

[スマートファクトリーは工場の何を変えるのか?]

## ⑤ 持続可能な社会に向けた 今後の生産システムと産業基盤

— 「人」が主役となるものづくり革新推進 (HCMI)  
コンソーシアム 2050 年に向けたロードマップから—



岩井匡代 谷川民生

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 HCMI コンソーシアム



### 「人」の活躍が持続可能な社会の鍵

「人」が主役となるものづくり革新推進 (HCMI) コンソーシアムは、2019 年 4 月 10 日に産業技術総合研究所 臨海副都心センター内に事務局を設置して発足した。産業競争力懇談会 (COCON) で産学官が集結し、次世代のものづくりと豊かな未来に向けた産業基盤の課題について協議した結果、「人」は労働力だけでなく、消費社会を形成する重要な財産であり、「人」の活躍が今後の産業基盤の進化に不可欠であるとし、「人が主役となる新たなものづくりの確立」を提言し、その実現に向けた産学官協働プラットフォームとして発足した。

当コンソーシアムでは、2020 年度、2050 年の社会・産業の環境を分析した結果を踏まえて、2030 年までに目指すべき姿の確立に向けたロードマップを策

定した。本稿ではこの活動を通じて検討した持続可能な社会に向けた今後の生産システムと産業基盤について紹介する。

### 未来の産業基盤の在り方考察

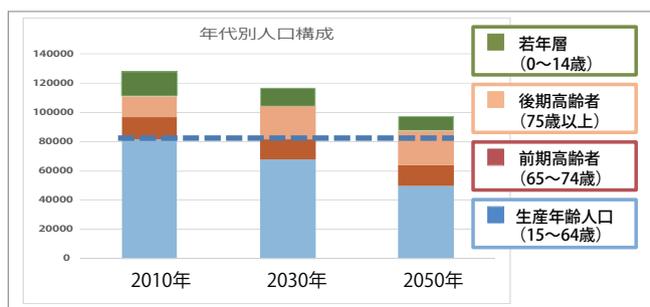
#### 産業基盤を揺るがす社会課題

昨今、消費者のニーズが「モノ」から「コト」に移行し、この傾向は国内だけでなくインバウンド市場にも強まっている。産業動向だけでなく、COVID-19 により、在宅勤務などを余儀なくされるなど、社会課題が産業基盤に大きく影響している。

#### 生産年齢人口減が産業・経済の減退を招く

我が国は世界に先立ち、超高齢化社会を迎え、生産年齢人口は半減する (図-1 参照)。2030 年にはこの傾向が世界中に拡大する。すでに深刻な人手不足が、「人手不足倒産」(後継者不足、従業員退職、求人難、人件費高騰が原因の倒産)が増加傾向となり、事業継続問題になっている。

同時に、消費層を担う重要な就労世代が縮小することにより、国内市場の消費経済の大幅な縮退を招く。さらに、市場があるところでものを作る地産地消の傾向は、消費経済の縮退に連動してものづくり産業需要も縮退する。このままでは国内産業の危機につながる。



■ 図-1 日本の人口と年齢構成推移 <sup>1)</sup>

特集  
Special Feature

人口偏在による市場の不確定さの加速

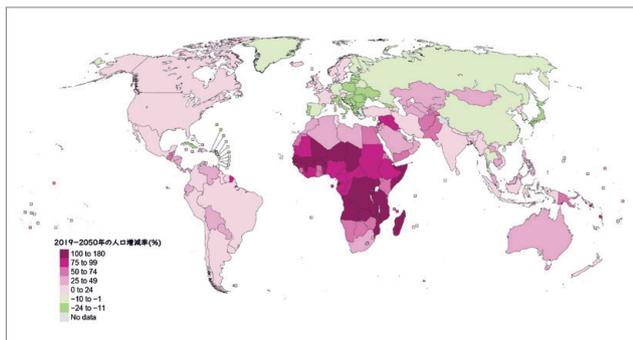
従来、消費動向は、「消費の重心」（人口×経済力が大きい国、地域）の需要動向で予測してきた。しかし、将来の人口動向分析では、現在経済力がある欧米、日本、中国などの国は大幅に生産年齢人口が減少し、人口増の8割はアフリカなど消費社会が未成熟な国である(図-2 参照)。そのため「消費の重心」が不安定になり、消費動向の予測は困難になり不確定さが加速すると予想される。

もちろん消費社会が未成熟な国においても、生産年齢人口増による、経済成長期待が高まっているが、地球環境の容量を超えた資源の消費が見込まれ、社会の持続可能性にも大きな課題がある。

すなわち、消費動向はもはや予想するのではなく、想定して、環境を整え創造する時代になると言える。

自然環境の変化が及ぼす社会持続性課題

地球温暖化の影響により、気温の上昇が5～6℃まで達すると異常気象の頻度や強度が高まり、海面上昇による居住地域の制限が出てくるなど、自然災害リスクが高まる。感染症の媒介動物の生態地域にも



■図-2 世界人口変動マップ<sup>2)</sup>

影響し、感染症リスクも高まることが確実である。

もはや、緊急事態対策では対処できないレベルになり、生活や事業を継続できる対処が重要課題となる(表-1 参照)。

また、枯渇性資源の逼迫問題は、単に材料調達が困難であるというレベルではなく、もはや消費主導経済(大量消費、大量破棄)の限界を示している。この対策は企業の枠を超え、重要な産業課題である。

一方、生活様式や経済の大きな変化を加速する側面もある。COVID-19では緊急事態対応である在宅勤務が通常時にも広がり、国内外のデジタル社会の急激な進化を促した。また、資源枯渇についてはサーキュラーエコノミー(循環経済)という新たな経済潮流を生み、欧州を中心に国策として進められている取り組みの中には、単にリスクに対する防御的施策だけでなく、新たな価値創造や、新たな雇用創造につながるとして、積極的に国策として環境と経済成長の両立に向けた政策が展開されている。国内でも、経済産業省が循環経済2020として政策展開を強化している。

産業の持続的発展に向けた課題

当コンソーシアムでは、上述の社会課題が及ぼす産業基盤への影響を踏まえ、「人」の活躍を経済成長に効率的に転換すること、自然災害・感染症リスク発生時に生活や事業を継続しやすいこと、さらに質的な豊かさを提供できることを目標として設定し、産業の持続的発展に向けた課題を分析した。

生産人口増と労働生産性向上

「モノ」から「コト」へ移行し、市場ニーズの多様化

■表-1 温暖化による環境変化と健康影響<sup>3)</sup>

温暖化の健康影響		
	温暖化による環境変化	人の健康への影響
直接影響	暑熱、熱波の増加	熱中症、死亡率の変化(循環器系、呼吸器系疾患)
	異常気象の頻度、強度の変化	障害、死亡の増加
間接影響	媒介動物等の生息域、活動の拡大	動物媒介性感染症(マラリア、デング熱など)の増加
	水、食物を介する伝染性媒体の拡大	下痢や他の感染症の増加
	海面上昇による人口移動や社会インフラ被害	障害や各種感染症リスクの増大
	大気汚染との複合影響	喘息、アレルギー疾患の増加

に対応するため、生産方式は多品種少量生産からさらに変化に追随する変種変量生産への転換が急がれる。

これまで生産性を牽引してきた機械中心の自動化は、開発期間が追いつかず、投資効果を得にくくなり、人件費支出の方が効率的という結果に陥りやすい状態になる。一方、人依存が大きくなると人手不足の影響をダイレクトに受けるため、求人对策や労働生産性の維持向上対策が重要課題になる。

### 人口偏在の緩和と生活・事業継続

自然災害や感染症対策として、人口偏在の緩和や、少ない移動で日常生活が維持できる自立した地域環境づくりと、自立した地域同士の連携が有効であり、これはサステナブル社会の実現にも貢献する。

また、豊かな未来に向け、人々の生活も地域に密着しながらグローバルなつながりが得られるなど開かれていることがリスクの緩和適応と産業基盤の進化を促すと考える。そのためには時間・空間の制約が少ない自分らしい生き方(働き方)を実現する働く環境革新が求められる。

### 生涯能力向上の期待を持つ豊かな働き方

就労人口の拡大を豊かな消費社会形成に発展させるためには、単に労働の場の提供にとどまらず、生涯能力向上の期待を持った豊かな働き方の実現が不可欠である。また在宅勤務などの定常化から、現在の労働集約型を前提として充実してきた労働安全の仕組みを進化させ、個々人の状況に応じて能力を発揮し

やすい状態を確保する新たなマネジメントシステムが必要であると考えられる。

## Society5.0 時代のものづくり —SDGs 目標 8「働きがいも経済成長も」

上記の考察を踏まえ、当コンソーシアムでは図-3に示す、活動の狙いを定めた。

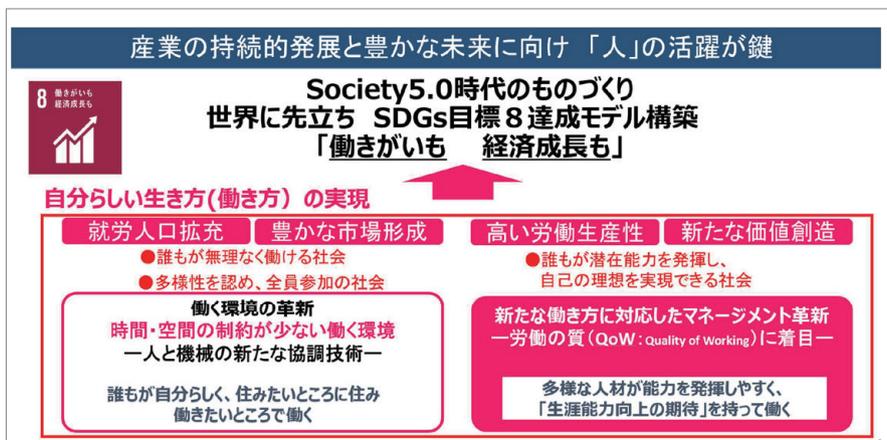
### ものづくりの進化と働く環境革新

誰もが無理なく働くことができ、自分らしく住みたいところに住み、働きたいところで働ける、時間・空間の制約が少ない働く環境の整備に向け、これまでの機械中心で、機械化が及ばないところを人がサポートするというのではなく、人が主体性を持って働けることに集中して技術習得や成長への希望が持てるように、人と機械が柔軟に役割を調整しながら働く新たな人と機械の協調型協働システム基盤の構築に取り組む。さらに時間・空間を超えてつながる遠隔協調型協働へ進化させ、働く場所にかかわらず協調できるものづくりIoA (Internet of Ability) の構築が必要であると考えられる。その前提として生産システムを Human-in-the-Loop に進化させる必要がある。

### 労働の質に着目した新しい働き方

産業の持続的発展と豊かな未来に向けた「人」の

活躍が、日本における Society 5.0 時代のものづくりの鍵になるという考えのもと、高い労働生産性や新たな価値創造には「働きがい」が非常に重要であると認識している。そこで、労働の質を Quality of Work ではなく、労働者の就労生活の質や能力の向上と組織価値(労働生産性)の双方に着目した、Quality of Working (以降の QoW は、



■図-3 2030年に向けたHCMIコンソーシアムの活動の狙い<sup>4)</sup>

特集  
Special Feature

Quality of Working の略称) の確保・向上を実現するための新たな働き方に対応したマネジメントの革新が不可欠と考えている。就労人口拡大に向け、多様な人材が働きやすく、就労者の労働寿命を延伸し、生涯能力向上の期待を持って働けるように各人の状態に応じたきめ細やかなセルフマネジメントと組織マネジメントを実現するためのマルチタレントマネジメントの手法確立とオンジョブでシステムインするための技術確立に取り組む必要があると考えている。

## Human-in-the-Loop のつながるものづくり

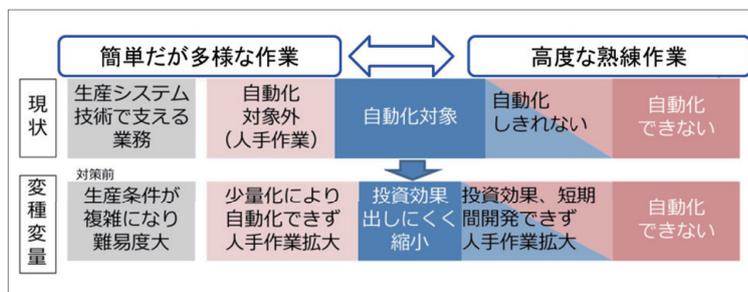
### 人と機械の協調システム基盤

生産分野において、人手でなければならない作業として大きく 2 種類考えられる。

図-4 における左側が、簡単ではあるが、多様な動作や手順を必要とする作業、右側が、作業自体が高度であり、主に高度な熟練技術を要する作業である。従来の大量生産方式であれば、設備投資をしても十分投資回収が可能であったが、作業工程が頻繁に変わる変種変量生産においては、ロボットによるモーションの再設定や生産ラインの改変等、自動化におけるコストが増大し、費用対効果について人件費のほうが良い結果となっている。しかし、労働生産性や人手不足の影響を考慮すると、AI 等を活用し、自動化技術をより高度化することが必要であると考えられる。特に、簡単だが多様な作業においては、今までのようにロボット技術と AI 技術を活用し、ロボットの知能化

を向上し、多様な作業に適用できるようにすることは重要ではあるが、すべての作業において、完全に自動化することは困難であると考えられ、多様な作業に対応できるという人の柔軟性に依存する部分は残らざるを得ない。すなわち、1人の作業者をロボットで置き換えるという考えではなく、2人の作業者のうち、1人をロボットに置き換え、人とロボットが協調作業することで、1人あたりの生産性を向上するという考え方で進めることが現実的と考えられる。現在でも、ロボットメーカー各社から協働ロボットというコンセプトの下、人と同じ空間で作業できる安全性の高いロボットが販売されている。しかし、基本的には、安全柵等の物理的な作業空間を分離することなく安全センサを備えたロボットであるだけで、労働安全衛生法上は、ロボットが作業者にツールを手渡しするようなインタラクションの強い協調作業をすることは認められていない。そこで重要な技術は、人の作業動作の認識技術の高度化である。協働ロボット等の安全を担保する機能安全の考え方においては、人間のモデルは不確定なものとしてリスクアセスメントされていた。よりインタラクションの強い協調作業をさせるには、作業個々のパーソナライズされたモデル化およびその作業者の行動推定を行い、タイミング等を予測する技術が必要となる。パーソナライズされた作業者の予測動作通りに作業者が動いている間は、安全率よりも効率性を上げ、モデルと食い違う動作になれば、安全率を上げていくといった、人の動作予測制御と組み合わせ、安全性と効率性を両立した人・機械協調制御技術を開発していくことが求められる。

さらに、昨今の COVID-19 の緊急対策として、在宅勤務という業務が浸透してきている。会議や PC を活用したオフィスワークについては、作業場所によらない業務形態が取り入れられてきているが、工場や物流等のモノを扱う物理作業においては、現場での作業の必要性は変わらない。しかし、ロボットの遠隔操作技術を活用することで、物理



■図-4 変種変量生産におけるものづくりの変化

特集  
Special Feature

作業においても、在宅勤務のように、現場に依存しない就労が可能であることが期待できる。これは、人と機械の協調という「1人あたりの生産性向上」と場所に依存しない就労の実現による「働きやすさ向上による潜在的労働者の活用」の効果が期待でき、今後の就労人口の低下の大きな解決策として期待できる。

以上のように、「AIによるロボットの知能化」から、作業者の動作予測技術を活用した「人と機械（ロボット）の協調技術」、さらに遠隔操作技術を活用した「時空間を超えた人とロボットの協調技術」へと展開していくことが必要であると考えて、当コンソーシアムでは図-5のロードマップを策定した。

### ものづくり IoA システム基盤

IoA (Internet of Abilities) とは、「能力のネットワーク」を意味する概念であり、人がネットワークを介して他の人間や機械と知覚および動作を共有することで、意識や能力を拡張するものとされる。このIoAの概念を技能継承に適用し、熟練技術者の広範な技能や知

識をネットワークを介して集約し、集合知化して展開することによって人材育成やロボット活用を推進するものづくり IoA システム基盤を、我々は提案している。

ものづくり IoA システム基盤実現のための技術開発は、以下の段階を経て実施することを当コンソーシアムのロードマップを策定した(図-6 参照)。

#### (1) AI を活用した技能転写技術

熟練作業は、定まった条件の下で行われる定型的熟練作業と、変化する状況に応じた柔軟な判断が求められる適応的熟練作業に分類される。ここでは、定型的熟練作業にロボットを適用するための技能転写技術を開発する。

#### (2) 熟練知識の構造化と高度化プロセスの定式化

ここでは、適応的熟練作業を対象として、作業者とロボットのインタラクションによる知識の構造化を進める。適応的熟練作業における技能継承の難しさの1つに、作業の再現性が挙げられる。ロボットに熟練者の知識や判断ロジックを転写し、再現性の確保された動作を実施・評価することで、知識やロジックの

更新を行い、知識の構造化を進める。そして、この過程を技能の高度化プロセスとして定式化する。

#### (3) 知識処理および遠隔共有化技術

(1)と(2)の成果をベースとして、ネットワークを介した広域・広範な技能・知識の集約による集合知化を行う。そして、それまで散在していた知識を結び付けることによって、ライフサイクルを見据えた広視野の熟練知識の創造を図る。

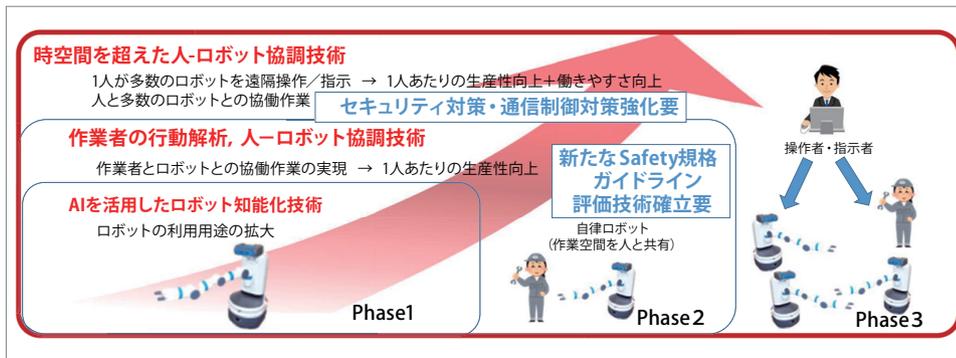


図-5 協調型協働から遠隔協調型協働へのロードマップ<sup>5)</sup>

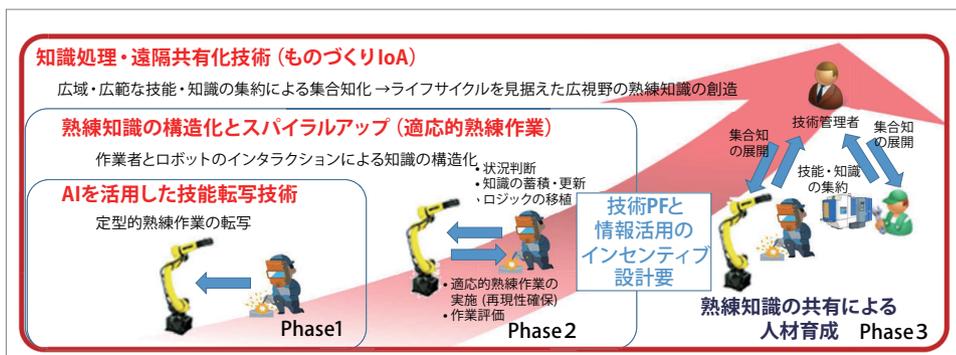


図-6 ものづくり IoA 基盤構築に向けたロードマップ<sup>5)</sup>

特集  
Special Feature

### QoW マルチタレントマネジメントシステム

当コンソーシアムでは、労働の質とは、健康（労働寿命の延伸）、働きやすさ（労働環境）、働きがい（成長意欲）を指標として構成されていると定義し、労働の質向上のためマルチタレントな多様な人材の「労働生活の Well-being」「多様な働き方でも主体的に労働参加」「能力を発揮しやすい状態の維持向上」を各人の状態に応じて支援することが必要であると考えている。このため、チャレンジしたい労働に必要な、労働生活の能力の見える化に向けた「労働生活能力分類の策定」の検討、寝込むほどの健康悪化の前の中間的な虚弱状態（フレイル）を予知し、早期に適切な改善を行い健康を維持するためのフレイル予知予防、つらさの度合い測定、組織との相互信頼に着目した QoW 指標の検討やセンシング方法、改善フィードバック方法の開発、物理的な身体モデルを簡易的な計測で評価できる人モデル基盤の開発、生産システムと人モデルを融合するコンセプトの立案に取り組んでいる。パーソナルマネジメント手法の確立と並行して、ものづくり IoA 型マルチタレントマネジメントシステム手法の確立を進めることにより、NEXT 健康経営として QoW 経営の社会実装を目指している。QoW を定量的かつ客観的に見るための、3K（きつい、汚い、危険）に代表される働きやすさを阻害する作業のつら

さの状態を示す指標の検討やフレイルの予知予防の視点で見る健康指標の検討、またこれらの計測方法の検討は、これらの活動における基盤的な取り組みであり、まさに今取り組むべき課題であると認識している（[図-7](#) 参照）。

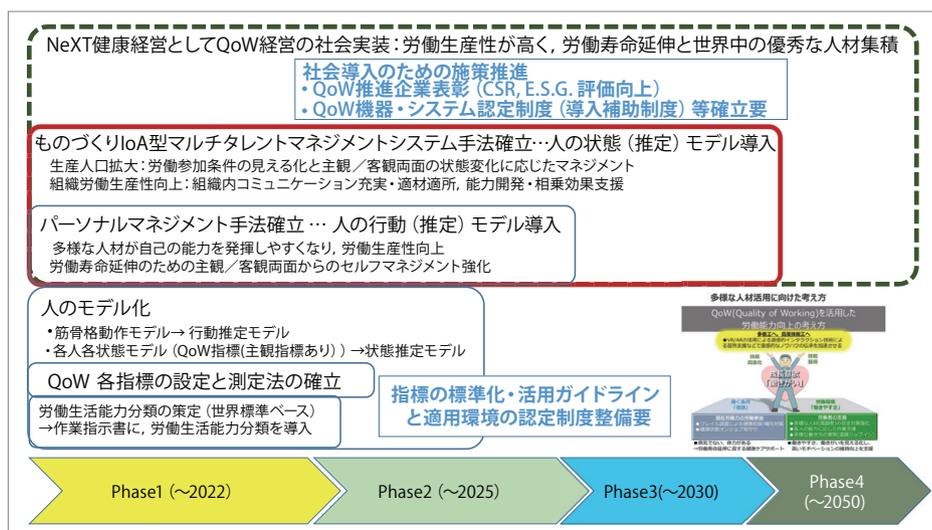
### 2050 年に向けた人が主役となる循環経済のものづくり

欧州の CE（サーキュラーエコノミー）政策に代表されるように、現在の使用済み製品から材料を再生する資源循環から、2050 年にはシェアリング経済、製品のサービス化が進展するとともに、より高付加価値な資源循環メカニズムが構築されると予想される。

本コンソーシアムでは、産業横断的に資源循環を情報管理する 21 世紀政策研究所が発行した「欧州 CE が目指すもの」に定義されている「循環プロバイダー<sup>6)</sup>」の登場により起こり得る社会変化として、以下の 3 つのシナリオを想定した。

- 消費者が主体となるネットワーク型の循環経済へ移行する。地域市場ニーズに柔軟に対応した地域内資源循環の最大化（資源循環のローカライズ）。
- 物流合理化による余剰部材削減、資源投入量削減。
- 製品ライフサイクルを通じたデータの利活用（標準化／流通）により、資源循環の効率化を進め、産業の育成、発展に寄与。

以上のシナリオの実現に必要な技術や制度をバックキャストし、人と資源循環のかかわりについて具体的な移行シナリオの検討を進めるとともに、上述の働く環境革新やマネジメント革新を製品の再利用を担う産業へも適用することで、製品開発産業と再利用を担う産業を融合し、産業横断しの循環メカニズムを構築する



準備を早々に始める必要があると考えている。

## モノ・コトづくりの両輪で活躍する産業基盤へ

社会課題や自然環境が及ぼす産業基盤への影響が強くなる中、これからの産業競争力は単に技術力の強化や事業力の強化だけでなく、同時に産業基盤の根幹である消費社会を形成する就労人口の拡充と活躍を促す対策を行うことが後世に豊かな未来を残しているために必要不可欠である。

そのため、生産システムに人モデルなどを導入し、Human-in-the-Loop に進化させ、協調型協働基盤、遠隔協調型協働基盤、ものづくり IoA 基盤の形成と労働の質 (QoW) に着目したマネジメントシステムの社会実装が必要であると考えている。

産業基盤としても、コトづくりの進展に向けより消費地ベース地域密着型と、基盤製品・部品については、極力量を集めて生産効率を上げ、市場価格を安定させるべく、部材生産密着型の産業クラスタ構築もやはり必要になり二極化が進むと考える。この間をつなぐ広域物流や資源循環などに新たな産業や基盤づくり

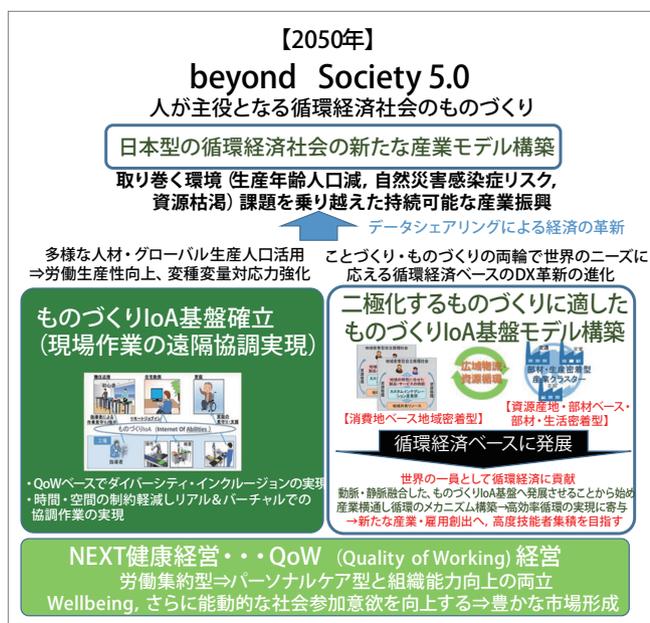
の可能性があると考えるが、上記の基盤がこの可能性を広げることには貢献できると考えており、2050 年に向け、日本はコトづくり・モノづくりの両輪で世界のニーズに応える新たな産業構造と DX 革新の実現により、災害時の生活・事業継続にも貢献する、日本型の循環経済の新たな産業モデル構築に発展させたいと考えている (図 -8 参照)。

なお、本 HCMCI コンソーシアムのロードマップは、運営委員会 (産業技術総合研究所 加納誠介氏, 増井慶次郎氏, 澤田浩之氏他) を中心に会員と協議して作成し、各界を代表するアドバイザー<sup>5)</sup>にご指導をいただき作成した。

### 参考文献

- 1) <https://www.stat.go.jp/data/jinsui/2.html#series>, 総務省統計局データから編集。
- 2) 世界人口統計 2019 年版データブックレット。
- 3) 環境省地球温暖化に関わる影響に関する懇談, [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/pamph\\_infection/full.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/pamph_infection/full.pdf)
- 4) NEDO モノづくり日本会議「TSC Foresight」オンラインセミナー「産業の持続的発展と豊かな未来にむけて」講演資料, <https://www.nedo.go.jp/content/100937372.pdf>
- 5) 「人」が主役となるものづくり革新推進コンソーシアム活動概要 2021 年 6 月 10 日版, [https://www.hcmi.cons.aist.go.jp/document/introduction\\_pdf.pdf](https://www.hcmi.cons.aist.go.jp/document/introduction_pdf.pdf)
- 6) 欧州 CE 政策が目指すもの～ Circular Economy がビジネスを変える～, 21 世紀政策研究所 報告書, 2019 年 3 月, <http://www.21ppi.org/pdf/thesis/190405.pdf>

(2021 年 11 月 25 日受付)



■ 図 -8 HCMCI コンソーシアム活動の狙い (2050 年)<sup>5)</sup>

■ 岩井匡代 (正会員) iwai-msy.hcmi@aist.go.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 HCMCI コンソーシアム 事務局長 兼 三菱電機先端技術総合研究所開発戦略部連携推進 G 担当部長。2016～2017 年産業競争力懇談会「人」が主役となる新たなものづくりプロジェクトの事務局代表として提言書策定取り組み, その提言を実現すべく, 2019 年より事務局長に就任し現在に至る。三菱電機では産学官連携推進の担当部長として組織的連携の推進に取り組んでいる。

■ 谷川民生 tamio.tanikawa@aist.go.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 HCMCI コンソーシアム 運営委員長 兼 産業技術総合研究所情報・人間工学領域インダストリアル CPS 研究センター研究センター長。マニピュレーション技術, 空間型ロボット, Society 5.0 等社会デザインの研究を進めてきた。現在, 労働生産人口低下における社会課題の解決として CPS を基盤とした人機械協調技術の研究を進めている。