

# 進化するインテリジェントロボット

——日本企業における展開と活用の可能性

2023年2月

苅田 修、櫻井 佑介、大久保 篤



**BCG**

---

 **BCG  
HENDERSON  
INSTITUTE**



# 進化するインテリジェントロボット

## ——日本企業における展開と活用の可能性

2023年2月

荻田 修、櫻井 佑介、大久保 篤

## はじめに

「インテリジェントロボット」とは、AIとロボットが融合することで、人の活動の代替、拡張を可能にするロボットを指す。私たちBHI Japanは、日本が経済成長とウェルビーイングを高いレベルで実現させ、失われた30年を取り戻し「理想的な2050年」を迎えるための優先課題について考察しているが、インテリジェントロボットの活用はその1つだと考える。その理由はまず、インテリジェントロボットは少子高齢化が進む日本で、生産性向上の切り札となりうるためだ。日本では生産年齢人口の割合は1995年の69.8%から減少の一途をたどり、2022年には58.8%、2050年には51.8%まで落ち込むことが予測される。個々の働き手がより高い付加価値を生む必要があり、労働生産性の抜本的な向上が求められる。労働生産性の向上は、余暇の創出や高付加価値な活動への注力を通じて国民のウェルビーイング(健康で幸福な状態)にもつながり、さらに経済成長を促すという好循環を生み出せる可能性がある。

また、ロボットは、日本が歴史的にグローバルで競争優位性を構築してきた分野の1つである。日本の産業用ロボットの生産台数のシェアは長年グローバル市場のトップを占め、2021年のシェアは45%に上る。そして、世界に先駆けて二足歩行ロボットやペットロボットを提供するなど、ロボットの開発においても強みを発揮してきた。しかし近年では、コモディティ化が進む分野で中国や台湾が、最先端のイノベーションにおいては欧米企業が大きく飛躍しているように見える。例えば、産業用ロボットの年間導入台数が4割と世界トップの中国で、その供給の30%を中国の国産ロボットメーカーが占めるようになっている。一方、開発においては米国のアマゾンがロボットを自社開発したり、米国発のスタートアップのボストン・ダイナミクス<sup>1</sup>が俊敏に動く二足歩行ロボットを開発したりと、欧米企業の躍進が目立つ。今ここで、大きく方針を転換しなければ、日本はロボットの分野で優位性を維持できなくなるおそれがある。

私たちBHI Japanは今回、独自の調査・研究を実施するとともに、有識者の方々と議論を重ね、日本がインテリジェントロボットの事業としての展開、および活用の両面で世界をリードするためにどのような道筋を描けばよいのか、考察を進めてきた。本稿では、まず第1章でAIとロボットそれぞれのこれまでの歩みと今後の可能性を洗い出し、インテリジェントロボットの進化とボトルネックについて考察する。第2章では、提供企業の視点で、日本が特に注力すべきインテリジェントロボットの領域を考察し、続く第3章で、それを可能にするエコシステムの在り方を論じる。そして第4章で、ユーザー企業がインテリジェントロボットを積極的に活用するために押さえるべきトランスフォーメーションの要諦を考察し、最後に日本が考慮すべきリスクと備えを展望したい。

---

1. 現在は韓国の現代自動車の傘下。

# 目次

## 04 | インテリジェントロボットの進化とそのボトルネック

- ・ インテリジェントロボットとは何か
- ・ インテリジェントロボットの進化につながるAIとロボットの歩み
- ・ 進化のボトルネック

## 12 | 事業としてのインテリジェントロボット

### —日本の注力領域

- ・ 日本が特に注力すべき2つの道筋と7つの領域

## 16 | インテリジェントロボットを実現するエコシステム

- ・ イノベーションに必要な3つの要素
- ・ エコシステムが目指す姿

## 23 | ユーザー企業におけるインテリジェントロボットの活用

- ・ B2B / B2Cにおける活用例
- ・ ユーザー企業による活用で押さえるべき8つのポイント
- ・ インテリジェントロボットの活用の継続的な発展

## 30 | おわりに

### —リスクと備え





# インテリジェント ロボットの進化と そのボトルネック

## インテリジェントロボットとは何か

本稿では、インテリジェントロボットを「ロボット本体にAIを搭載したロボット、またはロボットの先のクラウド上のAIとつながるロボット」を指すものとする。また、AIは「機械学習を組み込んだシステム」、ロボットは「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」と定義する。詳細は第4章に譲るが、インテリジェントロボットとは、従来のロボットよりも高精度であったり、より少ない学習で汎用的に動作したり、相手の状況に合わせて自律的に動くことができるロボットである。人型のいわゆるヒューマノイドロボットだけを指すものではなく、産業用ロボットからコミュニケーションロボットまでを含めた幅広い概念である。さらには、メタバースなどのバーチャル空間で自律的に動くアバターも、広義のインテリジェントロボットと考える(図表1)。

図表1 ロボットの全体像におけるインテリジェントロボットの範囲



1: ロボティクス・プロセス・オートメーション  
出所: BHI Japan 分析

インテリジェントロボットが人の活動を代替することで、人はよりクリエイティブな発想や、感情や情緒の表現をはじめとする人間ならではの高付加価値な活動に注力できるようになる。それだけでなく、インテリジェントロボットは製造業などにおいて、職人技を再現したうえでさらに活用規模を拡大できる可能性がある。職人技は、例えば、ミリ単位の繊細な加工を微調整したり、製造機械の故障予兆を音で捉えたりといった、長年の経験によって培われた暗黙知が結晶された技術であり、再現は難しいと言われてきた。インテリジェントロボットが職人技を再現・拡大するためには、AIによる職人技の学習や、実現のためのアクチュエーター(エネルギーを動作に変換する装置)の高度化といったボトルネックを解消する必要がある。

補足すると、職人技の再現とは、早い計算を実現するためにロボット自身がそばを猛スピードでたたくということではない。早い計算を実現するために最適なロボットの在り方を考える、ということである。その

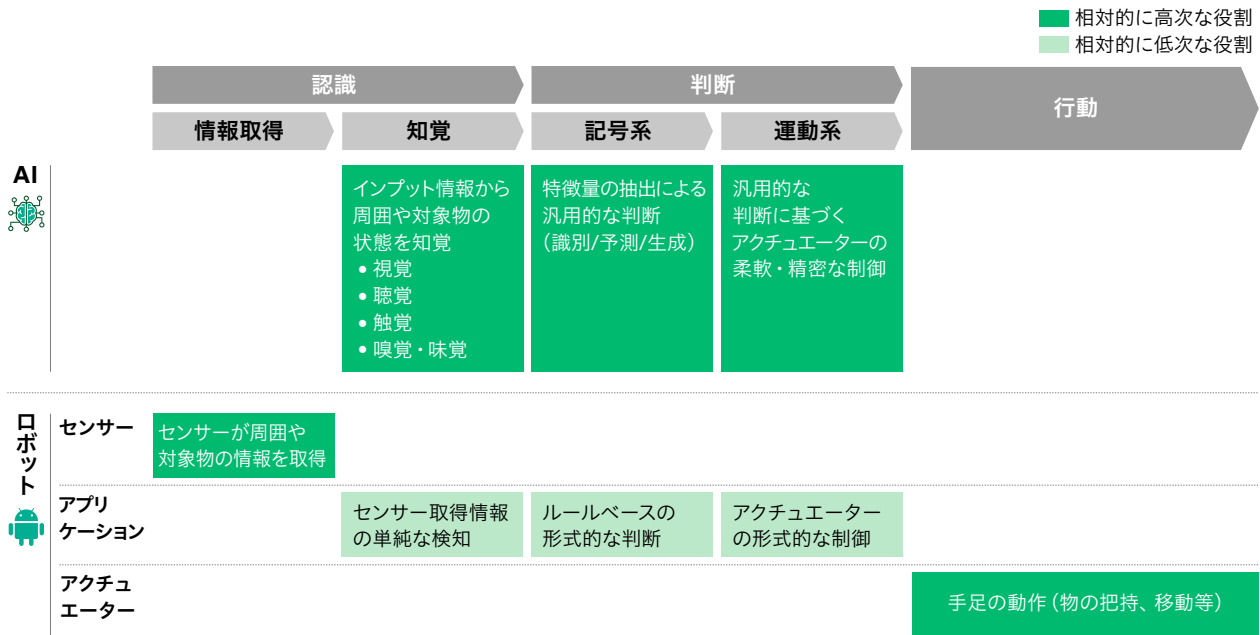
実現には、企業活動全体のオートメーション/メカニゼーションを考え、その中にインテリジェントロボットを位置づける、全社的なトランスフォーメーションが求められる。

### インテリジェントロボットの進化につながるAIとロボットの歩み

インテリジェントロボットは今後、どう進化していくだろうか。インテリジェントロボットを構成するAIとロボット、それぞれの進化の歩みと今後の可能性をひも解くことで、その融合体であるインテリジェントロボットの将来的な進化の方向性を見通したい。さらにそれを踏まえ、進化を阻むボトルネックについて考察する。

まず、インテリジェントロボットという文脈でAIとロボットがそれぞれどのような機能を有するのを見ている。これは、人間の身体性の観点である認識/判断/行動の軸で整理できる(図表2)。人の頭脳に相当

図表2 人間の身体性に見立てた、AIとロボットの主な役割



出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

するAIは、認識と判断を司る。センサー等を通じて収集されたインプット情報から周囲や対象物の状態を正しく知覚する。この知覚には人間の五感と同様に、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚がある。知覚した情報を基に、記号系で言語や数理を用いて判断し、それに基づくアクションの信号を外部の媒体に送る。

一方、ロボットは、センサー、知能・制御系、駆動系のすべてを有することから、身体性の認識、判断、行動のすべてを司る。ロボットが動作に至るまでの一連のプロセスは、まずセンサーが周囲や対象の情報を取得する。そのインプット情報をルールベースのプログラムであるアプリケーションが検知する。そして、アプリケーションがあらかじめ定められたルールに基づき形式的に判断する。その結果をアクチュエーターに信号として送る。最後に、アクチュエーターがフィジカルな動作を行うというものだ。

以上のように、これまでAIとロボットはそれぞれの

世界で完結して、人間の身体性を模倣してきた。これを融合させたインテリジェントロボットは、AIとロボットがそれぞれに進化し性能を補い合うことで、認識、判断、行動から成る人の活動を代替・拡張する方向へ進化していく(図表3)。以下ではAIとロボットそれぞれの進化について概説し、そこから考えられるインテリジェントロボットの進化についても検討する。

### AIの進化

AIの進化におけるブレークスルーは2012年、機械学習の1つである深層学習の台頭だ。ロボットの視覚にあたる画像認識では、深層学習の登場以前はエラー率が25.7%もあったが、深層学習の台頭により2012年に16.4%に低減し、現在は人間を超える精度に達している。映像からの行動認識も可能となった。映像は、時間の概念をもった画像の連続であり、AIはその一連の動きを捉えられる。例えば、監視カメラによる異常者検知や、店舗設置カメラによる導線設計が可能



図表3 AI、ロボットそれぞれの進化により、インテリジェントロボットは人の活動を代替・拡張する方向へ進化

		■ AI単体で実現することの例		■ ロボット単体で実現することの例		■ AIとロボットの融合で実現することの例			
		これまで 2010~2015	2015~現在	今後 現在~2025	2025~2030	2030~			
AI	認識	視覚	機械学習の台頭(深層学習の実用化)	画像認識(分類、セグメンテーション、物体検出)	映像からの行動認識	マルチモーダルな認識精度の向上による定型コミュニケーション(画像、音声、触感等)	入力情報処理のさらなる精度向上/処理時間の短縮	環境とのリアルタイムなインタラクションの認識(人や物へのアクションと結果を理解) 人間の五感だけでは捉えられない情報や生体情報・脳波など新たな情報の認識	
		聴覚		音声認識					
		触覚				触覚センサー高度化で物体の柔らかさ判定			
		嗅覚・味覚				嗅覚/味覚の識別			
	判断	記号系		識別・予測の精度向上/適用範囲の拡大	大規模モデルによる性能向上(GPT-3等)	言語の意味理解の発展(文と映像の相互変換、抽象概念)	生体情報・脳波など複雑な情報の解析	生成の適用範囲拡大(創薬等)	言語からの知識獲得(概念とひも付いた言語データ的大量入力から、さらなる抽象化)
				深層強化学習による最適化*の精度向上	GAN等による文章や画像の生成	結果に至る理由を説明できるホワイトボックスAIの適用/従来型AIとの使い分け			因果関係の推論の可能性(CFML等)
		運動系			深層強化学習による運動の習熟	シミュレータでの学習/AIによるシミュレータ高度化によるさらなる運動の習熟(自動運転の実現)		職人技の習得	
	ロボット	行動	センサー	センサーの高度化(取得情報の拡大/解像度向上)		透明物の認識		取得情報の種類・精度の継続向上	
		アプリケーション		プログラムによるルールベース判断		人による操作			
アクチュエーター			定型作業(組立加工、運搬等)	手の高度化(人工筋肉等による、精密性/耐久性/出力)			足の高度化(二足歩行等)		
インテリジェントロボット	認識	センサー		エッジAIでの取捨選択を見越した、複数データの取得/解像度向上	AI学習等のデータ収集のためのフィジカル空間とデジタル空間の連携				
	判断			SLAMによる空間認識					
	行動								
	AI+アプリケーション			複数ロボットのデータの集合知による学習とフィードバック	フィジカルの内部・外部状況判断(自身/作業/対象/環境)		汎用的コミュニケーション		
	アクチュエーター			手の高度化(センサーフュージョン連携により、重心を正確につかんだり、力をリアルタイムで加減し、複雑/柔らかい物を把持)			足の高度化(環境に応じた柔軟な歩行) 職人技の再現		

\* 最適化は、数理最適化をはじめAIとは別分野として進化してきたが、「数式化できるが中身が複雑なモデル」における強化学習等でAIと一部関連する  
出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

になった。眼の誕生がカンブリア紀に起きた生物の爆発的な進化を促したように、視覚にあたる画像認識がAIの進化に果たす役割は大きい。

触覚では、触覚センサーと視覚センサーから得られた情報から、対象物の柔らかさをリアルタイムに判定できるようになるだろう。実際に、ロボットの視触覚センサーの情報処理の研究が進んでいる。

現在までに、視覚、聴覚、触覚をまたいだ、マルチモーダルな認識精度の向上による定型コミュニケーションも可能になっている。例えば、人型ロボットが人の表情や声から感情を予測したり、定型音声を適切なタイミングで出せたりするようになった。今後は、AIの処理に必要なコンピューターの性能向上や、エッジコンピューティング<sup>2</sup>とクラウドの両立を背景に、インプット情報の処理のさらなる精度向上や、処理時間の短縮が見込まれる。さらに将来的には、AIが環境とのインタラクションをリアルタイムに認識したり、生体情報・脳波など複雑な情報を解析したりできるようになる可能性がある。

認識した情報に対する判断機能も進化している。判断は頭脳の中核的機能であり、AI進化の本丸だ。記号系では、深層学習による特徴量の抽出が可能になったことで、識別・予測の精度が向上した。大規模モデルによる性能向上も目覚ましく、ChatGPTなど言語モデルを活用した新しいプロダクトが次々に登場している。加えて、2015年以降はGAN（敵対的生成ネットワーク）などの生成モデルの台頭により、文章や画像の生成も発展してきた。今後、生成の適用範囲が創薬などに拡大していこう。実際に、AI創薬スタートアップのエリックス、シンセティックゲシュタルトなどが、生成モデルを用いたAI創薬技術の開発を進めている。将来的には、文章と映像の相互変換をはじめとした言語の意味理解が進み、AIが言語から大量の知識を獲得できるようになる可能性がある。また、反実仮想機械学習（CFML）などにより、因果関係の推

論が可能になることも考えられる。

運動系は、記号系と同様に深層強化学習を用いて習熟が進んだ。特にフィジカルな動作の学習は、学習データの環境の変化によりぶれが生じやすかったり、めったに起きない事象についてはデータの量が取れずに学習が進まなかったりする課題がある。その解消を目指し、シミュレーター上での学習、さらにはAIでシミュレーター自体を作る研究が進んでおり、今後ますます進展すると考えられる。その先には自動運転の実現や、職人技の習得も見えてくるだろう。

## ロボットの進化

ロボットは、五感に相当するセンサー、頭脳に相当する、プログラミングで構築されたアプリケーション、動作を行う手足に相当するアクチュエーターで構成される。1960年代の産業用ロボットの誕生を起点として、ロボットのセンサー、アプリケーション、アクチュエーターの性能は継続的に向上してきた。さらに近年は、製造、物流、サービス、医療、介護、コミュニケーションといった業界で、幅広い用途や目的に合わせて性能を向上させている。

**センサー** ロボットにおける五感の認識の解像度が向上してきた。人間と同様、認識に占める視覚の比重が大きく、画像を読み込む視覚センサーが最初に進化した。機械学習の台頭により大量のデータを処理できるようになったことから、センサーは特にここ5年で急速に解像度を向上させている。今後は、現状では難しい透明物の認識などの課題を解決していこう。

**アプリケーション** アプリケーションには、「こういう場合はこう行動する」という分岐を詳細に記したルールベースのプログラムが使われてきた。アプリケーション単体はすでに成熟しており、今後はAIとの組み合わせによる進化が見込まれる。なお、アプリケーション

2. 端末の近くにサーバーを分散配置するネットワーク技法の1つ。クラウドにデータを送らず、ユーザーや端末の近くでデータを処理できるためリアルタイム性が高く、通信の遅延も起こりにくい。

を通じて人が操作するロボットも、手術や災害救援など  
予期せぬ動作の回避が特に求められる領域や、高齢  
者・障害者の経済活動への参加といった領域で使われ  
続け、インテリジェントロボットと併存すると考えられる。

**アクチュエーター** 駆動源であるアクチュエーター、  
骨に相当するリンクについては、産業用ロボットの発展  
とともに、決まった動きを速く正確にできるよう、モー  
ターの性能が向上してきた。近年は、生体の筋肉組織を  
工学的に模倣し、外部からのエネルギーを受けることで  
変形して力を発生させる人工筋肉も登場している。一  
部でロボットの腕への適用が始まっているものの、指関  
節などの複雑さから、普及はこれからの段階である。手  
の次には、ロボットの重心、バランスの維持といったさら  
に複雑な制御が求められる足が進化すると考えられる。

## インテリジェントロボットの進化

このように、それぞれに進化してきたAIとロボットだ  
が、インテリジェントロボットの形で融合することで、新  
たな進化が始まっている。AIが組み合わせることで、  
ロボットは何ができるようになるのだろうか。

**センサー** エッジAI<sup>3</sup>で必要な情報が取捨選択され  
ることを見越して、センサーがより多くのデータを高解  
像度で取得できるようになるだろう。今後は、センサー  
によるリアル空間でのデータ収集に加えて、デジタル  
ツインやシミュレーターなどバーチャル空間でのデータ  
収集が組み合わせり、データ収集のハイブリッド化が  
加速するだろう。

**AI + アプリケーション** 前述の通り、ロボットのアプ  
リケーションは単体としては成熟しているが、さらにAI  
とアプリケーションが組み合わせることで、複数のロボ  
ットの取得データやロボット自身のデータをクラウド等  
に集めて集合知として学習し、結果をロボットにフィ  
ードバックすることが可能になってきている。

**アクチュエーター** アクチュエーターにAIが組み合  
わさることで、センサーフュージョン<sup>4</sup>との連携により、  
対象物の重心を正確につかんだり、力の入れ具合をリ  
アルタイムで加減して複雑な形状の物や柔らかい物を  
把持できるようになったりしていくと考えられる。手の  
次には、足が進化していこう。AIと組み合わせる  
ことで、足裏センサーの加圧を測定でき、安定した姿  
勢を維持したり、不安定な場所でも体全体の重心をコ  
ントロールして自然な歩行ができたりするようになる可  
能性がある。また、アクチュエーターの精度・出力・強  
度の向上が進めば、センサーとAI+アプリケーション  
の進化と相まって、職人技を再現できるようになる可  
能性もある。

## 進化のボトルネック

では、インテリジェントロボットが進化を遂げるう  
えで、何がボトルネックとなるだろうか。私たちは以下の  
4つに大別できると考えている(図表4)。開発におけ  
る認識/処理にかかわる①AI学習に必要なデータの  
収集、②環境・状況に応じた判断ができる汎用AIの  
実現、行動にかかわる③アクチュエーターの精度・出  
力・強度の向上、そして上市における④導入・運用にか  
かわるROIの向上である。

### 1. AI学習に必要なデータの収集

インテリジェントロボットが複雑な行動を自動化した  
り、さらには周囲の状況から近い未来を予測して行動  
できたりするようになるには、AIに学習させる質・量を  
伴うデータが必要である。しかし、ロボットはリアル  
の世界に存在するため、そのデータの収集は困難を極め  
る。リアルの世界でデータを収集する場合、例えば、  
画像の照度が天候とともに変わったり、データを収集  
するセンサーの位置がずれたり、データの質に影響  
する変数が多岐にわたるため、質の担保が難しい。ま  
た、めったに起きない事象にかかわるデータの量を確  
保することにも時間を要する。そこで、質・量を伴うデ

3. 端末に搭載されるAIで、端末上でAI処理を行うことでクラウドとの通信を減らすことができる。

4. 対象物を正確にとらえるために、各センサーの複数情報の中から必要なデータを組み合わせる技術。

図表4 インテリジェントロボットの進化のボトルネックは4つ

開発

上市

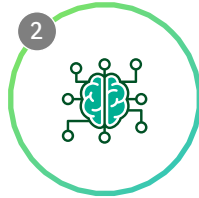
認識/判断

行動



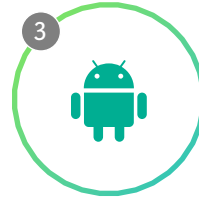
**1 AI学習に必要なデータの収集**

ロボット自体/対象物/作業/環境にかかわる質・量を伴うデータの収集が必要



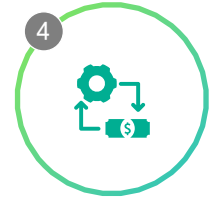
**2 環境・状況に応じた判断ができる汎用AI(単機能でないAI)の実現**

環境・状況に応じて、自律的な判断ができる汎用的なAIが必要



**3 アクチュエーターの精度・出力・強度の向上**

人に近い動きや職人技の再現に、アクチュエーターの精度・出力・強度の向上が必要



**4 導入・運用にかかわるROIの向上**

ユーザー企業によるロボットの導入・運用を後押しする、ソリューション全体のリターン可視化と、コスト削減が必要

出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

ータをバーチャルの世界で獲得する方法の研究も始まっている。例として、「疑似学習データの生成」「シミュレーター上でのデータ収集」が挙げられる。「疑似学習データの生成」は、学習させるAIとは別のAIで、リアルな偽物の疑似学習データを生成し、それをAIに与えて学習させる手法だ。例えば、製造業における不良品の検品作業を自動化したい場合、不良品のデータ(画像など)が大量に必要なが、日本の製造業は歩留まり(良品率)が高いがゆえに不良品のデータが多く存在しない。その際に、前述した生成モデルによる不良品の疑似学習データ生成が活用できる。「シミュレーター上でのデータ収集」は、デジタル空間であるシミュレーター上に実世界を再現し、そこでデータを収集する方法である。この方法であれば、データの質に影響する環境の条件のコントロールと、めったに起きない事象の再現によるデータの量の確保を実現できる。将来的には、このシミュレーションに量子コンピューターを活用することで実世界の再現度が飛躍的に向上する可能性も考えられる。

**2. 環境・状況に応じた判断ができる汎用AI(単機能でないAI)の実現**

AIは急速に進化しているものの、いまだ周囲の世界の意味合いを理解し、その文脈に沿った適切な行動を判断することは実現できていない。AIの進化の項目で述べた通り、判断の記号系が発展すればそれが実現できるようになるだろう。例えば、産業用ロボットが対象物の状態や周囲の環境を解釈してリアルタイムに行動を変えたり、コミュニケーションロボットが運動している人を見て喉が渇いていると判断し、飲み物を差し出したりするといった、状況に応じた判断ができるようになるだろう。実際に、グーグルが2022年8月に発表したロボット用のAIでは、質問に対する回答候補と、周囲の環境情報から導き出される動作の候補をマッチングさせることで、ロボットが質問に対して環境に応じた自然な行動がとれるようになるという。

**3. アクチュエーターの精度・出力・強度の向上**

多くの関節を連動させて物を適切につかんだり、歩行したりする人に近い動きや、微細な精度調整を必要



とする職人技の再現には、ロボットの動きの大もとであるアクチュエーターの精度・出力・強度の向上が必要である。精度については、センサーが収集した周囲の情報を踏まえてAIが計算した適切な力を、リアルタイムでアクチュエーターが制御することが求められる。出力については、物をつかんだり、歩行したりするのに十分な力を、たとえ小さなサイズのアクチュエーターであっても発揮することが求められる。強度については、複数関節の連動、あるいは軽量、極小なサイズであっても、壊れにくい耐久性が求められる。

#### 4. 導入・運用にかかわるROIの向上

開発にかかわるこれらのボトルネックが解消しても、ユーザー企業による導入・運用のROI(投資利益率)が見合わない限り、インテリジェントロボットは普及しないだろう。リターンについては、解くべき課題を明確にしたうえで、インテリジェントロボットを含むソリューション全体での効果を見極める必要がある。投資にかかわるコストのうち特に大きな開発コストの構成要素は、

「ロボット本体の製造コスト」「周辺機器の製造コスト」「導入コスト」の3つである。ロボット本体／周辺機器の製造コストは知財を含むため価格が高い。そのために数が売れないので製造コストが下がらない負のスパイラルになっている。導入コストは、AI学習に必要な質・量を伴うデータ収集に特に手間がかかり、かさんでしまう。ソフトウェア／ハードウェアの標準化が進まないことも、コストが高止まりする大きな要因である。ロボットは解くべきユーザーの課題によって、適するハードウェアの形状が異なるため、パソコンのように事前に標準を定めるのは困難である。そのハードウェアごとに、各社が基本機能を標準化せずソフトウェアをゼロから開発するため、効率化の余地がある。

これらのボトルネックは、日本がグローバルに競争優位性を築くうえで押さえておくべき重要なポイントである。次章で詳しく論じる。





## 事業としてのインテリ ジエントロボット ——日本の注力領域

開発から製造、運用までを含めて、インテリジェントロボットの市場への提供を事業と捉えた際、日本企業はどこに注力すべきだろうか。それを検討するために、まずインテリジェントロボットの産業構造を整理したい。ここでは、インテリジェントロボットの構成要素を示す縦軸と、適用業界を示す横軸に沿って考える。

縦軸にあたるのが10のレイヤーから成るインテリジェントロボットの構成要素である(図表5)。まず、ロボットを含むシステム全体の設計図としてのアーキテクチャがある。その下にソフトウェア、ハードウェアがある。ハードウェアは、下から順に、駆動源のアクチュエーター、人の骨に相当するリンク、認識に必要なさまざまな情報を収集するセンサー、ソフトウェアを格納・処理するエッジ/クラウドのデバイスであるコンピューティングデバイスから成る。その上のソフトウェアは下から、基盤機能にあたるOS、ロボットの基本機能とAPI(ア

図表5 インテリジェントロボットは10レイヤーで構成される

概要	
全体	<b>アーキテクチャ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>全体のパフォーマンス向上に資する、ロボット、基幹システム等の連携先<sup>1</sup>を含むシステム全体の設計図</li> </ul>
ソフトウェア	<b>データ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットの一連の動作により収集できる、環境/対象物/タスク/ロボット自体に関するデータ</li> </ul>
	<b>アプリケーション</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>エンドユーザー（企業/消費者）との接点となる各用途に特化したサービス</li> </ul>
	<b>AI</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>自律動作や職人技の再現に必要な認識・判断・制御を担う機械学習を組み込んだソフトウェア（ロボット本体にあるエッジAI/クラウド上のAI）</li> </ul>
	<b>ミドルウェア</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>API<sup>2</sup></li> <li>ロボット基本機能（自律移動/複数台制御/状態検知/基幹システムとの連携IF等）</li> </ul>
	<b>OS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>コンピューター作動に必須の基盤機能（ログイン管理/電力管理/各デバイスの接続等）</li> </ul>
ハードウェア	<b>コンピューティングデバイス</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトウェア（ソースコード、データ）を格納・処理するエッジデバイス/サーバー</li> </ul>
	<b>センサー</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>五感に相当する認識に必要な情報を収集するためのセンサー機器</li> </ul>
	<b>リンク</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>アームなど人間の骨に相当</li> </ul>
	<b>アクチュエーター</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>手足の関節などの動作に必要なモーター群</li> </ul>

1: インターフェース 2: アプリケーション・プログラミング・インターフェース  
出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

アプリケーション・プログラミング・インターフェース)にあたるミドルウェア、判断を行うAI、各用途に特化したサービスであるアプリケーション、ロボットの一連の動作から収集されるデータから成ると考えられる。

この縦軸に、インテリジェントロボットの適用業界となるB2Bの産業<sup>5</sup>、物流、サービス、B2Cの医療、介護、コミュニケーションという横軸を掛け合わせることで、インテリジェントロボットの産業構造を捉える(図表6)。

### 日本が特に注力すべき2つの道筋と7つの領域

産業構造をこのように捉えたとき、日本がグローバルに競争優位性を築くため、今後特に取り組むべき注力領域として大きく2つの道筋が考えられる。1つ目は、日本企業がすでに優位性を有する領域と、AI活用による自律型ロボットという付加価値を掛け合わせる道

筋である(図表6、濃い緑の網掛け)。自動車メーカーの系列をはじめ、垂直統合<sup>6</sup>の密な擦り合わせによる開発という日本の強みが生きやすい道筋でもある。具体的な領域としては、①産業用ロボットのさらなる高度化、②産業用プラットフォームの提供、③ロボット向けセンサーの提供が挙げられる。

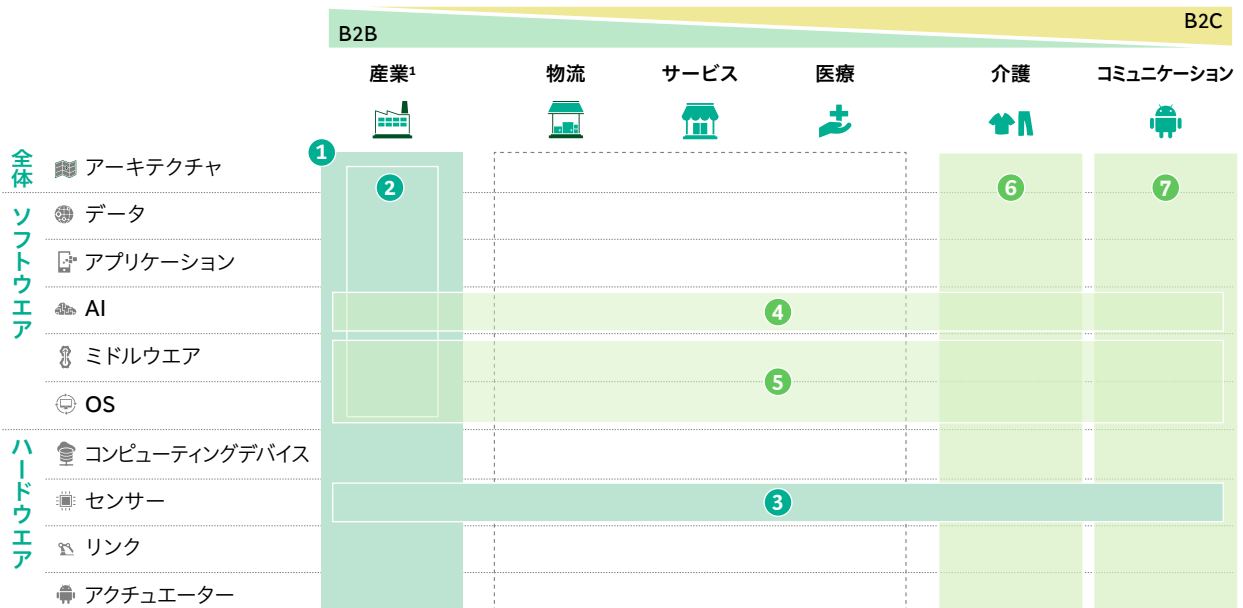
2つ目は、日本が先んじて優位性を築けるよう、ボトルネックの解消に向け優先的に先行投資すべき道筋である(図表6、薄緑の網掛け)。この領域の例として④ロボット向けの汎用的なAIの提供、⑤ロボット基本機能プラットフォームの提供、⑥人の活動を代替できる介護ロボットの提供、⑦コミュニケーションロボットの提供が挙げられる。以下、それぞれについて概説する。なお、ここで取り上げていない領域においても、日本企業が取り組む意義や、ポテンシャルを発揮する可能性は十分にあると考えられる。

5. 本稿では製造業、建設業などを指す。

6. 技術開発、生産、販売、サービス提供などのバリューチェーンに沿った異なる業務を、グループ企業がすべて担うビジネスモデル。

図表6 インテリジェントロボットにおける、日本が今後特に注力すべき領域

インテリジェントロボットにおける日本が注力すべき領域



1: 製造業、建設業などを指す  
 出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー ※点線枠は、日本が国内を中心に通常の開発を行う領域

まず、日本が伝統的に強い領域で、AI活用により自律という付加価値を向上させる道筋である。

### 1. 産業用ロボットのさらなる高度化

産業用ロボットの生産台数では、日本は世界をリードしてきた。しかし、あらかじめ定めた動きだけを行う従来型の産業用ロボットの市場では、他国との競争が厳しくなる。今後はAIを活用した、自律的に動いてオートメーション化された業務の生産性を向上できる産業用ロボットで差別化することに注力すべきだ。例えば、安川電機は、産業用ロボットのバラ積みピッキングをAIによって高度化している。従来、軟体物や不定形物のピッキングは個体差があるため自動化が困難であったが、AI活用によりシミュレーター上で現実環境に近い学習データを作成し、ロボットハンドでの軟体物のピッキングを実現した。

### 2. 産業用プラットフォームの提供

同じく産業用の分野において、進化のボトルネック

の1つである、AI学習に必要なデータ収集の困難さを解消するため、産業用ロボット横断で各種データを集めて学習させるプラットフォームの提供が考えられる。単一ではなく複数ロボットから、特定社製品に限らずにクラウドでデータを収集することで、ロボット自体、対象物、作業、環境といった各要素の大量なデータを収集・分析できるようになる。類似事例として、ファナックが製造業向けのプラットフォーム「FIELD system (フィールドシステム)」を複数の企業と共同で開発し、ローンチしている。機械から収集されたデータを活用することで、生産ラインや工場全体の最適化を図り、機械がお互いに柔軟かつ賢く協調する、今までにない高度な製造現場の実現を目指している。

### 3. ロボット向けセンサーの提供

日本にはソニーグループ、オムロン、キーエンス、パナソニックなど、ロボットに適用可能性のあるセンサーの開発に強みを持つ企業が複数存在する。この延長線上で、ロボットが対象物や周囲の環境・状況を正確



に察知できるロボット向けのセンサーを水平分業<sup>7</sup>で展開する方向性が考えられる。例えば、ロボットが透明物を認識したり、柔らかい物体を壊さずに重心を的確につかんだりするためには、センサーの工夫やセンサーとアクチュエーターの密な情報のやり取りが必要となる。こうした領域では、センサー開発、およびセンサーと他コンポーネントとの擦り合わせに伝統的に強い日本企業が、強みを発揮できると考えられる。

次に、ボトルネックの解消に向けて先行投資し、優位性の構築を目指す道筋である。

#### 4. ロボット向けの汎用的なAIの提供

ロボットが周囲の環境・状況の文脈を押さえて自然に振る舞えるようにする、ロボット向けの汎用的なAIの実現もボトルネックの1つであるが、それを水平分業で提供するという方向性が考えられる。その萌芽として、日本のAI関連スタートアップであるプリファードロボティクスは、SLAM技術<sup>8</sup>を用いた自律移動性能の高いAIを含む、自律移動ロボットソリューションをB2Bの業務用清掃や、B2Cの家庭用ロボットに業界横断で提供している。また、AIスタートアップのアセントロボティクスは、製造・物流現場横断でさまざまなロボットメーカーに適用できる、多様な形状の物体をピッキングするためのAIソフトウェアを提供している。バーチャルに着目すると、メタバース上で自律して行動するアバターを汎用的なAIで実現し、日本が強みとするキャラクターのIP(知的財産)と掛け合わせて、広義のインテリジェントロボットとして提供する方向性も考えられる。

#### 5. ロボット基本機能プラットフォームの提供

前述の通り、導入・運用にかかわるROIのコストについては、標準化されたソフトウェアの不在が高止まりの一因となっている。この解消策として、業界横断で共通的なミドルウェア・OSを提供するプラットフォームの提供が考えられる。

#### 6. 人の活動を代替できる介護ロボットの提供

高齢化先進国の日本が先陣を切って、介護ロボットの提供に取り組む方向性である。その目的は、人手不足かつ重労働の介護士の負荷軽減と、ウェルビーイングの実現だ。介護ロボットの提供価値は、移乗支援、移動支援、排泄支援、認知症患者の見守りなど、多岐にわたる。AIと組み合わせることで、高齢者の状況に合わせてアクションを柔軟に変えられるようになる。例えば、ベッドやトイレへの移乗・移動を支援するロボットについては、高齢者の具合が悪くなったことをセンサーが察知し、それに応じたアクションを取ったり、介護士に知らせたりすることが考えられる。介護業界の人手不足や低賃金が報道で話題になることから、インテリジェントロボットの導入・運用のROIの達成は他業界に比べて難しいと考えられる。そのため、時間軸としては、インテリジェントロボットが別用途で普及し、コストがある程度下がったタイミングで本格的に普及すると予想される。

#### 7. コミュニケーションロボットの提供

会話、交流ができ、人の生活に溶け込むパートナーとしてのコミュニケーションロボットを提供する方向性が考えられる。高度な技術をコンパクトにロボットに結集できる日本の強みが活きる領域でもある。日本は、ソニーグループの自律型エンターテインメントロボット「AIBO / aibo<sup>9</sup>(アイボ)」をはじめ、世界に先駆けてこの市場に挑戦してきた。AIBOのお葬式が開かれるなど、人がロボットに対して機械以上の感情を抱く動きも見られるほどになっている。また、同社のAIを搭載したコミュニケーションロボット「poiq(ポイック)」は、人との会話の内容をクラウド上のAIで学習し成長するモデルに取り組んでいる。大規模言語モデルが進化するなどして、ロボットがより自然なコミュニケーションをとれるようになり、ボトルネックも解消され、家庭への普及が進めば、大きな市場が立ち上がる可能性がある。

7. 技術開発や原料調達、組み立て工程などを、異なる企業が得意分野を生かして協力するビジネスモデル。

8. 自己の位置を推定しながら地図を自動生成する技術。

9. AIBOは1999年から2006年に販売されたモデル。aiboは2018年に発売されたモデル。





## インテリジェント ロボットを実現する エコシステム

日本企業がこれらの領域で優位性を築くためには、イノベーションの加速が必要である。インテリジェントロボットの潜在的な市場規模は大きく、イノベーションの加速に取り組む価値は十分にあるだろう(図表7)。

インテリジェントロボットの進化については、ボトルネックを解消していくことで段階的に発展していくシナリオが考えられる。このシナリオにおいて、インテリジェントロボットが生み出す市場は、「A. 既存の延長線上のロボット市場」と「B. ロボットにより代替・創造しうる市場」の2つが考えられる。「A. 既存の延長線上のロボット市場」だけでも、産業用ロボット、業務用サービスロボット(物流、医療、介護ロボット等)、消費者サービスロボット(家庭用ロボット等)の合計で、2030年頃までに年間約3兆~8兆円の市場を対象として、インテリジェントロボットが新たな価値を創造・提供しうると私たちは試算している。加えて、「B. 代替・創造しうる市



図表7 インテリジェントロボットの進化のシナリオとポテンシャル

	インテリジェントロボット1.0	インテリジェントロボット2.0	インテリジェントロボット3.0	インテリジェントロボット4.0	
ボ ト ル 消 す る ネ ッ ク	AI  センサーデータの適切な学習	環境に依存しない学習による、状況に応じた判断	文脈・意味合いを含む言語理解に基づいた判断	分散・自律の協調制御	
	ロボット  センサーによるAI学習データ収集	アクチュエーターの高度化 ・手の精密動作	アクチュエーターの高度化 ・自然な歩行	人間と共創可能な形態・行動ロボットの製造コストの削減	
対 象 市 場	<b>A. 既存の延長線上のロボット市場</b>				
	産業用ロボット： 1.7~2.9兆円/年 <sup>1</sup>				
	業務用サービスロボット： 1.0~2.7兆円/年 <sup>1</sup>				
	消費者サービスロボット： 0.7~2.6兆円/年 <sup>1</sup>				
+	<b>B. 代替・創造しうる市場の例</b>				
	予知保全市場の代替 (予知保全の市場規模：5,500億円 <sup>2</sup> )	目視/触診を伴う手作業の代替	職人技の代替 (工作機械の職人技の市場規模：700億円 <sup>3</sup> )	対応業務の代替 (来場者管理システムの市場規模：3,500億円 <sup>4</sup> )	コミュニケーション市場の創造 (コミュニケーションロボット市場規模：1.6兆円 <sup>5</sup> )
				ロボットの形状進化による生産性向上	ロボットのライン配置の抜本変革による生産性向上

1: 国際ロボット連盟「World Robotics 2021」に基づき、2021~2030年の市場規模を試算；2: 予知保全の2021年の市場規模(グローバルインフォメーション、2022年)に基づき試算；3: 工作機械の2027年までの市場規模予測(Report Ocean、2021年)に基づき試算；4: 来場者管理システムの2027年までの市場規模予測(Report Ocean、2021年)に基づき試算；5: 世界のペット市場規模予測(Global Market Insights、2022年)に基づき試算

※ いずれも1ドル = 131.5円換算(2022年の平均為替レート)

出所: BHI Japan分析、有識者インタビュー

図表8 インテリジェントロボットのイノベーションに必要な3つの要素



大企業とスタートアップの連携の加速

- ・新しい製品の開発には自前ではなくオープンイノベーションが有効
- ・ソフトウェア/ハードウェアのレイヤー間の密な連携が必須

開発の標準化

- ・PCやスマホと同様、普及のために開発の標準化が有効
  - 特に基本機能のミドルウェア等

ソリューション開発のための複数企業の役割分担

- ・ファクトリーオートメーション全体を見られる企業が製品開発に必要
- ・エンドユーザー(企業/消費者)を理解している企業はアプリ開発に専念すべき

出所: BHI Japan分析

場」として、予知保全や目視／触診を伴う手作業、職人技のほか、対応業務やコミュニケーション市場などが見込まれる。

大きなポテンシャルを秘めた市場へ参入するにあたり、優位性構築に向けたイノベーションをどのように加速していけるだろうか。以下で、先進的な事例を交えながら、インテリジェントロボットのイノベーションに求められる要素を確認していく。

### イノベーションに必要な3つの要素

私たちBHI Japanは、インテリジェントロボットのイノベーションに必要な要素を、「大企業とスタートアップの連携の加速」「開発の標準化」「ソリューション開発のための複数企業の役割分担」の3点と考えている(17ページ、[図表8](#))。

### 大企業とスタートアップの連携の加速

新しい製品・サービスの開発には、自社にない発想、技術、アセットを活用できるオープンイノベーションが有効だ。インテリジェントロボットの構成要素は多岐にわたる。一般的に、ハードウェア開発は資金・設備を豊富に有する大企業が、ソフトウェア開発は先進技術やデータ活用に長けたスタートアップが強い傾向にあることから、大企業とスタートアップが互いの強みを提供し、連携を加速することが重要だ。この連携の在り方には、大企業起点型とスタートアップ起点型の2つのパターンが考えられる([図表9](#))。

**大企業起点型** 大企業が自社／顧客の課題を設定するパターンである。大企業とスタートアップがそれぞれの強みを活かして価値を提供し合う。課題設定の特性から、大企業が垂直統合による製品開発をリードすることが多い。主な国内事例として、PKSHA

**図表9 大企業とスタートアップの連携には2つのパターンが存在**

	大企業起点型	スタートアップ起点型
<b>課題の設定</b>	大企業が自社/顧客の既存の課題を設定	スタートアップが目指す世界像の実現に向けて、市場・データ創出等の新しい課題を設定
<b>連携の目的</b>	製品・サービスの開発の加速	
<b>提供価値</b>	<p><b>大企業</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 垂直統合による製品開発を主にリード</li> <li>● 顧客基盤</li> <li>● 資金/設備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ドメイン知識</li> <li>● 規制対応力</li> </ul>
	<p><b>スタートアップ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 先進テクノロジー</li> <li>● ソリューション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水平分業のプラットフォーム開発を主にリード</li> <li>● 意思決定スピード</li> </ul>
<b>主な国内事例</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 東京大学松尾研究室発のスタートアップ群</li> <li>● パナソニックグループ運営「Robotics Hub (ロボティクスハブ)」</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ソニーグループのロボティクスプラットフォーム</li> <li>● アセントロボティクスの製造・物流ロボットソリューション</li> </ul>

出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

Technology(パークシャテクノロジー)など東京大学の松尾研究室発のスタートアップ群と大企業の連携、パナソニックグループが運営する「Robotics Hub(ロボティクスハブ)」などが挙げられる。

**スタートアップ起点型** スタートアップが目指す世界像の実現に向けて、市場・データの創出など新しい課題を設定するパターンである。大企業起点型と同様、両者が強みを活かして価値を提供し合う。スタートアップから大企業に新しい課題を提案するため、スタートアップが水平分業のプラットフォーム開発をリードすることが多い。主な国内事例として、ソニーグループの「ロボティクスプラットフォーム」、アセントロボティクスの製造・物流ロボットソリューションが挙げられる。ソニーグループのロボティクスプラットフォームは、ソニーが開発技術を提供するプラットフォームを活用して、スタートアップが目指す課題解決をアプリケーションを通して実現するエコシステムだ。実際にインフラ関連ロボット開発スタートアップのイクシスが、建設分野における課題を解決するアプリケーションを開発するために、ロボティクスプラットフォームを活用している。

## 開発の標準化

ロボットの世界における開発の標準化は、イノベーションを促進する重要な動きになるだろう。パソコンやスマートフォンは、ハードウェアの標準規格があり、それに適したOSがあることで、多くの人が効率よくアプリケーションを開発できる。その結果、ユーザーが望むアプリケーションが続々と生まれたことが、広く普及した要因である。しかし、ロボットはユーザーの課題の解決方法に応じてハードウェアの形が決まるため、標準規格を広く定めづらい傾向がある。その前提を考慮しても、ある程度共通的に使われるハードウェアをモジュール化することで開発を効率化する方向性は考えられる。また、移動や複数台制御といったロボットの基本機能／動作に必須の基盤機能を備えたミドルウェア・

OSがこれまで存在しなかったため、各社がその都度ゼロからソフトウェアを開発しており、非効率な面が多い。幅広い企業がアプリケーションの開発に参画できるように、開発の標準化が求められる。

## ソリューション開発のための複数企業の役割分担

インテリジェントロボット業界全体で革新的なソリューションを生み出すには、ソリューション提供者からアプリケーション開発者まで、上流～下流にわたる複数企業が各自の強みを活かして参画し、役割を分担することが求められる。インテリジェントロボットを含むソリューションの開発や、インテリジェントロボットをユーザー企業のバリューチェーンに組み込むトランスフォーメーションを実現するには、ファクトリーオートメーション全体を見ることができるソリューション提供者の参画が必要である。一方で、課題解決に資するアプリケーションの開発は、エンドユーザー(企業／消費者)の課題を理解する企業が取り組むべきだ。また別の視点として、ソリューション開発をスマイルカーブ<sup>10</sup>で捉えると、上流のエLEMENTの開発と、下流のシステムインテグレーションの利益が一般に大きくなるだろう。その意味でも、ソリューション提供者、アプリケーション開発者の参画が有効であると言える。さらに一歩進めて考えると、企業群間でWin-Win関係を効果的に設定することができれば、スマイルカーブを打破し、インテリジェントロボット業界全体が底上げされ、飛躍的に前進する可能性がある。

このようなソリューション開発のためには複数企業が参画し、適材適所で役割分担することが求められる。このとき有効となるのがエコシステムを通じたアプローチだ。これについてはコラム「イノベーションを目的とするエコシステムのKSF(重要成功要因)」で紹介する。

10. 製造業において事業別の収益性を表す曲線。収益性を縦軸に、事業のプロセスを横軸に取ったグラフ上では、企画・開発や部品製造など上流にある事業の収益性が高く、加工や組み立てなどの中間事業は収益性が低くなり、販売やメンテナンスなど下流にある事業では再び収益性が高くなるとされている。

## イノベーションを目的とするエコシステムのKSF(重要成功要因)

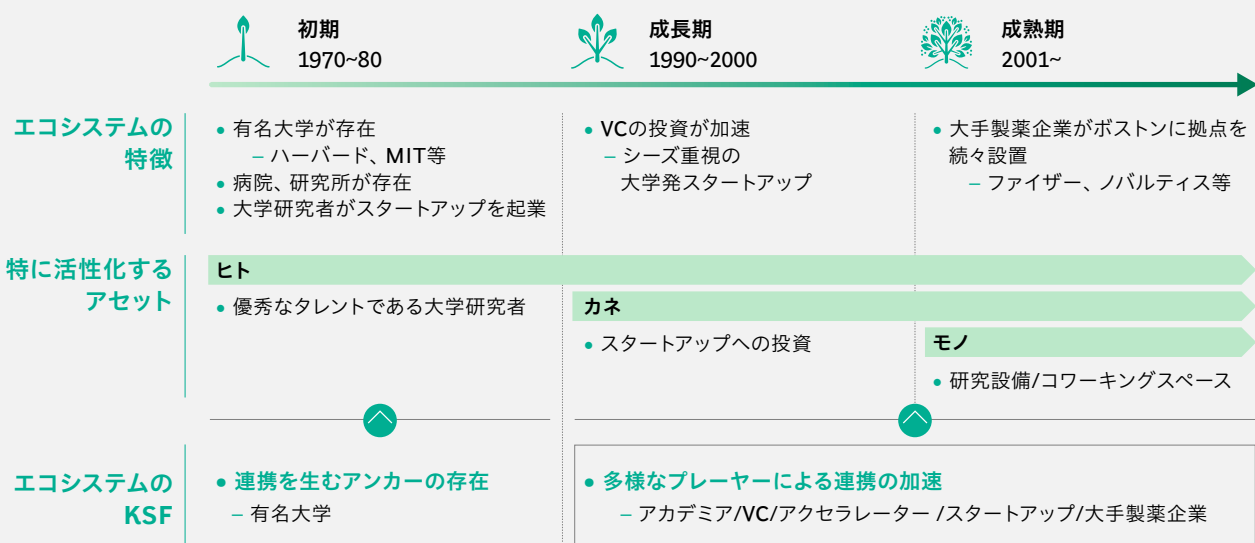
3つのイノベーションの要素を1つの企業のみで進めるのは当然のことながら難しい。有効な方法の1つが、エコシステムの活用と考えられる。一般にエコシステムとは、多様なプレーヤーが相互連携して価値を高める仕組みである。イノベーションを主な目的としたエコシステムとして、創薬イノベーションで成功するボストンのメディカルエコシステムを例に考えると、ヒト・モノ・カネが継続的に活性化し、イノベーションが加速するためには「優秀なタレントを有するアンカーの存在」と、「プレーヤーの多様性」が成功要因であると考えられる(図表10)。

**優秀なタレントを有するアンカーの存在** 特にエコシステムの初期は、3つのイノベーションの起点として、優秀なタレントを有するアンカーが必要だ。ボストンのメディカルエコシステムでは、1970~80年の初期において、ハーバード大学やマサチューセッツ工科大学などの優秀な研究者がスタートアップの起業を通じてア

ンカーの役割を担った。日本のインテリジェントロボットでは、優れた研究者が多く在籍する大企業や、スタートアップを起業する大学がアンカーにあたるだろう。

**プレーヤーの多様性** 初期以降は、ヒト・モノ・カネが継続的に循環するカギとなるプレーヤーの多様性が重要だ。ボストンのメディカルエコシステムでは1990~2000年の成長期に、企業がもつ技術、ノウハウ、人材、設備といった「シーズ」重視の創薬の潮流も相まって、優秀なタレントが起業したスタートアップにVC(ベンチャーキャピタル)による投資が集中した。2001年以降の成熟期には、ファイザー、ノバルティスといった大手製薬企業がボストンに拠点を続々設置して共同の研究設備を作ったり、アクセラレーター等がスタートアップの協働の場となるコワーキングスペースを作ったりすることで、ヒト・カネはもとより、モノが充実した。プレーヤーの多様性により、アンカーの存在に頼らず、ヒト・モノ・カネが活性化したのである。

図表10 ボストンのメディカルエコシステムのKSFは、初期の「アンカーの存在」と、「プレーヤーの多様性」



出所: 各種文献をもとにBHI Japan作成



日本のインテリジェントロボットでは、ここまで大がかりなものでもなくとも、研究者を有するアンカーとしての大企業に加えて、スタートアップや、オートメーションを理解するベンダーなど多様なプレイヤーの連携が有効と考えられる。なお、エコシステムのプレイヤーには、産に限らず、学と官も含まれる。学については、大学によるテクノロジーの社会実装の加速が考えられる。すでに、ビジネスに適用可能性のある技術や知にかかわる研究を重視したり、大学発のスタートアップ群を組成したりと、学のイノベーションの潮流が見られる。

官はこれまでも、ロボットに限らずさまざまな業界で、資金提供やルール作りという形でエコシステムの構築を支援してきた。ロボットによる損害への対応などのルール作りは、一企業では実現できない領域であり、引き続き官がリードしていくことが期待される。今後はエコシステムでの製品開発・研究の加速や、参加者のベネフィットの最大化により焦点を当てることで、エコシステムをさらに加速・拡大させられる可能性がある。

## エコシステムが目指す姿

「インテリジェントロボットのイノベーションに必要な3つの要素」と、コラムで紹介したエコシステムのKSFを掛け合わせると、インテリジェントロボットのエコシステムが目指す姿は、「ハードウェア開発者、ミドルウェア・OS開発者、アプリケーション開発者、ソリューション開発者によるロボット開発プラットフォーム」であると言える(図表11)。プラットフォームが提供するロボットの基本機能を各者が利用することで、全プレイヤーが得意領域に専念でき、Win-Winの関係を構築しうる。さらには、ユーザー企業がプラットフォームに加わり、ユーザー企業の現場やバーチャル空間を実証実験の場として活用できる可能性も考えられる。

このエコシステムに類似した先進事例としても、ソニーグループのロボティクスプラットフォームが挙げられる。このプラットフォームでは、同社がロボットの基本機能の開発に関する要素技術を惜しみなく提供することで、参画プレイヤーがアプリケーションの開発に専念できる。

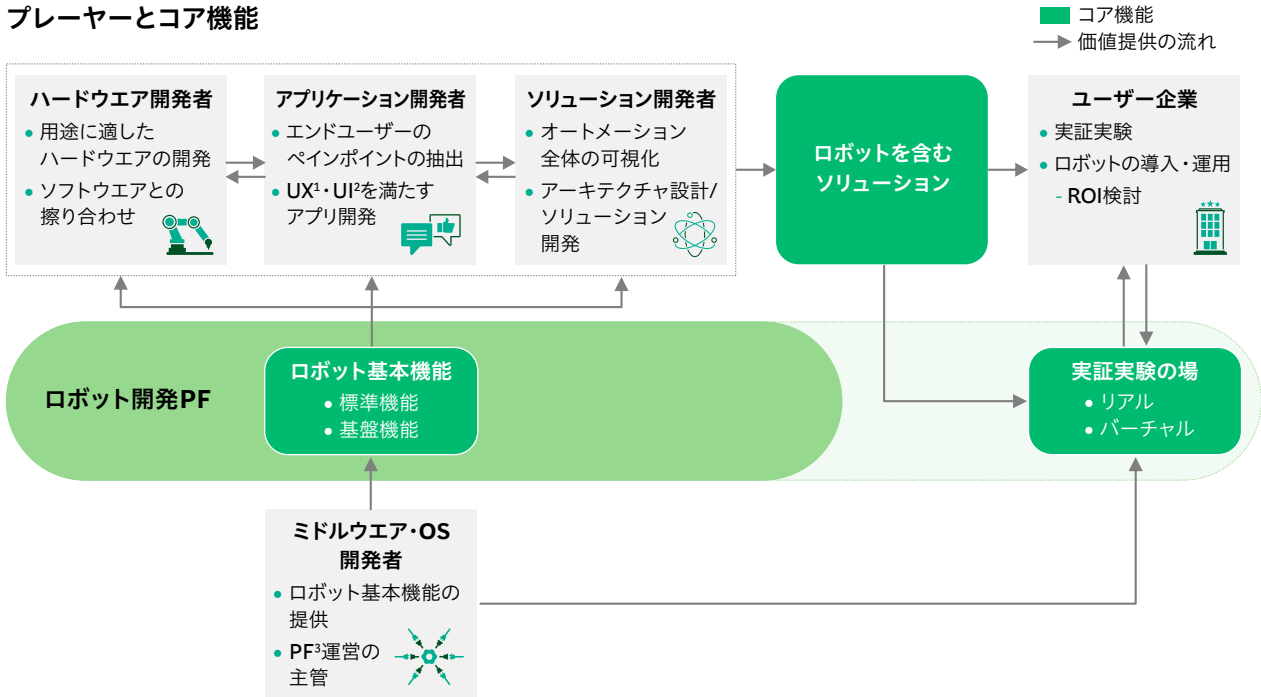
こうしたエコシステムの軸となるのは、大企業とスタートアップの連携だ。しかし、効果的な連携に向けては、互いのビジョン、組織能力(ケイパビリティ)や、プロセスの違いに起因するハードルが存在する。例えば、大企業の経営者からは、「事業部やR&D部門の技術者は自分たちの技術に誇りを持っているため、スタートアップに手を借りず自分たちの手でやり遂げたいという思いが強い」という声を聞く。「大企業が重要な部分をスタートアップに任せない」「リスクリングなどの社員育成に時間をかけるあまり機を逃す」「念入りの確認で意思決定スピードが鈍化する」といった傾向が、素早く大きな成果を上げたいというスタートアップ側の期待とのギャップを生み、両者の連携を阻む可能性がある。こうした事態を脱却するには、連携の起点・よりどころとなる「長期ビジョン・連携目的の共有」と、持続的な連携に必要な「Win-Win関係の構築」が重要となる。

まず、**互いの長期ビジョンの理解を踏まえて連携目的を共有**することで、製品・サービスのコンセプト検討や開発における連携がスムーズになる。大企業のスタートアップへの期待と、スタートアップが描くビジネ



図表11 インテリジェントロボットのエコシステムの目指す姿

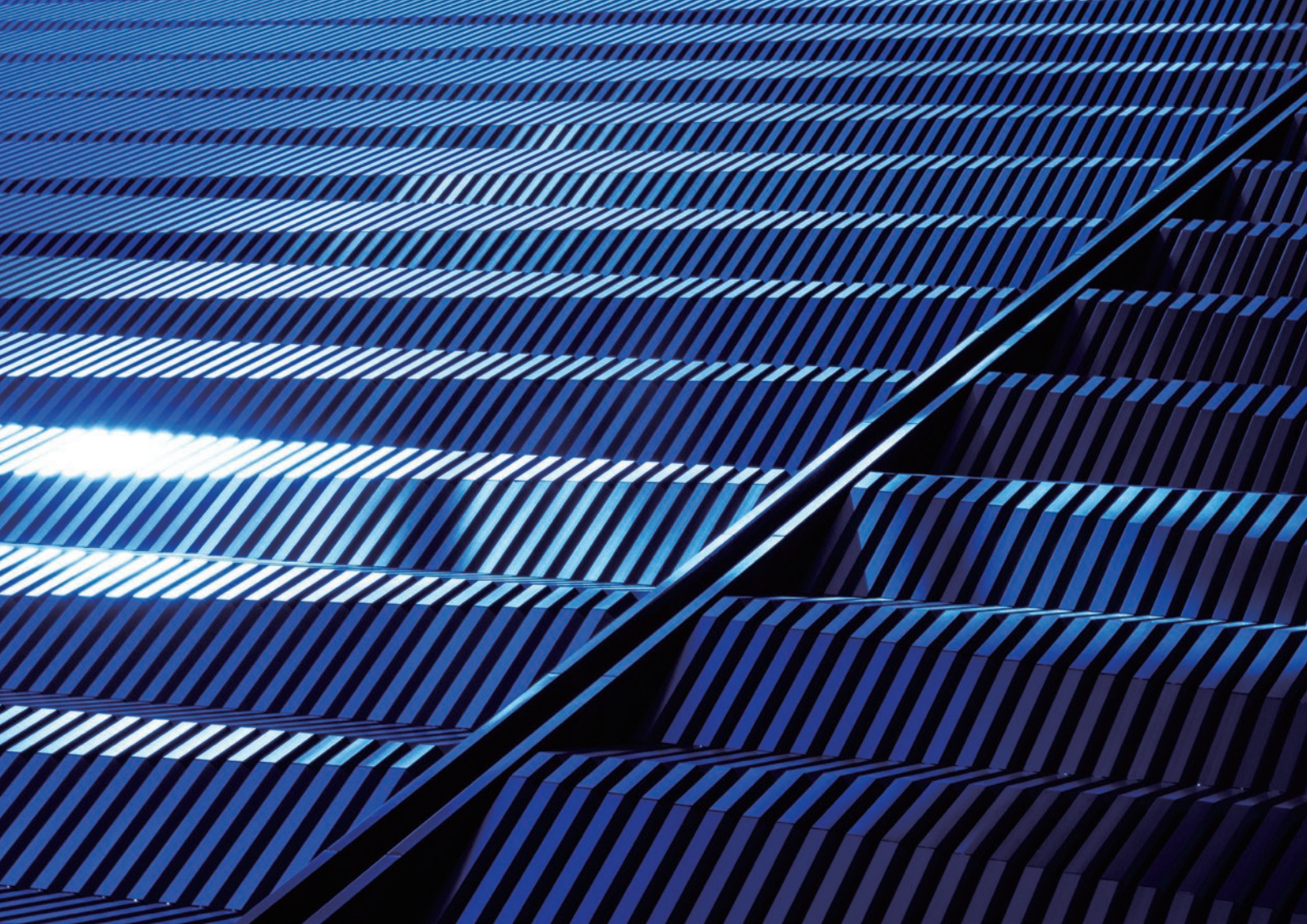
プレーヤーとコア機能



1: ユーザーエクスペリエンス 2: ユーザーインターフェース 3: プラットフォーム  
出所: BHI Japan 分析、有識者インタビュー

モデルには相違があることが多いため、その違いを互いに認識することが重要になる。

また、大企業とスタートアップの双方が目的を達成できる**Win-Win**の関係を構築する必要もある。それはまず、大企業とスタートアップのそれぞれが、どのような価値を提供するのかを互いに明確にすることから始まる。同時に、大企業において強烈的な危機意識を醸成し、新規事業に挑戦する土壌を作る。「速く・安く・賢く失敗する」フェイルファストな意思決定プロセスを築き、イノベーションモデルを変革させることが重要だ。さらに、スタートアップのエグジット手段の選択肢として、IPOだけでなくM&Aを視野に入れることも検討すべきだろう。複数のオプションがあることで、大企業とスタートアップの連携に広がり生まれ、イノベーションの幅も拡大する。



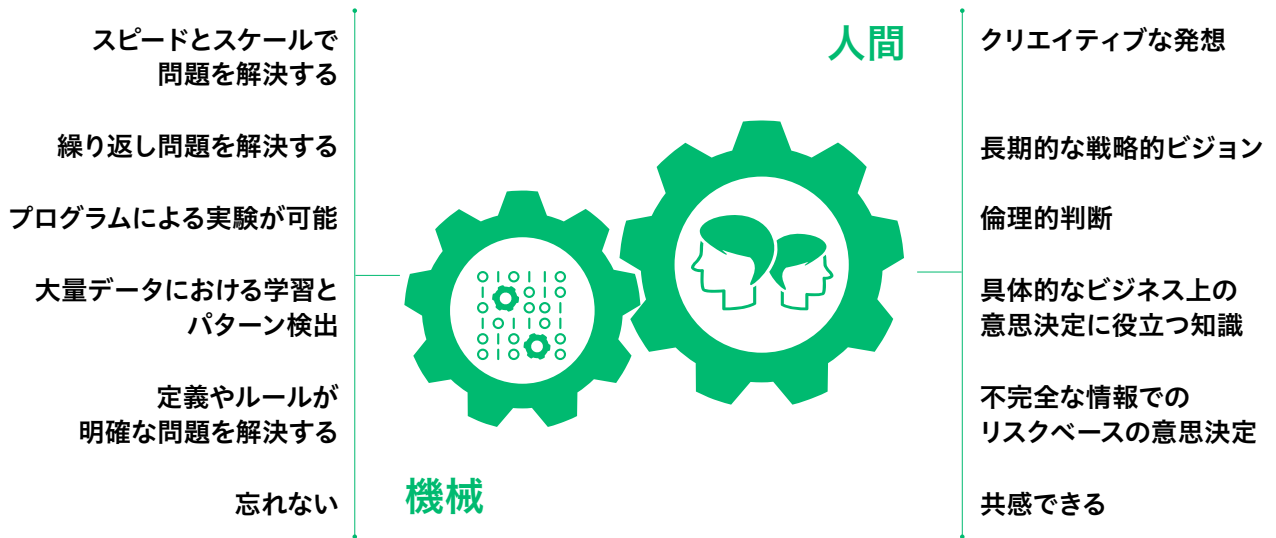
## ユーザー企業における インテリジェントロボットの活用

ここからはインテリジェントロボットをユーザー側がどう活用するかを見ていきたい。インテリジェントロボットは、あくまで人間の活動のイネーブラー（支援者）にすぎない。バイオニックな（人間と機械が協働する）企業においても、企業の本質は人であり続けるからだ。インテリジェントロボットの活用を通じて、人間がクリエイティブな発想や戦略的思考などの創造力を解き放てることが重要である（図表12）。ユーザー企業がインテリジェントロボットの活用により、さらに広く複雑なタスクをロボットで自動化・拡張することを目指す際には、この考え方を念頭に置くべきだろう。将来の姿に向かう過程で、企業のバリューチェーンやオペレーションをロボットの形状・機能に適する形で再設計するトランスフォーメーションが求められる。

インテリジェントロボットは、前述のボトルネックをすべて解消せずともさまざまな価値の創出・提供が可能



図表12 人間と機械の融合の考え方



出所: BHI Japan 分析

であり、実際に利活用が始まっている。今後、ボトルネックの解消によりロボットの提供台数の規模が一定を超えると、低コスト化や、職人技のような高精度な動きの実現が加速し、一気に普及する可能性がある。

### B2B / B2Cにおける活用例

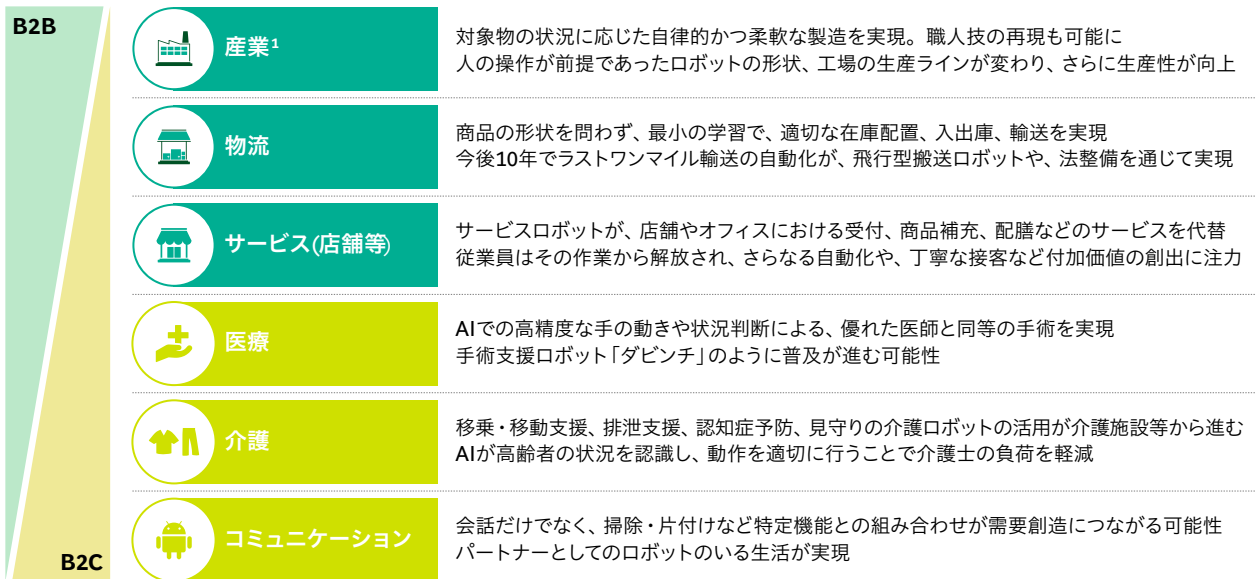
すでに現場での活用が進む産業、物流、サービスなどのB2B、今後のさらなる普及が期待される医療、介護、コミュニケーションなどのB2Cに分けて、活用例を見ていく(図表13)。

**産業** 産業用ロボットが製造する対象物の形状や状態を捉え、それに応じた自律的な動作を行えるようになる。産業用ロボットをAIが操作できるようになると、人が操作する前提で設計されていたロボットの形状そのものが変わる。例えば、人が操作する前提で1本であったロボットアームは、AIであれば同時に複数本操作できるので、作業効率を考えると4本になるかもしれない。結果、工場の生産ラインの在り方から再設計することが重要となりうる。

**物流** 物流ロボットが最適な在庫配置、入出庫のルート設計、ラストワンマイル輸送を行うようになる。アマゾン・ロボティクス、ノルウェーのオートストア、日本のムジンなど、物流ロボットの活用は国内外ですでに始まっているが、特に海外が先行している。今後10年ほどで、倉庫から目的地までのラストワンマイル輸送の自動化が、飛行型搬送ロボット、輸送ロボットの進化や、空・陸の自動運転にかかわる法・規制の整備を通じて、実現する可能性がある。

**サービス(店舗、オフィス等)** 店舗やオフィスにおける受付、配膳などのサービスは、サービスロボットが代替するだろう。従業員はその作業から解放されて、デジタルにかかわるリスクリングを行いつつさらなる自動化を推進したり、丁寧な接客などの付加価値に注力したりできるようになる。すでに、配膳ロボットはファミリーレストランなどの飲食店で普及が進んでいる。今後は、顧客体験を向上させるアプリケーションや、データ活用によるサービス改善が行われていくと考えられる。なお、店舗やオフィスなどの環境は、車輪タイプのロボットを想定したバリアフリー化など、サービスロボットが

図表13 インテリジェントロボットの活用例



1: 製造業、建設業などを指す  
出所: BHI Japan 分析

動作しやすい空間・内装の設計に変わる方向性が考えられる。

**医療** 医師が現状では実現が難しい、より高精度な手術が行えるようになる可能性がある。医師の手術を支援する操作型医療ロボットの例として、米国のインテュイティブサージカルの「ダビンチ」が挙げられる。ダビンチは、優れた性能や、消耗品・保守に重きを置いた購入しやすいビジネスモデルを背景にB2Cの中では例外的に普及が進んでいる。患者の体表に開けた1センチの穴から挿入したロボットアームで、医師の動作の手振れ補正や縮小動作により、精密に身体へのダメージの少ない形で手術を行える。AIを組み合わせれば、フィードバック制御により、より高精度に繊細な手術を行えるようになる可能性がある。

**介護** 介護施設やリハビリ病院などで、移乗支援、移動支援、排泄支援、認知症予防、見守り等の介護ロボットが導入されると、患者の状態・状況にあった適切な措置をAIが判断して行えるようになり、介護士が少人数でも、負荷を軽減しながら介護にあたる可能性

がある。介護ロボットの活用は高福祉国家の北欧が先行している。例えば、デンマークでは日本に先駆けて、日本のスタートアップのGROOVE X(グローヴエックス)が開発した家族型ロボット「LOVOT(ラボット)」を、介護施設での認知症治療等に用いる実証実験が進んでいる。

**コミュニケーション** 人・ロボット間のコミュニケーション、人同士のコミュニケーションの促進をロボットが担うことで、ロボットが新しいパートナーとなり、人間との共存が実現する可能性がある。コミュニケーションロボットの普及時期を予測することは難しいが、進化のボトルネックが解消されれば、比較的高コストでも導入しやすいB2Bのサービス(店舗、オフィス等)から始まり、B2Cに普及していくと考えられる。具体的なタスクをこなせる掃除ロボットが一定普及していることに鑑みると、コミュニケーションだけではないロボットならではのプラスαの機能が普及のカギとなりうる。

## ユーザー企業による活用で押さえるべき 8つのポイント

すでに述べてきたように、インテリジェントロボットの活用にあたっては、バリューチェーンやオペレーションの再設計を伴う、自社のトランスフォーメーションが求められる。ユーザー企業がインテリジェントロボットを活用するうえで押さえるべきポイントは8つある（図表14）。同じく全社的な再設計が求められるデジタルトランスフォーメーション(DX)との共通点をヒントにしつつ、考察する。

### 1. 解くべき経営／事業課題が明確になっている

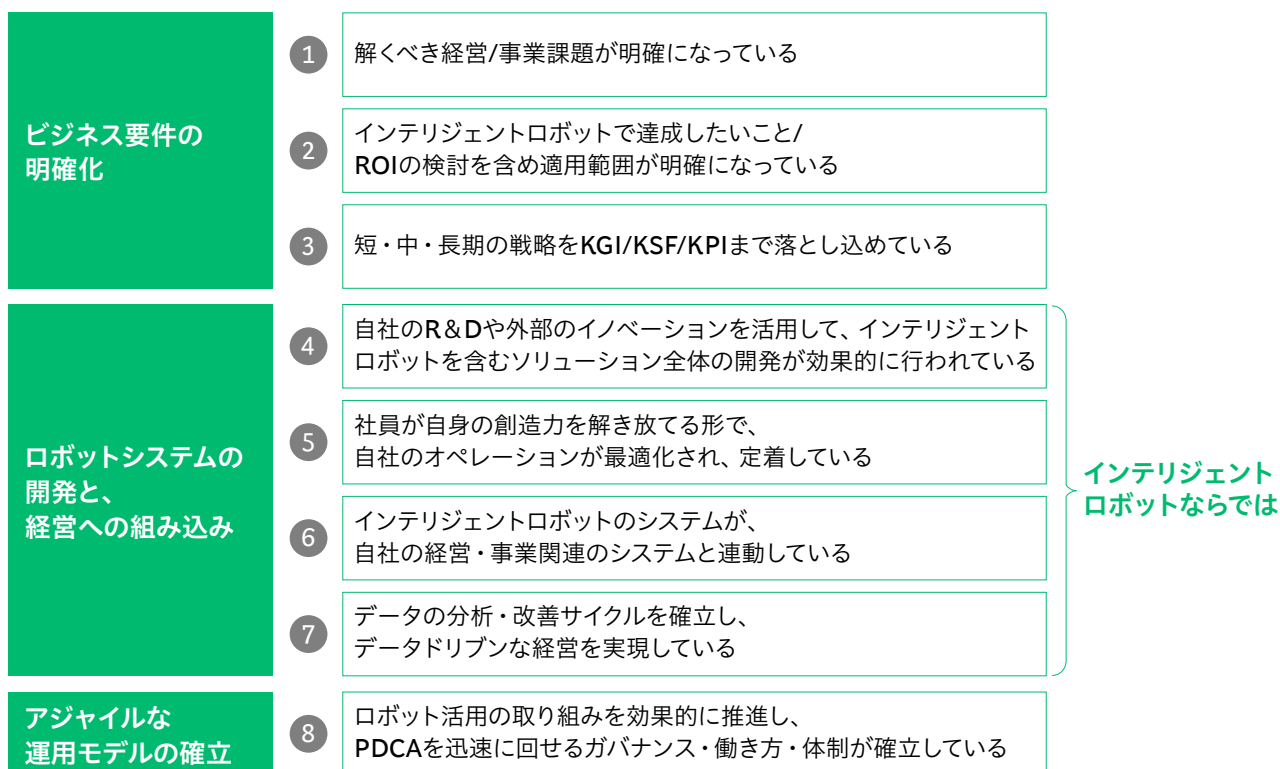
まず行うのが、解くべき経営／事業課題の明確化だ。インテリジェントロボットを導入するのは、何らかの課題を解決するためであり、クリエイティブな発想と具

体化が重要となる。例えば、B2Bの製造業であれば、「製造効率をもっと上げたい」「機械故障による生産ライン停止に伴う機会損失を最小化したい」「職人技を大量に再現したい」など、B2Cのコミュニケーションであれば、「顧客体験を向上したい」「顧客接点から得られるデータを有効活用したい」といった課題を出発点に明確化していくことになる。

### 2. インテリジェントロボットで達成したいこと／ROIの検討を含め適用範囲が明確になっている

経営／事業課題の解決のためにインテリジェントロボットで達成したいことと、そのバリューチェーン上の適用範囲を明確にする必要がある。インテリジェントロボットで達成したいことは、突き詰めれば、人の作業の代替と、職人技の再現や高度な情報収集・分析といった人の能力の拡張だ。自動化しやすい単純な作業と、

図表14 ユーザー企業がインテリジェントロボットの活用で押さえるべき  
8つのポイント



出所：BHI Japan分析、有識者インタビュー



人間でないとできない柔軟な作業の両極端の中間地点に位置付けられる、とも言える。

適用範囲については、製造業であれば、まさに製品の開発・組み立てが、コミュニケーションであれば顧客体験のインターフェースとなる顧客接点が考えられる。ロボット活用による人の作業の代替、および付加価値のROIと、従来通り人が行う場合のROIを比較して、前者が大きければ導入が合理的という判断ができる。その際には、製造業であれば産業用インテリジェントロボットを導入することでタクトタイム(製品ひとつあたりの製造に要する時間)が何秒短縮できるのかなど、リターンと投資を細かく計算し、ROIをシビアに検討する必要がある。また、ROIを満たしやすい高付加価値領域を対象とする視点も重要である。例えば、製造業において、職人によるジェットエンジンのギアの加工は高付加価値領域であるが、ミリ単位よりも高い精度を求められるという点で、作業場所に固定されたインテリジェントロボットによる高精度な作業と相性がよい。

一方で、DXと同様、常にROIを計算して取り組んでいると重要な機会を逃したり、大胆な改革に踏み切れなかったりと大きな弊害を生むことになる。DXで有効な「まず小さくヒットを打って、その実績をもって拡大していく」という考え方は、インテリジェントロボットにおいても必要であり、ROIの見立てに束縛されすぎない柔軟かつアグレッシブな思考とアプローチを大切にすべきである。

### 3. 短・中・長期の戦略をKGI / KSF / KPIまで落とし込んでいる

確実に実行し、継続的にモニタリングできるよう、戦略はできる限り定量的かつ測定可能な形でKGI(重要目標達成指標) / KSF / KPI(重要業績評価指標)に落とし込む必要がある。例えば、介護施設が介護ロボットを導入する場合を考える。KGIは、「逼迫する介護職員の離職率抑制」とする。その場合のKSFは、離職の大きな原因である、「介護職員の日々の重労働を実現可能なオペレーションに即した形で軽減」する

ことが考えられる。KPIは、オペレーション上で特に職員が負荷を感じている点を改善する数値目標や、職員が介護ロボットを使ってみた感想、使い勝手のフィードバックとなる。

### 4. 自社のR&Dや外部のイノベーションを活用して、インテリジェントロボットを含むソリューション全体の開発が効果的に行われている

第3章で述べたように、ソリューションの開発では、社内のR&Dや外部のイノベーションを結集した効果的な開発を自社がリードすべきである。全体のアーキテクチャ設計、開発・運用において自社でできることと外部の力を活用することの見極めや、自社が担うべき機能のケイパビリティ構築が重要となる。DXの推進に関しては、欧米の先進企業と比較すると日本では必要なケイパビリティが内製化されていない傾向がある。インテリジェントロボットについても、自社のケイパビリティを構築しながら、外部と連携したエコシステムをいかに創り上げるかが、重要なレバーとなる。

### 5. 社員が自身の創造力を解き放てる形で、自社のオペレーションが最適化され、定着している

人間と機械が融合しても、企業の本質は人であり、社員が創造力を解き放てることが重要だ。それに資する形で、開発したロボットが自社のオペレーションに適切に組み込まれ、かつ定着している必要がある。自社ならではのオペレーションは、競争優位性の源泉ともなりうるからだ。製造業であれば、実現したい職人技をいかに再現してオペレーションに組み込むか、コミュニケーションであれば、ターゲット顧客のペインポイントを解消できる顧客体験の設計などが、オペレーションの最適化として考えられる。

オペレーションの最適化に際しては、現状のオペレーションに単純にロボットを組み込むのではなく、ロボットの活用に適したオペレーションの再設計と、環境のインテリジェント化の視点が有効である。環境のインテリジェント化とは、ロボットを取り巻く環境側にあるシステムがオペレーションに必要なデータ収集や分析を行

い、その結果をロボットとやりとりすることで、ロボットの自律のハードルを下げる考え方である。また、オペレーションの最適化では、社員が再現できるよう、ロボットを活用する前の現状のオペレーションと、変更後のオペレーションがマニュアルなどで言語化されていることが望ましい。

## 6. インテリジェントロボットのシステムが、自社の経営・事業関連のシステムと連動している

インテリジェントロボットが自社のバリューチェーンに適切に組み込まれ、オペレーションが円滑に回るためには、ロボットのシステムが自社の経営・事業関連の周辺システムと、データ連携などで連動している必要がある。例えば物流では、物流ロボットがWMS(倉庫管理システム)と連動することで、倉庫全体における最適な在庫管理や、効率のよい入出荷ができるようになるだろう。店舗サービスでは、自動配送ロボットが店舗ビルのBIM(ビルディングインフォメーションモデリング)と連動することで、店舗ビル内での商品の自動配送を効率的に行えるようになる。実際に、三菱地所グループなどによる大手町・丸の内・有楽町エリアでのコーヒーの自動配送の実証実験において、店舗ビルのBIMを用いたデジタルツインに連動させることで、フィジカルな測量等の作業を削減し、効率的に自動配送を実現している。

## 7. データの分析・改善サイクルを確立し、データドリブンな経営を実現している

インテリジェントロボットの活用を通じて収集できるデータを、ロボットの動作の精度向上などに継続的に活かすことが、データドリブン経営のカギとなる。例えば、製造業ではロボットの動作と、その結果にかかわるデータを用いてAIによる機械学習を推進することで、動作の精度を上げたり、故障などの予測の精度を上げたりすることができ、コスト削減につながる。コミュニケーションでは、ロボットがデータを収集する部屋の構造のデータをAIが学習することで、導線がよりスムーズになったり、物の探索や把持が可能になったりし、顧客体験の向上につながるだろう。また、自動的

に収集された多様なデータを顧客インサイト、オペレーション全体など、広く深く活用していくことが優位性構築のカギとなる。

## 8. ロボット活用の取り組みを効果的に推進し、PDCAを迅速に回せるガバナンス・働き方・体制が確立している

上記の一連のロボット活用の取り組みは、大目標を見据えつつ、小さく走りながら取り組みの全体像の解像度を継続的に上げていき、時にはピボット(方向転換)するという、アジャイルなやり方で進めるのが望ましい。ロボットがフィジカルであるがゆえに、オペレーションなどに影響する変数が多く、試してみてもわかることも多いからだ。

## インテリジェントロボットの活用の継続的な発展

自社のトランスフォーメーションという視点から一歩引いたマクロの視点で考えると、「空洞化産業の国内回帰」「自動化で余裕が生まれた人材のリスクリング」「サステナビリティ」を考えていくことが、ロボット活用の継続的な発展に有効である。

**空洞化産業の国内回帰** 日本では長く、地域経済を支える製造業の工場が国外に移転することで産業の空洞化が進行してきたが、近年その生産拠点を国内に呼び戻す動きが見られる。例えば、福岡県では、伝統的に半導体関連企業が集中してきた経緯から、「シリコンアイランド九州」を掲げ、産官学が連携して半導体関連企業の誘致を進めている。労働集約型の製造から、インテリジェントロボットを駆使したオートメーションへの転換が、新興国における労働コストの上昇とも相まって、製品によっては日本で製造することの意味合い、ROIを高めることにつながることを期待したい。

**自動化で余裕が生まれた人材のリスクリング** 自動化により手が空いた人材がより高付加価値な業務を行うことで、それにより生まれた活力がウェルビーイング

につながるよう、必要なスキルの学び直しを図ることも重要だ。インターネットの誕生により、ネット広告の企画や、ネット利用状況のモニタリング・施策実行といったインターネットを使いこなす仕事生まれたように、自動化をより推進する方向性と、高度な接客に注力するなど自動化とは別の業務に当たる方向性が考えられる。

**サステナビリティ** ロボット活用による省エネルギー化を通じた、カーボンニュートラルへの貢献も考えていく必要がある。開発における省エネルギー化と、ロボット活用を通じた自動化による省エネルギー化の方向性が考えられる。





## おわりに ——リスクと備え

最後に、日本がインテリジェントロボットの実現に取り組むうえでは、リスクも想定される。例えば、法整備・法解釈が遅れる、インテリジェントロボットが予測不能な動きをして事故が発生する、個人情報・機密情報が漏洩するなどのアクシデントにより、開発の進展が滞ることも考えられる。

また、技術発展の遅れや、過度の法規制、さらには消費者の受容が思うように進まないことで、市場が進展しない可能性もある。

これらのリスクへの備えとして、政府が柔軟な法・ルールを整備し、そのうえで大企業がリスク対応を主導することが望ましい。大企業はリスク対応に慣れていること、問題発生時に影響を及ぼす範囲が大きいことから、リスク対応の先駆者となることが求められる。



技術の進化はもちろん、日本においては特に労働生産性向上という課題への対応から、インテリジェントロボットは確実に広がり、自動化と能力の発展により、人の活動を代替・拡張していこう。それに伴い、人はより高付加価値な仕事や、新たなやりがいを感じる仕事にシフトすることができる。このシフトがうまく実現できれば、成長とウェルビーイングを両立する経営、ひいては社会の実現につなげることができる。海外企業が躍進するなか、今ならまだ日本の強みを活かしてグローバルでの競争力を維持・強化することができる。産官学が最適な形で連携し、この領域の発展を積極的に推進すること、ならびに、B2B、B2C 共に幅広い業種のユーザー企業が、インテリジェントロボットへの投資を通じて、これまでと違う発想でサービスの質の向上と業務の効率化を推進することが求められている。

## 執筆者



### 荻田 修

BCG 東京オフィス  
マネージング・ディレクター & シニア・パートナー  
BCG ヘンダーソン研究所 (BHI) フェロー  
BHI Japan リーダー



### 櫻井 佑介

BCG 東京オフィス  
プロジェクトリーダー  
BHI アンバサダー



### 大久保 篤

BCG 東京オフィス  
コンサルタント

### 助言、議論への協力:

### 植田 和則

BCG 京都オフィス  
マネージング・ディレクター & パートナー

### 関根 正之

BCG 東京オフィス  
アソシエイト・ディレクター、データサイエンス

2023年2月発行

### BCG ヘンダーソン研究所 (BHI)

BCG の戦略シンクタンクとして、アイデア創出に有効なテクノロジーを活用し、ビジネス、テクノロジー、科学分野からの新しい価値あるインサイトを探求・開発しています。ビジネスリーダーを巻き込んで、ビジネスの理論と実践の境界線を広げ、ビジネス内外から革新的アイデアを取り入れるための刺激的なディスカッションや実験を行っています。2022年7月に日本における拠点である BHI Japan を設立しました。  
<https://www.bcg.com/ja-jp/bcg-henderson-institute/ideas-of-tomorrow>

BHI Japan では、日本が経済成長とウェルビーイングを高いレベルで実現させるための優先課題についてさまざまな角度から研究しています。ご関心をお持ちの方はこちらをご覧ください。

「メタバースの可能性——日本企業の成長と社会課題の解決に向けて」  
(2022年11月)



BCG

BCG  
HENDERSON  
INSTITUTE