

先端エレクトロニクス研究グループ

# エンボディドAIは協働ロボット の誕生につながるのか

汎用ロボットが職場でできること、まだできることを現実的に考察する。

本稿は、アーサン・サイード、アニ・ケルカー、クリスチャン・ヤンセン、ジョナサン・ティリー、マーク・パテル、マイケル・チュイと、ヤン・ポブロッキ、マット・ウェブスター、サルタク・ヴァイシュ、シトス・ネパールが共同で執筆し、マッキンゼーのAdvanced Industries、QuantumBlack、AI by McKinsey、Operations Practicesの見解を代表している。監訳は芝野菜乃子、東直彦、工藤卓哉。



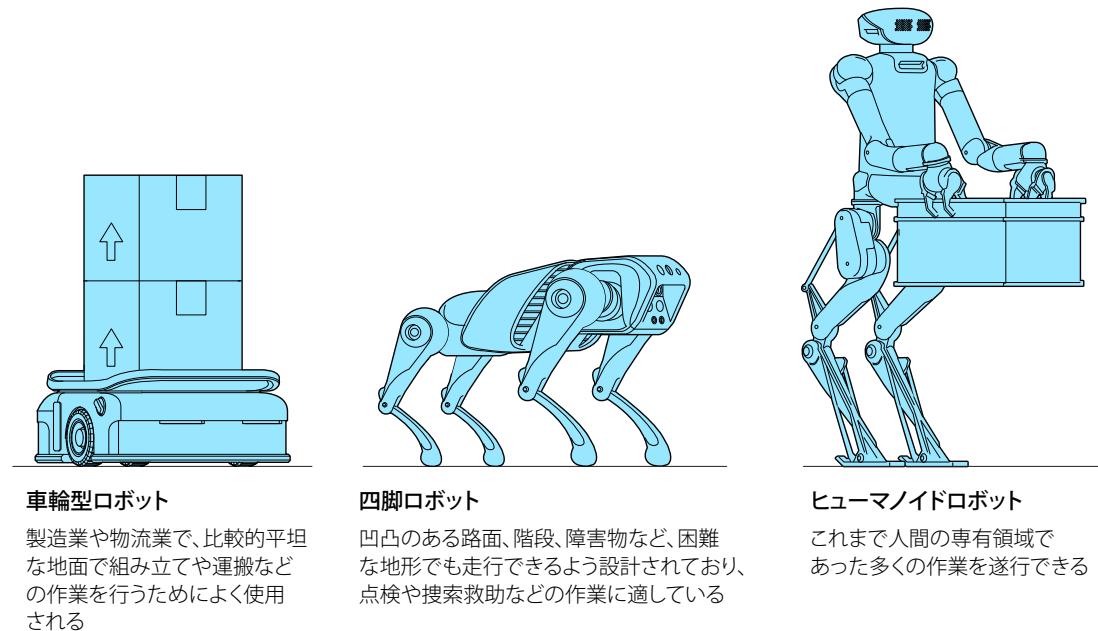
C-3POの洗練された外交術からR2-D2の戦場での勇姿まで、ロボットは長い間私たちの想像力をかきたててきた。かつてはSFの世界にとどまっていたものが、いまや産業界で現実のものとなりつつある。ますます高性能になるエンボディドAIを搭載した汎用ロボットが、倉庫、工場、病院、畠などでテストされている<sup>1</sup>。旧世代のロボットとは異なり、エンボディドAIを搭載したロボットは、あらかじめプログラムされた単一のタスクをこなすだけでなく、動的な環境に適応し、新しい動作を学習し、さらには口頭での命令に従うこともできる。

現在の話題の大半はヒューマノイド(人間に似たロボット)に集中しており、直近の活躍にはマラソン完走やバックフリップの実演などがある。汎用ロボットには、さらにはかにもさまざまな形態があり、移動に4本の脚や車輪を使うものもある(図表1)。しかし経営幹部が自動化のロードマップとワークフォースの進化を検討する際に重視すべきなのは、ロボットが人間に見えるかどうかではなく、人間用に設計された環境でロボットがタスクを柔軟にこなせるか否かである。その理由は、多目的サブカテゴリに属するロボットを含む汎用ロボットは、梱包、ピッキング、持ち上げ、検査、移動、人との協働をリアルタイムで行うように訓練され、職場のチームの一員となる可能性があるからだ<sup>2</sup>。

図表1

### 汎用ロボットにはさまざまな形態がある

#### 移動・操作能力



McKinsey & Company

<sup>1</sup> ロボットに組み込んだAIは、物理的世界における物体の動作を指示することが多いため「エンボディドAI(身体性のあるAI)」と呼ばれる。

<sup>2</sup> 多目的ロボットが特定の環境内で関連する限られたタスクをこなすようにプログラムされているのに対して、汎用ロボットは、さまざまな環境下で関連のない多様なタスクをこなすことができる。

しかし、ロボット革命はどれほどのスピードで起こるのだろうか。エンボディドAIとロボティクスは明らかに進歩しているが、スケールアップして真の価値を提供するのに十分な速さ、安さ、信頼性を備えた進化については疑問が残る。ポテンシャルは非常に大きいが、その進展は複数の技術の進歩、規制要因、組織の準備態勢に左右されるだろう。経営幹部は、先行きの強気・弱気を予測するより、汎用ロボットが価値を提供できる環境について検討する方が有益だろう。本稿では、汎用ロボット技術の可能性を解き明かし、課題点を指摘することにより、経営幹部が自社ビジネスにおいて汎用ロボット技術がいつ、どこで、どのように重要となるかを評価するための実践的な視点を提供する。

### なぜ話題になっているのか

汎用ロボットをめぐるモメンタムは現実のものとなっている。何が変わり、なぜ今なのか。

#### 投資とイノベーションの急増

このセクターは爆発的な活況を呈している。汎用ロボットに関する資金調達額は2022年から2024年にかけて5倍に増加し、年間投資額は10億ドルを超え、Figure AI、Skild AI、Agility Roboticsなど大手の新興企業が数億ドルを調達している。特許出願件数も急増し、2022年以降の年平均成長率は40%となっている。

各国政府も注目している。中国は、エンボディドAIを国家的優先事項に指定し、1,380億ドルのイノベーション基金を設立した。

マッキンゼー・グローバル・インスティチュートの最新リサーチレポート [The next big arenas of competition](#) では、エンボディドAIとロボティクスが将来のグローバルな生産性とデジタルインフラを形成する5つの新たなフロンティアの1つであると指摘している。

#### ロボティクスの頭脳となるAI基盤モデル

大規模言語モデルがチャットボットの自然な会話を解き放ったように、視覚言語アクション(VLA)基盤モデルにより、ロボットは、視覚的な合図を解釈し、話し言葉の指示に従って複雑なシーケンスを実行できるようになる。この基礎モデルは、知覚、推論、意思決定など主要なロボット機能をサポートする。複数のインプット(触感や力など)を取り込んで動作するマルチモーダルセンサーと組み合わせることにより、手作業で段階的にプログラムする必要もなく、人間を観察することで学習できるシステムを構築する。

#### モビリティと器用さにおけるハードウェアのブレークスルー

ロボットは現在、かつてないほどアジャイルで、安定性が高く、器用になっている。多くのモデルが、不規則な形状の物品を持ち上げるような構造化していないタスクを処理できる。同時に、アクチュエータ(蓄積されたエネルギーを動きに変換するモーターやその他の装置)やエッジコンピューティングの改良により、意思決定が加速し、エネルギー効率が着実に向上している。

#### 人間中心に設計されたスペースでの共存性

ヒューマノイドは写真映えするだけでなく実用的だ。狭い廊下を移動したり、ドアノブを回したり、工具を使ったり、棚から品物を取り出したり、人のために設計したスペースで操作できる。すべてのユースケースで二足歩行ロボットが必要なわけではないが、ヒューマノイドロボットは、ワークスペースを再設計することなく人間の環境をナビゲートする能力を備えていることは、大きな利点である。

## 安全性とコラボレーションへの関心の高まり

「コボット」、つまり人と一緒に安全に働くように設計されたロボットが、より賢く、より安全になっている。センサーフュージョン(視覚・聴覚・触覚の統合)の改善、知覚モデルの向上、ロボットが通常より弱い圧力をかけるべきタイミングを指示するプログラム可能な力制限機能などにより、さまざまなリスクが減少した。すでに、Agility Robotics社のDigitのようなロボットが物流センターで安全に稼働している(サイドバー「充実したロボット機能」参照)。

## どのような課題があるのか

最近の進歩にもかかわらず、汎用ロボットはまだ現場に持ち込めばすぐ使えるほどシンプル(プラグアンドプレイ)ではなく、その性能は多くの分野で最適とは言えない。北京で開催された最近のハーフマラソンでは、21体のヒューマノイドランナーが参加し、最速のロボットが2時間40分を記録したが、人間のトップは1時間弱でゴールしていた<sup>3</sup>。さらなる技術的飛躍が実現するまでは、ヒューマノイドが人間を表彰台から追い落とすことも、他の多くの作業で人間と競い合うこともないだろう。現在の大げさな宣伝やSNSなどで拡散されたロボットのデモは期待を非常に高いものにしているが、ロボットのエコシステムは、ソフトウェア、ハードウェア、経済性、運用面でかなりのハードルを乗り越えなければならない。

## 充実したロボット機能

**業界を問わず、汎用ロボットはその形態と同様にさまざまな機能を果たしている。最近のアプリケーションをいくつか見てみよう:**

- Agility Robotics社は、倉庫内で商品を運んだり置いたりできる「Digit」と呼ばれるロボットを開発した。このロボットは動的な調整が可能で、現在、物流プロバイダーGZO社のさまざまな現場で使用されているほか、アマゾンの倉庫でもテストが行われている。
- BMWは、カメラ、マイク、その他のセンサーを搭載した汎用ロボットを使用して板金部品の操作と積載を行い、機械の工具内で部品を正確に位置決めできるようになっている<sup>1</sup>。

- Boston Dynamics社は、最近同社に出資した現代自動車と協力し、ロボットを活用した現代自動車の工場における生産性と効率性の向上について検討している。
- アマゾンは最近、フルフィルメントセンターで密集した区画から商品をより簡単にピッキングできる新しいロボット「Vulcan」を導入した。
- Nelipak Healthcare Packaging社は、トレイや蓋をヒートシール機に装填したり、滅菌が完了したパッケージを取り出すなど、さまざまな作業を行なうロボットの利用を検討している<sup>2</sup>。

汎用ロボットを使用すれば、必ずしも雇用を削減することなく生産性を向上させ、運用コストを大幅に削減できる可能性がある。さらに、安全衛生問題や製品の品質など、長年の懸案事項を解決する上で重要な役割を果たすことも期待できる。汎用ロボットはまた、人間と協働することで労働力不足の解消に寄与することも可能だ。特に、人間が退屈・困難・危険を感じるような作業を代行できるだろう。

<sup>1</sup> "Humanoid robots for BMW Group plant Spartanburg," BMW Group (2024年11月11日)。

<sup>2</sup> Jim Lawton, Bert Verheugen, and Seán Egan, "How collaborative robots are changing medical device packaging," Machine Design (2018年8月6日)。

<sup>3</sup> Tanika Godbole, "Robots lose against humans in half-marathon," Deutsche Welle (2025年4月19日)。

### 基盤モデルには、依然として膨大なタスク固有のデータが必要

膨大なインターネット上のデータセットで訓練された基盤モデルは、実世界の物理的環境では苦戦を強いられる。ロボットに板金加工させたり食器洗い機に食器を入れさせるには、ラベリングした画像だけではなく、動画やシミュレーションラボ、実生活から得た数十億もの物理的相互作用の事例が必要になる。この分野では、利用可能なデータを増やすため、シミュレーション環境の構築と拡張を競っている。

### 電力とバッテリーの制約により稼働時間が減少

動的タスクを実行するヒューマノイドロボットには、高い放電率を持続できるバッテリーが必要である。このような性能を長期間維持することは困難であり、過熱やバッテリー寿命の低下につながる可能性がある。現在、最先端のヒューマノイドロボットが可能な稼働時間は、従来型バッテリーで通常2~4時間であり、人間による1シフトの作業時間にも及ばない。重いものを持ち上げたり、大きなトルク(回転力)を伴う作業は、バッテリーの消耗を早める。しかも、充電インフラは未熟なままだ。産業用ロボットの普及には、より長い稼働時間、より高速な充電、より優れたバッテリー交換能力が必要だ。

### 操作は依然として高価で時間がかかる

人間の手は、何十もの筋肉、骨、靭帯、関節、腱、神経の相互作用によって機能している。正常に機能している場合、手には指、親指、手首を含む最大27の自由度(動き方の数)がある<sup>4</sup>。ロボットの「手」(エンド・エフェクター)も複雑ではあるが、人間の手の正確で繊細な動作を完全に模倣することはできない。例えば、Sanctuary AI社の最先端ヒューマノイドの手の自由度は21しかなく、人間の手よりも可動域に制約がある<sup>5</sup>。エンドエフェクターの器用さ、スピード、感度が向上するまで、靴ひもを結んだりバナナの皮をむいたりといった作業は今後も月面着陸レベルの難題のままだろう。

触覚認識とコンプライアント・アクチュエータ、つまり力を受けると伸縮する柔らかい要素を持つアクチュエータは有望な進歩を遂げているが、まだ工業用にはなっていない。加えて、多くのロボットは独自のアクチュエータや触覚センサーに依存しており、それらは限られた量しか製造されず、多くの場合、中国で製造されているため欧米のOEMにとって供給リスクとなっている。

### サプライチェーンの問題や統合の問題が頻発

汎用ロボットのほとんどは、まだ広く受け入れられている規格がなく、オーダーメイドの部品から組み立てられているため、生産規模を拡大することが難しい。サプライチェーンのボトルネック、特に高精度のアクチュエータとセンサーのために生産が遅れ続け、工場システムとの統合は依然として高価で一貫性がない。

より重い負荷に対応し、より滑らかな動きを提供するためロボットに使用される遊星ローラーねじの不足は、トルクセンサーの出荷の遅れと同様によくあることだ。着実に増加する需要は、さらに大きな制約を生み出す可能性がある。

さらに、ロボットを機能させるために、開発者はハードウェアとソフトウェアを複雑な技術スタックに統合しなければならず、産業化は難しい。

<sup>4</sup> George ElKoura et al., Handrix: Animating the human hand, Eurographics Association (2003年7月26日)。

<sup>5</sup> "Sanctuary AI shows how reinforcement learning can control hydraulic robotic hands," Robot Report (2025年4月3日)。

### 高コストと投資回収の遅れによる導入遅延

ヒューマノイドロボットの開発と配備には多額の費用がかかる。製造コストは設計の複雑さや材料によって異なるが、通常1台あたり3万ドルから15万ドルになる<sup>6</sup>。一般的な必須部品の多くは最も高価な部類に入り、その中には1本あたり1,350ドルから2,700ドルの価格帯となる遊星ローラースクリューも含まれる<sup>7</sup>。JPモルガン・チェースによれば、このスクリューは、減速機とともに一般的なヒューマノイドの部品表(BOM)の約33パーセントを占めている<sup>8</sup>。

全体として、汎用ロボットのコストは1台あたり約15,000ドルから250,000ドルで、初期のパイロットでは投資回収期間が2年を超えることが多い<sup>9</sup>。ヒューマノイドのメンテナンスコストも高い。輸送費と技術者の労力を含め、1回の修理に最大1,000ドルが必要な場合があり、ダウントIMEが生じて出費がかさむ可能性がある<sup>10</sup>。

汎用ロボットの普及には、製造コストとメンテナンスコストの低減が必要である。特に利益率の高いセクター以外では、リターンを加速させる必要がある。

### 組織と人材の障壁が前進を遅らせる

最後に、採用は技術だけの問題ではない。企業は、従業員の抵抗、ロボットを操作・保守する技術者の不足、パイロットを拡大するための明確なプレイブックの欠如に直面している。また、安全性、倫理、規制の枠組みもあいまいなままであり、多くの懸念がある。例えば、ヒューマノイドロボットの重量は以前より軽くなったが、それでも落下したり故障したりすれば人を傷つけるには十分な大きさだ。Boston Dynamics社のAtlasは、当初約150kgだったが、現在は約52kgにまで軽量化されている。リーダーシップの足並みが揃わず、明確なKPI、安全ガイドライン、説明責任がなければ、有望なパイロットでさえ失速しかねない。

### 市場の見通はどうか

このような課題にもかかわらず、汎用ロボットの市場ポテンシャルは非常に大きい。しかし、その時期、導入のパターン、技術的の成熟度については不確定要素が残っている。

マッキンゼーは、産業や地域ごとの汎用ロボットの採用状況を分析し、複数のシナリオに基づいて潜在的な市場規模を推計した。ベースケースは、トレーニングデータ、ハードウェアの価格、統合機能において中程度の進歩があり、文化面・組織面な導入も着実に進むことを想定している。このシナリオが実現すれば、市場は2040年までに約3,700億ドルに達する可能性がある(図表2)。そのうちの約50%は中国からもたらされる可能性があり、残りはヨーロッパと北米で分け合う形となる。主な用途としては、倉庫物流、軽工業、小売業、農業、医療などが挙げられる。

<sup>6</sup> “Pro-Suuma Model maintains its lead. Goldmann Sachs says humanoid robot manufacturing costs range from \$30,000 to \$150,000 per unit, depending on the model. Let's look at the competition” Impact Lab (2024年5月15日)。

<sup>7</sup> “The hidden hardware powering the humanoid revolution: Planetary roller screws take center stage,” Impact Lab (2025年4月27日)。

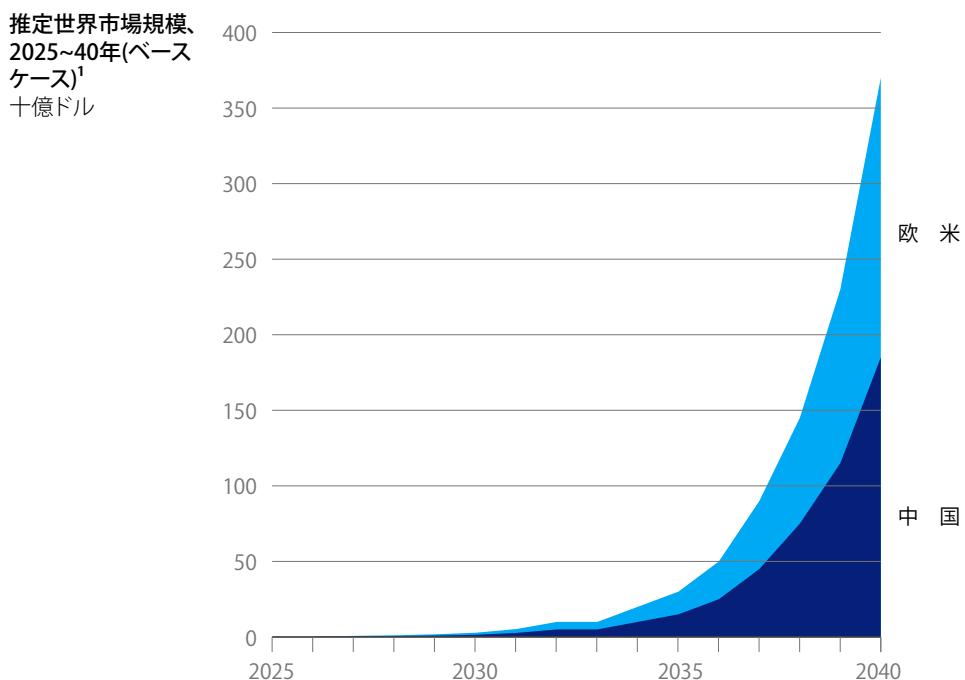
<sup>8</sup> “The hidden hardware powering the humanoid revolution: Planetary roller screws take center stage,” Impact Lab (2025年4月27日)。

<sup>9</sup> Nickie Louise, “Agility Robotics raises \$400M to scale bipedal robot Digit as humanoid race heats up,” TechStartups.com (2025年3月31日)、Loz Blain, “Boston Dynamics shows off another major leap in humanoid mobility,” New Atlas (2025年3月19日)。

<sup>10</sup> RobustAI Blog, “Humanoid robots: Dollars and GPTs,” (2024年5月21日)。

図表2

現在のペースで進歩すると、汎用ロボット市場は2040年までに3,700億ドルに達する可能性があり、その約半分は中国が占める



<sup>1</sup>ベースケース(基本シナリオ)では、中国におけるロボット導入が一定の速度で進むことを想定。この導入促進要因としては、中国政府のロボット導入補助金、導入口ロボットの普及拡大(新市場や新しい作業用途の拡大を含む)、一般的なハードウェアの学習曲線に伴うユニットコストの低下(欧米では1台あたり4万ドル、中国では3万ドル)、および機能の開発サイクル(3~4年)が挙げられる

McKinsey & Company

ベースライン推計値は期待が持てるものの、多くの分野の進展次第である。重要な仮定(前提となる状況)には次のようなものがある:

- 基盤モデルの改良が続き、豊富な物理的相互作用のデータセットで訓練されている。
- バッテリー技術と電力管理が十分に向上し、自律稼働時間が2倍に延びる。
- 人の手のような操作が、より安く、より堅牢になる。
- 部品サプライチェーンが統合され、標準化される。
- ビジネスリーダーが長期的なROIを受け入れ、新しいワークフローとスキルセットのために組織を整備する。

## 経営幹部が今すべきこと

汎用ロボット産業は転換期を迎えているのかもしれない。例えばヒューマノイドでは、世界的な生産能力が急速に拡大しており、多くの企業がさらなる増産に向けて意欲的な計画を発表している。これにはAgility Robotics社も含まれ、オレゴン州の新施設におけるDigitロボットの生産について、2025年の1,200台から2027年までに7,500台へ拡大する計画である。最終的に、Agility Robotics社は、この施設に年間1万台の生産能力を持たせたいと考えている。中国のTianlian Robotics社も生産施設を建設中で、完成時には年間1,000~3,000台のヒューマノイドロボット生産を目指している。

ヒューマノイドやその他の汎用ロボットの完全なスケールアップには何年もかかるかもしれないが、最も前向きな企業は、ロボティクスが職場と日常生活の両方を変革する未来に向けてすでに準備を進めている。

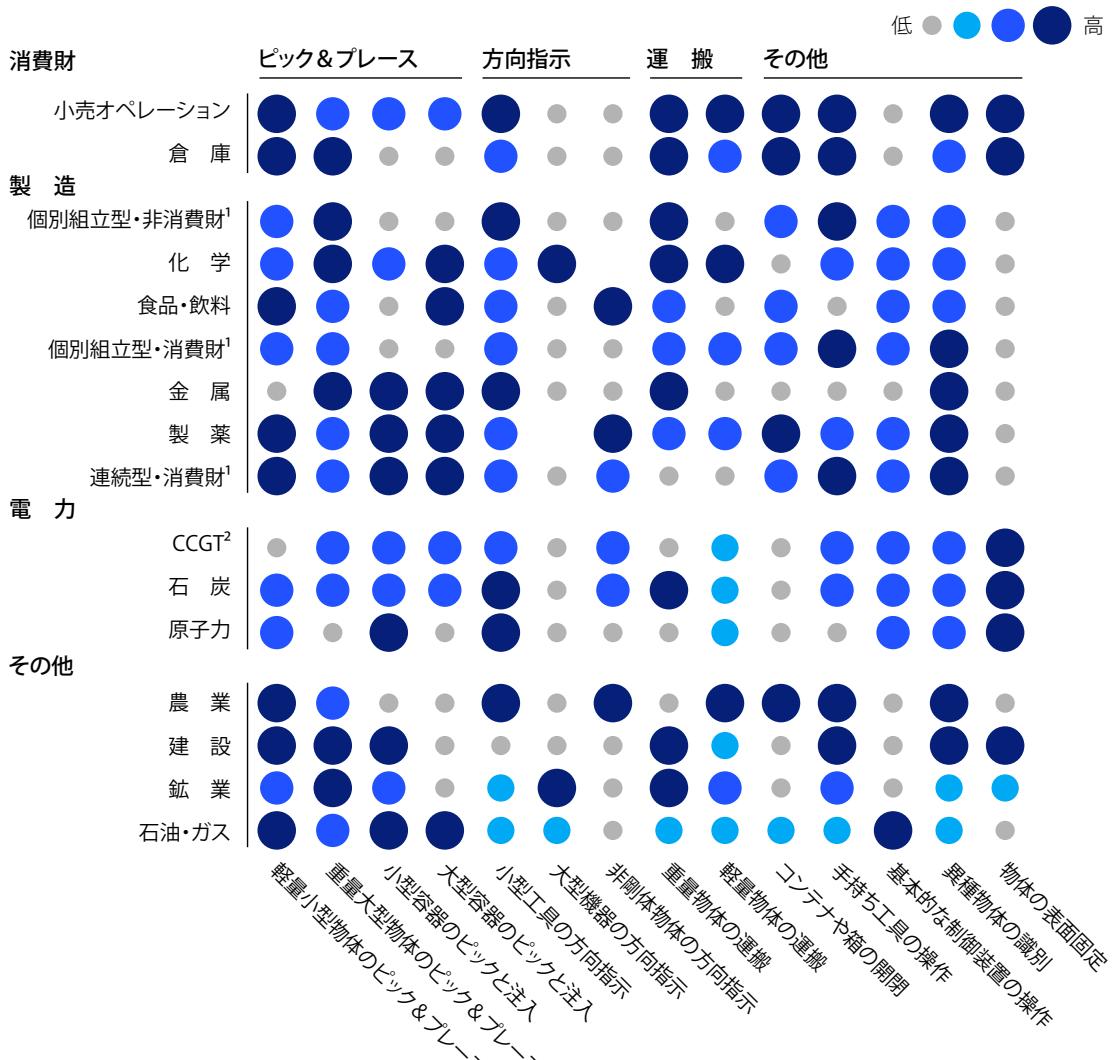
経営幹部のこの機会に対するアプローチ例:

- 長期的な自動化のビジョンを設定する。汎用ロボットは自動化の最初の波ではないが、最も大きな変革をもたらす可能性がある。ロジスティクス、品質管理、検査、組み立て、マテリアルハンドリングなど、これらのテクノロジーがオペレーションにおいてどのような役割を果たすことができるのか、長期的なビジョンを定め、パイロットに適した環境の特定を開始する。多くのタスクは、大規模な自動化からそう遠くないところにある(図表3)。
- データとデータインフラに投資する。企業は、汎用ロボットのトレーニングを最適化するために、基盤モデルのためのデータとデータインフラに投資しなければならない。また、研究者が新しいロボットプラットフォームを開発する際に、その手法を簡単に再現できるように、どのような情報が使われたかを明確に文書化しなければならない。
- 正しい指標を見る。ロボットのデモだけでなく、バッテリー密度、基盤モデルのサイズとレイテンシー、ハプティクス(触覚を感知する能力)といった実現技術の進歩を追跡する。規制の明確化も心強い兆しだ。これらの指標は、ロボットが制御された環境で動作する様子を映した派手な動画よりも進歩のパロメータになる。
- 人材を育成する。ワークフォースのスキルアップは、ロボットが導入されるのを待つてからでは遅い。特に保守、オペレーション、プログラミングの分野において、機械と協働人材と企業文化の構築を開始し、さらにシミュレーション、ロボット工学の統合、AIツールの開発における社内能力の構築も検討すべきである。
- パートナーシップとエコシステムを構築する。イノベーションの最先端を走り続ける。これには、ロボティクスのスタートアップ企業との提携、標準化団体への参加、工場やその他の職場において、異なるロボットタイプに対応できるよう容易に移設可能なモジュール式インフラへの投資などが挙げられる。
- 上流の価値を創造するために迅速に行動する。半導体、アクチュエータ、電力システム、エッジコンピューティングなどの投資家や部品サプライヤーは、ロボットプラットフォーム全体で需要集中が形成される場所を追跡すべきである。共通規格、オープンプラットフォーム、知的財産の共有に関する早期のパートナーシップや戦略的な投資が長期的な成功につながる可能性がある。スマートフォンや電気自動車の黎明期と同様に、サプライヤーの連携がスケーリングの成功を左右することが多い。

図表3

## 汎用ロボットは、分野を超えて多様な作業をこなせるようになる可能性が高い

ロボットがこなせる可能性のある人間の作業: 人間の作業時間

<sup>1</sup>消費財<sup>2</sup>コンバインドサイクル・ガスタービン

McKinsey &amp; Company

C-3PO やウォーリーなどの一般的な知能、器用さ、自律性を備えたロボットはまだ登場していないが、その基盤となる技術は急速に現れつつある。勝者となるのは、後発で参入する企業ではなく、早期に準備を整え、賢明に実験を重ね、責任を持って規模を拡大する企業である。電子同僚の時代が到来しつつある。ただし、一夜にして訪れるわけではない。

アーサン・サイードはマッキンゼーのミュンヘンオフィスのパートナー、[アニ・ケルカー](#)はボストンオフィスのパートナー、同オフィスにはコンサルタントとしてシトス・ネパールが在籍。[クリスチャン・ヤンセン](#)はハンブルクオフィスのパートナー、ジョナサン・ティリーは南カリフォルニアオフィスの元従業員、[マーク・パテル](#)はベイエリア・オフィスのシニア・パートナー、同オフィスにはシニアフェローとしてマイケル・チュイが在籍。[ヤン・ポブロッキ](#)はフランクフルトオフィスのコンサルタント、[マット・ウェブスター](#)はアトランタオフィスのコンサルタント、[サルタク・ヴァイシュ](#)はデトロイトオフィスのコンサルタント。

[芝野菜乃子](#)は東京オフィスのエンゲージメントマネージャー、[東直彦](#)は同オフィスの準パートナー、[工藤卓哉](#)は関西オフィスのパートナーでありマッキンゼーデジタルジャパンの統括者。

Designed by McKinsey Global Publishing  
Copyright © 2025 McKinsey & Company. All rights reserved.