0 プロジェクトが発足して以来、政治、経済、科学は共同で大きな成果を達成することができた²。多くの企業はデジタル化を拡充することによってインダストリ 4.0 の前提条件を作り出し、インダストリ 4.0 の一部を巧みに導入した。これには、たとえば様々なレベルにまたがるデータ統合が含まれる。それでもインダストリ 4.0 の全面的な実装は、ドイツの工業界にまだ十分に定着していない。しかも、インダストリ 4.0 の中心的な考え方は、必要な技術を導入することにとどまらない。むしろ、工業の幅広い分野で既存の価値観を変える可能性が期待されている。これには、革新的なデータ駆動型のプラットフォームに基づくビジネスモデルにより、デジタルエコシステムにおいてカスタマイズされた製品やサービスを大量生産のコストで作りに出すことが含まれる。インダストリ 4.0 研究活動の助成について見ると、これまでの高い研究モメンタムにもかかわらず、インダストリ 4.0 をさらに調査し、実際の場面で広範囲に実装するためには、様々なテーマに重点を置いた追加の措置とイニシアティブが必要であることが同時に確認される³。この分野では科学と企業の大きなコミットメントと連携は、今後も促進され推進されなければならない。共同研究におけるイノベーションの可能性を活用することは、企業、特に中小企業にとって、研究開発協力を参加する大きなインセンティブとなる。さらに、インダストリ 4.0 の活用は、国内およびグローバルな競争において、目に見えて多くの企業戦略上の利点をもたらす。

インダストリ 4.0 は、ドイツにおける価値創造を体系的に確保し、さらに発展させるための鍵であり、それによって現代の社会政策上の課題の克服に決定的に寄与することができる。2019 年 9 月に初めて「インダストリ 4.0 のテーマ分野」が発表されて以来、特に経済システムに対する国内およびグローバルな影響を背景として、インダストリ 4.0 の重要性は近年ますます高まっている。気候危機が公に語られるようになって行動することへの圧力が著しく高まった結果、持続可能性の文脈におけるイノベーションが、製品やサービスの創造においてライフサイクル全体を通じて不可欠となっている。

1 以下のインダストリ 4.0 を成功させるための研究ニーズの概観は、Stark/Damerou（2019）の次の定義を参考にしている。「デジタルツインとは、アクティブな特定の製品（リアルな装置、オブジェクト、リアルな機械、サービス、またはリアルな無形財産価値）、または特定の製品サービスシステム（製品と関連サービスからなるシステム）のデジタル表現であり、選択された特徴、特性、状態および挙動を、モデル、情報、データを用いて個々のライフサイクル内または異なるライフサイクルにわたって捕捉する。」この場合、中心的な特徴は、現実存在する製品、機械、またはサービスが、IoT データ（デジタルシャドウ）を介して元のデジタルマスターモデルまたはデジタルプロトタイプと関連付けられることであり、これが本来の「ツインング側面」である。

2 参照：研究諮問委員会/acatech 2021a

3 参照：研究諮問委員会/acatech 2021b

新型コロナパンデミック、ロシアのウクライナ侵略戦争、および重要資源の不足は、バリューチェーンと価値創造ネットワークの脆弱性を浮き彫りにした。ビジネス拠点としてのドイツの技術的主権は、国際競争の中でますます失われる危険性が高まっている。さらに、発展しつつある動的なデジタルエコシステムの中で、多国間のデータ交換を保証し、スケーラビリティの高いソリューションを生み出すために、相互運用性の問題に統一的なルーチン、標準および規格によって答えなければならない。このような背景から、インダストリ 4.0 とその実装に関する今後の研究活動が、実際の場面でますます戦略的に重要であることが明らかとなる。

未来への展望

現代の大きな社会的課題は、インダストリ 4.0 を活用した価値創造の包括的な変革を求めている。持続可能性、レジリエンス、相互運用性、技術的主権といったテーマが、これまで以上にインダストリ 4.0 の研究の焦点となっている。研究の目的は、これらの戦略的目標を実現するうえでインダストリ 4.0 の可能性を十分に発揮させるための前提条件を作り出すことでなければならない。

プラットフォーム・インダストリ 4.0 の研究諮問委員会は、持続可能性を包括的に理解することから出発している。持続可能性とは、生態学的、経済的および社会的な目標を同時に達成することで実現される。これら 3 本の柱は、対等な関係で成り立っている。それゆえ持続可能性を全体的に実現するためには、これらの柱の相互作用も考慮する必要がある。1本の柱だけが最適化され、他の柱がないがしろにされることがあってはならない。ここに、インダストリ 4.0 の枠内における研究開発ニーズがある。その結果、持続可能性の生態学的側面をデジタル化によって促進し、資源やエネルギー効率の改善、排出量の削減に貢献することができる。さらに、インダストリ 4.0 は、気候変動に配慮した循環型経済の基盤を構築する。社会的な観点から見ると、労働のデジタル化は、熟練労働者や管理者の教育や訓練に、また、組織やグローバルな枠組みの条件に、特に人と機械の新しい協力形態を背景として、新たな要求を突きつけることになる。これらの要求には、相応の教育内容によって応えなければならない。こうした生態学的および社会的側面は、持続可能性の経済的側面と相互に作用して初めて達成することができる。ここでの目標は、国際競争力の点でデータエコノミーおよびプラットフォームエコノミーに成功するためのコンセプト、方法およびインフラを開発し、インダストリ 4.0 における革新的なビジネスモデルのために AI を活用することでなければならない。ここでは研究および移転合同プログラムによるプリコンペティティブな助成が有効であることが証明されている。こうして、国際競争の中で、ネットワーク化された世界市場におけるドイツ産

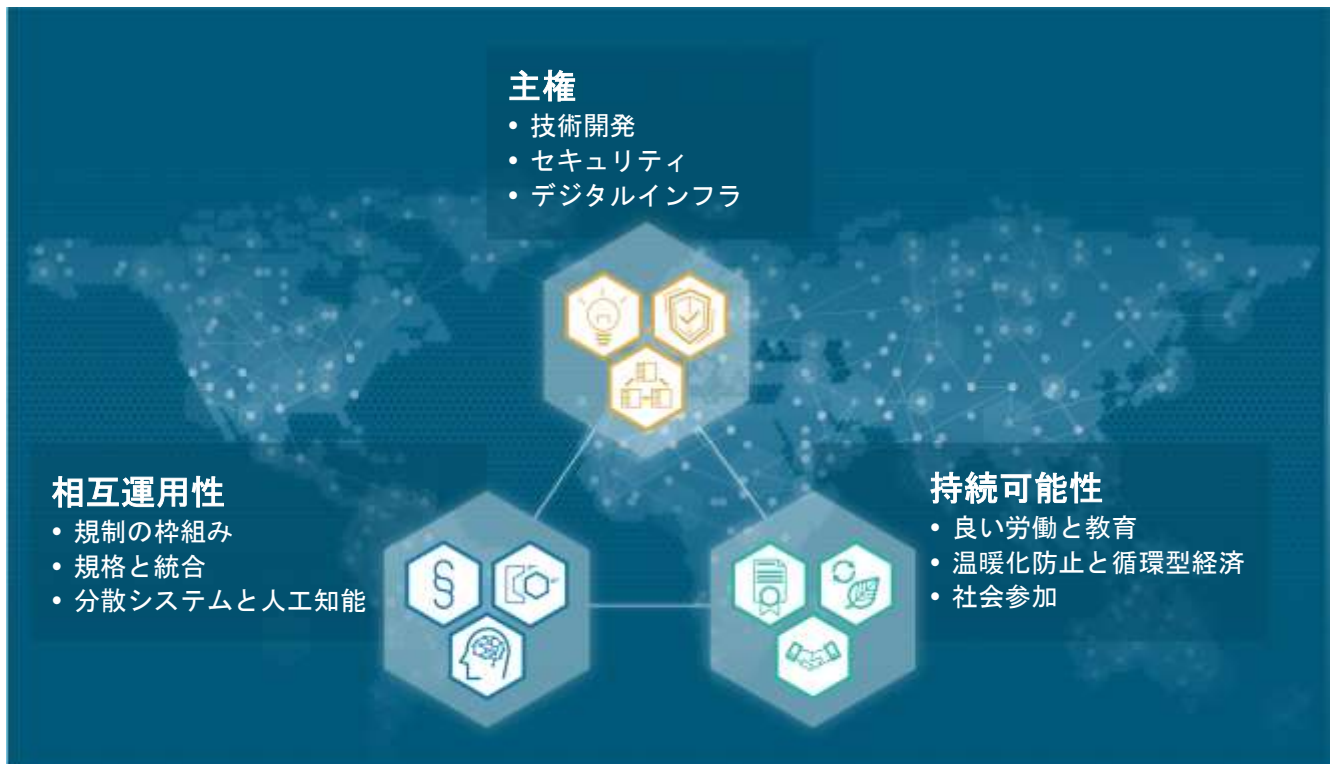
業の先駆的な役割が維持され、さらには拡大される。それによって技術的な卓越性と社会政策上の目標が等しく達成され、強化されることできる。

持続可能性の側面に加え、インダストリ 4.0 における価値創造ネットワークのレジリエンスと技術的主権が、今後の研究開発ニーズの焦点となりつつある。特に新型コロナパンデミックやウクライナ戦争は、レジリエントな価値創造ネットワークの重要性と必要性を明確に示した。データ主権を確保すると同時に、いわゆるハイパースケーラー（グーグル、マイクロソフト、アマゾンなど）への依存度を低減するための前提は、科学をベースとした（国家間の）データ主権に基づくデータスペースの積極的な構築にある。これらは、データ駆動型のスケーラブルなビジネスモデルを実現することを目的として、欧州の法制度や価値体系に従ってデータ交換の基礎を形成する。さらに、相互運用性、ひいては多国間のデータ交換を可能にするためには、インダストリ 4.0 に適した標準化および認証プロセスと、IT セキュリティが必要である。

今後の研究開発ニーズから、インダストリ 4.0 における価値創造が、社会の中心的な議論や政治問題にどこまで踏み込むことができるかが明らかになる。インダストリ 4.0 は、イノベーションの屋台骨をなすものである。統合に関するテーマ（たとえばトレーサビリティ、信頼性、倫理を考慮したインダストリ 4.0 におけるデータスペースと AI）だけでなく、応用に関するテーマ（たとえばインダストリ 4.0 による持続可能なカーボンニュートラル生産）にも取り組まなければならない。これにより、この分野における研究開発は、現代の転換課題に対する解決策を実践に移すための決定的な調節ねじの役割を果たす。産業のデジタル化は、最新の多様な研究全般からイノベーションを生み出すとともに、人々のために具体的な応用とそれらの目的を示すための決定的な前提条件となるものである。

このようにして、インダストリ 4.0 は、工業界のデジタル化のための国際的に認知されたベンチマークとブランドとしてさらに強化され、その結果、ドイツから始まる第 4 次産業革命が世界中で成功裏に実現されよう。BDI、BITKOM、VDMA、ZVEI といった協会を含む、科学、労働組合、政治、経済の相乗的な協力が、プラットフォーム・インダストリ 4.0 という素晴らしい環境を生み出した。プラットフォーム・インダストリ 4.0 は、ビジョン 2030 により、多様性と、多元性と、すべての参加者にとって公平な競争を特徴とするオープンなデジタルエコシステムを形成するための全体的なアプローチを策定した⁴。将来の欧州産業社会の礎となるのは、企業の自由の維持、データと情報のセキュリティ、そして個人の権利の保護である。

図 1：プラットフォーム・インダストリー 4.0 のビジョン 2030



出典：プラットフォーム・インダストリー 4.0 2019a

このビジョンを成功させるために、プラットフォーム・インダストリー 4.0 は、異質性、ダイバーシティ、専門化を特徴とするドイツ産業を背景に、相互にリンクした 3 つの戦略的行動領域、すなわち主権、相互運用性、持続可能性を策定した⁵。これらの行動領域は小項目によって具体化され、オープンでフレキシブルなエコシステムの分散戦略、および自由で社会的な市場経済の価値に従うデジタルエコノミーの形成と調和している⁶。

研究諮問委員会は、ビジョン 2030 を明確に支持している。それゆえ以下のテーマ分野に記載されている研究開発ニーズは、ビジョンの戦略的行動領域にもはっきり言及しており、それらの実現もしくは実施に重要な貢献を果たすものである。また、これに関する内容的な関連付けは、それぞれのテーマ分野を扱った各章の冒頭に具体的に記されている。

さらに、インダストリー 4.0 のテーマ分野は、連邦教育研究省（BMBF）のプログラム「価値創造の未来」⁷ の中心的な問題およびテーマ群にも取り組んでいる。このプログラムは、将来性のある製品、付加価値の高い生産、顧客志向のサービス、そして高い品質の労働を確保するための基礎を築くことを目的としている。価値創造について研究するために取った視点（価値創造システムのダイナミクス、価値創造に関わる人間、ビジネスモデルとバリュープロポジション、

資源、社会技術的および方法論的イノベーション、ネットワークとコラボレーション）は、研究諮問委員会のインダストリー 4.0 テーマ分野でも取り上げられている。

本書の目標と構成

このような背景から将来を見据えると、インダストリー 4.0 がまだまだ完成していないことは明らかである。産業の変革を成功させるためには、現状を知るだけでなく、現在ないものや発展の機会とリスクを明らかにするために、基礎づけられた分析が必要である。それには、政治、経済、科学、社会の各ステークホルダーが一体となった取り組みが必要である。研究諮問委員会は、ここで決定的な貢献をすることを目指している。独立の戦略的機関として、研究諮問委員会はプラットフォーム・インダストリー 4.0 とそのワーキンググループ、関与する連邦省庁、特に BMBF に助言を行う。また、インダストリー 4.0 分野における今後の研究開発ニーズを早期に把握し、対応策を提示することも、その役割の一つである。そうすることで研究諮問委員会は生産、サービス、労働の研究を早い段階で互いに連携させ（これは BMBF プログラム「価値創造の未来」が目指す目標でもある）、連邦政府の研究助成をさらに拡大する方向性を示すことに寄与できる。

5 参照：プラットフォーム・インダストリー 4.0 2019b, p.3

6 参照：同上

7 参照：連邦教育研究省 2021

研究諮問委員会は現在、将来の研究開発ニーズを区分するための 4 つのテーマ分野を特定しているが、これらはインダストリ 4.0 とドイツのイノベーションシステムを成功裏に形成するために決定的となるであろう。これは 2019 年に研究諮問委員会が初めて発表したテーマ分野を更新し追加を施したものである。これらの提言は、政策立案者、研究機関および企業に向けられている。以下の章で詳しく説明する 4 つのテーマ分野は、次の通りである。

1. 変革期の産業価値創造
2. 技術開発の展望
3. インダストリ 4.0 ソリューションのエンジニアリング
4. 労働・企業・社会

研究開発は、今後もインダストリ 4.0 に焦点を当て続けなければならないが、それはこれに必要なキーテクノロジーの活用にも向けられているわけではない。既存の製造工程やルーチンを最適化する可能性に加え、方法論的なアプローチをさらに発展させることにも、インダストリ 4.0 を的確に実装するチャンスがある。この場合、データ駆動型ビジネスモデル、プラットフォーム市場、データスペース、デジタルエコシステムのための全く新しいアプローチを検討して設計する必要がある。これらの変化は、常にインダストリ 4.0 システムの人間志向の設計と、相応の法的もしくは制度的な枠組み条件を伴うものでなければならない。インダストリ 4.0 の中心には「人」がいる。人の役割は、形成し、そして決定することである。人間はこの変革に積極的に参加して、インダストリ 4.0 環境で主権を持って行動でき、その中で効果的かつ安全に働くのでなければならない。このようにして、インダストリ 4.0 は社会的な変革を持続的に形成し、繁栄を確保することができるのである。