

# JSME 技術ロードマップ

## 持続可能で多様かつ包摂的、テクノロジーと自然が調和する 2050 年の社会

山崎 美稀〔(株)日立ハイテク〕

日本機械学会における技術ロードマップの策定と公開の活動は、2007年の創立 110 周年を機に開始された。当初は学術的に未検証の領域に踏み込むことが少なかった。しかしこの時代、世界の金融市場は不安定で、温暖化による環境問題が切迫していた。これらの社会的な課題に対応する必要性が高まり、JSME 技術ロードマップ委員会が設立された。この委員会は、産学連携と分野融合のコミュニケーションを強化し、期待される将来の社会像とそれを実現する技術についての情報を継続的に公開してきた。

2016年には、「技術ロードマップから見る 2030 年の社会」をテーマに特集号を公開した。当時から、部門を超えたテーマによる分野の統合が必要だとされていたが、そのテーマは自動運転に限られていた。その後、分野融合を促進するためのワークショップや年次大会での特別ワークショップを通じて、多角的な議論を展開してきた。これにより、2017年には 2050 年のものづくりに向けた二つの将来ビジョンを発表し、バックキャストिंगの考え方をういたロードマップの作成も進めた。

2022年からは、「JSME メンバーが考える 2050 年の社会像実現に向けた技術ロードマップ」の策定と公開が本格的に始まった。この活動は、単なる未来予測ではなく、希望する 2050 年の社会を創発し、その実現のために必要な新技術や横断分野の方策を検討して来た。バックキャストिंगの手法を用いて創発した社会像 (図 1) を実現するためには、将来の社会課題を明確にし、それに対する技術的な解決策を模索することが重要である。

2023年から1年間にわたって、2016年に公開した「技術ロードマップから見る 2030 年の社会」のレビューを各部門で実施した。その見直し内容を本会の会誌に連載しながら、将来の各分野の展望についての議論を進めてきた。同時に、各部門から選ばれた代表者で構成される分野横断のチームを結成し、ワークショップを通じて、「持続可能で多様かつ包

摂的な社会、そしてテクノロジーと自然が調和する社会」のテーマについて探求してきた。その結果、JSME メンバーが考える三つの社会像を設計した。第一に、『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』。第二に、『多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会』。そして第三に、『リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会』である。それぞれの社会像に関する課題と解決策を明確にした後、モノづくりを中心とする社会実装技術を選定した。これらの考察を基に、新たな技術ロードマップを策定し、本特集で紹介する。

この一連の取り組みは、未来社会が直面する課題に対し、科学技術がどのような形で貢献可能かを具体化している。これは日本機械学会が長年にわたり行ってきた価値ある試みである。その進展と方向性に今後も注目していただきたい。

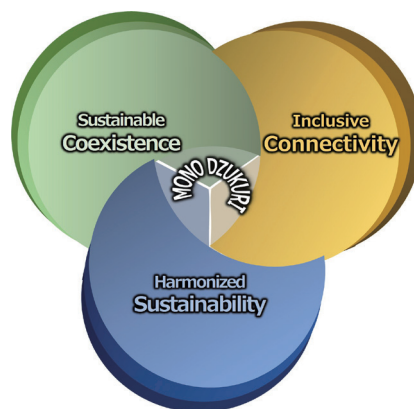


図 1 ©JSME メンバーが考える 2050 年の社会像

技術ロードマップ委員会 委員長  
<フェロー>

山崎 美稀

©(株)日立ハイテク ものづくり・技術統括本部 主管技師

◎専門:環境配慮材料設計・システム設計、製品企画論、技術開発戦略策定

# 技術ロードマップと社会課題への挑戦

矢部 彰(新エネルギー・産業技術総合開発機構)

## 技術ロードマップの検討対象の移り変わり

### フォアキャストの視点の追求

日本機械学会技術ロードマップ委員会が活動を開始した 2006 年頃に、企業の方々に言われたことは、アカデミアが技術の将来を予測できないようであれば、学会活動は必要ないのではないかという厳しい指摘であった。それならば、学会を挙げて技術の将来予測に挑戦し、議論しようではないかという共通の思いを持って活動を開始した。

技術の将来動向は、常に性能が上がり続けるので、将来をその延長で予測することができ、現象のメカニズムに関連するキーとなる科学的なパラメーターを見出すことで、将来予測を定量的に議論できることを示すことができた。例えば、物体から熱を除去できる性能(熱伝達率)、断熱材で熱の損失を防ぐ性能(熱伝導率)、また、繊維材料の強度、発電所の効率、ヒートポンプの性能(COP)などであった。この活動を、機械工学の多くの学問分野で実施したのが第一段階であった<sup>(1)</sup>。

次に、機械工学の多くの学問分野から見た将来像を集めることで、将来の社会を描くことに挑戦した。各部門、機械工学全体の技術ロードマップなどを集めて、「技術ロードマップから見る 2030 年の社会」を提示し、技術や社会の将来像を議論した<sup>(2)</sup>。

これに対して、2023 年度日本機械学会誌に掲載されているものは、2016 年時点での 2030 年に対する技術予測の内容を、最近の技術の急速な進展や社会の急激な変化の観点から、見直したものである。これは、現在から将来を予測するというフォアキャストの視点からみて、7 年間をかけて突き詰めたもので、より多角的に検討された完成度の高い技術予測であると言える。

## 技術ロードマップの社会課題への挑戦

### バックキャストの視点での検討段階へ

今回の特集号での検討内容は、将来の社会像を想定し、その社会像を実現するためには技術はどうあるべきかというバックキャストの視点からの検討に重点を置いている。2050 年の社会像の創発と実現のための課題、分野横断課題の創出、技術ロードマップ策定への挑戦である。

ここでは、今回作られた三つの社会像が、他の方々が考える社会像とどのような関係にあるのかを考察したい。社会像 1「人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会」は、「持続可能性」、社会像 2「多様性と包

摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会」は、「多様性と包摂性」、社会像 3「リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会」は、「リアルとバーチャルの調和」と端的に捉えさせていたこととする。

本特集の三つの社会像は、おおむね種々の社会像の内容を包含していると言えよう(表 1)。具体的には、国連の SDGs の 17 課題<sup>(3)</sup>は、社会像 1、社会像 2 に関するものと理解できる。また、日本の科学技術基本計画<sup>(4)</sup>では、社会像 3 に関係して、「Society 5.0」が取り上げられている。また、経団連<sup>(5)</sup>、NEDO<sup>(6)</sup>、タイ政府<sup>(7)</sup>などが提案する「サーキュラーエコノミ」・「バイオエコノミ(ネイチャー・ポジティブ)」および、「サステナブルエネルギー(グリーン・トランスフォーメーション)」の推進の概念も、社会像 1、社会像 2 で理解できると考えられる。

技術ロードマップの策定は、世界を牽引し、世界で存在感を出す上での必須なプロセスであると思われ、この検討内容が広く活用されることを期待したい。

表 1 他で検討されている社会課題との関係整理

社会課題	SDGs (国連、17 課題)	科学技術・イノベーション基本計画(日本政府)	経団連、NEDO、タイ政府の社会の方向性指針
1 持続可能性	貧困、飢餓、保健、水・衛生、エネルギー、イノベーション、生産・消費、気候変動	グリーンイノベーション(第 3 期)	サーキュラーエコノミ、サステナブルエネルギー(グリーン・トランスフォーメーション)
2 多様性・包摂性	教育、ジェンダー、成長・雇用、不平等、都市、海洋資源、陸上資源、平和、実施手段	ライフイノベーション(第 3 期)、Market Pull な研究開発資源、陸上資源、Well Being(第 6 期)	バイオエコノミ(ネイチャー・ポジティブ)
3 リアルとバーチャルの調和		Society 5.0(第 5 期、第 6 期)	

### 参考文献

- (1) 日本機械学会誌 Vol.110, No.1067, 2007 年 10 月号付録。
- (2) 日本機械学会誌 Vol.118, No.1170, 2016 年 5 月号。
- (3) <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2023 年 11 月 13 日)。
- (4) <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index.html> (2023 年 11 月 13 日)。
- (5) <https://www.keidanren.or.jp/policy/2023/039.html?v=p> (2023 年 11 月 13 日)。
- (6) <https://www.nedo.go.jp/content/100964787.pdf> (2023 年 11 月 13 日)。
- (7) <https://www.bcg.in.th/eng/> (2023 年 11 月 13 日)。

<正員>

矢部 彰

©新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 技術戦略研究センターフェロー、福島国際研究教育機構(F-REI) エネルギー分野長、産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

◎専門: エネルギー工学、熱工学、ファインパブル技術

# 技術ロードマップから見る 2030 のレビューと JSME メンバーが考える 2050 年の社会像実現に 向けた技術ロードマップ

山崎 美稀〔(株)日立ハイテク〕

## はじめに

JSME 技術ロードマップ委員会では、各部門から選出された代表委員による部門連携グループを設立し、『JSME メンバーが考える 2050 年の社会像実現に向けた技術ロードマップ』の策定と公開を目指して活動を展開してきた。本活動では、単に将来を予測するのではなく、実現すべき 2050 年の社会像を積極的に創造し、その実現に必要な新技術や多様な分野の統合による方策を探求してきた。このプロセスにおいて、バックキャストिंगの手法を用い、将来の社会的課題やトレンドを前提として、必要とされる技術や方策を逆算することで具体的な方策を策定してきた。2023 年には、2016 年に公開した<sup>(1)</sup>『技術ロードマップから見る 2030 年の社会』の見直しを各部門で行い、その成果を会誌にて連載する形で議論を深化させてきた。さらに、部門間で選出された代表者による横断的なチームを形成し、ワークショップを通じて、持続可能かつ多様性と包摂性を重視した社会、そしてテクノロジーと自然が調和する社会の構築に向けた探究を行った。その結果として、三つの異なる社会像を設計し、それぞれの課題と解決策を明らかにした。これを基に、新たな技術ロードマップを策定した。

本稿では、このような一連の活動を通じて行われた 2030 年と 2050 年に向けた技術ロードマップの策定と公開、およびその直接的、間接的な成果と期待される効果について、エグゼクティブサマリとして紹介する。

## 技術ロードマップから見る 2030 年の社会レビュー

時代の激動と共に進化する技術トレンドに対応するため、定期的なレビューと更新は本委員会の不可欠な任務となっている。その一環として、2016 年に公開した<sup>(1)</sup>「技術ロードマップから見る 2030 年の社会」について、現在の社会・技術的変動を反映させる形で各部門の技術ロードマップのレビューを実施した。本レビューは 2023 年1月から<sup>(2)</sup>開始され、12 月までに連載が進められ、12 月号においては、自動運転技術を中心とした部門横断の技術ロードマップのレビューを掲載した。これらをもとに本特集による「JSME メンバーが考える 2050 年の社会像と新技術や横断分野のロードマップ」へとつなげていった。

このような継続的なレビューと更新のプロセスを通じて、技術の変遷や社会の要求に柔軟に対応しつつ、未来へのロードマップをより正確かつ実用的にしていく目的がある。

### 計算力学分野<sup>(3)</sup>

2030 年における計算力学の技術ロードマップは、高性能コンピュータの普及とその応用が中心である。具体的には、大規模シミュレーションとパラメトリックスタディの二つの方向性が考えられている。流体解析のための Large Eddy Simulation (LES) と Direct Numerical Simulation (DNS) は、低レイノルズ数の制約から脱却し、多くの産業で利用される見込みである。これは、輸送機器や流体機器の効率向上と騒音削減を可能にする。設計最適化と不確定性評価も重要であり、高品質かつ信頼性の高い製品の効率的な開発が見込まれる。機械学習との融合は進行中で、新しい価値創造が加速している。デジタルツインやサイバー・フィジカル・システム(CPS)は、Society 5.0<sup>(4)</sup>の中核技術とされている。新材料の開発では、機械学習などの AI 技術を応用し、材料開発の効率を高める「マテリアルズ・インフォマティクス(MI)」が注目されている。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の AI アクションプラン<sup>(5)</sup>でも、シミュレーションと AI の融合が重要課題とされている。製造業において、計算力学は新しい CAE (Computer Aided Engineering) へと進化している。2050 年には、計算力学と機械学習の融合による技術イノベーションが期待される。さらに、高齢化、医療、防災・減災、地球温暖化などの社会的課題に対する貢献も期待されている。

### バイオエンジニアリング分野<sup>(6)</sup>

2030 年のバイオエンジニアリング分野の技術ロードマップには、「マイクロ・ナノバイオメカニクス」および「生体低摩擦接合」の二つの主要なトピックが挙げられている。マイクロ・ナノバイオメカニクスでは、荷重支持組織の形態や機能維持において力学刺激が必要であるとされている。現在の治療法には、幹細胞や成長因子が用いられており、力学環境と細胞分化や組織形成との相互作用が解明されると、治療効果の向上や患者負担の軽減が期待される。一方、生体低摩擦接合においては、物体表面の摩擦研究が進行中である。これはバイオミメティクス<sup>(7)</sup>の一環であり、多様



な分野での応用が見られる。ISO/TC266 Biomimetics では、製品の評価や起業、人材育成、用語の検討が行われている<sup>(8)</sup>。バイオエンジニアリング分野は、機械工学と他分野の融合により、新しい治療法や製品開発が進展している。特に、治療の効果を高める手段として、また新製品の開発において、多様な分野との連携が強調されている。

#### 機械材料・材料加工分野<sup>(9)</sup>

2030年において、機械材料と材料加工分野の技術ロードマップは、3DプリンタとAdditive Manufacturing(AM)および自己治癒材料といった二つの重要なキーテクノロジーに焦点を当てている。3DプリンタとAM技術は航空、宇宙、医療などで高付加価値製品の製造を実現しており、品質保証とコスト削減が次なるステップである。また、マルチマテリアルとマルチスケールのシミュレーション技術がその進展に寄与するとされている。自己治癒材料は、使用寿命の延長や部材の健全性向上に貢献する潜在能力を有している。特に、カーボンニュートラルな社会構築に向けて、エネルギー機器や使用済み部材の修復に役立つ可能性が高い。これらの材料の設計と開発には、マテリアル・インフォマティクスとデータ科学が大きく寄与すると見られている。3DプリンタとAM技術は「グリーン・イノベーション」、自己治癒材料は「ライフ・イノベーション」として、それぞれ異なる方向での社会貢献が期待されている。ただし、これらの技術が一般に普及するためには、未解決の技術的課題の克服が必要である。

#### 熱工学分野<sup>(10)</sup>

2030年における熱工学分野の技術ロードマップは、固体、流体、放射の三つの主要領域に焦点を置いている。現在の技術は既に成熟しており、JIS規格に基づく測定装置も一般に普及している。コンピュータの高性能化により、熱物性の研究において新たな可能性が開かれている。この進展は、エネルギー効率の高い住宅、電気自動車、さらには宇宙機といった多様なアプリケーションに貢献している。技術的な突破口としては、数値計算技術の進化が挙げられる。従来は解析が困難だった問題に対し、新たな解法が開発されている。機械学習と光学的測定手法の進化が合わさり、より精度の高い熱物性値が取得可能となっている。社会的な側面では、新材料の探索や熱輸送メカニズムの解明が進行中である<sup>(11)~(13)</sup>。これにより、工業製品からバイオサイエンスに至るまで、多岐にわたる応用が見込まれている。持続可能でクリーンなエネルギー供給が求められており、この分野においては多角的な革新が不可欠である。熱工学全体の水準向上に向けて多様な視点からの議論が深化していると言える。

#### 動力エネルギーシステム分野<sup>(14)</sup>

2030年に向けての動力エネルギーシステムの技術ロードマップには、火力、原子力、再生可能エネルギーの三つの主要な要素が組み込まれている。火力発電は、環境対応技術の進化と効率化を目指している。特に、ガスタービンの高温材料研究とCO<sub>2</sub>回収技術が注目されている。原子力については、安全性と効率の向上が必須である。東日本大震災後の社会的なリスクを考慮しつつ<sup>(15)</sup>、人材育成と再生可能エネルギーとの連携が課題である。再生可能エネルギーは、日本のエネルギーミックスで増加する傾向にあり、その導入には「時間」間欠性と「空間」偏在性が大きな課題である。セクターカップリングによって、これらのエネルギーの異なる特性を効果的に利用する機会が広がっている。また、地域間連携とビッグデータの活用が、エネルギーシステムの柔軟性と効率を高める方向で進展している。熱供給においては、ヒートポンプ技術と排熱回収が焦点となっている。これにより、エネルギーの効率的な利用と環境負荷の低減が期待されている。

2050年に向けては、これらのエネルギー源を効率的に組み合わせることで、カーボンニュートラルと安定供給の双方を実現することが目標である。産官学の連携が、これらの課題解決と持続可能なエネルギーシステム構築の鍵である。

#### エンジンシステム分野<sup>(16)</sup>

2030年までのエンジンシステム技術のロードマップは、熱効率向上が中心課題である。現在、ガソリンエンジンの熱効率はDHE(Dedicated Hybrid Engine)技術により45%近くまで高まっており、高膨張比化やミラーサイクルなどが採用されている。日本の産学官連携によるSIP革新的燃焼技術プロジェクトでは、熱効率50%を目標としたスーパーリーンバーンエンジンが提案されている。希薄燃焼や低温燃焼、未利用廃熱の回収といった技術が進展することで、Well to WheelでのCO<sub>2</sub>排出量削減が可能である。電気自動車の普及が進んでいるものの、1次エネルギーの供給バランスや液体燃料のエネルギー密度を考慮すると、内燃機関車は今後も一定の役割を担うであろう。持続可能性とエネルギー効率の向上には、産官学が協力して革新的な燃焼技術を開発する必要がある。

これが2030年までのエンジンシステム技術の大きなトレンドであり、エネルギー問題への対策としても重要である。

#### 機械力学・計測制御分野<sup>(17)</sup>

2030年を見据えた機械力学・計測制御分野の技術ロードマップは、ITと物理ダイナミクスの融合に焦点を当てている。IoT、AI、ビッグデータの活用により、自動運転から無人航空機、産業用ロボットまで多岐にわたる産業応用が進展している。磁気軸受技術は医療から産業までの応用



が広がっており、特に小型で高推力を持つセルフベアリングモータは小児用人工心臓などにも寄与する。1D モデリング技術も進化し、システム全体の最適化が目指されている。この技術はデータレイクやエッジコンピューティングと連携し、制御工学と融合することでデジタルツインや AI の活用が進められている。AI とデータ駆動の導入により、広範な産業応用と社会貢献が期待されている。部門を超えた広範な連携と多様な専門分野からのフィードバックが集約されることで、効果的な活動が展開されると考えられる。

#### 機素潤滑設計分野<sup>(18)</sup>

2030年を見据えた機素潤滑設計分野のロードマップでは、歯車とトライボロジーが中心的な要素である。歯車は自動車から風力発電、ロボット、医療マイクロマシンまで多岐にわたる用途に適用されている。大型で耐久性の高い歯車は風力発電に、小型・高効率な歯車はロボットやマイクロマシンに求められている。新しい歯形、特にサイクロイドや複合歯形が、強度と効率の向上に貢献する可能性がある。トライボロジーは摩擦と摩耗を最小化し、効率を向上させる科学技術である。持続可能な潤滑油や新しい表面処理技術がその進展に重要である。企業と学術界の協力が不可欠であり、特に環境や新規ビジネスへの直接的な影響が期待されている<sup>(19)</sup>。ゼロエミッションや持続可能性といった目標に対して、これらの技術は大きな貢献をする可能性がある。

#### 設計工学・システム分野<sup>(20)</sup>

2030年までの設計工学・システム分野の技術ロードマップでは、複雑性のマネジメントが特に重要なテーマである。製品開発の段階で、社会と環境に配慮した設計手法が求められている。Discovery Driven Planning やシナリオプランニングなどの先進的な手法が注目を集めている<sup>(21)</sup><sup>(22)</sup>。製品サービス領域では、Web 化と AI の進展によって設計の複雑性が増しており、SysML (Systems Modeling Language) や AUTOSAR (Automotive Open System Architecture) などのモデル化技術が重要性を増している。製造と調達においては、Covid-19 の影響を受けた供給網に対する対応が急務であり、ロバスタかつレジリエントなサプライネットワークの構築が不可欠である。組織内では、Web ベースの分散協業と国際的な分業が進む中、DSM などの全体進捗の可視化技術とセキュリティ強化が必須である。これらのトレンドを受けて、大規模かつ複雑なシステムを効率的に管理する新たな技術が進化することが期待される。このような技術革新は、製品開発から製造、調達、組織運営に至るまでの各フェーズで寄与すると考えられる。

#### 生産システム分野<sup>(23)</sup>

2030年までの生産システム分野の技術ロードマップでは、数々の未来的かつ革新的な要素を包括している。まず、COVID-19 とウクライナ軍事侵攻が世界の社会経済に与えた影響を考慮しながら、レジリエンスを重視したグローバル・サプライチェーンの確立が求められている。次に、高精度仮想生産システムは、マルチフィジクス対応の先進物理エンジンと AI の融合によって、製造プロセスの事前評価が可能になっている。組合わせ最適化問題の新しい解決策は、量子コンピューティングなどの進展によって現実的な時間内に見つけられるようになっている。物流においては、「物のインターネット化」が進行中で、地理的分散とコスト削減が期待される。微生物工場による機能性材料生産は、環境にやさしい大量生産の新たな可能性を開いている。人材育成面では、アナログとデジタルの両方に精通した「情実二刀流」人材が必要とされている。また、完全隔離工場は環境負荷を最小限に抑えつつ、持続可能な生産活動が可能である。最後に、ものづくり文化を維持するエコシステムが、地域社会に新たな価値をもたらす可能性がある。これらの要素は、2050年までに生産システムが大きく変貌する一歩となり、多くの研究者や技術者がその変化をリードすることが期待されている。

#### ロボティクス・メカトロニクス分野<sup>(24)</sup>

2030年までのロボティクス・メカトロニクス分野の技術ロードマップでは、多くの革新が予測されている。自律型ロボット技術は産業、医療、家庭用途での運用が広がり、特に人間と協働するロボットが注目を集めている。センサ技術の進展により、ロボットはより高度な判断を行い、人間に近い動きや認識能力を持つようになると予測されている。AI の進化もこの分野に大きな影響を与える。AI とロボット技術の融合により、複雑なタスクも効率よく、かつ安全に遂行できるようになる。例えば、AI が高度な診断をサポートし、ロボットが手術を補助する形が一般的になる可能性がある<sup>(25)</sup>。環境に対する考慮も強まっている。環境負荷の低減やエネルギー効率の高いロボットの開発が進められている。これにより、サステナビリティに対する企業の責任も高まると予想される。また、デジタルツイン技術の導入により、仮想空間でのシミュレーションがより現実に近いものになる。これにより、製造プロセスや製品の性能評価が精密に行えるようになり、時間とコストの削減が期待され、技術の民主化も進むと予想される。オープンソースプラットフォームや低コストのハードウェアが普及することで、より多くの人々がロボティクスとメカトロニクスの恩恵を受けられるようになる。

2030年のロボティクスとメカトロニクスは、人々の生活を

大きく変え、産業にも革命をもたらす可能性が高い。

#### 産業・化学機械と安全分野<sup>(26)</sup>

産業・化学機会と安全分野における技術ロードマップは、社会変化に伴う、技術的進歩、市場の動向、規制の変化、そして社会的ニーズに対応しながら、産業や安全技術の将来的な方向性を示すために使用される。コロナウイルスの影響で加速したリモートワークや AI、IoT の普及は、労働人口減少と産業構造の合理化に寄与している。特に、2020年代には IoT が安全技術と連携し、労働人口減少に効果的な対策を提供している。これが基盤となり、2030年代には安全を前提とした AI と CPS(サイバー・フィジカル・システム) がいっそう生産現場の自動化を推進する。新たな産業構造も形成され、日本の第1次産業と第3次産業が主軸となると予想される。さらに、2050年を見据えた未来展望では、スマートエコシステムが実現し、安全とセキュリティの技術は社会に不可欠な要素となる。これらの技術は、労働集約型から知識集約型へのシフトを支え、日本および世界の産業構造と社会形成に大きな影響を与える。

#### 交通物流分野<sup>(27)</sup>

2030年までの交通物流分野の技術ロードマップを概観すると、電動化、自動運転、データ解析、持続可能性が主要なテーマである。初めに、電動車と電動航空機の普及が進む一方で、新しいエネルギー蓄積システムの開発が急務である。次いで、自動運転技術は効率性を高め、人的ミスを減少させるため、多くの物流業者がこの技術の導入を急いでいる。LiDAR、AI アルゴリズム、V2X(車両対何でも通信)がこの分野で進化を遂げる<sup>(28)</sup>。また、データ解析と AI の進歩によって、サプライチェーンの透明性と効率性が高まる。リアルタイムでの物流トラッキング、需要予測、在庫管理が一段と精緻になり、ビッグデータがビジネス戦略に不可欠な要素となる。持続可能性に関しては、再利用可能なパッケージ材料、エミッション削減、循環経済への移行が急がれる。環境に優しい物流ソリューションが、企業の社会的責任(CSR)と経済的利益を両立させる鍵である。

多様なトランスポートモードの統合と、それを可能にするデジタルプラットフォームも注目されている。MaaS(Mobility as a Service) のようなコンセプトが、個々の交通手段をシームレスに連携させ、効率的な移動と物流を実現する。これらの技術と戦略が組み合わさることで、2030年の交通物流はよりスマート、効率的、かつ持続可能なものとなる見通しである。

#### 自動運転技術で見た分野横断の技術ロードマップのレビュー<sup>(29)</sup>

2030年までの自動運転技術に関する分野横断の技術ロードマップは、「自動運転に関する分野横断型研究会」<sup>(30)</sup>

の活動において、多角的かつ高度に統合されたアプローチでまとめられたものである。主に、物流や移動サービスに焦点を当てた協調型自動運転システムと、個々の車両に焦点を当てた自律型自動運転システムの二つのカテゴリに分けられる。レベル3以上の自動運転は、システムが運転を主導するため、人間の運転とは根本的に異なるレベルとされる。この高度な自動運転は、AI チップの進化に大きく依存しており、分野横断の技術が必要とされる。品質要求展開表の作成は、製品開発の成否を決定する重要なステップである。この展開表は、人間、ビジネス、機械、開発技術といった複数の軸で整理され、総合的な技術戦略を形成する。このような多角的な視点は、自動運転技術が多数の産業と関連していることを反映している。研究会は、技術ロードマップのほかにも、教育活動や他の学会との連携を行い、多様な専門家が関与する横断型活動を推進している。これにより、多くの関連分野での研究開発が促進され、技術の社会実装がスムーズに進行する可能性が高まる。

#### JSME メンバーが考える 2050 年の社会像実現に向けた技術ロードマップ

急速に変化する社会環境の中で、将来を単に予測するのではなく、目指すべき2050年の社会像を創出するアプローチは極めて重要である。この観点から、各部門から選出された代表者による分野横断的なチームを形成し、ワークショップを通じてその目標についての深い洞察を得る試みは、有意義である。「持続可能で多様かつ包摂的な社会、そしてテクノロジーと自然が調和する社会」というテーマは、現代社会が抱える多くの問題、例えば環境破壊、社会的不平等、テクノロジーの責任ある利用など、多角的に対処するための骨格を提供する。これにより、新しいテクノロジーや横断分野の研究が、具体的な社会課題解決に結びつく可能性が高まる。分野横断のチームが持つ多様な知識と視点は、単一分野に偏った考えでは見過ごされがちな要素を明らかにする可能性がある。さらに、このような多様な視点が統合されることで、より堅牢で実行可能な戦略やロードマップが生まれると考えられる。これは、単に未来を予測する以上の価値を持つ行為であり、緊急性を帯びた多くの課題に対する具体的な解決策を生み出す。

#### 持続可能で多様かつ包摂的、テクノロジーと自然が調和する社会

JSME メンバーによる2050年の社会像の設計は、持続可能性、多様性、包摂性、そしてテクノロジーと自然環境の調和を中心に据えている点で極めて先見的であると言える。このような社会を具現化するためには、多角的かつ具

体的な取組みが必要であり、それが三つの社会像として詳細に展開されている(図1)。

第一の社会像である『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』(図2)は、持続可能な環境配慮と地域社会の結びつきを強調している。第二の社会像『多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会』(図3)では、社会全体が持続可能でありながらも多様な価値観やバックグラウンドを尊重する方向性が見て取れる。第三の社会像『リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会』(図4)は、テクノロジーが持つポテンシャルとその制限を理解し、人々の精神的、肉体的な福祉を中心に据える。各社会像における主要課題を特定し、その解決策を明示することで、実現可能な未来像に近づけると考えられる。特に、モノづくりを基盤にした社会実装技術の選定は、理想と現実のギャップを埋めるために不可欠である。このような総合的な考察に基づいて新たな技術ロードマップを策定することは、長期的な戦略設計において極めて重要なステップであると言える。三つの社会像について本特集で詳細に説明する。

## まとめ

社会が急激に変化する中で、単に将来を予測するのではなく、2050年に我々が実現させたい社会像を創造し、それを実現するための新技術や横断的な分野での戦略を検討してきた。この道しるべとなる技術ロードマップの更新や新規ロードマップの策定は、機械工学や工学全般に対する社会的な要求に応え、未来を設計する責任を担っている。さらに、その情報を社会全体に発信することで、先導的な役割を果たしている。

技術開発の国際的な動向、技術の基本原則、経済性、産業規模、消費者動向、社会受容性といった多角的な要素を総合的に考慮し、評価するのは、研究者や技術者にとって期待される責任である。このような活動を通じて、部門を超えた分野融合によるイノベーションを創出し、技術ロードマップの維持と更新、また新規ロードマップの策定を進めることは、技術革新、学術進展、産業への貢献といった直接的な成果につながると考えられる。また、社会的認識の向上、政策形成への影響、教育プログラムの強化といった間接的な成果も期待できる。

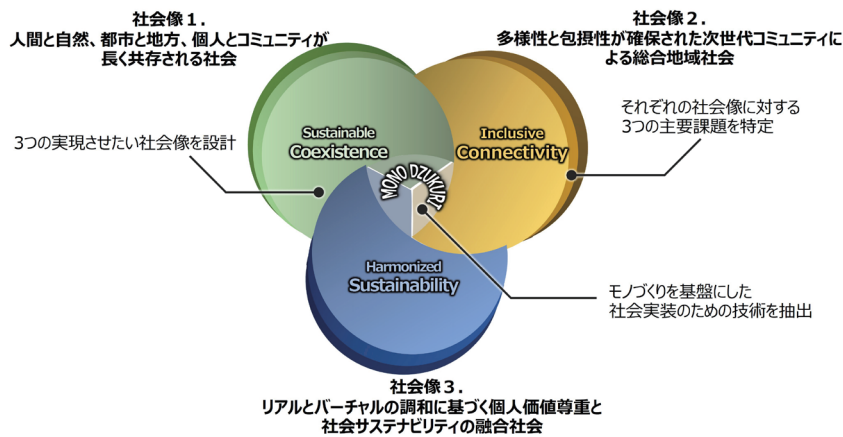


図1 JSMEメンバーが考える2050年の社会像

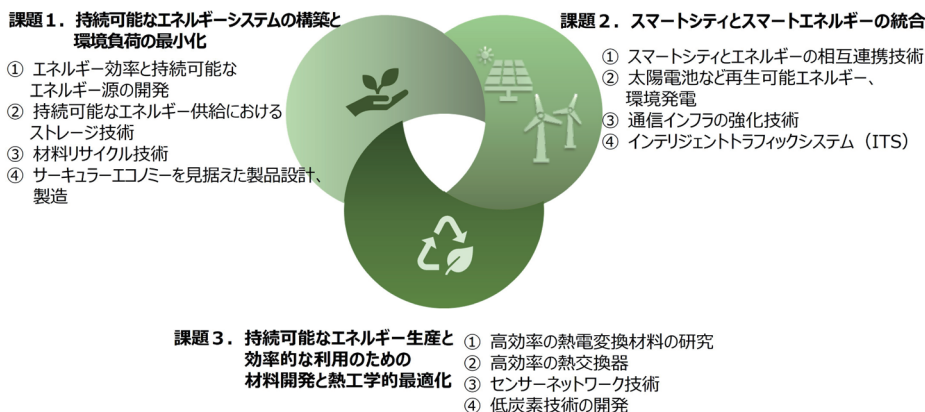


図2 人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会の課題



**課題 1. 共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築**

- ① データ分析とAIを活用した個人のニーズや関心の把握
- ② スマート農業や地域産業の振興を支援する技術の開発
- ③ 創造性を促進するAIツールやデザイン支援システムの開発
- ④ 災害時に対応できる交通・物流技術



**課題 2. 高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働**

- ① フレキシブル/ウェアラブル情報機器の開発
- ② テレメディスンや遠隔診療の技術開発
- ③ ロボットによる人間機能の補助・維持・回復
- ④ IoT、振動・AE・画像計測技術の活用とAI技術の連動による状態監視技術の向上

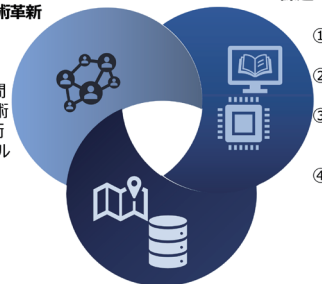
**課題 3. 革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現**

- ① パーソナライズされた移動体験
- ② 感情認識技術とエンパシックコミュニケーションの実現
- ③ 身体特徴にあわせた機能の再生・訓練・サポート
- ④ 高齢化社会/健康社会を支える薄膜生体センサ、医療用人工生体膜、高性能人工心臓

図 3 多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会の課題

**課題 1. 次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新**

- ① バーチャルリアリティ技術とユーザインタフェースの統合技術
- ② デジタルリアルとバーチャル/遠隔地間での感覚情報伝達手段の改善技術
- ③ デジタルツインと工作機械の連携技術
- ④ 脳神経インタフェース技術とバーチャル空間内の操作技術の統合技術



**課題 2. デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント**

- ① 力覚、触覚等五感を活用したリモート情報伝達技術
- ② フライバシーバイデザインの考慮とデジタルツインのプライバシー保護技術の統合技術
- ③ データ駆動型解析法（深層学習、量子コンピュータ）による経済合理性と人間的価値観の予測技術
- ④ AI倫理およびAIの倫理規範の策定と実践

**課題 3. 持続可能なワークライフバランスとパフォーマンス最適化の実現**

- ① バーチャル空間とリアル空間でのロボット制御技術の融合技術
- ② 生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術
- ③ 意思を伝達するメカニズムの解明およびその技術展開
- ④ AI感情認識とAI駆動の業務自動化とリモートワーク最適環境

図 4 リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会の課題

参考文献

- (1) 日本機械学会技術ロードマップ委員会, 技術ロードマップから見る 2030年の社会, 日本機械学会誌, Vol. 119, No.1170 (2016. 5).
- (2) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 1回 「技術ロードマップから見る 2030年の社会」のレビューの連載にあたって), 日本機械学会誌, Vol. 126, No. 1250-42 (2023. 3).
- (3) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 3回 \_1 計算力学), 日本機械学会誌, Vol. 126, No. 1252-40 (2023. 3).
- (4) 内閣府, Society5.0, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/) (参照日 2022年 11月 25日).
- (5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 人工知能 (AI) 技術分野における大域的な研究開発のアクションプラン (AI アクションプラン),
- (6) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 3回 \_2 バイオエンジニアリング), 日本機械学会誌, Vol. 126, No.1252-42 (2023. 3).
- (7) 平坂雅男, バイオミメティクスを取り巻く課題—国際標準化および産業展開を中心として—, 日本知財学会誌, Vol.13, No.2, pp.11-17(2016).
- (8) 公益社団法人高分子学会バイオミメティクス標準化国内審議委員会, ISO/TC266 Biomimetics 第 11 回総会の開催について, Newsletter, ISO/TC266 Biomimetics, Issue 9, December(2020).
- (9) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 4回 機械材料・材料加工), 日本機械学会誌, Vol. 126, 1253-40 (2023. 4).
- (10) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 5回 カーボンニュートラルに向けた熱工学の取り組み), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 5).
- (11) 日本熱物性学会編, ナノ・マイクロスケール熱物性ハンドブック (2014).
- (12) S. Volz, J. Shiomi, M. Nomura, and K. Miyazaki, J. Therm. Sci. Tech., Heat conduction in nanostructured materials, Vol.11, No.1 (2016), JTST0001.
- (13) S. Walia, C. M. Shah, P. Gutruf, H. Niili, D. R. Chowdhury, W. Withayachumnankul, M. Bhaskaran, and S. Sriram, Flexible metasurfaces and metamaterials: A review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales, Appl. Phys. Rev., Vol. 2, No. 1 (2015), 011303.
- (14) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 6回 \_1 動力エネルギーシステム分野), 日本機械学会誌, Vol. 126, No. 1255-42 (2023. 6).
- (15) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 東日本大震災合同調査報告 (機械編), 日本機械学会 (2013年).
- (16) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 6回 \_2 エンジンシステム分野), 日本機械学会誌, Vol. 126, No. 1255-44 (2023. 6).
- (17) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 7回 機械力学・計測制御), 日本機械学会誌, Vol. 126, No. 1256-42 (2023. 7).
- (18) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 8回 要素潤滑設計), 日本機械学会誌, Vol. 126, No.1257-36 (2023. 8).
- (19) 技術のロードマップトランスミッション分野, 自動車技術会 <https://jsae.or.jp/public/brand/roadmap/page3/> (参照日 2023年 6月 23日)
- (20) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 9回 設計工学・システム分野), 日本機械学会誌, Vol. 126, No.1258-50 (2023. 9).
- (21) 江口隆夫, 松尾 武, 村谷諒, 古賀毅, 外部環境要因の不確実性を定量化した事業価値評価の支援手法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 84, No. 857 (2018.1), pp. 17-00270, doi.org/10.1299/transjsme.17-00270.
- (22) Takayuki ISAKA, Wataru YONEDA and Tsuyoshi KOGA, Proposal on Hybrid Risk Evaluation Method (HREM) for Bidding Decision in International Infrastructure Project, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Volume 11 (2017), Issue 5, Pages JAMDSM0063.
- (23) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 10回 生産システム分野), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 10).
- (24) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 10回 ロボティクス・メカトロニクス分野), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 10).
- (25) 医療機器等における先進的研究開発: 開発体制強化事業 (ロボット介護機器開発等推進事業), 国立研究開発法人日本医療研究開発機構
- (26) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 11回 産業・化学機械と安全分野), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 11).
- (27) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 11回 交通物流部門 燃費・走行効率), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 11).
- (28) 日産自動車と日立ビルシステムが電気自動車からの給電で停電時のエレベーター利用を可能にする V2X システムの普及に向けて協創を開始, 日立ビルシステム [https://www.hbs.co.jp/news/2023/20230127\\_01.html](https://www.hbs.co.jp/news/2023/20230127_01.html) (参照日 2023年 6月 26日)
- (29) 技術ロードマップから見る 2030年の社会 (第 12回 自動運転技術で見た分野横断の技術ロードマップ), 日本機械学会誌, Vol. 126 (2023. 12).
- (30) 「自動運転に関する分野横断型研究会」のホームページ [https://www.jsme.or.jp/tld/home/workshop/autonomous\\_car\\_site/index.htm](https://www.jsme.or.jp/tld/home/workshop/autonomous_car_site/index.htm)

技術ロードマップ委員会 委員長

<フェロー>

山崎 美稀

©(株)日立ハイテク ものづくり・技術統括本部 主管技師

©専門:環境配慮材料設計・システム設計、製品企画論、技術開発戦略策定

# 社会像 1. 人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会

## はじめに

### 日本機械学会メンバーが 2050年実現させたい社会像の説明

日本機械学会は、2021年から2023年にかけて、メンバーが描く三つの理想的な2050年の社会像に関する議論を深化してきた。具体的には、『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』、『多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会』、『リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会』をテーマとしている。本特集では、これらの理念を詳細に解析し、実現に向けた課題と技術的方向性を提案することを目的としている。

特に社会像1『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』に関しては、日本機械学会の22部門の中から、このテーマに密接に関連する7つの部門代表が選ばれ、チームを組成し、意見交換や議論を行ってきた。関与した7つの部門として、熱工学部門、環境工学部門、エンジンシステム部門、動力エネルギーシステム部門、産業・化学機械と安全部門、材料力学部門そしてマイクロ・ナノ工学部門が挙げられる。これらの部門代表によるチームでは、目指す社会像のテーマを基盤とし、各専門分野の知識を融合させることで、新しい技術分野の創生を目指して議論を深化させてきた。

人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会構造を実現するためには、それぞれの社会要素が相互に依存関係にあるという複合的な課題に取り組む必要があり、各専門領域の進歩が全体の均衡を保つためには、精緻な調整と統合的アプローチが不可欠である。さらに、技術革新の進展がもたらす社会的および倫理的影響についても、詳細かつ慎重な検討が求められる。これらの側面から、持続可能性と効率性を両立させるバランスのとれたアプローチが、今後の研究および社会実装において重要であると考えられる。

社会像1『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』のテーマは以下の三つの観点から考察されている。

観点①：環境問題、エネルギー問題、資源リサイクル問題を解決し人間と自然の調和を実現している。

観点②：地方と都市の格差を縮小し、通信、運送、コミュニケーションの問題を解決している。

観点③：生産効率向上、物流最適化、半導体製造技術の発展など、ものづくりの改革やイノベーションが進んでいる。イノベーションも継続的に推進されているが、その技術の社会的および倫理的影響、持続可能な生産手法の確立は引き続き考慮が必要である。

## 2050年社会像実現のための課題の抽出

前述の三つの観点の社会像の実現に向けた課題抽出について述べる。観点①では、社会像を具現化するための課題が関連キーワードとワークショップの結果に基づいて抽出された。初めに明らかになった課題は規模と範囲が多様であったが、アンケート調査により「エネルギー効率と持続可能なエネルギー源の開発」が主要な課題として特定された。この課題を中心に図1に示す関連課題が整理され、統合された。その結果、包括的な課題として「持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化」が明らかになった。この包括的な課題を解決する技術を特定する過程で、課題は再分解され、表1に示すように、4つに分解された課題と、それぞれの課題の詳細な定義が示された。

観点②でも、社会像を実現する課題がキーワードとワークショップ結果に基づき抽出された。観点①と同様に、課題規模の統一のためアンケートが実施され、図2に示す主課題と関連課題が区別された。これにより、「スマートシティとスマートエネルギーの統合」という包括的な課題が明らかになった。この課題を解決するため、再分解が必要であり、その詳細は表2に示されている。

＜主課題＞  
エネルギー効率と持続可能なエネルギー源の開発



＜関連課題＞

- ・環境負荷の軽減と新材料の開発
- ・循環経済とリサイクル技術の推進

図1 主課題と関連課題

表1 課題「持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化」の分解

分解課題	定義
新しいエネルギー源の開発と導入	2050年までに、再生可能エネルギー源（太陽光、風力、水力など）の技術を更に進化させ、効率的なシステムを構築することが必要である。また、新たなエネルギー源の開発にも取り組むことで、エネルギー供給の多様化の促進が必要である。
持続可能なエネルギー供給におけるストレージ技術の革新	持続可能なエネルギーソース（太陽や風）は天候や時間帯によって出力が変動するため、エネルギーの蓄積と供給の安定化が重要である。また、効率的で持続可能なエネルギーストレージ技術の開発が必要である。
環境負荷の軽減と新材料の開発	新たなエネルギー技術やエネルギー効率化に伴って、環境配慮素材の需要が増加する。そのため、環境負荷の低い新材料の開発と利用の促進が必要である。また、既存の産業プロセスや製品の環境負荷軽減のためにも、新たな材料や技術の導入が必要である。
循環経済とリサイクル技術の推進	資源の枯渇と廃棄物の増加を防ぐために、循環経済の実現とリサイクル技術の進化が必要である。また、先端エネルギー産業においても、再生可能資源の利用と廃棄物の最小化を目指すことが重要である。

<主課題>  
都市と地方の共存を支援するインフラ技術

<関連課題>

- ・エネルギー効率と持続可能なエネルギー源の開発

図2 主課題と関連課題

表2 課題「スマートシティとスマートエネルギーの統合」の分解

分解課題	定義
スマートシティ技術の導入	都市部と地方のインフラをスマート化し、効率的な運営と管理を実現が必要である。また、スマートグリッド技術の導入により、電力の供給と需要のバランスを最適化し、エネルギー効率を向上することが必要である。
再生可能エネルギーの地方利用	地方の自然資源を活用した再生可能エネルギーの開発と地方への展開の推進が必要である。また、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー源を地域に密着して導入し、エネルギーの分散供給の促進が必要である。
デジタルコミュニケーションの普及	通信の問題を解決するために、地方のデジタルインフラの整備と普及が重要である。また、高速かつ安定したネットワーク接続の確保により、地方でも情報の双方向伝達が可能となり、都市と地方のコミュニケーションの強化が必要である。

スマートモビリティの推進	運送の問題を解決するために、スマートモビリティ技術の開発が必要である。また、自動運転技術や交通インフラの効率化により、都市と地方の移動の利便性を向上させると同時に、交通渋滞や排出ガスの削減が必要である。
--------------	---

観点③においても、社会像を実現するための課題はキーワードとワークショップに基づいて特定された。課題の規模統一のためアンケート調査が実施され、図3に示す主課題と関連課題が区別された。これにより、「持続可能なエネルギー生産と効率的な利用のための材料開発と熱工学的最適化」という包括的な課題が明確となった。この課題を具体的に解決する技術や手法を明らかにするため、課題の再分解が行われ、その詳細は表3に記載されている。

<主課題>  
材料開発と熱工学的最適化

<関連課題>

- ・エネルギー効率と持続可能なエネルギー源の開発
- ・エネルギー生産・消費の時空間的高解像度情報処理

図3 主課題と関連課題

表3 課題「持続可能なエネルギー生産と効率的な利用のための材料開発と熱工学的最適化」の分解

分解課題	定義
新しいエネルギー変換材料の開発	効率的で持続可能なエネルギー源への転換を促進するため、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの変換材料の研究開発が必要である。
熱工学的最適化とエネルギー効率	エネルギー生産・消費プロセスの最適化により、余剰エネルギーのロスを最小限に抑えるための研究が必要である。（例えば、製造プロセスの高効率化や熱の回収・再利用技術の開発）
リアルタイムエネルギーモニタリングと制御	エネルギーの生産・消費をリアルタイムでモニタリングし、適切な制御と管理を行うための制御・情報処理技術の研究開発が必要である。
技術革新と持続可能なエネルギーシステムの構築	新たな技術の導入や産業のイノベーションを推進し、持続可能なエネルギーシステムの構築に貢献するための研究活動が必要である。

以上のように、本稿では、『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』のテーマに関して、三つの社会像に分けて課題を抽出した。それぞれの社会像における包括的な三つの課題、「持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化」、「スマートシティとスマートエネルギーの統合」、「持続可能なエネルギー生産と効率的な利用のための材料開発と熱工学的最適化」が得られた。



## 持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化

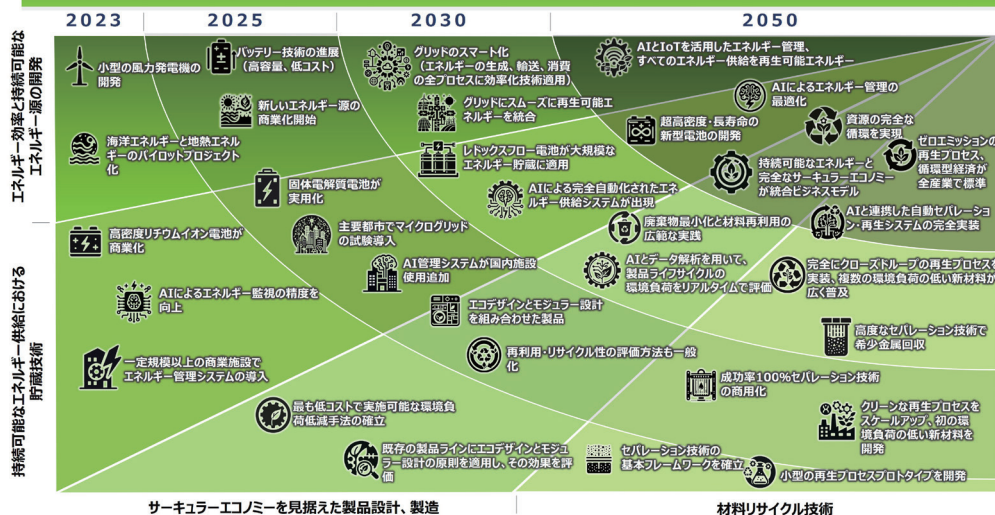


図4 課題1「持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化」のための技術ロードマップ (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

### 課題1. 持続可能なエネルギーシステムの構築と環境負荷の最小化(図4)

#### 新しいエネルギー源の開発と導入

##### エネルギー変換効率向上と持続可能なエネルギー源の開発

持続可能なエネルギーシステムの構築のために、まず再生可能エネルギー源の利用技術向上と効率的なシステムの構築が必要であり、本会を中心に既存の再生可能エネルギー源(太陽光、風力、水力)の効率を高めるための研究が進行中である<sup>(1)</sup>。さらに、新たな持続可能なエネルギー源、例えば海洋エネルギーや地熱エネルギーも開発の対象とされている。このように、エネルギー供給の多様化と、全体のエネルギー効率の向上を目指すことが必要であると考えられる。

2050年までに持続可能なエネルギーシステムの確立と環境負荷の低減が必須であると強く謳われている<sup>(2)</sup>。これは、既存のエネルギー供給システムが持続性に乏しく<sup>(3)</sup>、また世界的に気候変動が加速化していることに起因する<sup>(4)</sup>。特に本国においては、他の先進国に比して化石燃料への依存度が高く<sup>(5)</sup>、このような化石燃料由来のエネルギー源の使用により、我が国が温室効果ガスの排出量増加に少なからず加担してしまっている事実は否めない。この結果、地球温暖化に代表される“気候変動”が急速に進行し、海面上昇や気温の上昇、さらにはゲリラ豪雨などにみられる極端な局地気象など、多くの環境的なリスクが増大している。さらに、化石燃料は有限であり将来的に枯渇することは紛れもない事実である。これにより将来のエネルギー供給に不安が高まるとともに、社会経済的なリスクも増大することが考えられる。したがって、多様で効率的な持続可能なエネルギーシステムを構築することは、エネルギー問題を緩和するとともに、これらの不安を払拭してくれる要素となり得る。そして、自然環境との調和を実現するとともに、持続可能な社会経済システムの実現にも寄与することが期待される。

持続可能なエネルギーシステムの開発には、複数のステップが必要である。

第1段階は「研究と開発のフェーズ」であり、既存の再生可能エネルギー技術の効率向上を目指し、同時に新たな持続可能なエネルギー源に関する研究を進める。これには、産学連携を強化し、専門家、研究機関、企業が協働して具体的な技術開発に必要なデータの収集を行う。

第2段階は「パイロットプロジェクトのフェーズ」であ

り、新たに開発された技術や改良された技術を現地でフィールド試験する。この段階でのフィードバックは大変重要であり、技術の適用可能性と効果を評価し、必要な調整を行わなければならない。

第2段階のパイロットプロジェクトが成功すれば、次の第3段階である「スケーリングフェーズ」で、効果が確認された技術をより大規模なプロジェクトに適用する。これにより、技術の商業的な実用性と持続可能性を高めることができる。

最後に、社会実装をするにあたって制度的なサポートが必要不可欠であると考えられる。政府や関連機関は、研究開発に対する資金提供をはじめ、税制優遇や補助金・助成金といった形で、持続可能なエネルギー技術の開発と導入の後押しが必要である。これらの手段を通じて、持続可能なエネルギーシステムの構築が現実的なものになると期待される。

既存の持続可能エネルギー技術の高効率化には、新材料の探求や、エネルギー変換効率を向上させるためのシステム設計が含まれる。例えば、より変換効率の高い太陽電池の設計や、風力タービンの最適翼形状の検討などがある。一方で、新しい持続可能なエネルギー源に関しては、いまだ十分に活用されていない海洋エネルギーや地熱エネルギーといった新たな可能性を追求することが必要である。地域や環境によって有利なエネルギー源が異なるため、多様なエネルギー源から選択できるようにすることが重要となる。異なる種類のエネルギー源を効率よく組み合わせることで、供給の安定性を確保しながら、全体のエネルギー効率を向上させる。これには、スマートグリッド技術の概念を活用して、需要と供給を最適にマッチさせるようなシステム設計が求められる。このように、持続可能なエネルギーシステムの実現に向けて、具体的な技術目標としてこれらを推進することが重要である。

2023年現在、技術的な側面では太陽光エネルギーの変換効率40%超を目指す研究<sup>(6)</sup>、小型の風力発電機の開発<sup>(7)</sup>が進行中である。この小型発電機は、都市部や地理的に制限のある狭小箇所での設置が容易であり、エネルギー供給の多様化に貢献すると考えられる。さらには、海洋エネルギーと地熱エネルギーのパイロットプロジェクトが計画されており<sup>(8)</sup>、技術的な実現可能性、費用対効果、環境への影響などを総合的に評価し、社会実装に向けた検討が進められている。

2025年頃には、技術と目標、およびマイルストーンがさらに高度化していることが期待され、特に蓄電技術の進展が必要である<sup>(9)</sup>。電池容量の大幅な増加と製造コストを低減する技術の開発が重要である。これにより、再生可能エネルギーによる電気エネルギーの時空間シフトが可能となり、供給の安定性が高まることが期待できる。また、地熱エネルギーの商業化も進行中である<sup>(10)</sup>。これによって、地熱エネルギーが持続可能エネルギーの一つに組み込まれ、地熱環境に恵まれた本国においてより多くの地域でのエネルギー供給が可能となる。

2030年頃における持続可能なエネルギー供給のロードマップは、高度な技術とエネルギー変換の効率化が重点的に求められる計画となっている。技術面では、電力使用グリッドのスマート化が中心的な取組みとして位置づけられている。このスマートグリッド化はエネルギー供給と需要のバランスを時空間的に最適化し、自動的に調整することが可能となる。エネルギーの生成から消費までの全プロセスの効率向上が重要であり、スマートグリッド技術による再生可能エネルギーの電力グリッドへの統合が進行中である。マイルストーンでは、2030年までに本国の再生可能エネルギーの割合を全エネルギー供給において約36%から38%に増やす目標が設定されている。これは、気候変動対策と持続可能性の観点から極めて重要な指標である。加えて、スマートグリッドの導入と最適化により、電力供給のダウンタイムも大幅に削減される予定である。

2050年までの展望では、100%再生可能エネルギーによる供給を目指すことが期待される。これにより、石油、石炭、ガスなどの化石燃料に依存したエネルギー生成および供給は完全に排除され、太陽光、風力、水力、地熱などの再生可能エネルギー源のみでエネルギー供給が行われるようになる。また、人工知能(Artificial Intelligence: AI)とモノのインターネット(Internet of Things: IoT)を駆使したエネルギー管理システムも導入され、エネルギーの供給と消費がより効率的に行われるようになる。この全面的な転換は、エネルギー生産から輸送、そして消費に至るまでの過程に亘って行われる。さらに、最先端のエネルギー管理技術の採用によって、電力グリッドの効率を大幅に引き上げるとともに環境負荷の最小化が目指されている。このためには、製造業や交通、

建築など、多くの社会セクターでの持続可能性が求められ、継続的な技術革新と効率向上も重要な要素であり、先進技術を活用しながら、エネルギー供給の効率化と環境負荷の低減が進められる。

### 持続可能なエネルギー供給におけるストレージ技術の革新 持続可能なエネルギー供給源の貯蔵技術

持続可能なエネルギー供給源の出力変動性は、エネルギー供給の安定性の観点から大きな障壁となっている。特に、風力や太陽光発電は、気象条件や時間帯および地域に依存するため、一定量のエネルギーを継続的に供給することは難しい。このような変動性が存在すると、電力スマートグリッドシステムでは非効率的な運用を余儀なくされ、結果としてエネルギーの浪費や供給不足、さらには価格の変動まで引き起こす懸念がある。また、変動性の高いエネルギー供給源に依存すると、急な供給過多または有事などの供給不足が発生した場合に電力供給に対する信頼性が低下し、産業活動や日常生活において大きな問題を引き起こす原因となることが容易に想像できる。例えば、医療機関や重要なインフラにおいては、電力供給が途切れることによるリスクは計り知れない。

このような背景から、効率的で持続可能なエネルギー貯蔵技術の必要性が高まっている。高密度で効率的なエネルギー貯蔵システム、AIを活用したエネルギー管理、およびスマートグリッド技術をさらに精緻化した高度なマイクログリッド技術などが必要とされる<sup>(11)</sup>。

エネルギー貯蔵技術は、変動するエネルギー源からのエネルギーを一時的に蓄えることで、需要の高い時や供給不足時に放出し、エネルギー供給の時間調整を行う重要な役割を果たす。この分野では、リチウムイオン二次電池、全固体電池、レドックスフロー電池などが注目されており、これらの技術は現在、研究開発段階から製造、市場導入に至るまでの一連のプロセスを通じて進展している。具体的にはまず、基礎研究において新たな素材や設計原理を探索し、次いでプロトタイプの開発と評価を行う。評価基準をクリアしたプロトタイプについては、量産化のための設計最適化と製造プロセスの確立を進める。その後、パイロットテストを通じて製品の安全性と信頼性を評価し、最終的には市場へ導入される。また、スマートグリッド化に伴うAIとIoTを活用したエネルギー管理システムの開発は、データ収集から解析、実装までの一連の流れを考慮していく必要がある。諸種センサ技術を用いてエネルギー使用状況や貯蔵容量をリアルタイムでモニタリングし、スマートグリッド化によるエネルギーの最適利用のためのビッグデータを構築する。収集されたデータは、AIアルゴリズムで解析され、エネルギーの供給と需要に応じて最適な貯蔵・利用プログラムを自動的に生成する。地域や用途に応じた最適なマイクログリッドシステムの設計と導入は、まずニーズ調査と地域特性の分析から始まる。これに



に基づき、マイクログリッドの設計図を作成し、必要なエネルギー貯蔵容量や制御システムを定義する。次に、地域コミュニティや関連機関と連携を取りながら、実際の設置作業に着手する。設置後は、継続的な運用とメンテナンスが行われ、運用データをもとにシステムの最適化が進められる。

以上のように、多角的かつ段階的なアプローチによって、持続可能なエネルギー供給における貯蔵技術革新を推進する。この過程は、エネルギー供給の安定化だけでなく、持続可能な社会システム全体の実現にも寄与することが期待される。

エネルギー密度と出力密度が高く、かつ長寿命で低コストの蓄電池は、次世代のエネルギー貯蔵ソリューションとして大きな期待がかけられている。新たな電極材料、電極構造、さらには制御技術の組み合わせによって、高エネルギー密度と長寿命化を同時に実現する。同時に設計段階において低コスト化の実現を図る。AIを用いた自動化されたエネルギー供給と需給バランスの最適化は、スマートグリッド概念の中核技術である。AIアルゴリズムは、ビッグデータからエネルギーの需給パターンを学習し、それを基に最適なエネルギー供給計画を自動生成する。これによって、太陽光や風力といった変動するエネルギー源と、エネルギー貯蔵を連成させエネルギー使用の高効率化を図る。地域社会や産業施設での自律的なエネルギー供給システムは、マイクログリッドの展開とともに具現化されると考えられる。各地域や施設の特性に合わせてカスタマイズされたエネルギー供給プログラムが設計され、太陽光パネル、風力発電、エネルギー貯蔵などが一体化して動作する。地域社会自体が一つのエネルギー生産・消費ユニットとして機能し、自らのエネルギーを効率よく管理・供給することで、持続可能なエネルギーシステムが確立される。これらの技術は、2050年を見据えた持続可能なエネルギーシステムの構築に不可欠であり、それぞれが相互に補完し合う形で展開されることが期待される。

2023年現在には、エネルギー密度を高めたリチウムイオン二次電池が市場に登場する予定であり、以降も従来技術を基盤とした着実な性能向上が見込まれる。同時に、AIによるエネルギー管理システムも出現する計画である。このシステムは、エネルギーの使用状況をリアルタイムで監視し、消費パターンに応じて最適なエネルギー供給を行う。具体的には、AIアルゴリズムを用いて、エネルギーの需給バランスをより正確に把握し、過不足が生じにくいように制御することが目標とされる。

2025年の展望では、全固体電池が、より安全でエネルギー密度が高いとされ、製造技術を確立<sup>(12)</sup>することにより、高出力かつ長時間のエネルギー供給が可能となり、エネルギー貯蔵としての効率と利便性が飛躍的に向上する。この段階には、AIとIoTの連携が進んでより高度なエネルギー管理が可能となる。AIが集めたデータを基に、IoTデバイ

スを通じてエネルギー供給の最適化が行われ、消費側の需要を事前に予測し、供給側のエネルギー生成と貯蔵を効率的に管理することが可能となる。マイルストーンとしては、主要都市でのマイクログリッドの試験導入が始まることが挙げられる。さらに、AIによるエネルギー管理システムが国内施設に導入されることにより、その効果と拡張性を広範に証明する機会となると期待される。

2030年の展望では、レドックスフロー電池が大規模なエネルギー貯蔵に広く適用される段階に入ると予想される。レドックスフロー電池は長期間の耐久性と高いリユース性が特徴であり、特に大規模なエネルギー貯蔵にその能力を最大限発揮すると期待される。リチウムイオン二次電池や全固体電池の開発同様、AIによる完全自動化されたエネルギー供給システムの出現が予想される。これにより、人手を介さずとも効率的なエネルギー管理が可能になると期待される。

2050年の展望では、超高密度・長寿命の新型電池が開発され、高安全性、資源制約フリー、軽量化など、社会から求められる性能を備えたエネルギー貯蔵が実現される<sup>(13)</sup>。この技術革新により、再生可能エネルギーによる持続可能な社会の構築が期待される。同時に、AIによるエネルギー管理が最適化され、人の介入がほとんど不要になる。この高度なAIシステムは、需給の最適化を全自動で行い、エネルギーの使用と蓄積を絶えず調整する。このような全自動のエネルギー管理システムが全世界で普及することが、この時代のマイルストーンになると予想される。

このロードマップ(図4)は、技術進捗と社会ニーズが予想される方向に応じて調整されていくべきである。特に2030年以降は、技術の急速な進展や環境変動による影響を十分に考慮する必要がある。エネルギーの持続可能性と効率性の向上は、今後数十年にわたり進化し続けるものと見込まれる。そのため、ロードマップは多角的な観点において柔軟で適応性の高いものでなければならない。

## 環境負荷の軽減と新材料の開発

### サーキュラーエコノミーを見据えた製品設計、製造

資源・エネルギーや食糧需要の増大や廃棄物発生量の増加が世界全体で深刻化しており、一方通行型の経済社会活動から、持続可能な形で資源を利用するサーキュラーエコノミーへの移行が必要とされている<sup>(14)</sup>。サーキュラーエコノミーを見据えた製品設計、製造とは、製品のライフサイクル全体における環境負荷を考慮した上で、製品の長寿命化、資源の循環利用、廃棄物の最小化に配慮した設計を行うもので、これにより資源の効率的な利用と環境負荷の低減が可能である。

2050年に向けて、資源枯渇への対応は重要課題である。地球上の資源は有限であり、現在の消費パターンが続くと、希少金属をはじめとする重要な資源が枯渇してしまう可能性がある。これにより、社会基盤や産業活動、さらには日常生



活にも深刻な影響が出ることが予想される。また、廃棄物の発生抑制も重要な課題である。近年、適正処理やエネルギー回収などが進み、廃棄物処理に伴う環境負荷は抑えられてきているが、最終処分場の枯渇問題や、CO<sub>2</sub>排出量削減の観点から廃棄物発生量を削減することが必要とされている。そのため、サーキュラーエコノミーは持続可能な社会を実現するために不可欠な要素であり、エネルギー効率と資源の持続可能な管理においても大いに寄与すると言える。

製品・サービスを市場に出す際には、3R(リデュース・リユース・リサイクル)の観点、廃棄物処理、省エネルギー、特定化学物質の使用制限などを考慮して、ライフサイクル全体を通じて、適切にデザインされるべきであり「環境配慮設計」や「エコデザイン」と呼ばれて既に取組みが始まっている。この取組みの指針として2022年12月に策定されたJIS Q 62430は、組織による環境配慮設計の実践における指針として機能している。

本指針に基づき、計画段階では、まず組織が設計および開発を通じて影響を及ぼすことが可能な活動範囲、すなわち環境配慮設計の適用範囲の決定を行う。次に、エネルギー使用量の削減や3Rのような、法的な要求および消費者や顧客からの環境に関するニーズと要求を特定し、分析する。さらに、製品やサービスのライフサイクル全体でのインプットとアウトプットを考慮し、それらが環境に与える影響を特定する。これには、使用されるエネルギーや材料などのインプットと、CO<sub>2</sub>排出や廃棄物などのアウトプットが含まれる。その上で、これらの環境側面がどれほどの環境影響を持ち、影響低減の可能性があるかを評価する。実行段階では、計画に基づき具体的な設計および開発に取り組む。これは、環境配慮設計が製品の設計および開発プロセスに統合されることを意味する。最後に、評価および改善段階では、実施された設計および開発の結果をレビューし、継続的な改善を促進する。このプロセスを通じて、環境配慮設計の効果を定期的に評価し、必要に応じて改善策を策定・実施することが要求される。これらの段階を経ることによって、環境負荷の低減を図りながら、製品やサービスのライフサイクル全体の環境性能の向上が期待される。

また、サーキュラーエコノミーの観点では、製品の長寿命化が重要であり、メンテナンスやアップグレードに対応した設計が必要になる。そのためには、製品は互換性が高い少数の部品(モジュール)によって構成されることが望ましい。機能ごとにモジュールを設計し、それが互いに容易に組み合わせられるようにすることで、特定の部品が壊れた場合や技術が進化した場合にも、容易に部品の交換やアップグレードが行える。

製品の長寿命化に焦点を当てた製品開発では、各部品が他の製品やアプリケーションで容易に交換・アップグレードできるような設計原則を適用する。これには、標準化された

コネクター、互換性のあるフォーマット、およびモジュラー設計が採用される。このアプローチにより、ひとつの製品としては使用限界に達した場合にも、その製品を構成する個々のモジュールや部品は新しい製品での利用が可能となる。

廃棄物発生抑制に向けては、製品の耐久性と修理可能性が求められる。これは、部品が高品質で、製品自体が破損しにくい構造を持つことを意味する。また、消耗品や電池が簡単に交換できるようにすることで、製品全体を廃棄する必要がなくなる。このような環境への負荷最小化については、ライフサイクル分析を基に、全工程での環境影響を考慮した設計が行われる。これには、再生可能エネルギーの使用、有毒な化学物質の排除、排出されるガスや廃水の処理技術の改善が含まれる。特に、製品の生産から廃棄に至るまでの各段階でのCO<sub>2</sub>排出量を計測し、最も環境負荷の高い工程を特定して改善策を実施する。

以上の各目標は、製品が持続可能なライフサイクルを持ち、資源の効率的な利用と環境保護を両立するためのものである。それぞれの目標は互いに補完し合う形で設計され、一つの製品が複数の環境目標を達成できるように努力する必要がある。

2023年現在においては、環境配慮設計とモジュラー設計に関する研究開発が特に活発に行われる。具体的には、環境負荷の低減と資源の効率的な使用を最もコスト効率よく達成するための手法と材料を探索する。このフェーズの主な目標は、既存の製品ラインに環境配慮設計とモジュラー設計の基本原則を導入し、その効果を科学的に評価することである。

2025年の展望では、エコデザインとモジュラー設計を組み合わせた製品が市場でより広く受け入れられ、その重要性が一般的に認知されるようになると考えられる。また、再利用やリサイクル性の評価方法も業界標準として広く採用されることが予想される。この年の目標・マイルストーンは、新しく市場に投入する製品の80%以上に環境配慮設計の適用が期待され、その結果として環境負荷の削減を具体的に実現することである。

2030年の展望では、AIとデータ解析を活用して製品ライフサイクル全体の環境負荷をリアルタイムで評価する手法の開発が予想される。これにより、企業はよりタイムリーかつ精密に環境への影響を把握し、その情報を製品開発や製造プロセスに即座に反映することが可能となる。また、製品生産による廃棄物量とCO<sub>2</sub>排出量の削減が求められており、これは効率的な製造プロセスとリサイクルや再利用が容易な設計によって実現される。

2050年頃までの展望では、持続可能なエネルギーシステムと完全なサーキュラーエコノミーの統合が予想される。これにより、新しいビジネスモデルが形成され、企業は、環境と社会に対して積極的に貢献する中で利益を得ていく形とな

ると期待される。この新しいビジネスモデルは、製品の設計から製造、使用、再利用、そしてリサイクルに至るまで、すべてのプロセスで環境への負荷を最小限に抑えることが前提である。製品は長寿命であり、使い終わった後もその部品や材料が他の製品や用途で再利用されることが考えられる。消費者もこのような製品やサービスを選ぶことで、自分自身が持続可能な社会づくりに参加しているという認識が高まると期待される。この年には、ほとんどの製品が再利用やリサイクルを前提とした設計になっており、廃棄物は極小化されることが考えられる。エネルギーも持続可能な方法で供給され、その使用効率も高いレベルに達することで、持続可能な社会の実現が期待される。

## 循環経済とリサイクル技術の推進

### 材料リサイクル技術

前項で述べたように、サーキュラーエコノミーの実現のためには、環境配慮設計により製品製造のための資源投入量を極小化していく必要があり、日本機械学会が取り組むべき分野として、「材料リサイクル技術」が挙げられる。材料リサイクル技術は、使用済みの製品を利用しやすいように処理して、新しい製品の材料もしくは原料として利用する技術である。この技術は、新たな資源の投入を抑制し持続可能な製品サイクルを構築するための核となる技術である。特に注目すべきは、リサイクルを前提とした製品設計、高度なセパレーション技術、環境負荷の少ない再生プロセス、そして循環型経済に適した新しい材料の開発である。

リサイクルの種類として、サーマルリサイクル、ケミカルリサイクル、マテリアルリサイクルがある。材料リサイクルは一般的にマテリアルリサイクルを指すことが多いが、広義にはケミカルリサイクルも含まれる。サーマルリサイクルは焼却処理に伴い発生する熱エネルギーを回収して利用する技術であり、現時点でも日本国内ではかなり普及が進んでいる。しかしながら資源循環の観点からはワンウェイでの使用となってしまうため、優先順位としては三つのリサイクルのうち最後に選択すべき手段とされている。ケミカルリサイクルは製品を化学的に分解させるなどして原材料レベルの物質として再利用を行う技術である。これによって製造される製品は新品と遜色のないものとなるが、一般的には化学的分解に大きなエネルギーが必要となる。マテリアルリサイクルは製品を分解・破壊・セパレーションなどを通じて得られた素材を製品原料として再利用する技術である。資源循環の観点、エネルギー消費の両面から優れた手法であるが、一方で不純物の混入や劣化などの問題を解決していかなければならない。

令和5年版環境・循環型社会・生物多様性白書によれば、「循環型社会の形成に取り組んできた我が国の実情を踏まえれば、循環経済への取組みは、3R（優先順位は[1] 発生抑制(リデュース)、[2] 再使用(リユース)、[3] 再生利用(リサイ

クル))の取組みを経済的視点から捉えて、いわゆる本業を含め経済活動全体を転換させていくことが重要<sup>(15)</sup>、としている。この優先順位は、商品に近い形で循環利用することが一般的に資源およびエネルギーの投入量が少なくなることによって実現される。一方でこの循環利用を成立させるためには商品およびその部品が長期にわたり利用され、かつ材料リサイクルに耐えられるだけの寿命が求められる。これに対応するためには環境負荷を抑えつつ長寿命である新材料の開発が期待される。

セパレーション技術の進化には、ナノテクノロジーや高度なフィルタリング技術を用いることで、複雑な材料構造や成分を効率的に分離する技術を開発することが重要である。具体的には、先端の物質分析手法を活用して材料の成分を精緻に識別し、その情報をもとに分離プロセスを最適化する。こうした努力により、分離の精度と効率を格段に向上させることが期待される。新材料の開発では、リサイクルされた材料を基にして、持続可能な生産サイクルに適した、環境負荷の低い新材料を研究することが考えられる。これには、材料科学だけでなく、生態学や環境工学といった多角的な観点からのアプローチが不可欠である。最後に、サーキュラーエコノミーへの移行に関しては、製品の設計段階からライフサイクル全体にわたるリサイクル性を考慮することが必要である。具体的には、製品デザインにおいて、容易に分解・分離できる構造を持たせたり、リサイクルや再利用が容易な材料を選択したりすることで、製品が循環型経済に適応する。

また、セパレーション技術は、高度なセンサ技術とアルゴリズムを組み合わせることで、特定の材料を非常に高い精度で分離することを目指している。この技術は、例えば電子廃棄物から希少金属を効率良く回収する場合などへの適用が期待される。新材料の開発では、長寿命でありつつ資源・エネルギー投入量が少ないという特性が求められる。特にプラスチック類については、リサイクル性の向上と長寿命の両立が期待される。サーキュラーエコノミーに貢献する目標に関しては、製品の全ライフサイクルにわたる材料の再利用を促進する方針である。具体的には、製品設計段階で分解・再利用が容易な設計を取り入れ、使用後は効率よく材料を回収し、再利用またはリサイクルするプロセスを確立する。

以上のように、高効率な材料セパレーション技術、環境負荷の低い新材料の開発を通じてリサイクル率を向上させ、サーキュラーエコノミーへの移行を実現したい。

2023年現在における主要な目標は二つである。一つ目は、セパレーション技術の基本フレームワークを確立することである。この基本フレームワークを通じて、多様な廃材に対応する技術の拡張と洗練が可能となる。二つ目の目標は、小型の再生プロセスのプロトタイプを開発することである。このプロトタイプは、分離と再生の一連のプロセスを模擬実



験する基盤となる。マイルストーンとしては、セパレーション技術における初期の特許を取得することで、技術の独自性と競争力を高めることが期待される。以上のように、2023年は基本フレームワークとプロトタイプ確立に注力する年になると予想される。

2025年の展望では、セパレーション技術の普及を目指し、具体的には、小型プロトタイプでの成功を基に、工場規模での運用が可能なシステムを確立すると考えられる。再生プロセスにおいては、CO<sub>2</sub>排出量の削減を含む環境への影響を軽減しつつ、効率の向上も目指すことが重要である。新材料については、実用フェーズに入ることが期待される。

2030年の展望については、高度なセパレーション技術を用いて、希少金属も回収可能なレベルに技術を進化させる。希少金属の回収・再利用は資源採取時の環境負荷を大幅に低減できることに加え、資源安全保障面でも極めて重要な技術となる。次に、クローズドループの再生プロセスを実装する。これにより、リサイクルから生産、使用、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルに至るまでの全工程での資源循環が可能となる。最後に、複数の環境負荷の低い新材料を広く普及させると考えられる。

2050年の目標は、AIと連携した自動セパレーション・再生システムの完全実装である。このシステムは、資源の効率的な分類と再生を自動で行い、人力を大幅に削減しながらも高精度なリサイクルを実現することが期待される。次に、ほぼゼロエミッションの再生プロセスを確立する。この目標は、気候変動対策に直結するものであり、CO<sub>2</sub>排出量を極限まで抑制すると考えられる。これらを通じて最終的に、サーキュラーエコノミーが全産業で標準となり、新しい経済成長の基盤となる。マイルストーンもそれぞれの目標に沿った高度なものとなる。AIによる自動セパレーションと再生において、資源とエネルギーの投入量は極小化されることが期待される。これは、システムが極めて効率的に動作し、資源を無駄なく再生する証である。次に、再生プロセスのCO<sub>2</sub>排出量のNETゼロを達成すると期待される。最後に、全製品ライフサイクルでの材料再利用率が95%以上に達すると期待される。これは、ほぼすべての材料がマテリアルリサイクルまたはケミカルリサイクルされ、廃棄物が最小限に抑えられる状態を意味する。

## 課題2.スマートシティとスマートエネルギーの統合(図5)

### スマートシティ技術の導入

#### スマートシティとエネルギーの相互連携技術

都市と地方の共存には、都市と地方のインフラをスマート化し、スマートグリッド技術の導入により、エネルギー効率を向上することが必要である。日本機械学会が取り組むべき分野として、「スマートシティとエネルギーの相互連携技術」が挙げられる。この技術は、スマートシティのインフラとスマートエネルギーシステムを統合し、シームレスに相互作用させる目的で開発される。都市の交通、建築、エネルギー供給、廃棄物処理などの多様なシステムが相互にデータを共有し、効率的に運営される。これにより、エネルギーバランスが最適化され、環境負荷の低減が期待される。

2050年に向けての展望を考慮すると、特に都市環境において多くの挑戦が存在している。都市人口の増加は、交通渋滞、エネルギー消費、廃棄物の増加など多くのインフラに対する負荷を増加させると考えられる。このような状況下では、従来の都市インフラとエネルギー管理手法では、効率性や持続可能性が十分に確保できない可能性が高い。気候変動や資源の枯渇問題など複合的な問題に対処するためには、都市そのものの設計から考慮する必要がある。したがって、スマートテクノロジーを活用することで、エネルギーはもちろん、交通や廃棄物管理などでも効率的な運用が可能となる。これは、持続可能な社会の基盤を形成する大きなステップとなり、資源の有効利用や環境負荷の軽減につながる。さらに、スマートな都市設計とエネルギー管理は、持続可能な社会を形成する上でのマルチプライヤー効果をもたらすと考えられる。例えば、エネルギーバランスが効率化されると、温室ガスの排出量が削減され、気候変動の進行が抑制される。これは、未来の世代にも持続可能な生活環境を提供するために不可欠な要素である。

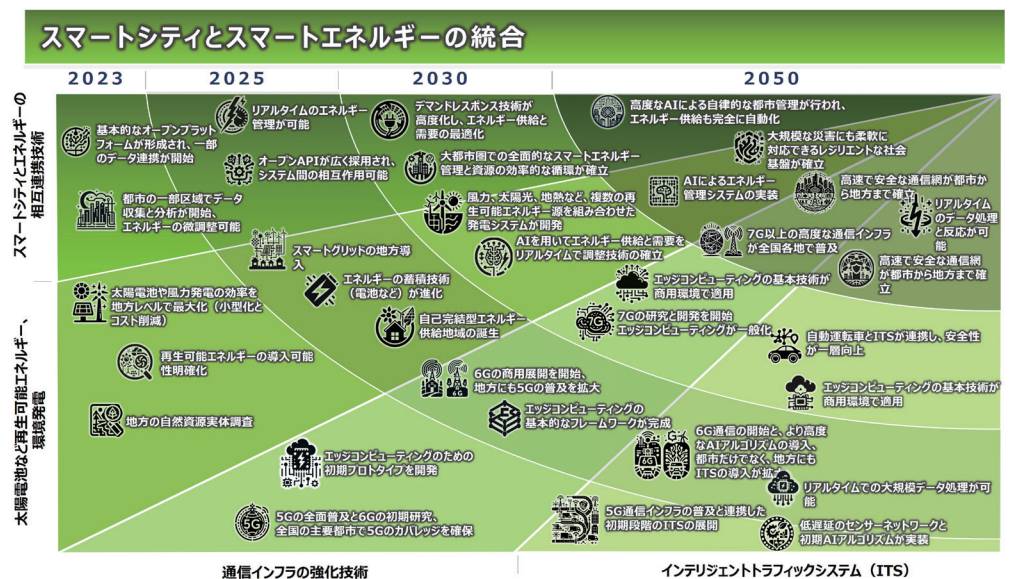


図5 課題2「スマートシティとスマートエネルギーの統合」のための技術ロードマップ (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)



以上のような理由から、スマートな都市設計とエネルギー管理は、2050年の持続可能な社会構築において非常に重要な役割を果たすと期待される。

スマートシティとエネルギー管理の技術開発においては、いくつかの重要な要素を考慮する必要がある。まず、データ収集と分析に関しては、センサ技術やIoTを広範に導入することが期待される。これにより、都市やエネルギーインフラからリアルタイムでのデータ収集が可能となる。続いて、AIやビッグデータ分析を活用し、そのデータを深く解釈する。これは、交通フローやエネルギー使用状況、さらには環境影響まで多角的に把握する基盤を築くと期待される。次に、オープンプラットフォームの構築が重要である。具体的には、システム間のデータ連携を容易にするためのオープンなAPI（アプリケーションプログラミングインターフェース）やプロトコルを採用する。これがあれば、さまざまな業者や自治体が参加する多様なシステムが効率良く協働できる。リアルタイム管理においては、収集されたデータをリアルタイムで解析する技術が必要である。これによって、エネルギー供給や交通フローの調整が即座に可能となる。この即時性が、環境への負荷を減らすだけでなく、エネルギーの効率的な利用を促す。デマンドレスポンスの実施も同様に重要である。これは、エネルギーの需要と供給をリアルタイムで調整し、ピーク時における電力供給の負荷を軽減するテクニックである。デマンドレスポンスを有効に活用することで、全体としてのエネルギー効率が向上する。最後に、持続可能なエネルギーの統合に関しては、太陽光や風力、蓄電池などの環境に優しいエネルギー源を効率よくシステムに組み込む。これにより、持続可能なエネルギー供給が確保され、CO<sub>2</sub>排出量の削減や資源の有効利用が実現すると予想される。

以上のような手法を組み合わせることで、スマートシティとエネルギー管理の技術開発の進展が期待される。これらの技術は、2050年の持続可能な社会構築に向けて、極めて有用なソリューションを提供する可能性が高い。

開発していく技術の具体的な目標には、いくつかの要点があると考えられる。まず、持続可能なエネルギーの最大活用を目指す。これにはスマートグリッドの活用が不可欠であり、再生可能エネルギー源から生成された電力を効率的に配分し、消費するプロセスが構築される。これにより、エネルギーの無駄を極力排除し、持続可能なエネルギー供給を確保する。次に、効率的な資源管理も目標とする。スマートシティ内で生成される廃棄物や汚水は、先進的な処理技術やリサイクルシステムを用いて効率よく処理またはリサイクルされる。これは資源の再利用を促進し、その結果として持続可能な資源管理が実現する。また、低炭素社会の実現も目指す。具体的には、エネルギー効率の高い運営が行われることで、CO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減する。これはクリーンなエネルギー技術を活用し、環境への影響を最小限に抑える

ためである。最後に、高度なライフスタイルの実現が目標である。住民自体がエネルギーを効率的に使用することで、より快適で持続可能なライフスタイルが可能となる。これには、エネルギー使用の自動化や効率化を促進するテクノロジーが導入されると期待される。

以上のように、複数の具体的な目標を達成するための技術が開発されていく。これらの目標は相互に関連しており、一つ一つが成功すれば、2050年に向けての持続可能な社会構築が加速すると予想される。

2023年現在における最初のステップとして、初期段階のセンサ技術やIoTデバイスが市場に導入されている。これらのテクノロジーは、都市環境の各所でデータを収集する基盤を提供する。続いて、基本的なオープンプラットフォームが形成される。このプラットフォームは、さまざまなデバイスやシステムが互いにデータを共有できるようにする仕組みである。目標としては、これらの初期技術を用いて都市の一部区域でデータ収集と分析が開始されることであり、一部のモデル地域では取組みが始まっている<sup>(16)(17)</sup>。具体的には、交通量、エネルギー消費、廃棄物生成量などの各種指標をリアルタイムでモニタリングし、それを基にエネルギーの微調整ができるレベルを目指す。この微調整により、エネルギー消費が最適化され、都市の効率が向上する。技術進捗やマイルストーンに関しては、いくつかの具体的な目標が設定され、プロトタイプの開発と実証実験が行われ、その結果を基に初期のパートナーシップが形成されつつある。この段階でのパートナーシップは、通常、地方自治体、エネルギー供給会社、技術開発企業などが含まれる<sup>(18)</sup>。これらの主体が協力して、スマートシティとエネルギーの相互連携技術の有用性と実用性を検証する。このプロセスを通じて、次の段階へと進むための重要なフィードバックとデータが集められると予想される。

2025年の展望では、AIとビッグデータ分析が都市インフラの管理に適用され始め、これによってリアルタイムのエネルギー管理が可能になる<sup>(19)</sup>。同時に、オープンAPIが広く採用されることで、異なるシステムとデータベースがシームレスに相互作用を始めると期待される。さらに、CO<sub>2</sub>排出量の削減と効率的な資源管理が進展する。政府は、スマートエネルギー技術の導入を促進するための法的枠組みを提供し、企業や地方自治体はこの基盤の上で、独自のスマートシティプロジェクトを展開することが計画されている<sup>(20)</sup>。

2030年の展望においては、デマンドレスポンス技術がさらに高度化する。この技術の進化により、エネルギー供給と需要の最適化が高度に行われるようになる。目標としては、大都市圏での全面的なスマートエネルギー管理が確立されると期待される。つまり、大都市においては、エネルギー供給から消費、そして廃棄物や汚水の処理に至るまで、すべてのプロセスがデータドリブンとなる。

2050年の展望では、高度なAI技術が都市管理の各方面に広く導入され、エネルギー供給も完全に自動化される段階に到達していると予想される。AIは交通フローの最適化から廃棄物管理、緊急対応まで、都市の運営を全体的に支え、さらには自律的に調整・最適化を行う。エネルギー供給もAIによってリアルタイムで調整され、エネルギーのロスが極めて少ない状態が維持されていると予想される。目標としては、持続可能な社会の確立が前面に出ている。これはただの環境負荷の削減を超えて、全人口にわたる高度なライフスタイルの提供を含んでいる。技術進捗やマイルストーンとしては、グローバルスケールでのスマートシティの実現が期待される。数十年の積み重ねにより、多くの都市がスマートシティのモデルケースとなり、その成功が世界中で共有されていると期待される。

## 再生可能エネルギーの地方利用

### 太陽電池など再生可能エネルギー、環境発電

2050年に向けてのビジョンとして、「スマートシティとスマートエネルギーの統合」が非常に重要な課題であり、その中で「再生可能エネルギーの地方利用」が特に重視されている。この「再生可能エネルギーの地方利用」とは、地方の自然資源を活用して再生可能エネルギーを開発し、そのエネルギーを地方自体で利用するという概念である。この方針は、風力発電、太陽光発電などの再生可能エネルギーを地域社会に密着させて導入し、エネルギー供給の分散を促進することにつながる。

必要な技術として「太陽光発電などの再生可能エネルギー、環境発電」が挙げられる。太陽電池は、光を電気エネルギーに変換する装置であり、地方での利用が特に有用である。また、環境発電技術とは、風力、水力、地熱など、その地域が持つ独自の自然エネルギーを利用した発電手段を指す。

このような再生可能エネルギー技術が必要な理由は多面的である。最も顕著なのは、エネルギー供給の安定性を確保することである。地方地域で自給自足型のエネルギー供給が行われるようになると、中央集権的なエネルギー供給体系からの独立性が高まると予想される。これにより、エネルギー供給がより安定し、大規模な停電やエネルギー供給の途絶などのリスクが低減する。次に、環境負荷の低減も大きな要因である。地方で生産された再生可能エネルギーは、その地域で消費される場合、エネルギーを長距離輸送する必要がなくなる。その結果、輸送によるエネルギーロスやCO<sub>2</sub>排出が大幅に削減されることが期待される。これは気候変動の進行を抑制する上で非常に重要な要素である。そもそも、再生可能エネルギーの導入は、化石燃料への依存を減らすことが可能である。これは、エネルギー価格の変動リスクや政治的なリスクを軽減するとともに、持続可能なエネルギー供給の確立に貢献する。

以上の要因から、地方での再生可能エネルギー利用とその技術開発は、エネルギー供給の安定性、環境保護、そして持続可能な社会を構築する上で不可欠であると言える。

再生可能エネルギーの地方利用における開発方法は、精密な地域分析から始まる。具体的には、各地域の気候、地形、自然資源を詳細に調査し、そのデータに基づいて最も適した再生可能エネルギー源を選定する。例えば、風力が豊富な地域では風力発電、日照時間が長い地域では太陽光発電が有用である。次に、地方自治体、産業界、研究機関と連携し、集めたデータに基づいて具体的な設備設計を行う。この際、地域社会のニーズや持続可能性も考慮に入れる。さらに、設備の設計と並行して、運用フェーズでのエネルギー供給と需要を調整するためのスマートグリッド技術の導入が進められる。この技術によって、エネルギーの供給と需要をリアルタイムで最適にマッチングさせることが可能である。また、開発の進捗を定期的に評価し、必要な調整を行う。これには、設備の効率や運用コスト、さらには地域社会への影響などを網羅的に考慮する必要がある。評価と調整によって、持続的な運用が確保され、長期的に地域社会に貢献する形での再生可能エネルギー供給が実現される。

このように、地域の自然資源を調査し、多様なステークホルダーと連携しながら、スマートグリッド技術を活用することで、地方での再生可能エネルギー利用は効率的かつ持続可能なものとなる。

地方各地で地域ごとに適する安定したエネルギー供給が実現することで地方の独自性を活かしたエネルギー政策が可能になり、その結果、地方経済も活性化する。これに加えて、エネルギーの分散供給を通じて、大規模な災害時にも柔軟に対応できるようなレジリエントな社会基盤を構築する。地方各地で独立したエネルギー供給が可能になれば、一箇所でのエネルギー供給障害が全体に影響を及ぼすリスクを低減できる。また、地域社会が自前でエネルギーを生産できるようになれば、外部からのエネルギー供給が途絶えた場合でも、一定レベルの生活水準を維持できる。これを達成することで、持続可能で安全な地方社会を形成し、全体としても国のエネルギー戦略に貢献する形となると考えられる。

2023年現在における取組みは、太陽電池、風力発電をはじめとする再生可能エネルギーのエネルギー変換システムの高性能化が研究の中心テーマである。この研究においては、太陽電池のエネルギー変換をより高性能に実施する方策や、風力、水力などの発電機の設計改良が行われている。さらに、発電機などの小型化とコスト削減も並行して進められる。目標としては、地方毎の自然資源を綿密に調査し、その結果を基に再生可能エネルギーの導入計画を明確にして議論する。具体的には、風速や日照時間、地熱温度といった地域特有の環境要因をデータベース化し、それを元に最



適なエネルギー源を選定する。この調査は地方政府、産業界、研究機関と連携して行われ、その成果は地域社会にフィードバックされる。これにより、各地域での再生可能エネルギー導入の方針がはっきりとし、具体的なプロジェクトが始動するための道筋がつけられる。

2025年の展望では、スマートグリッドの基礎技術が一部地域に導入され、エネルギーの供給と需要のバランスを取る高度な制御が可能になると期待される<sup>(21)</sup><sup>(22)</sup>。また、エネルギーの蓄積技術も進化を遂げると予想される。特に電池技術においては、容量の増大と寿命の延長、さらには高速充電が可能な新型電池が開発される見込みがある。目標としては、初めての地方で再生可能エネルギーに基づいた自己完結型のエネルギー供給システムを構築する。このシステムには、太陽電池や風力発電、さらには地熱や水力といった地域特有の再生可能エネルギー源が統合されると期待される。マイルストーンとしては、スマートグリッドの地方導入であり、これによって地域社会のエネルギー効率が大幅に向上する<sup>(22)</sup>。もう一つは、初の自己完結型エネルギー供給地域の誕生である。

2030年の展望では、風力、太陽光、地熱など複数の再生可能エネルギーを単一のシステムで効率的に組み合わせることが可能となると考えられる。このような複合的なエネルギーシステムは、各エネルギー源の天候依存性や季節依存性を補完し、より安定したエネルギー供給を実現すると予想される。さらに、AIを用いてエネルギー供給と需要をリアルタイムで調整する技術も成熟する。具体的には、AIアルゴリズムが電力供給のピークとバレーを予測し、蓄電技術と連携してエネルギーの有効活用を図ると期待される。

2050年の展望では、エネルギー供給が完全に分散化されるとともに、全国各地で持続可能なエネルギー供給の確立が予想される。具体的には、地域ごとの自然資源や需要に応じて、太陽光、風力、地熱、海流など多様なエネルギー源が最適に組み合わせられる。さらに、高度なAIとIoTテクノロジーが統合された制御システムによって、エネルギー供給と需要のマッチングがより精緻に行われる。例えば、バイオエネルギーによる発電とCO<sub>2</sub>キャプチャ技術が組み合わせられることで、エネルギー供給の過程でCO<sub>2</sub>が吸収される。目標としては、「スマートシティとスマートエネルギーの統合」が全面的に実現することである。高度なデータ分析とネットワーク技術が駆使され、交通、健康、治安、エネルギーなど多くの市民サービスが連携して動く。特に、大規模な災害時にも柔軟に対応できるレジリエントな社会基盤が構築されると期待される。マイルストーンには、全国規模でのスマートシティとスマートエネルギーの統合、そしてCO<sub>2</sub>ニュートラルまたはネガティブエミッションによるエネルギー供給の実現が挙げられる。

## デジタルコミュニケーションの普及

### 通信インフラの強化技術

都市と地方の共存には、地方のデジタルインフラの整備と普及による地方の通信問題の解決が重要である。2050年には、「通信インフラの強化技術」<sup>(23)</sup><sup>(24)</sup>が極めて重要な役割を果たす。具体的には、次世代の高速通信技術(例：7G以上)、エッジコンピューティング、セキュアなネットワークプロトコル、低遅延通信の確立などが含まれる。これらは、大容量のデータを高速で安全に送受信でき、かつ広範な地域にわたって信頼性の高い通信網を確立するために不可欠である。

デジタルコミュニケーションの普及が必要な理由は多面的である。まず、地方においても高速かつ安定したネットワーク接続が確保されることで、都市と地方間の情報格差が縮小される。この情報格差の縮小は、経済的な機会の公平な分布や教育資源の均等なアクセスといった社会的側面でも非常に重要である。次に、スマートエネルギー管理においても、高度なデジタルコミュニケーションが必要とされる。例えば、リアルタイムでエネルギーの需要と供給を調整するシステムは、地方においても効率的なエネルギー使用が可能になり、それが環境に与える負荷を減らすことにつながる。さらに、災害時においてもデジタルコミュニケーションの重要性は高まっている。安定した通信インフラがあれば、災害発生時の緊急情報の伝達や救援活動の調整がスムーズに行われ、命を救う可能性が高まる。このように、デジタルコミュニケーションの普及とそれによる通信インフラの確立は、社会のさまざまな側面で効率と公平性を高めるために不可欠である。それは単に技術的な進歩以上の価値を持ち、持続可能で公正な社会を形成する上で基盤となる要素であると考えられる。

高速通信インフラの展開においては、次世代の通信技術である7Gの研究開発を早期に進める必要がある<sup>(25)</sup>。具体的には、大学や研究機関との共同研究を行い、初期のプロトタイプを作成する。その後、実地テストを経て商用化に向けてのステップを踏む。エッジコンピューティングについては、データ処理の遅延を減らすために通信網のエッジに処理能力を持つデバイスやサーバーを配置する。これは、特にIoTデバイスやセンサネットワークが広く導入される場面で有用である。エッジコンピューティングのアーキテクチャを設計し、現地でのパイロットテストを実施することが重要である。セキュリティ面では、セキュアなプロトコルとエンドツーエンドの暗号化を用いてデータの安全性を高める。これには、最新の暗号学的手法を用いて、データ流出や改ざんのリスクを最小限に抑える技術を開発する。低遅延技術に関しては、リアルタイムでのデータ処理と反応が求められる領域である自動運転車や遠隔医療において重要である。これに対応するため、低遅延を実現する通信プロトコルやアル

ゴリズムの開発を進める。

以上のような取り組みにより、高速かつ安全、低遅延の通信インフラを構築することが可能となる。これらの技術開発は段階的に行われるべきであり、各段階での成功メトリクスを設定し、進捗を定期的に評価する必要がある。

目指している技術について、最初に普遍的な接続性を確立することが重要である。これは、全国各地、とりわけ地方においても高速で安定したインターネット接続が得られるような通信インフラを構築することを意味する。具体的には、地方でも都市並みのネットワーク品質を確保するために、光ファイバーや次世代通信技術を活用した広域ネットワークを構築する。次に、情報の即時性と安全性を確保するための技術開発も進める。これには、低遅延の通信プロトコルと高度なセキュリティ技術が必要である。具体的には、データセンターとエンドユーザ間のデータ転送を高速化する方法や、エンドツーエンドの暗号化を施してデータの漏洩や改ざんを防ぐ手法を開発する。最後に、コミュニケーションの強化についても重要である。都市と地方が緊密に連携し、情報・リソースを効率よく共有できる社会の構築を目指す。具体的には、分散された情報資源を一元的に管理・共有できるプラットフォームを開発する。このプラットフォームは、スマートエネルギー管理や災害対策など、多様な社会課題解決に活用できるように設計する。これらの技術開発を通じて、高速で安全、そして普遍的なデジタルコミュニケーション環境を整えることで、社会全体のレジリエンスと効率性を高めることができると考えられる。

2023年現在においては、第一に、5G通信の全面普及を実現するために全国の主要都市において5Gのカバレッジが確保されると期待される。第二に、6G通信に向けた初期研究が開始されると期待される。この初期研究には、新たな周波数帯の探索や大容量データの高速送受信に関するテクノロジー開発が含まれると予想される。6Gに関する基礎研究の開始は、次世代の通信インフラに対する前向きなステップであり、長期的な展望を持つ重要なマイルストーンとなると考えられる。具体的には、実証実験が開始され、エッジコンピューティングの初期プロトタイプの開発が期待される。このプロトタイプには、データ処理の遅延を減少させるための新しいアルゴリズムやプロトコルの導入が予想される。

2025年の展望においては6Gの商用展開と5Gの地方への拡大、そしてエッジコンピューティングのフレームワーク完成といった複数の重要な技術的進展が同時に実現される年であると予想され、これらが通信インフラ全体の強化と社会のデジタルトランスフォーメーションに大いに寄与すると期待される。

2030年の展望では、通信技術とエッジコンピューティングの領域でさらなる大きな進歩が期待される。一つ目の大きな目標は、7Gの研究と開発の開始である。6Gが全国各地

で一般化すると予想される中、7Gの研究プロジェクトが始動すると期待される。エッジコンピューティングも大きな変化を迎えると期待される。具体的には、エッジコンピューティングが一般的に用いられるようになると考えられる。これまでの研究と開発が実を結び、エッジコンピューティングの基本技術が商用環境で適用され始めると期待される。2030年は通信技術が一段と進化し、人々の生活やビジネス、さらには社会インフラに至るまでのデジタルトランスフォーメーションが加速すると期待される。

2050年の展望では、さらなる先進的な通信インフラとデータ処理技術の融合が期待される。具体的には、7G以上の高度な通信インフラが全国各地で普及すると予想される。この通信インフラによって、高速で安全な通信網が都市から地方まで確立されると期待される。地方においても、都市と同等のデータ通信速度と安全性が確保され、社会全体の情報アクセシビリティが飛躍的に向上すると予想される。また、エッジコンピューティングと低遅延技術が完全な統合が期待される。これにより、エッジコンピューティング技術が高度化し、リアルタイムのデータ処理と反応が可能になると予想される。遠隔医療、自動運転車、スマートシティなど、リアルタイムの高度なデータ処理が求められる多くの分野で、効率と安全性が大幅に向上すると期待される。

## スマートモビリティの推進

### インテリジェントトラフィックシステム

都市と地方の共存には、スマートモビリティ技術の開発による運送の問題の解決が重要である。また、自動運転技術や交通インフラの効率化により、都市と地方の移動の利便性を向上させると同時に、交通渋滞や排出ガスの削減が必要である。この枠組みの中で中心的な役割を果たす技術は「インテリジェントトラフィックシステム (ITS)」である<sup>(26) ~ (28)</sup>。インテリジェントトラフィックシステムは、高度なセンサ技術、AIアルゴリズム、通信インフラを統合することで、リアルタイムでの交通流監視と制御が可能である。

都市と地方間での経済格差と人口密度の不均衡は、多くの交通問題を引き起こしている。都市では交通渋滞が慢性化しており、大気汚染や不必要な燃料消費が増大している。一方、地方では十分な交通インフラが欠如しており、地域経済に対する負担が大きい。このような課題に対し、インテリジェントトラフィックシステム (ITS) は有効な解決手段である。ITSはリアルタイムでの交通状況の把握と、そのデータに基づく信号調整やルート提案が可能であり、都市部の交通渋滞の緩和と地方での効率的な移動が期待される。加えて、ITSの効果的な運用によっては、燃料消費と排出ガスの削減が可能となり、環境への負荷も軽減する。したがって、ITSは交通の効率化と環境負荷の軽減、これら二つの重要な目標を同時に達成する可能性が高い手段である。このように、ITSは都市と地方の持続可能な発展に寄与するとともに、



気候変動対策にも一役買う重要な技術である。

ITSの開発において、最初にセンサネットワークを全国の主要道路に導入する。これらのセンサは車両の流れや速度、道路の状態などをリアルタイムで監視する。次に、AI技術を活用して、収集されたデータを高速に分析する。このAIはトラフィックパターンを認識し、予測モデルを生成する能力が必要である。通信インフラについては、7G以上の高度な通信技術を使用することが予想される。これにより、車両と交通インフラストラクチャ（例：信号機、道路標識）との間で、高速かつ確実な即時通信が可能となる。この高度な通信インフラが確立されれば、リアルタイムでの情報交換と迅速な意思決定が行える。さらに、エッジコンピューティングを導入することで、データ処理の速度と効率が大幅に向上する。エッジコンピューティングは、データを中央のサーバーに送るのではなく、現場近くで即座に処理する技術である。これにより、高いレイテンシ（通信の遅延時間）が発生することなく、リアルタイムのデータ分析と応答が可能となる。

以上のような手法によって、ITSは交通渋滞の削減、燃料効率の向上、交通事故の予防など、多方面での効果が期待される。特に、リアルタイムでの高度なデータ分析と通信が可能になることで、より柔軟かつ効率的な交通システムが構築できると考えられる。

ITSの開発において目指している技術は、主に効率的な交通フローの確立、環境負荷の軽減、そして安全性の向上である。効率的な交通フローについては、AIと高度な通信インフラを組み合わせ、道路上の車両がスムーズに流れるようにする。具体的には、リアルタイムでの交通流分析を通じて、信号配分や道路使用の最適化を図る。結果として、交通渋滞が削減され、それによって個々の移動時間も短縮される。環境負荷の軽減は、効率的な交通フローを実現することで直接的に達成される。車両がスムーズに動くことで、不必要なアイドリング時間が減少し、その結果、燃料消費と排出ガスが削減される。安全性の向上においては、センサネットワークとAI分析を用いて、異常な運転パターンや交通障害を早期に検出する。また、エッジコンピューティングを活用してリアルタイムでの反応と対処が可能となる。これにより、交通事故のリスクが大幅に低減される。

以上の技術目標は、都市だけでなく地方においてもその効果を発揮することが期待される。特に、都市と地方の経済格差や人口密度の不均衡に起因する交通の問題も、これらの技術によって解消される可能性が高いと考えられる。

2023年現在は、5G通信インフラの普及と連携した初期段階のITSの展開が予想される。技術進捗として、低遅延のセンサネットワークと初期AIアルゴリズムが実装されることが予想され、主要道路での試験運用が行われる可能性が高い。また、初めてのスマート信号機や情報提供システムが運用を開始すると期待される。

2025年の展望では、6G通信の開始とより高度なAIアルゴリズムの導入が予想される。リアルタイムでの大規模データ処理が可能になることが予想され、交通フローの最適化がさらに進む可能性が高いことを意味する。また、自動運転車とITSが連携することで、道路上の安全性がいつそう向上すると期待される。

2030年の展望においては、7Gの研究と開発が開始されると予想される。この時点で、既に6Gは全国各地で一般化すると期待される。エッジコンピューティングの基本技術が商用環境で適用され始めると予想される。また、ITSの性能と範囲は継続的に拡大し、より高度な交通制御が可能になると予想される。さらに、自動運転車とITSが連携し、安全性がいつそう向上することが期待される。

2050年の展望では、7G以上の高度な通信インフラが全国各地で普及すると予想される。具体的には、高速で安全な通信網が都市から地方まで確立されることが期待される。さらに、エッジコンピューティング技術が高度化し、リアルタイムのデータ処理と反応が可能になると予想される。このような技術的基盤の確立によって、ITSは全面的に最適化され、交通問題の根本的な解決に大きく貢献すると期待される。

### 課題3. 持続可能なエネルギー生産と効率的な利用のための材料開発と熱工学的最適化(図6)

#### 新しいエネルギー変換材料の開発

##### 高効率の熱電変換材料の研究

2050年に向けて、効率的で持続可能なエネルギー源への転換を促進するためには、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの変換材料の研究開発と熱工学的最適化が必要である。特に注目されるのは「高効率の熱電変換材料の研究」である。高効率の熱電変換材料は、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する、もしくはその逆のプロセスを高効率で行う材料である。このような材料には、新しいナノテクノロジー、量子技術、および高度な材料科学が活用される。

未利用の熱エネルギー—例えば工場で発生する余熱や家庭の熱エネルギー—を有用な電気エネルギーに変換する可能性を持っている。この変換プロセスにより、エネルギーの再利用が可能になるため、エネルギーの無駄が削減される。

高効率の熱電変換材料の研究開発においては、最初のステップは実験室レベルでの材料解析とプロトタイピングである。この段階では、新しい合成方法やナノ構造技術を用いて、熱伝導率が低く、電気伝導率が高い材料を開発する。機器やソフトウェアを使用して、これらのプロトタイプ材料の熱電特性を詳細に解析し、どの程度効率的にエネルギー変換ができるのかを評価する。次に、この実験データを基に、既存の材料の改良や新たな材料の設計が行われる。具体的には、合成過程でのパラメータ調整、表面改質、または

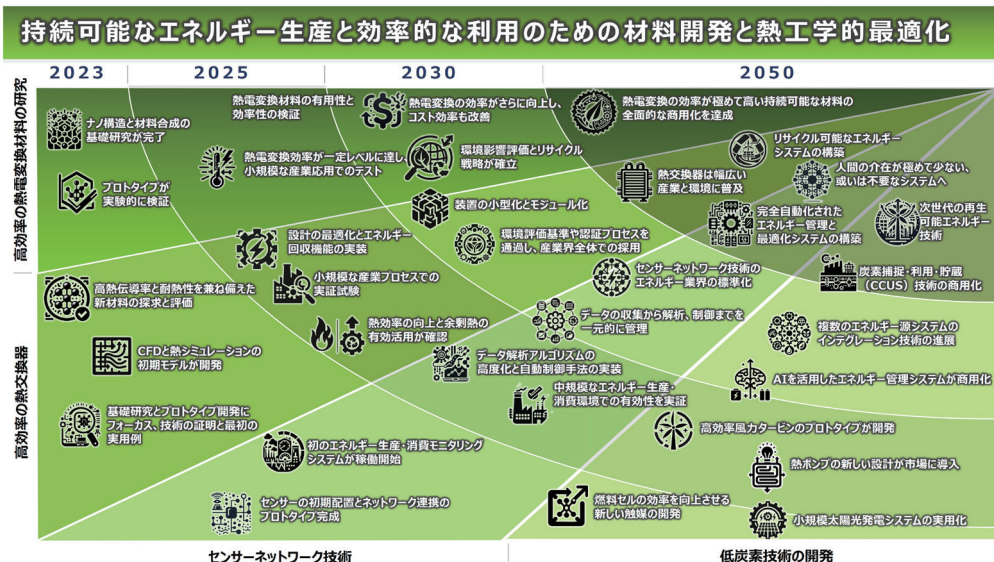


図6 課題3「持続可能なエネルギー生産と効率的な利用のための材料開発と熱工学的最適化」のための技術ロードマップ(図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

特定の成分の添加などを試みることで、性能を向上させる。この段階では、研究者と産業界との連携が強化され、より実用的な観点からのフィードバックが得られる。その後、実験室レベルで確認された材料特性を基に、スケールアップのプロセスが開始される。この段階で重要なのは、小規模で確認された効果が大規模な生産でも維持されるかを確認することである。この確認作業は、パイロットプラントでのテストや実際の環境下での性能評価を通じて行われる。最終的に、これらの検証作業が成功した場合、商用化に向けての動きが加速される。産業界と連携し、大量生産技術の開発や市場適用性の評価が行われる。これにより、高効率の熱電変換材料が実際のエネルギーシステムに導入され、持続可能なエネルギー生産と効率的な利用が促進されることとなると考えられる。

目標としているのは、熱電変換効率を大幅に向上させることにより、持続可能なエネルギー生産と利用に寄与する新材料の開発である。これにより、産業施設や家庭で発生する熱エネルギー、特に未利用の熱エネルギーを有用な電気エネルギーに効率的に変換する。具体的には、廃熱のような低品位熱源から、高いエネルギー変換効率で電力を生成する材料を作り出すことが狙いである。この目標達成のためには、材料の内部構造を微細に制御して熱電特性を最適化する技術、安定した高性能を持続するための耐久性向上技術、そして環境負荷を低減するためのリサイクルや廃棄処理に関する技術など、多角的な研究と開発が必要である。最終的には、これらの高効率熱電変換材料を用いたエネルギーシステムが普及することで、エネルギー供給の多様性が高まり、持続可能なエネルギー利用がいつそう促進されることが期待される。このような高効率の熱電変換材料は、再生可能エネルギー源だけでなく、化石燃料を使用する既存のエネルギーシステムにおいても、効率と持続可能性を向上させる

手段として非常に有用であると考えられる。

2023年現在においては、初のプロトタイプの開発とテストが行われることで、基礎研究から応用段階への移行が始まる予定である。この年には、ナノ構造と材料合成に関する基礎研究が完了し、その成果を活用して最初のプロトタイプが製造されると考えられる。このプロトタイプは、熱電変換の効率と安定性を検証するための実験的な試験に供される。具体的には、

エネルギー産業や廃熱を多く生じる製造業などと協力し、商用応用のためのフィージビリティスタディが行われると予想される。

2025年の展望では、プロトタイプ効率向上が一つの大きな目標であり、これによって小規模の産業応用が可能となると期待される。熱電変換効率が一一定レベル、例えば事前に定義されたエネルギー変換率や安定性などに達すると、次に小規模な産業応用での実証試験が始まる。ここでは、特定の産業シーン、例えば廃熱を大量に発生する工場やエネルギー生産施設での熱電変換材料の有用性と効率性の検証が行われると考えられる。

2030年の展望では、商用化に向けたスケールアップと産業での適用範囲の拡大が主な目標となると予想される。熱電変換の効率は、研究と実用化の連携によってさらに向上し、これに伴いコスト効率も改善する見込みである。具体的には、材料コストと製造プロセスの効率化を通じて、単位エネルギー当たりの変換コストが下がると予想される。成功例が出始めると、その影響力は他の産業や市場にも広がり、更なる商用化の道が開かれる可能性が高い。さらに、環境影響評価とリサイクル戦略が確立されると考えられる。持続可能なエネルギー利用が主眼の一つであるこの技術が、そのライフサイクル全体で持続可能であることを証明するためには、環境アセスメントとリサイクルに関する明確な方針が不可欠である。これにより、技術が社会や環境に与える影響が最小限に抑えられ、より広範な産業での適用が進むと期待される。

2050年の展望では、熱電変換の効率が極めて高い持続可能な材料の全面的な商用化が達成されると考えられる。一般家庭においても、この高効率の熱電変換技術が普及し、日常生活におけるエネルギー利用の効率化が進む見込みである。具体的には、家庭で発生する未利用の熱エネルギー、例えば調理や暖房から生じる余熱などを電気エネルギーに



変換するデバイスが一般的になると考えられる。さらに、エネルギー供給の多様性が大幅に向上し、持続可能なエネルギー利用が促進されることが考えられる。従来のエネルギー供給に依存することなく、熱電変換技術を利用して、地域や家庭レベルでのエネルギー自給が可能となると期待される。産業界でも、生産プロセスから発生する余熱を有効に利用することで、エネルギー効率が向上すると予想される。

## 熱工学的最適化とエネルギー効率

### 高効率の熱交換器

エネルギーの効率化のためには、エネルギー生産・消費プロセスの最適化により、余剰エネルギーのロスを最小限に抑えるための研究が必要である。高効率の熱交換器は、流体間での熱エネルギーの効率的な移動を促進するために設計された装置である。この技術は先進の材料科学、流体力学、そして熱力学的設計手法を用いて、最小のエネルギーロスと最大の熱転送効率を追求する。

高効率の熱交換器は、例えば製造プロセスで発生する高温の廃熱を低温の流体に効率よく移動させ、エネルギーの再利用を促進する。さらに、再生可能エネルギー源からのエネルギー採取や、既存のエネルギー供給網との統合も容易に行える。これにより、エネルギー供給の安定性が向上し、持続可能なエネルギー利用が促進される。

高効率の熱交換器の開発にはいくつかの重要なステップが存在する。第一に、材料の選定である。最先端の研究に基づき、高熱伝導率と耐熱性を兼ね備えた新材料を開発または選定する必要がある。これによって、装置全体の性能を向上させ、長期的な耐久性も確保する。次に、設計の最適化が必要である。具体的には、CFD (Computational Fluid Dynamics) や熱シミュレーションツールを用いて、流体の流れと熱輸送を最適化する。このステップで、熱交換器の全体設計が効率的に行え、必要な熱伝達率を確保できる。エネルギー回収も重要なポイントである。冷却や加熱プロセスから発生する余剰熱を効率よく回収し、再利用できるようにするためには、専用の回収システムを組み込む必要がある。これにより、全体的なエネルギー効率が向上し、環境負荷の低減が期待できる。最後に、可搬性とスケラビリティの確保が求められる。装置の小型化とモジュール化を行い、多様な規模や用途に適応できるようにする。このようにして、一つの熱交換器がさまざまな場面で応用可能になると考えられる。

2050年までに目指す技術的な成果は、高効率の熱交換器が広範な産業と個々の生活に普及し、持続可能なエネルギー生産と効率的なエネルギー利用の土台を形成することである。具体的には、この高効率の熱交換器によって産業界全体でのエネルギー効率が顕著に向上することが期待される。これにより、温室ガス排出量が削減されるとともに、リサイクル可能なエネルギーシステムの実現に繋がると考えら

れ、熱交換器の性能向上は、工場やエネルギー生産施設、さらには一般家庭でのエネルギー利用の効率を高めるための基盤技術となる。これは、余剰熱を有効に回収し再利用することで、エネルギーの全体的な使用効率を高める手段となる。その結果、非効率なエネルギー使用とそれに伴う環境負荷を大幅に削減する。この技術が成功すれば、熱工学的最適化とエネルギー効率の向上に大いに貢献する。短期間での効果はもちろん、長期的には持続可能なエネルギー生産と効率的なエネルギー利用が一体となり、持続可能な未来の構築に繋がる重要な一歩である。

2023年現在においては、熱伝導率と耐熱性のバランスが良い新材料を発見または開発することが、このフェーズでの重要な目標である。さらに、CFD と熱シミュレーションの初期モデルも同時に開発される。このモデルは、流体の流れや熱の移動に関する仮定を試し、基礎研究の理論とプロトタイプ開発による実際の性能が一致するか確認するためのものである。

2025年の展望では、初期プロトタイプの開発から得られたデータとフィードバックを基に、設計手法がさらに洗練され、エネルギー回収機能も本格的に実装されると予想される。この時点で特に注目されるのは、小規模な産業プロセスでの実証試験である。これらの試験によって、高効率の熱交換器が実際に熱効率を向上させ、余剰熱を有効に活用できるかが厳密に評価される。

2030年の展望では、熱交換器の設計が一段と進出し、装置の小型化とモジュール化が達成されると予想される。この技術的進展によって、産業界全体で多様な規模や用途に対応できる高効率の熱交換器が市場に登場することが期待される。さらに、環境評価基準や各種の認証プロセスを通過することで、その採用範囲は拡大し、特にエネルギー集約型の産業での需要が高まると見られる。

2050年の展望では、高効率の熱交換器が多様な産業領域や環境に広く普及することが予想される。その結果、持続可能なエネルギー生産と効率的なエネルギー利用において新たな基準が確立されることが期待される。この時期には、リサイクル可能なエネルギーシステムの構築が進み、熱交換器の役割が持続可能な未来に向けての重要な貢献として明確に認識されると考えられる。

## リアルタイムエネルギーモニタリングと制御

### センサネットワーク技術

エネルギー生産と消費の過程をリアルタイムで監視し、それに基づいて適切な制御と管理を実現するためには、制御および情報処理技術の研究開発が必要である。「センサネットワーク技術」は、多数のセンサノードを物理的に分散させて配置し、これらのノードが無線または有線の通信手段で連携を取りながら、環境データをリアルタイムで収集、伝送、処理できるシステムである。具体的には、温度、湿度、流速、圧力といった環境パラメータをモニタリングし、それらの

データを中央データセンターやエッジコンピューティングノードに送信する。送信されたデータは高度なアルゴリズムで解析され、エネルギーの生産と消費の最適化につながるアクションが自動的または半自動的に行われる。この技術の最大の特長は、エネルギーの生産から消費、そしてリサイクルに至る全プロセスにおいて、リアルタイムでの情報収集と制御が可能な点である。これにより、エネルギーの無駄遣いを大幅に削減し、システム全体の効率を高めることが可能である<sup>(29)</sup><sup>(30)</sup>。2050年に持続可能なエネルギー生産と効率的なエネルギー利用を目指すには、エネルギーのフローと使用状況をリアルタイムで精密に監視する必要がある。これにより、エネルギーの生産過剰や消費の無駄を即座に検出し、適切な調整や制御を行うことが可能となる。リアルタイムエネルギーモニタリングと制御は、瞬間的なエネルギー需給の変動に対応するため、かつ、エネルギー効率を最大限に高めることを目的としている。例えば、 unnecessary エネルギー消費を防ぐため、空調や照明の調整、産業用機械の最適運転など、多様な用途で即時にデータを収集し、分析する。この過程でセンサネットワーク技術が不可欠であり、多くのセンサから得られるデータを瞬時に処理し、適切なアクションを自動的に判断する能力がこの技術には備わっている。その結果、エネルギーの無駄遣いを大幅に削減し、持続可能なエネルギー利用が実現できるとともに、全体のシステム効率が向上するである。

センサネットワーク技術の開発においては、まずエネルギー生産設備や消費箇所に多数のセンサを配置する。これらのセンサは無線または有線のネットワークで連携し、データを一元的に収集するシステムを構築する。センサの種類や配置位置は、目的や必要性に応じて選定され、最も効率的なデータ収集が可能な環境を整える。次に、収集されたデータはクラウドやエッジコンピューティングリソースで即座に解析される。この解析プロセスでは、エネルギーの流れや使用状況を評価し、無駄なエネルギー消費や供給過多を検出する。この段階で高度な機械学習アルゴリズムや統計的手法が用いられ、より精緻な制御が可能となる。解析結果に基づき、エネルギー供給または消費の調整を行うアルゴリズムが実装される。このアルゴリズムは、さまざまなエネルギー需要に対応できるように設計され、自動で供給量を増減するか、消費箇所での使用量を調整する。ここで重要なのは、アルゴリズムがリアルタイムで運用されることである。最後に、人間とのインタラクションも考慮される。エネルギー使用状況や解析結果は、専用のダッシュボードやアプリケーションを通じて操作者に通知される。これにより、必要に応じて手動で調整が可能となり、システムの柔軟性と適応能力が向上すると考えられる。このように、センサネットワーク技術は持続可能なエネルギー管理に不可欠なツールとなり、効率的なエネルギー利用を促進する。

センサネットワーク技術が目指しているのは、エネルギーの生産から消費に至るまでのプロセスにおいて、最高レベルの効率性と持続可能性を確保することである。この目標の達成は、緻密なデータ収集と解析、そして適切な制御手法の組み合わせによって可能となる。特に重視されるのは、エネルギー消費の透明性を向上させることである。透明性が確保されると、エネルギーの使われ方や供給量が明確になり、それによって迅速かつ正確な意思決定が可能となる。さらに、この技術の進展によって、温室ガス排出量の削減も大幅に進展する見込みである。具体的には、リアルタイムでのデータ解析と制御によって、 unnecessary エネルギー消費や供給を即座に修正することができる。この機能の実現により、エネルギー供給と消費が極めて効率的に行われることが可能となり、持続可能なエネルギーシステム構築への貢献が期待される。

2023年現在においては、エネルギー生産設備や消費箇所に配置するためのセンサの初期バージョンが開発され、センサネットワークと連携するプロトタイプが完成されると考えられる。また、エッジコンピューティングのリソースも同時に開発され、初期のテストが行われると予想される。マイルストーンとしては、初のエネルギー生産・消費モニタリングシステムが稼働を開始すると考えられる。これにより、エネルギーの生産から消費までのプロセスがリアルタイムで監視され、そのデータが集められるようになると予想される。

2025年の展望では、データ解析アルゴリズムが高度化されるとともに、自動制御手法が実装される。これにより、エネルギーの供給と消費がより効率的に調整される。また、人間とのインタラクション機能も向上し、オペレータがシステムの状態をより容易に把握し、必要に応じて手動で調整できるようになると考えられる。この段階では、中規模なエネルギー生産・消費環境での有効性を実証することである。マイルストーンとしては、エネルギー消費効率が向上することが期待される。この成果は、センサネットワーク技術の持つポテンシャルを具体的に示すものとなり、さらなる投資と研究への道を開くと期待される。

2030年の展望では、クラウドとエッジコンピューティングが統合された解析プラットフォームが完成すると予想される。このプラットフォームは、データの収集から解析、制御までを一元的に管理することが可能となり、それによりエネルギーの生産と消費がさらに効率的に行われると考えられる。さらに、高度な自動制御アルゴリズムとAIが導入されることで、エネルギー管理が精緻かつ自動化されると期待される。この広範な導入により、エネルギーの効率化が業界全体で進展すると期待される。マイルストーンとしては、温室ガス排出量が20%以上に削減されると期待される。この削減は気候変動対策における重要な進展を意味しており、センサネットワーク技術が持続可能なエネルギーシステムにおける不可



欠な要素であることを示す。さらに、センサネットワーク技術が業界標準となると期待される。

2050年の展望では、完全自動化されたエネルギー管理と最適化システムが構築されると予想される。このシステムは、人間の介在が極めて少ない、あるいは不要なレベルに進化すると期待される。高度な人工知能と自動制御アルゴリズムが極限まで洗練され、エネルギーの生産から消費に至るまでの全プロセスがリアルタイムで監視され、瞬時に調整が行われるであろう。目標としては、世界規模での持続可能なエネルギー管理の実現が掲げられる。この時点で、センサネットワーク技術が多数の国と業界で採用され、エネルギーの効率的な管理と利用が全球的に展開されると期待される。マイルストーンとしては、グローバルでの温室ガス排出量が50%削減されると予想される。この大幅な削減は、気候変動の軽減に大きく寄与し、持続可能な未来への実現に向けた重要な一歩と考えられる。さらに、エネルギーの生産と消費が最も効率的で持続可能な方法で行われるようになると期待される。これにより、エネルギーの無駄が極力排除され、持続可能なエネルギーシステムの世界的な確立が見込まれる。

## 技術革新と持続可能なエネルギーシステム構築

### 低炭素技術の開発

「低炭素技術の開発」は、燃料セルを用いた電力生成、太陽光を直接電力に変換するフォトボルタイックセル、風エネルギーを機械的動力に変換する風力タービン、空気や水の温度を効率よく制御する熱ポンプ、および産業プロセスや暖房・冷房で失われる熱エネルギーを回収・再利用する熱回収システム、燃料電池の利用を中心とした水素エネルギーの革新的利用技術<sup>(29)~(31)</sup>などを含む多様な技術群を対象としている。この活動は、高性能な電解質や触媒の開発を中心とする材料科学、エネルギー転送メカニズムの最適化に寄与する熱工学、電力の効率的な制御と分配を可能にする電子工学、および水素の安全な貯蔵と効率的な利用に不可欠な構造安全性評価技術と信頼性工学といった、複数の専門分野が連携し、相互に影響を及ぼしながら進行する必要がある。この総合的なアプローチは、炭素排出を最小限に抑えることを基本とし、長期的には炭素中立なエネルギーシステムの全面的な構築を目指すものである。

この技術が必要な理由は、2050年を目指す持続可能なエネルギーシステムにおいて、低炭素技術は気候変動対策と資源効率の向上の両方を実現するための鍵であると考えられる。具体的に言えば、石油や石炭などの化石燃料に大きく依存している現行のエネルギーシステムは、大量の二酸化炭素排出を通じて地球温暖化を加速させている。このような気候変動は、極端な気象、海面上昇、生態系の崩壊など、多くの深刻な問題を引き起こし、人類の生存基盤自体を脅かす可能性がある。低炭素技術の導入と普及は、これらの

環境および社会的問題の緩和を目指す重要な手段である。また、資源が有限である中で、エネルギー需求が世界中で増加している現状において、エネルギーの効率的な利用は極めて重要である。低炭素技術は、エネルギーを生成、蓄積、輸送、使用する各段階で効率を高め、エネルギーの浪費を削減するための有効な手段であり、持続可能なエネルギーシステムの実現には欠かせない要素である。以上のような背景から、低炭素技術は2050年に向けた持続可能なエネルギー戦略の中心的な要素であり、その開発と実装は緊急性を持って推進されるべきである。

低炭素技術の実現には複数の手段が必要で、それぞれが相互に関連している。まず、新材料の研究開発によって、高効率・低炭素のエネルギー変換と蓄積が可能な基盤を築く。この研究は、次世代の燃料セルや高効率太陽電池の開発に直結しており、基礎研究から応用に至るまでの一貫したプロセスが求められる。燃焼しても大気中のCO<sub>2</sub>を増やさないカーボンリサイクル燃料の開発<sup>(32)</sup>は、既存インフラを活用できる強みがあり、発電や船舶用途としてのアンモニア燃料を利用した脱炭素化技術<sup>(33)</sup>の開発も必要である。次に、熱工学的最適化によって、エネルギー変換プロセスそのものの効率を向上させる。これには、現在のエネルギー変換技術のボトルネックを特定し、数値シミュレーションや実験によってその解決策を探る活動が含まれる。例えば、熱ポンプや熱回収システムを使って廃熱を有効に再利用するなど、熱のムダを削減する。エネルギー変換過程中的状態をモニタし、適切な制御で変換効率を高める工夫も必要となる。さらに、システムインテグレーションによって、複数の低炭素技術を一つの統合されたシステムとして動作させる。これにより、各技術が単独で達成できる以上の効率と信頼性を確保することができる。具体的には、太陽光発電と風力発電を一つのエネルギーマネジメントシステムでコントロールすることで、エネルギー供給の安定性を高めるような取組みが考えられる。最後に、データ解析と人工知能を活用することで、エネルギー使用のパターンを詳細に解析し、システムの最適な制御と維持を行う。これは、大量のセンサデータやユーザ行動データを基に、エネルギー供給と需要のバランスをリアルタイムで最適化するものであり、結果として全体のエネルギー効率を大幅に向上させる可能性がある。また、自動車や航空機を中心とした従来の化石燃料の使用をベースとする輸送機器のエネルギー環境に対し、燃料電池を活用した水素エネルギーの導入を促進することによって輸送機器運用時の二酸化炭素排出量を大幅に削減することが可能となる。

以上のような手段を組み合わせることで、低炭素技術は多角的に進化し、その普及と実用化が加速されると考えられる。

最終的に目指しているのは、持続可能なエネルギー生産と効率的なエネルギー使用が統合された、全面的なシステム構築を達成することである。具体的には、2050年までに

は全世界で温室ガス排出量を半減させるとともに、再生可能エネルギーの使用率を極めて高い水準にまで引き上げることが期待される。これには、太陽光発電、風力発電、およびその他の再生可能エネルギー源による電力生成、高効率のエネルギー変換技術、そしてスマートグリッドを含むエネルギー配分技術が一体となって動作する必要がある。さらに、このシステムは単にエネルギー供給と消費を効率化するだけでなく、地域社会や産業の持続可能性への寄与も意図して設計されるべきである。具体的には、分散型エネルギーシステムの採用により、エネルギーの地産地消が促進されることで、地域社会のエネルギーセキュリティが向上すると予想される。また、エネルギーの高効率化と低炭素化は、製造業などの産業においてもオペレーションコストを削減する可能性があり、経済発展をさらに促進する可能性がある。

このような持続可能なエネルギーシステムの構築により、気候変動の緩和だけでなく、エネルギーセキュリティの向上と社会経済の持続可能な発展に寄与する、複合的な目標達成が期待される。

2023年、燃料セル技術では、新たに開発されている触媒により、エネルギー変換効率が現在の水準よりも10%向上する可能性がある。一方、太陽光発電では、新しい設計と材料により設置コストを20%削減する研究が進んでいる。これにより太陽光発電システムのさらなる普及が促されることが期待される。試験運用が始まる小規模な太陽光発電システムでは、初期データに基づき期待される効果の確認が見込まれている。

2025年頃の展望では、高効率風力タービンのプロトタイプが開発され、既存の風力タービンよりも効率的なエネルギー生成が可能になることが期待される。これにより、風力発電がコスト効果的な選択肢となる可能性がある。一方、熱ポンプにおいても同様にエネルギー効率の大幅な向上が目標とされている。新しい熱ポンプの設計が市場に導入されることにより、エネルギーコストの削減だけでなく、その運用から生じる炭素排出量も減少すると期待される。2025年は風力発電と熱ポンプのエネルギー効率を大幅に向上させる新技術が登場する年となり、これにより持続可能なエネルギーの拡大と環境への負荷削減が一段と進むと期待される。さらには2025年度までに国内に水素ステーションが320箇所程度設置される予定であり、水素燃料電池自動車(FECV)の普及台数を20万台に伸ばすことが目標である。

2030年頃の展望では、複数のエネルギー源を効率的に統合するシステムインテグレーション技術が進展すると予想される。複数の低炭素技術が統合された実証プロジェクトが開始されることが、この目標達成への重要なマイルストーンとなると考えられる。また、AIを活用したエネルギー管理システムが商用化され、これにより家庭や産業でのエネルギー利用が大幅に効率化されると期待される。同時に

2030年には水素ステーション事業の自立化を目指し、900基程度の水素ステーション網の充実とそれに対応した水素供給能力の拡充を図り、FECVを80万台にまで普及させる計画である。

2050年頃までの展望においては、炭素捕捉・利用・貯蔵(CCUS)技術の商用化が気候変動対策において革新的な突破口となると予想される。具体的な目標としては、世界の温室ガス排出量を50%削減することが挙げられる。また、水素エネルギー利用技術に関しては、CCS(CCUS)や国内外の再生エネルギー利用技術との組み合わせによってCO<sub>2</sub>フリーの水素製造・輸送・貯蔵技術が実現される見込みである。こちらの目標は、再生可能エネルギーの使用率を80%以上にすることで、これにより化石燃料の使用が大幅に減少すると期待される。

2050年はCCUS技術と次世代の再生可能エネルギー技術が成功裏に導入と普及を果たすことで、温室ガス排出量の大幅な削減と再生可能エネルギーの普及率向上が可能になると予想される。これらが現実となれば、気候変動の軽減だけでなく、エネルギーセキュリティと経済発展も大いに支えられると期待される。

## おわりに

### 『人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会』

本稿では「人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティの持続可能な共存を目指す社会の構築をテーマに掲げ、その実現に向けた議論を展開した。このテーマに資する多様な部門の専門家による綿密な協議がワークショップ形式で行われ、2050年に向けて実現すべき理想的な社会像および必要な技術ロードマップが策定された。実現に向けての具体的方策を探るために、異なる分野の知見が統合され、新たな技術領域の創出が図られた。社会像に照らし合わせた望ましい将来を三つの主要カテゴリーに分類し、それに伴う包括的な課題をさらに深掘りして詳細化した。その上で、本会メンバーによる主導的な技術開発の方向性を特定し、12の技術領域にわたる具体的な議論を進行した。これらの技術項目に対し、2023年を起点として、2025年の短期目標から、2030年および2050年の中長期展望に至るまでの技術進化に関する見通しを描き、達成への目標とマイルストーンを具体化した。本取組みが、持続可能な社会を目指す一助となることを願っている。

#### 参考文献

- (1) 日本機械学会, 機械工学年鑑 2022 (2022).
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁, 第6次エネルギー基本計画 (2021), pp.21-32.
- (3) 2050年温室効果ガス排出実質ゼロを達成するための意見書 (2021年), 日本機械学会動力エネルギーシステム部門, <https://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-12/01.html> (参照日 2023年10月1日).
- (4) Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), IPCC 第6次評価報告書 (AR6) 政策決定者向け要約 (2022), pp.4-21.
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁, 令和4年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書



2023) (2023), pp.77.

- (6) 世界一のモジュール変換効率40%超を目指す、太陽電池開発中、NEDO Web Magazine, <https://webmagazine.nedo.go.jp/practical-realization/articles/201111sharp/> (参照日 2023年 10月 1日).
- (7) 世界最高性能の小形風力発電システム、NEDO Web Magazine, <https://webmagazine.nedo.go.jp/practical-realization/articles/201212zephyr/> (参照日 2023年 10月 1日).
- (8) グリーン成長戦略「洋上風力・太陽光・地熱産業」、経済産業省, [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/01\\_yojotaiyoko.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/01_yojotaiyoko.html) (参照日 2023年 10月 1日).
- (9) 蓄電池産業戦略, 経済産業省, [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/battery\\_strategy.html](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy.html) (参照日 2023年 10月 17日).
- (10) 地熱エネルギーの宝庫・東北エリアで見る、地熱発電の現場(前編)、経済産業省資源エネルギー庁, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyochinetsuhatsuden\\_yuzawa01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyochinetsuhatsuden_yuzawa01.html) (参照日 2023年 10月 1日).
- (11) Adam Hirsch, Yael Parag, Josep Guerrero, Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.90 (2018), pp.402-411. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.040
- (12) 蓄電池産業戦略検討官民協議会, 経済産業省, [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/battery\\_strategy/0007.html](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/0007.html) (参照日 2023年 10月 17日).
- (13) 革新的GX技術創出事業(GteX)・蓄電池, 科学技術振興機構, <https://www.jst.go.jp/gtex/field/storage.html>. (参照日 2023年 10月 18日).
- (14) 令和5年版環境・循環型社会・生物多様性白書, 環境省, pp.35-36.
- (15) 令和5年版環境・循環型社会・生物多様性白書, 環境省, pp.37.
- (16) スマートシティ・ガイドブック 第2版(令和5年8月10日公開), 内閣府, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/smartcity/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/index.html) (参照日 2023年 10月 18日).
- (17) 国土交通省, スマートシティモデル事業等推進有識者委員会, 令和5年度第1回(2023年8月23日), 配付資料 [https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/toshi\\_daisei\\_tk\\_000073.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/toshi_daisei_tk_000073.html) (参照日 2023年 10月 18日).
- (18) 仙台市/泉パークタウンにおけるサスティナブル & スマートな社会課題解決型まちづくり, (仮称) 泉パークタウン第六住区東工区開発計画におけるパートナー企業連携による提供サービスの概要について, <https://homes.panasonic.com/company/news/release/2021/0226.html> (参照日 2023年 10月 18日).
- (19) 内閣府国家戦略特区「スーパーシティ」構想について(令和5年8月更新), <https://www.chisou.go.jp/tiiki/kokusentoc/supercity/openlabo/supercitycontents.html> (参照日 2023年 10月 18日).
- (20) 滋賀県, 令和5年度スマートライフスタイル普及促進事業補助金, <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/ondanka/304463.html> (参照日 2023年 10月 18日).
- (21) 四国電力, AIを活用した電力需給計画立案システムの運用開始について, [https://www.yonden.co.jp/press/2022/\\_icsFiles/afiedfile/2022/06/23/pr004.pdf](https://www.yonden.co.jp/press/2022/_icsFiles/afiedfile/2022/06/23/pr004.pdf) (参照日 2023年 10月 18日).
- (22) 小都市(人口10万人未満)における100%再生エネルギーのスマートシティ化を実現する、簡易版スマートグリッド制御システム, 科学技術・学術政策研究所 デルファイ調査, <https://www.nistep.go.jp/research/scisip/delphisearch/start/all/single.php?id=19984> (参照日 2023年 10月 15日).
- (23) 総務省, 情報通信白書, 令和5年度版(令和5年7月), PDF.
- (24) 総務省「Web3時代にむけたメタバース等の利活用に関する研究会」資料(第1回:令和4年8月1日~第11回:令和5年6月14日), PDF, [https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/kenkyu/metaverse/index.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/metaverse/index.html) (参照日 2023年 10月 15日).
- (25) 総務省「Beyond 5Gに刻めた情報通信技術戦略の在り方」中間答申概要, 令和4年6月30日, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000822641.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000822641.pdf) (参照日 2023年 10月 15日).
- (26) 経済産業省, 令和3年度「無人自動運転等の先進MaaS実装加速推進事業(自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実証プロジェクト(テーマ4))」報告書, 委託先, 東京大学, 東海国立大学機構, 産業技術総合研究所, (株)三菱総合研究所, 令和4年3月, [https://www.meti.go.jp/medi\\_lib/report/2021FY/000303.pdf](https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2021FY/000303.pdf). (参照日 2023年 10月 15日).
- (27) 内閣府, SIP 第2期「自動運転(システムとサービスの拡張)」最終報告書, 2022年12月, [https://www.sip-adus.go.jp/file/rd05/rd-result\\_all.pdf](https://www.sip-adus.go.jp/file/rd05/rd-result_all.pdf).
- (28) 内閣府, 官民ITS・構想ロードマップ2021, <https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20210615/roadmap.pdf> (参照日 2023年 10月 15日).
- (29) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 「水素・燃料電池成果報告会2022(燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業)」発表資料, 2022年7月27日, <https://www.nedo.go.jp/content/100950349.pdf> (参照日 2023年 10月 15日).
- (30) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) スマートコミュニティ・エネルギーシステム部, 燃料電池・水素室, 「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」(中間評価)公開資料, 2022年10月, <https://www.nedo.go.jp/content/100952646.pdf> (参照日 2023年 10月 15日).
- (31) 経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ 改訂のポイント」, 平成28年4月15日, [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/nenryodenchi\\_fukyu/pdf/002\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/nenryodenchi_fukyu/pdf/002_01_00.pdf). (参照日 2023年 10月 15日).
- (32) グリーンイノベーション基金事業概要等プロジェクト情報 >CO2等を用いた燃料製造技術開発, NEDO <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/development-fuel-manufacturing-technology-co2/> (参照日 2023年 10月 29日).
- (33) グリーンイノベーション基金事業概要等プロジェクト情報「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」, NEDO, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/building-fuel-ammonia-supply-chain/> (参照日 2023年 10月 29日).

#### 熱工學部門

<フェロー>

小原 拓

◎東北大学 教授

◎専門:機械工学、熱工学、伝熱工学、熱物性学

<正員>

川南 剛

◎明治大学 教授

◎専門:熱工学、伝熱工学、冷凍空調工学

<正員>

藏田 耕作

◎九州大学 教授

◎専門:生体熱工学、生体工学

<正員>

小宮 敦樹

◎東北大学 教授

◎専門:熱工学、伝熱工学、熱物性学

<正員>

津島 将司

◎大阪大学 教授

◎専門:熱流体工学、電気化学エネルギー変換

#### 環境工學部門

<正員>

小野 義広

◎日鉄エンジニアリング(株) 環境・エネルギーセクター企画部 部長

◎専門:衛生工学(廃棄物部門)

#### エンジンシステム部門

<正員>

今村 宰

◎日本大学生産工学部 教授

◎専門:燃焼工学

#### 動力エネルギーシステム部門

<正員>

木戸 和浩

◎(一財)電力中央研究所 エネルギー

トランスフォーメーション研究本部 上席研究員

◎専門:機械工学、燃焼工学、ガス化、プラントシステム

#### 産業・化学機械と安全部門

<フェロー>

谷口 満彦

◎東レエンジニアリング(株)メカトロファインテック事業本部 品質保証室長

◎専門:機械工学、機械装置、機械安全

#### 材料工學部門

<フェロー>

荒井 政大

◎名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻

◎専門:材料力学、計算固体力学、複合材料

#### マイクロ・ナノ工學部門

<フェロー>

中別府 修

◎明治大学理工学部 教授

◎専門:熱工学、マイクロ・ナノ工学、MEMS

#### 技術ロードマップ委員会 委員長

<フェロー>

山崎 美稀

◎(株)日立ハイテク ものづくり・技術統括本部 主管技師

◎専門:環境配慮材料設計・システム設計、製品企画論、技術開発戦略策定

## 社会像 2. 多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会

### はじめに

#### 日本機械学会メンバーが実現させたい 2050 年の社会像の説明

日本機械学会は、2021 年から 2023 年にかけて、メンバーたちが描く理想的な 2050 年の社会像についての議論を展開してきた。ここからは、社会像 2.『多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会』のテーマに焦点を当てていく。このテーマに関しては、日本機械学会内の 22 部門のうち、該当テーマに関連する 7 部門の代表者で構成されたチームが綿密な議論を進めてきた。これらの部門は、交通・物流部門、機械力学・計測制御部門、流体工学部門、機素潤滑設計部門、機械材料・材料加工部門、技術と社会部門、スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門である。各専門領域の深い知見を積極的に取り入れ、新しい技術分野の創出を目指して議論が進行された。

このテーマは、以下の三つの観点から検討されている。

観点①：この未来都市では、人々のつながりや価値観が尊重され、社会的な格差が縮小。都市の境界を越えて人々が繋がり、社会の均衡が生まれている。

観点②：この社会の中心には、革新的な技術が位置づけられている。人々の感情や感覚を共有するシステムや、遠隔での体験共有が一般的となっている。

観点③：革新的な技術は、生活の質の向上はもちろん、医療や創造性の領域でも大きな進展をもたらしている。個人の経験や価値が尊重され、協力的な社会の実現に貢献している。

### 2050 年社会像実現のための課題の抽出

観点①での社会像を実現するための主要課題と関連課題をキーワードやワークショップにより抽出された。アンケート調査を行い、図 2 に示すように、主要な課題と関連課題を明確にした。「共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築」が包括的な課題として特定された。この包括的な課題を解決する技術を特定する過程で、課題は再分解され、表 1 に示すように、4 つに分解された課題と、それぞれの課題の詳細な定義が示された。

#### <主課題> 協創しやすい社会の実現



#### <関連課題>

- ・ヒト同士のつながりの多様性と価値観の共有の促進
- ・地方格差や貧富の格差の低減
- ・ヒトの感覚や心理の選択的なつながりの実現
- ・財の消費から財の提供へ

図 1 主課題と関連課題

表 1 課題「共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築」の分解

分解課題	定義
多様性と共有の促進	ヒト同士のつながりの多様性と価値観の共有を促進することで、社会全体の調和を実現する必要がある。異なるバックグラウンドや文化を持つ人々が交流し、相互理解や共感を深める場を創出することが重要である。
地方格差と貧富の格差の低減	地方格差や貧富の格差を低減することで、社会の均衡を実現する。経済的な機会均等の追求や、地域間の連携・協力を促進することで、地方の発展や貧困の軽減を図ることが必要である。
選択的なつながりと心理的な絆の実現	ヒトの感覚や心理的なつながりを考慮しながら、選択的なつながりや協力関係を促進。個人の好みや興味に基づいて、人々が自発的なつながり、信頼関係や協働を築くことが求められる。
財の提供と共有経済の推進	財の消費から財の提供へのシフトを促進し、共有経済の仕組みを推進する。人々が持つリソースやスキルを共有し、互いに貢献しながら社会的価値を創出することで、持続可能な社会を実現する。

観点②での社会像実現に関する課題も同様に、キーワードやワークショップを通じて抽出された。アンケート調査を行い、図 2 に示すように、主要な課題と関連課題を明確にした。その結果、「高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働」が包括的な課題として特定された。次に、この課題を技術的に分解すると、表 2 に示す二つの具体的な課題が明らかになった。



<主課題>  
**テラーメイド機械構造・環境適応機械構造**

✕  
 <関連課題>

- ・高度情報化・クラウド社会を支えるフレキシブル/ウェアラブル情報機器
- ・設計・保守・運用の人手不足への対応

図2 主課題と関連課題

表2 課題「高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働」の分解

分解課題	定義
フレキシブル/ウェアラブル情報機器の開発	高度情報化・クラウド社会において、個々のニーズに合わせた情報機器の開発が必要である。テラーメイド機構や環境適応機構を活用し、人々が自由に情報を入力・共有・利用できる機器の開発が必要である。
人手不足への対応	設計・保守・運用の分野において、人手不足が深刻化する。テラーメイド機構や環境適応機構を活用して、機械がより効率的に設計や保守・運用を支援することが必要。自動化、ロボット化、AI技術の活用などが期待される。

観点③でも、観点①②と同様に、キーワードやワークショップを通じて課題が抽出された。また、図3に示すように、アンケート調査により主要な課題と関連課題を明確にした。その結果、「革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現」が包括的な課題として特定された。そして、この課題を技術的に分解すると、表3に示す三つの具体的な課題が明らかになった。

<主課題>  
**医療と創造性の効率化**

✕  
 <関連課題>

- ・高齢化社会/健康社会を支える薄膜生体センサ、医療用人工生体膜、高性能人工心臓
- ・音環境・医療・福祉などでパーソナライズされた価値・空間の提供
- ・力学刺激による人間機能の再生・拡張

図3 主課題と関連課題

表3 課題「革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現」の分解

分解課題	定義
パーソナライズされた健康管理と創造性の促進	薄膜生体センサを活用した個々の健康情報の収集と分析により、高齢化社会や健康社会をサポートする。さらに、音環境・医療・福祉などでパーソナライズされた価値と空間の提供により、個人の創造性を促進する。
医療用人工生体膜と力学刺激による再生医療	医療用人工生体膜の活用により、機能低下した組織や臓器の再生を促進する。さらに、力学刺激を利用して人間の機能を再生・拡張し、健康と創造性の両方を促進することが可能になる。

高性能人工心臓と創造的な治療アプローチ	高性能人工心臓技術により、心臓疾患を抱える人々の生活品質向上と創造的な治療アプローチの実現を目指す。安定した血液循環を確保し、創造的な活動を支援する。
---------------------	---

最終的に、『多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会』のテーマに関して、三つの社会像に分けて課題を抽出した。それぞれの社会像における包括的な課題は、「共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築」、「高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働」、「革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現」が得られた。

**課題1. 共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築(図4)**

**多様性と共有の促進**

**データ分析とAIを活用した個人のニーズや関心の理解**

社会全体の調和を実現するためには、人々のつながりの多様性と価値観の共有を進めることが求められる。そのために必要な技術として焦点を当てたいのが「データ分析とAIを活用した個人のニーズや関心の理解」についてである。データ分析とAIの活用による個人の要望や興味の理解は、ビジネスの成功を目指す上での不可欠な要素として認識されている。消費者は独特の要望や興味を持っており、正確な要望や興味の把握により、効率的にリソースを提供することが可能となる。市場の動向に迅速に対応し、変わりゆく消費者の要求を予測することで、競合他社に先駆ける取組みが可能となる。

データ分析とAIを活用した要望や興味の理解を実現するためには、IoTデバイス、モバイルアプリ、ウェブ閲覧、SNSなどからのデータをまず収集することから始める。続いて、統計的手法や機械学習アルゴリズムを用いて、収集データからの有益な情報やパターンを洗い出すためのデータ分析を行う。これらの情報をもとにAIを使用して、個人の将来の要望や興味の予測を行うモデルを作成する。作成された予測モデルを利用して、実際のデータとの照合を行い、モデルの精度を上げるためのフィードバックループを構築する。

2023年現在、さまざまなデータの収集や統合、オープンソースのAIモデルを利用した分析ツールの実装が進行中である。分析の基盤となるデータの確保やデータの相互関係の明確化、そしてオープンソースのAIモデルの選定とトレーニングに関する研究開発が全世界的に進められている。

2025年を展望すると、個人のニーズや関心を対象としたリアルタイムトラッキングシステムの開発と、プライバシーを強化したデータ共有プラットフォームの導入が予定されている<sup>(1)</sup>。個人の行動や動向をリアルタイムで捉え、その情報を

元にしたサービスや提案が可能となることを目指し、研究開発が進行中である<sup>(2)</sup>。これには、リアルタイムデータ収集システムの設計と実装、即時データ解析のためのアルゴリズム開発、システムのテストと最適化が含まれる<sup>(3)</sup>。一方、プライバシー保護に注力したデータ共有プラットフォームの開発は、ユーザの信頼獲得と個人情報の安全確保を主な目的として進行していると予測される<sup>(4)~(6)</sup>。

2030年を展望すると、予測アルゴリズムの精度向上と、多様性を促進するAI推奨システムの拡大が見込まれる<sup>(5)(7)(8)</sup>。予測アルゴリズムの更なる進化は、増加するデータ量と技術の革新を活用し、予測の正確さを向上させることを目的として研究開発が行われる<sup>(9)</sup>。また、AI推奨システムの拡充に関しては、個別のニーズや関心に基づいた多様な提案が可能となるよう研究開発が進行中であると予想される<sup>(10)(11)</sup>。

2050年を展望すると、個人の本質的なニーズや関心を完全に把握し、社会全体での共生的な関係構築が期待される。新しい技術や手法の開発、社会全体のニーズの洗練された分析、および共生的コミュニティの形成とその拡張に焦点を当てた研究が重要なテーマとして前進していくことが予想される。

#### 地方格差と貧富の格差の低減

#### スマート農業やスマート漁業、地域産業の振興を支援する技術の開発

社会の均衡を実現するためには、地方格差や貧富の格差を低減し、経済的な機会均等の追求や、地域間の連携・協力を促進による地方の発展や貧困の軽減を図ることが必要である。そのために必要な技術として焦点を当てたいのが「スマート農業やスマート漁業、地域産業の振興を支援する技術の開発」についてである。

スマート農業や漁業において、センサテクノロジーを活用し、土壌の湿度、温度、養分、pHや海水の温度、潮流などのデータをリアルタイムで収集し、それらの情報に基づく最適水や肥料の供給、また適切な漁場の探索が行われる。ドローンや衛星観測技術を利用して、大規模な農地の監視や作物の健康状態、害虫の侵入を速やかに検出し、また沖合の大規模養殖の安定を図ることが可能になると考えられる。AIや機械学習、自動化技術の導入により、トラクターや収穫機などの農機具の自動運転が実現し、作業効率の向上や、短期・長期の漁場予測、養殖管理の高度化が進む。さらに、これらのデバイスや機械はインターネットを通じて連携し、IoT技術のもと、最適な農業や漁業運営のサポートが期待される<sup>(12)(13)</sup>。

地域産業の振興に必要な技術として、デジタルマーケティングを通じて地域の特産品をオンラインで宣伝し、販売ルートを増やすことが考えられる。eコマースプラットフォームの導入で、地域産品のオンライン販売が推進され、新規市場や顧客にアクセスすることが可能となる。

最新の技術や研究を適用し、地方の農業、漁業、および地域産業に合わせたスマート技術の開発と導入が重要である。カスタマイズされたソリューションを提供する方針が取られる。また、教育や研修を通じて、地方の住民に新しい技術や知識を教え、技術移転を促進する。

スマート農業や漁業技術においては、土壌センサやICTブイ、ドローン、AI、グリーンテクノロジーを活用した病害管理や自動化農機具の導入、さらに適切な漁場予測や漁獲量管理・養殖システム管理が進められる。地域産業の振興に関しては、地域資源を利用して新しいビジネスモデルを開発するとともに、eコマースの導入や地域特産品のブランディングとマーケティング戦略の策定が進む。また、地域のエネルギー自給自足を目指して、再生可能エネルギーやエネルギー効率向上技術の開発が進行している。最終的に、地域の持続可能性を高めるための循環型社会への取り組みや、廃棄物の削減を目指すリサイクル技術の導入が検討される。

2023年現在は、スマート農業や漁業を中心とした地域産業の振興に関する技術開発が進行中である。この背景から、土壌センサ、ドローン、ICTブイ、遠隔自動給餌システムなどの先進技術の実験的な適用が行われ、農業や漁業の生産性向上や収穫量の最適化に寄与することが期待されている。さらに、地域産業の振興策も実施されつつあり、地域特有のリソースを活用した初期段階のビジネスモデルの開発が進行中である。その上で、特産品のブランド化やマーケティング戦略の立案が進められており、地域ブランドの構築と市場の拡大が目指されている。

2025年を展望すると、AIを用いた作物の病害管理や短期漁場予測が導入されることが予想される。これにより、病害や害虫のリスクの軽減や適切な操業計画の策定が実現され、生産性の向上が見込まれる。また、eコマースプラットフォームによる地域産業のオンライン販売が加速され、市場の拡大が期待される。さらに、再生可能エネルギーの試験導入が進められ、地域エネルギーの自給自足の初動が始動すると考えられる。

2030年を展望すると、実用段階に達し、自動化農機具の拡大導入やAIの活用による長期漁場予測、大規模養殖プラントの安定化などが実現すると考えられる。特産品のブランド戦略やマーケティングの高度化も進行中で、地域ブランドの強化と市場の拡大が目指される。

2050年を展望すると、エネルギーにおいては、完全な自給自足が実現し、エネルギー利用の効率が高まることが期待される。地域産業の全体的な高度化と独自性の強化が期待される。

#### 選択的なつながりと心理的な絆の実現

#### 創造性を促進するAIツールやデザイン支援システムの開発

現代の社会において、テクノロジーは私たちの日常や業務に深く根付いている。特に、人々の創造的な思考やデザイ



ンの能力を引き出すツールは、心理的な絆や選択的な関係の構築に貢献している。AI やデザイン支援システムの活用により、個人は自らのアイデアやビジョンを容易に具体化でき、そうした活動が自発的な共創を促す方向へと進展すると期待される。

AI がアイデア実現のサポートを提供することで、自己表現がしやすくなり、他者とのコミュニケーションや共同作業が円滑に進むことが期待される。AI が個人の興味や好みを捉え、適切なツールやサポートを提示することで、選択的な関係の形成や深い協働の機会が増加する。デザイン支援システムの発展とともに、ユーザのアイデアをリアルタイムで視覚化するツールや、共同作業をスムーズに行うプラットフォームが導入される見込みである。

2023年現在、AIとデザインを統合した初の取組みとして、クリエイターのサポートを目的とした基本ツールの提供が進行中である<sup>(14)~(16)</sup>。その後、チーム協力を強化する基本的なコラボレーションツールの実装が進められ、これにより、クリエイターやデザイナーはアイデアをリアルタイムで共有し、フィードバックや変更を容易に行えるようになると見込まれる。

2025年を展望すると、デザイン支援に関する高度なAIモデルの採用が拡大し、その機能もさらに進化・充実すると見込まれている。特に注目されるのは、AI が複雑なクリエイティブタスクのサポートを一般的に行い、リアルタイムのコラボレーションプラットフォームが導入されると考えられる。これにより、クリエイター間の連携や共同作業がさらに円滑になると予測される。

2030年を展望すると、統合デザイン支援システムの実現により、さまざまなツールやリソースを一括で利用できるようになる。さらに、AI が独自のデザインやアイデアを生成する能力を獲得し、クリエイターやアーティストとのシームレスな深い連携が実現されることが期待される。

2050年を展望すると、デザインプロセスがすべて仮想空間で進行するようになることが見込まれる。ユーザは最先端のクリエイティブツールを駆使して、自らのアイデアを制約なく具現化することが可能となると考えられる。この時代の顕著なマイルストーンとしては、AI が人間と同等、あるいはそれを上回るクリエイティブ能力を持つこと、そしてAI が真のクリエイティブパートナーとして位置づけられることが挙げられる。クリエイターは物理的な制約から完全に解放され、究極のクリエイティブ自由を享受できると考えられる。

### 財の提供と共有経済の推進

#### 災害時に対応できる交通・物流技術

社会の均衡を実現するためには、共有経済のメカニズムを強化することを提案する。人々の持つリソースやスキルを共有し、互いに助け合いながら社会的価値を生み出し、持続可能な社会を目指すために、「災害時の交通・物流技術」に焦点を当てていきたい。

2050年までに、数多くの都市や地域が自然災害や環境変化の影響を受けると予想される。災害対応の交通・物流技術は、共有経済の核心部分としての役割を果たし、安全な環境で必要な物資や情報へのアクセスを保証する必要がある。



図4 課題1「共生的なつながりとリソースの共有に基づく社会の構築」のための技術ロードマップ (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

ドローンや自動運転技術を使用することで、被害を受けた地域や困難な場所を避けつつ、空中や最適な地上ルートを利用して物資を迅速に届けることができる。位置情報ネットワークや AI 技術の進展により、災害時の物資ニーズや人の動きを予測し、最も効果的な物流ルートや適切な避難場所・経路を迅速に決定し、自動化・情報提供することが可能となる。また、リアルタイムのコミュニケーションツールを利用することで、被災地と物資供給地点との情報共有や調整を効率的に行い、救援活動を迅速かつ正確にサポートすることが可能である<sup>(17) ~ (19)</sup>。

災害が発生した場合も物資の需要と供給のギャップを最小限にし、最短時間で必要な場所に物資を届ける物流システムを構築すること、そして人々の移動を確保しながら適切なサービスや社会インフラを維持・回復する交通システムを構築することを目指す。

2023年現在において、ドローンを活用した初期配送の実験が実施され、自動運転車の商業化や遠隔操作による無人化施工重機の導入が初期段階を迎えている。また、AI による災害時の迅速な対応や物流ルートの最適化、人流の予測が進展している。この年には、商用ドローンを使用した救援物資の配送テストが成功し、AI 技術を取り入れた初の災害時物資需要予測モデルや災害時の人流予測モデルの実装が期待されている。

2025年の展望として、自動運転車の技術が広く普及し、それを支える通信ネットワークの構築が進行すると予想される。目指すべき地点として、災害時の物資輸送・移動の時間短縮、物流の誤りの低減、帰宅困難者や孤立地域の最小化が挙げられる。この年の大きな成果として、完全に自動化された物資輸送ルートが実現し、さらに AI 技術による物流ハブの最適化や個別の避難情報の提供が期待される。

2030年の展望として、大型ドローン、VTOL、無人化施工重機が商業の現場や大型の工事現場での利用が普及する見込みで、AI 技術と広範囲のセンサネットワークの統合により、物流ハブのリアルタイム管理や災害対応の効率向上が期待される。目標としては、被災地への迅速な対応や継続的な物資供給が掲げられる。大型ドローンや VTOL による迅速な物資輸送、自律的な施工重機の普及、そして自動化された災害対応センターの構築が予想される。

2050年の展望において、全天候型の物流インフラが実現し、災害時の効果的な対応が可能となる体制が築かれることが予想される。最も注目されるマイルストーンとして、全天候型の超高速トランスポートネットワークの完全実用化が挙げられる。AI を核とした災害対応システムが人間との連携を深めることにより、多様な災害状況に対しても十全な物流および交通の対応が実現可能と期待される。

## 課題 2. 高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働(図 5)

### フレキシブル/ウェアラブル情報機器の開発

高度な情報化・クラウド化社会に求められるのは、個別のニーズに応じた情報機器の開発である。テーラーメイド機構や環境適応機構を用いて、人々が情報を自由に取得・共有・利用する機器の開発も必要とされる。

フレキシブル・ウェアラブル情報機器の開発は、個人のニーズに適した情報機器を供給することを目的としており、高度な情報化・クラウド社会への対応が求められる。多様なニーズに応えるため、カスタマイズ可能な情報機器が求められ、健康管理デバイスは、ユーザの健康状態や目標に応じて最適化<sup>(20)</sup> する必要がある。情報の取得や共有の容易さ、すなわちアクセシビリティによって情報の価値が大きく変わる。情報の取得や共有のハードルを低くすることで、情報社会はさらに進展し、生活の質が向上する。また、5G や 6G<sup>(21)</sup> ~ <sup>(23)</sup> を活用することで、リアルタイムの大容量データ転送や低遅延通信が可能になり、新しいサービスが登場する。

真に有用な製品やサービスは、エンドユーザのニーズや使用状況を深く理解することが必要である。情報機器の開発における継続的なイノベーションは、新しい技術や材料、アルゴリズムの導入が要求される<sup>(24) ~ (26)</sup>。

2023年現在では、フレキシブルディスプレイの実用化、バッテリーの小型化と長寿命化<sup>(27)(28)</sup>、さらに初期段階のウェアラブル AI アシスタント<sup>(29) ~ (31)</sup> が注目の技術となっている。マイルストーンとして、最初の商品のローンチと、初期ユーザからのフィードバックの収集が挙げられる。

2025年の展望として、高度なバイオセンサ<sup>(32)</sup> の導入、AI パーソナルアシスタントの更なる進化、そしてエネルギーハーベスティング技術<sup>(33) ~ (35)</sup> が主要技術と見られる。この年の目標は、健康管理や生活支援を主体とするウェアラブル製品の広範囲な普及を促進することが予想される。

2030年の展望では、技術のキーワードとして、量子ドットディスプレイ<sup>(36)</sup>、神経インターフェース<sup>(37)</sup>、セルフヒーリング材料<sup>(38)</sup> などが挙げられる。また、神経インターフェースを利用したウェアラブル商品の市場への導入や、生命体と情報機器の完全な統合を持つ技術の実証が期待される。

2050年の展望として、分子レベルのコンピューティング技術や、体内に完全に組み込むことができるウェアラブルデバイス、そして進化したブレイン・マシン・インターフェース<sup>(39)(40)</sup> が主要な技術トレンドと予想される。先を見越すと、情報機器を人体に移植する技術が確立され、人と機械が一体化する新しいエコシステムが形成されることが期待される。

### テレメディシンや遠隔診療の技術開発

テレメディシンおよび遠隔診療は、遠隔地からの医療サービス提供を可能とする技術であり、病院やクリニックに直接足を運ばずとも適切な医療を受けられる手段となっている。



# 高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働

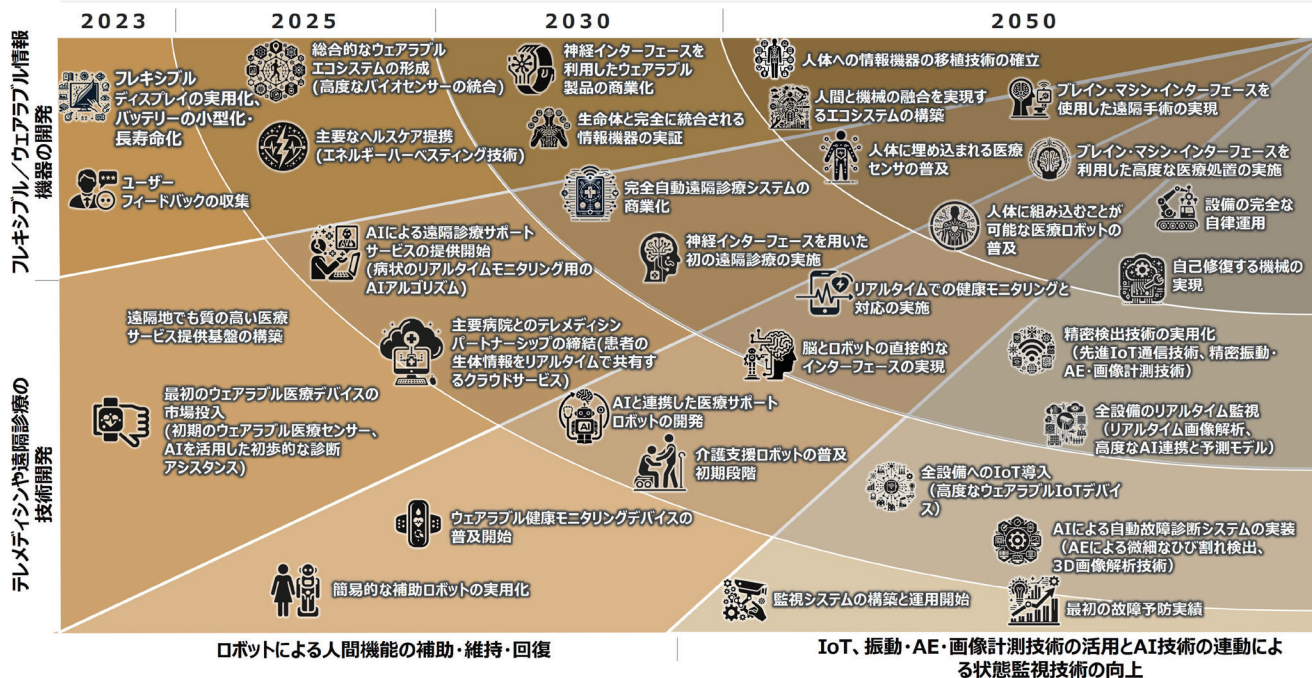


図5 課題1「高度情報化・クラウド社会を支える人間と機械の協働」のための技術ロードマップ  
(図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

高度情報化の時代やクラウドベースの社会においては、地理的・時間的制約が取り除かれ、質の高い医療サービスを平等に受けることが可能となる。特に、高齢化や過疎化が進行する地域や医療資源が限られている地域では、遠隔診療の重要性が増している<sup>(41) (42)</sup>。

高解像度のカメラやセンサを有するウェアラブルデバイスの活用により、リアルタイムでの健康情報の収集や専門家とのコミュニケーションをはじめ、診察の精度向上が期待される。究極の目的は、どこにいても、いつでも質の高い医療サービスを受けられる社会の実現である。

2020年のコロナ禍を背景に、オンライン診療の整備が急ピッチで進み<sup>(43)</sup>、その普及の期待が高まっている。2023年には、高解像度のビデオ通信技術の進展<sup>(44)</sup>やウェアラブル医療センサの初期モデル<sup>(45)</sup>の登場、そしてAIを活用した診断サポート<sup>(46) (47)</sup>が開始されることで、遠隔地でも質の高い医療サービスが提供される基盤<sup>(48)</sup>が築かれると考えられる。

2025年の展望として、ウェアラブル医療センサ技術のさらなる進化や、病状のリアルタイムモニタリングのAIアルゴリズム、医療スタッフとの生体情報共有のためのクラウドサービスの提供が予想される。

2030年の展望では、VR/AR技術の導入<sup>(49)</sup>や神経インターフェースの利用、さらには高度な自動診断AIの登場など、テレメディシンの大きな進化が期待される。この時代には、リアルタイムの病状モニタリングや予防医療の普及、全自動遠隔診療システムの商業化や、神経インターフェースを用いた初の遠隔診療の実施など、医療の大きな変革が予想される。2050年の展望として、分子レベルでの健康モニタリング、

完璧に統合されたブレイン・マシン・インターフェース、そして自動治療を提供するAIシステムの実現が予想される。そして、人体に埋め込まれる医療センサが普及し、ブレイン・マシン・インターフェースを使用した遠隔手術も実現されると期待される。

## 人手不足への対応

### ロボットによる人間機能の補助・維持・回復

ロボットによる人間の機能補助技術は、人の物理的、認知的制約を超えて、高度な業務の効率的遂行をサポートすることを目指している。ロボット技術や最新のAI技術の組み合わせにより、業務の自動化と効率化、そして質の向上が可能となる。最終的には、人とロボット、AIが協力して、質の高いサービスを提供する社会が形成されることを期待している。

2023年現在では、簡易的な補助ロボットの実用化が進行中で、日常の業務の効率化を目指している<sup>(50)</sup>。初期段階のAI技術やウェアラブル技術も同時に開発されており、基本的な健康モニタリングが実現されると予想される。

2025年の展望として、医療分野でのロボット技術やAIの進化が進行中で、特に高齢者や障害を持つ人々の生活支援に注目が集まっている<sup>(51)</sup>。この時期、AIを活用した介護ロボットや医療支援ロボットの開発が進められ、それらの技術の導入が医療現場で進行中と考えられる<sup>(52)</sup>。

2030年の展望として、AR/VR技術の組み合わせによってリハビリテーションの質を一段と向上させることが期待されている。この時期の主要な目標は、身体機能の大幅な補助や代替を実現することである。マイルストーンとしては、脳とロボットの直接的なインターフェースの実現や、リアルタイムで

の健康モニタリングと対応が可能になることが挙げられる。

2050年の展望として、完全なブレイン・マシン・インターフェースや高度なAI技術の導入により、人の身体機能の完全な補助・維持・回復が可能となることを目指している<sup>(53)</sup>。ロボット技術とAIを駆使して完全に自動化された医療システムを構築することが期待される。マイルストーンとしては、人体に組み込むことができる医療ロボットの普及や、ブレイン・マシン・インターフェースを使用した高度な医療処置の実施が期待される。

#### IoT、振動・AE・画像計測技術の活用とAI技術の連動による状態監視技術の向上

状態監視技術は、設備や機械、システムの動作や健康状態をリアルタイムで監視することを目的とし、その進化により、故障や異常の事前検知や、予防的な保守・修理が実現可能となっている。IoTはこの技術進展の中核を担い、センサからのデータの収集・共有を容易に実施している。特に、振動計測は機械の健康状態評価における基盤技術であり、AE(Acoustic Emission)は物質の異常、例えばひび割れや変形の音響的検出に用いられる。また、画像計測技術を採用することで、物体の形状、表面状態、動作などを光学的に評価することが可能となる。これらのセンサデータは非常に大量であり、効果的な解析のためにAI技術の活用が不可欠である。

高度情報化・クラウド社会の進展は、大量データの収集、解析、応答が要求される一方で、特に設計、保守、運用の分野での人手不足はこれらのプロセスの迅速・効果的な実行を阻害している。これに対応するためのキーとなるのは、正確な状態監視と、タイムリーな情報の取得・分析技術である。IoT技術の採用により、振動・AE・画像計測技術は機械やシステムの状態や動作を精密に捉える手段として有効であり、これらの技術の結合によって、異常や変化の迅速な検出が可能となる。

最終的な目標は、IoT、振動・AE・画像計測技術、そしてAI技術の連動による先進的な状態監視技術の確立である。これを実現することで、設備の故障や異常を早期に特定し、迅速な対応措置を講じることができる。その結果として、人手不足の問題を緩和し、効率的かつ安全な運用の実現が期待される。

2023年現在において、技術的展望を考慮すると、IoTデバイスの導入が初めて行われ、基本的な振動やAE計測技術の採用が始まる<sup>(54)</sup>。この時期に、初歩的な画像解析とシンプルなAIモデルを用いたデータ解析が実施されることが期待される。この年の達成目標として、監視システムの構築と運用開始、そして最初の故障予防の成果が挙げられる。

2025年の展望では、先進的なウェアラブル型IoTデバイスが広まり、AE技術を活用した微細なひび割れの検出能力が向上するとされる。さらに、3D画像解析技術の採用と、

中級AIモデルとの統合が進むことが期待される。マイルストーンとして、全設備にIoTが取り入れられ、AIを活用した自動故障診断システムの実装が期待される<sup>(55)</sup>。

2030年の展望では、リアルタイム画像解析の実現や、AI連携と予測モデルの高度化が進むことが期待される。この時期の主な目標は、設備の全面的な健康診断と、完全な自動予防保守の実現であると考えられる。また、精密検出技術の実用化と、全設備のリアルタイム監視がマイルストーンとして挙げられる。

2050年の展望として、IoTのネットワーク技術が最先端に到達し、振動、AE、画像計測技術がナノレベルでの計測が可能とする予想される<sup>(56)</sup>。4D画像解析の導入と、AI技術が自律的段階に進化し、完全に連携することが期待される。そして、自己修復能力を持つ機械の実現と、完全自律運用を達成する設備がマイルストーンとして期待される<sup>(57)</sup>。

### 課題3. 革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現(図6)

#### パーソナライズされた健康管理と創造性の促進

##### パーソナライズされた移動体験

2050年の医療界の進展により、各患者に特化した治療と予防が実現されている。この進展の鍵となるのは「パーソナライズされた健康管理」と「創造性の促進」だ。前者は個人の生活習慣や遺伝的特性を基にしたカスタマイズされた医療、後者は日常の中での創造的活動やアイデアの奨励として表れる。特に、「薄膜生体センサ」<sup>(58)</sup>や「ブレイン・コンピュータ・インターフェイス(BCI)」<sup>(59)</sup>の導入は、高齢化や健康志向社会の支援に役立ち、それぞれの健康情報の収集・分析を通じて、各人のニーズやリスクを基にした医療ケアや健康管理提案が可能になると期待される。

また、「パーソナライズされた移動体験」が新たなステップとして注目されている。ここでの「移動体験」とは、物理的な移動だけでなく、情報やサービスへのアクセス、さらにはリアルとバーチャルの統合サービスを意味する。

高齢化や健康志向の社会では、「音環境、医療、福祉」の分野でのカスタマイズされた価値提供や空間提供が考慮される。音の環境は心の状態を作り出す上で重要で、医療や福祉でも、個々のニーズや特性に合わせたケアがその人の健康や幸福感、そして創造性を高めることが期待される。

2023年現在、基本的な移動履歴収集技術の前面的な導入が期待されている。この技術は、ユーザの移動パターンを詳細に把握するためのアプリケーションやデバイスとして重要視される。初期段階のARナビゲーションシステム<sup>(60)</sup>の導入により、現実の風景にシンプルな情報をオーバーレイ表示することが可能となると考えられる。この年における主要なマイルストーンとしては、パーソナライズされた移動アプリのリリースやARナビゲーションの実装および普及が予想される。



# 革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現

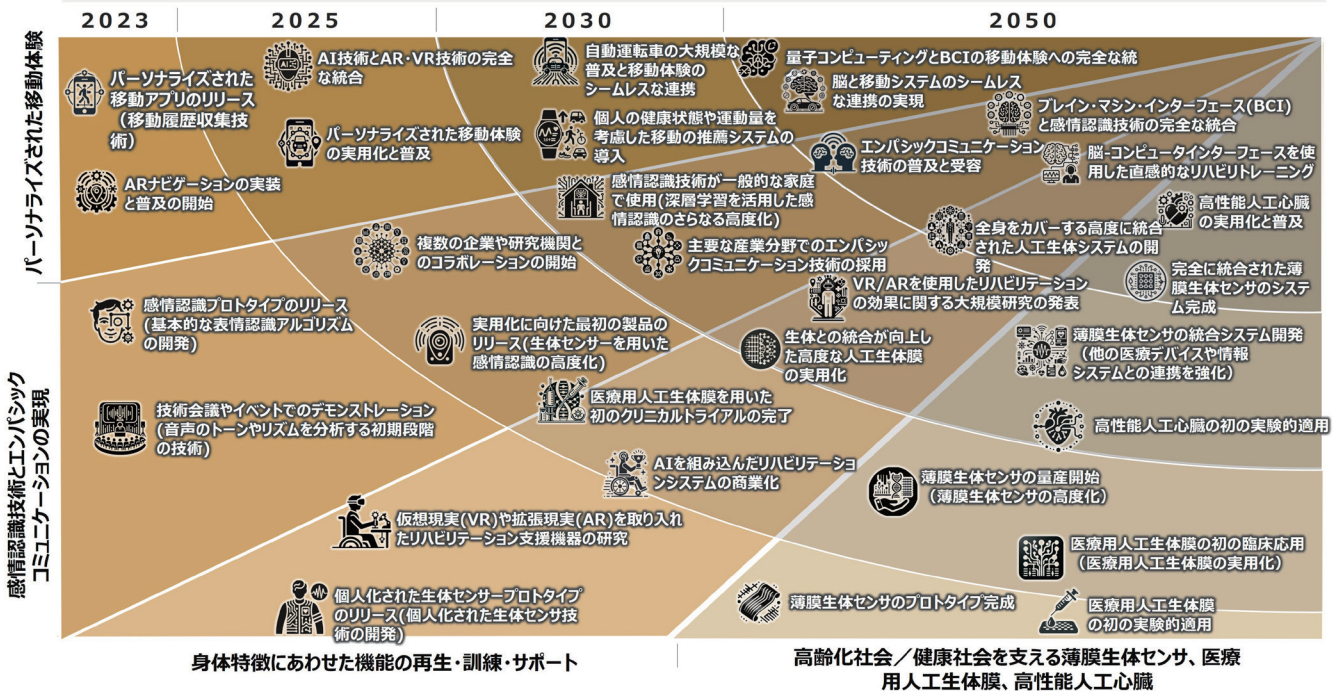


図 6 課題 3 「革新的な技術による医療と創造性の効率化の実現」のための技術ロードマップ (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

2025 年の展望として、ユーザの移動パターンを元に、AI による最適ルート提案システムの実現が期待される。さらに、AR・VR 技術が顕著に進化し、ユーザには詳細な情報のオーバーレイ<sup>(61)</sup>や、仮想空間での体験が提供される見込みである。これらの技術を利用した目標として、日常の移動をさらに最適化し、時間やエネルギーの削減が挙げられる。マイルストーンとしては、AI と AR・VR 技術の完全統合、そしてパーソナライズされた移動体験の普及が進むことが予想される。

2030 年の展望では、自動運転車のシームレスな連携が実現<sup>(62)</sup>することにより、移動中の健康管理や運動量の計測など、パーソナライズされたヘルスケアの統合が可能となる見込みである。マイルストーンとして、自動運転車の大規模普及や、健康や運動量を考慮した移動推薦システムの導入が期待される。

2050 年の展望として、量子コンピューティングを用いた移動最適化<sup>(63)</sup>や、BCI<sup>(64)</sup>を活用した移動体験の直感的制御など、革新的な技術の出現が予想される。これらの技術は、ゼロ待機時間やゼロストレスの移動体験の実現を目指し、高い QoL をもたらすとされる。この時代の重要なマイルストーンとして、量子コンピューティングと BCI を完全に統合した移動体験や、人間の脳と移動システムとのシームレスな連携<sup>(65)</sup>の実現が予想される。

## 感情認識技術とエンパシフィックコミュニケーションの実現

感情認識技術は、人の表情<sup>(66)</sup>、声の調子<sup>(67)</sup>、生体情報などを基に、その人の感情を正確に捉えることを目指す技

術である。この技術が進化することで、個々の感情や気持ちをより深く理解し、適切に反応することが期待される。一方、エンパシフィックコミュニケーション<sup>(68)</sup>は、他者の感情や視点を深く共感し、それを基にした豊かなコミュニケーションを追求する考え方である。

高齢化が進展し、健康に対する関心が高まる現代社会において、各人が抱えるさまざまなニーズや感情に応えることは不可欠である。薄膜生体センサを介して取得される健康情報や生活環境データ<sup>(69)</sup>を活用し、感情認識技術でその人の精神的状態を詳細に把握する。そして、エンパシフィックコミュニケーションを基に、個々のニーズに合わせた医療、福祉、生活環境の最適化などのパーソナライズされたサポートを実現する。

2023 年現在、基本的な表情認識アルゴリズムの開発が進行中であり、音声のトーンやリズムの分析も初期段階に導入される見込みである。この年の目指すところは、喜びや悲しみ、怒り、驚きといった基本的な感情を 70% 以上の正確さで認識することである。この目標達成を目指し、初の感情認識のプロトタイプが公開され、主要な技術会議やイベントでのデモンストレーション<sup>(70)</sup>が予定されている。

2025 年の展望では、生体センサの導入と共に感情認識技術がさらに進化し、AI の力で感情の微細な変動を捉え、エンパシフィックコミュニケーションの基本的な方法が取り入れられる見込みである。この年の目標は、85% の正確さで感情の変動を捉え、エンドユーザとのエンパシフィックコミュニケーションを初めて実現することである。そして、多くの企業や研究

機関との共同作業が始まり、実用段階への最初の製品のリリースが予定されている。

2030年の展望として、感情認識技術は深層学習の活用でさらなる進化<sup>(67)</sup>を遂げることが予見される。また、バーチャルリアリティやオーグメンテッドリアリティを駆使したエンパシクコミュニケーションも強化される見込みである。感情認識技術は一般の家庭での使用にも適応し、主要な産業におけるエンパシクコミュニケーション技術の導入と実用化が進むことが期待される。

2050年の展望では、先進的なBCIを使用した直感的な感情認識とコミュニケーション<sup>(71)</sup>が実現されると考えられる。この年の究極の目標は、人間と技術の間のコミュニケーションのギャップを完全に埋め、すべてのコミュニケーションがエンパシクで深い意味を持つものとなることである。この壮大な目標を達成するための重要なステップとして、BCIと感情認識技術の完全な統合が実現され、エンパシクコミュニケーションの理念が世界中で広がり、多くの人々に受け入れられることが期待される。

医療用人工生体膜と力学刺激による再生医療医療用人工生体膜の導入は、機能が低下した組織や臓器の再生を期待して行われる。さらに、力学刺激を活用し、人間の機能の再生・拡張を実現し、健康と創造性を同時に促進することが求められている。

#### 身体特徴にあわせた機能の再生・訓練・サポート

身体特徴に合わせた機能の再生・訓練・サポートに向けて、2050年までの革新的な技術展開と医療の効率化が進められ、機能が低下した組織や臓器の再生において、医療用人工生体膜と力学刺激の重要性が増してくることが期待される。身体の訓練やサポートの分野では、身体能力の向上を目的とした適切な力学刺激の導入が必要とされている。「身体特徴に合わせた機能の再生・訓練・サポート」の実現のためには、個別の患者の具体的な状況やニーズに応じたカスタマイズされた治療やトレーニングが求められる。健康な身体は、プレゼンティーズムの軽減とともに、パフォーマンスの向上に貢献すると報告されている<sup>(72)</sup>。

機能が低下した組織や臓器の再生において、医療用人工生体膜の利用は不可欠である。損傷した肝臓や腎臓の機能をサポートまたは代替するために、この技術の導入が検討されている。さらに、力学刺激により、筋肉や骨などの組織の機能の再生や拡張が可能となり、骨折や筋肉の損傷の際には、治療期間の短縮や効果的なリハビリテーションが期待される。

2023年現在、個々の身体特性や健康状態に応じた最適な治療やリハビリテーションプランの必要性が増している<sup>(73)</sup>。その対応として、個別化された生体センサ技術や生体膜を模倣したバイオチップの研究と開発が進められている<sup>(74)</sup>。また、VRやARを取り入れたリハビリテーション支援機器も研

究されている<sup>(75)</sup>。

2025年の展望として、医療用の人工生体膜技術が新しいフェーズに突入り、実用化に向けた実験が行われることが期待される。同時に、AIを用いた力学刺激の最適化や個別化が進展し、機能の低下やダメージを受けた組織や臓器の再生が効果的に行われることが予想される。

2030年の展望では、生体との一体化を追求した高度な人工生体膜の実用化が進展し、これを活用した再生医療の導入が拡大、その効果が確認されることが期待される。さらに、VRやARの普及が進み、個々のニーズに応じたトレーニングのプランが策定されることが予想される。

2050年の展望としては、全身を対象とした高度な人工生体システムの研究が進められると予想される。この中で、脳-コンピュータインターフェースを活用した直感的なリハビリやトレーニングも実現されることが期待される。これらの革新的な技術導入により、人間と技術の境界はほぼなくなり、リハビリやトレーニングの効果や効率が大きく向上することが見込まれる。そして、この年には、人工生体システムを全身に適用する実験が成功し、脳-コンピュータインターフェースが新たなリハビリテーションやトレーニングの標準として確立され、一般的に認知されると期待される。

#### 高性能人工心臓と創造的な治療アプローチ

#### 高齢化社会／健康社会を支える薄膜生体センサ、医療用人工生体膜、高性能人工心臓

2050年には、先進的な医療技術の時代が到来することが予見されている。その中心技術として、体内埋め込み型のヘルスケアデバイスや高性能人工臓器を用いた治療法が挙げられる。

社会が高齢化する中で、心臓疾患やその他の健康問題を抱える高齢者の増加が見込まれる。それ以外にも健康に不安を抱える若者を含め、全体の健康や生活の質の維持・向上は、社会の持続性や活力を確保するために不可欠である。

「薄膜生体センサ」、「医療用人工生体膜」、および「高性能人工心臓」の技術はこの問題の解決策として注目されている。「薄膜生体センサ」は、リアルタイムでの健康状態のモニタリングを可能にし、異常時の迅速な対応をサポートする。「医療用人工生体膜」は、機能不全の組織や臓器の再生を補助し、その性能を高める。「高性能人工心臓」は、自然な心臓と同等、またはそれを超える性能を持ち、継続的な血液の循環を確保し、患者の活動範囲を拡大することを目指している。

これらの技術の組み合わせによって、疾患を持つすべての人々に、高い生活品質と創造的な活動の機会を提供することが2050年に目指す健康な社会の理想として期待される。

2023年現在は、薄膜生体センサ技術が初期段階に至り、リアルタイムで基本的な生体情報を取得する埋込型・装着型デバイスが多数開発されている<sup>(76)</sup>。この技術の進展によ



り、常時の健康状態監視や早期の健康問題の迅速な検出が可能となると予想される。一方、補助人工心臓の臨床試も進行中である<sup>(77)</sup>。

2025年の展望では、医療用の人工生体膜に関する基礎研究が進行中であり、基本機能を備えた試作品の開発が始まると予想される。このセンサは、複数の指標を同時に測定する能力を有すると考えられる。同時期に、医療用の人工生体膜技術が実用化の方向へ進むことと、それを実際の医療現場で使用することが期待される。その主な目的は、疾患の早期発見と予防のための情報提供の充実である。また、マイルストーンとして、薄膜生体センサの量産と医療用人工生体膜の初の臨床応用が開始されると見込まれる。

2030年の展望では、薄膜生体センサ技術がさらに進化し、統合型システムの開発が予見される。これにより、他の医療デバイスや情報システムとの連携が強化される見込みである。医療用の人工生体膜も、大規模な臨床応用が進展すると考えられる。さらに、補助人工心臓の臨床データ蓄積と高性能人工心臓のプロトタイプ開発が進行していると予想される。この時期の主要な目標は、個人の健康管理を集約する統合プラットフォームの構築である。また、マイルストーンとして、薄膜生体センサの全国展開や高性能人工心臓の初の実験的応用が期待される。

2050年の展望では、完全統合型の薄膜生体センサシステムの完成が予想される。医療用の人工生体膜もさらに高機能化が進み、全面導入が期待される。高性能人工心臓の技術も実用段階に入り、普及が進行すると見込まれる。この時期の主要な目標は、高齢化社会を支援し、高度な医療ケアを実現することである。そして、マイルストーンとして、全国的な健康管理ネットワークの構築や高性能人工心臓の大規模な臨床応用、および成功事例の報告が期待される。

## おわりに

### 「多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会」の実現の技術ロードマップ

本稿では、多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域を目指す社会の構築をテーマに掲げ、その実現に向けた議論を展開した。このテーマに資する多様な部門の専門家による綿密な協議がワークショップ形式で行われ、2050年に向けて実現すべき理想的な社会像および必要な技術ロードマップが策定された。実現に向けての具体的方策を探るために、異なる分野の知見が統合され、新たな技術領域の創出が図られた。社会像に照らし合わせた望ましい将来を三つの主要カテゴリーに分類し、それに伴う包括的な課題をさらに深掘りして詳細化した。その上で、本会メンバーによる主導的な技術開発の方向性を特定し、12の技術領域にわたる具体的な議論を進行した。これらの技術項目に対し、2023年を起点として、2025年の短期目標

から、2030年および2050年の中期展望に至るまでの技術進化に関する見通しを描き、達成への目標とマイルストーンを具体化した。本取組みが、持続可能な社会を目指す一助となることを願っている。

#### 参考文献

- (1) データ戦略の推進状況 (digital.go.jp), デジタル庁, [https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic\\_page/field\\_ref\\_resources/b565c818-75f4-4990-9125-dd43af8362ba/afe23c36/20220906\\_meeting\\_data\\_strategy\\_outline\\_01.pdf](https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/b565c818-75f4-4990-9125-dd43af8362ba/afe23c36/20220906_meeting_data_strategy_outline_01.pdf), 2023年10月9日
- (2) 昨今の顧客体験から見る、小売業の課題と今後の展望: 富士通 (fujitsu.com), 富士通, <https://www.fujitsu.com/jp/solutions/industry/retail/feature/articles/article-202203-03/>, 2023年10月9日
- (3) 時系列ビッグデータのためのリアルタイム AI 技術 (JST 新技術説明会), 日本科学技術振興機構, [https://shingi.jst.go.jp/pdf/2021/2021\\_mirai\\_10.pdf](https://shingi.jst.go.jp/pdf/2021/2021_mirai_10.pdf), 2023年10月9日
- (4) GDPR (General Data Protection Regulation: 一般データ保護規則), 個人情報保護委員会, <https://www.ppc.go.jp/enforcement/infoprovision/EU/>, 2023年10月9日
- (5) California Consumer Privacy Act, State of California Department of Justice, <https://www.oag.ca.gov/privacy/ccpa> 2023年10月9日
- (6) 次世代のデータ共有を可能にするプライバシー強化技術, デロイトトーマツグループ, <https://www2.deloitte.com/jp/ja/pages/deloitte-analytics/articles/privacy-enhancing-technologies.html> 2023年10月9日
- (7) AI 戦略 2022 の概要, 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局, [https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aistrategy2022\\_gaiyo.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aistrategy2022_gaiyo.pdf) 2023年10月9日
- (8) AI Index Report 2023 - Artificial Intelligence Index, Stanford University, <https://aiindex.stanford.edu/report/> 令和2年情報通信白書, 総務省, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd141100.html> 2023年10月9日
- (9) 大川 佳寛, 小林 健一, "データ変化に対する教師なし適応技術に関する最新研究動向とその考察", The 36th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2022
- (10) 「令和の日本型学校教育」の構築を目指して, 中央教育審議会, [https://www.mext.go.jp/content/20210428\\_mxt\\_kyoiku01-00014639\\_10.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20210428_mxt_kyoiku01-00014639_10.pdf) 2023年10月9日
- (11) 人工知能研究の新潮流～日本の勝ち筋～, 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/RR/CRDS-FY2021-RR-01.pdf> 2023年10月9日
- (12) スマート農業をめぐる情勢について, 農林水産省 <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-120.pdf> (参照日 2023年10月2日)
- (13) スマート水産業の展開について, 水産庁 <https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/smart/attach/pdf/index-9.pdf> (参照日 2023年10月2日)
- (14) 内閣府 HP, ムーンショット目標 3: 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現 (2020) <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub3.html> (参照日 2023年10月13日)
- (15) Baldwin, E., "How Artificial Intelligence Will Shape Design by 2050", Published on 28 Sep 2021, ArchDaily. <<https://www.archdaily.com/937523/how-artificial-intelligence-will-shape-design-by-2050>> ISSN 0719-8884 (参照日 2023年10月13日)
- (16) Sarker, I.H., "AI-Based Modeling: Techniques, Applications and Research Issues Towards Automation, Intelligent and Smart Systems", SN Computer Science, 3, Article number:158 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x>
- (17) 無人化施工の課題と今後の方向性について, 国土交通省 <https://www.mlit.go.jp/common/000987457.pdf> (参照日 2023年10月2日)
- (18) 今後の災害・物流ネットワークについて, 国土交通省 <https://www.mlit.go.jp/common/001214462.pdf> (参照日 2023年10月2日)
- (19) グリーン社会の実現に向けた国土交通分野における環境関連施策・プロジェクトについて (検討イメージ例: 持続可能な交通・物流サービス関係), 国土交通省 <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001400953.pdf> (参照日 2023年10月2日)
- (20) 段暁楠, 河井伸子, 山崎由利亜, 小野年弘, 正木治恵, 高齢者ケアにおけるセンサーとIoT機器の使用に関する文献検討 - 日本語, 英語, 中国語のデータベースを用いて -, 日本看護科学会誌, Vol. 43 (2023), pp. 28-37.
- (21) Beyond 5G (6G) に向けた技術戦略の推進, 総務省 [https://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/B5G\\_sokushin/index.html](https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/B5G_sokushin/index.html) (参照日 2023年10月10日)
- (22) Beyond 5G 研究開発促進事業研究開発方針 (令和4年6月), 総務省 [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000827283.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000827283.pdf)
- (23) 須山聡, 5Gの高度化と6G, 日本機械学会誌, 125巻, 1246号(2022), pp. 10-13.
- (24) 藤掛英夫, フレキシブルディスプレイの基礎, 映像情報メディア学会誌, Vol. 67, No. 12 (2013), pp. 1048-1053.
- (25) 竹井邦晴, ウェアラブル・フレキシブル健康管理デバイス, 応用物理, 第84巻, 第11号(2015), pp. 1002-1007.
- (26) 吉田学, 医療用ウェアラブルデバイスと印刷技術, 日本印刷学会誌, 第58巻, 第2号(2021), pp. 52-56.
- (27) 薄形フレキシブル電池 (Air Patch Battery), マクセル(株) [https://biz.maxell.com/ja/primary\\_batteries/air\\_patch\\_battery.html](https://biz.maxell.com/ja/primary_batteries/air_patch_battery.html) (参照日 2023年10月10日)
- (28) フレキシブルエネルギーデバイスコンソーシアム, AIST (国立研究開発法人 産業技術総合研究所) エネルギー・環境領域研究企画室 <https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/FDEC/index.html> (参照日 2023年10月10日)
- (29) NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構), 人工知能技術適用によるスマート社会の実現紹介ハンドブック(2022年度版), 第2章 健康・医療・介護分野, pp.36-58.

(30) 総務省 次世代人工知能推進戦略「新たな情報通信技術戦略の在り方」第2次中間答申(別冊2), 第4章 分野別の推進方策, 第2節 次世代人工知能分野の推進方策, III-2(1) 医療・ヘルスケア分野, pp.58-60.

(31) 総務省 次世代人工知能推進戦略「新たな情報通信技術戦略の在り方」第2次中間答申(別冊2), 第4章 分野別の推進方策, 第2節 次世代人工知能分野の推進方策, IV-2(3) 次世代人工知能技術の研究開発ロードマップ, pp.102-105.

(32) 生物機能を利用したデバイス分野の技術戦略策定に向けて, NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)技術戦略研究センター, TSC Foresight, Vol.23 (2017).

(33) 竹内敬治, エネルギーハーベスティングで実現する Society 5.0, 計測と制御, 58巻, 9号(2019), pp.703-706.

(34) 秋永広幸, エネルギーハーベスティング技術の新展開, 応用物理, 89巻, 6号(2020), pp.321-327.

(35) 竹内敬治, エネルギーハーベスティング技術の現状と将来, 精密工学会誌, 88巻, 11号(2022), pp.805-808.

(36) 次世代高効率ディスプレイ向け Cd フリー量子ドットで RGB 画素のパターニングに成功, NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構), ニュースリリース 2022年12月12日 [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101599.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101599.html)(参照日 2023年10月10日)

(37) 「埋込サイボーグ技術の社会実装に係る技術・社会的課題および社会システムに及ぼす影響に関する調査研究」調査報告書(令和3年7月), JST(国立研究開発法人 科学技術振興機構)ムーンショット型研究開発事業新たな目標検討のためのビジョン策定, 埋込サイボーグ技術社会実装検討チーム. <https://doi.org/10.52926/JPJMJS20M1>

(38) 新谷紀雄, 自己修復材料の研究開発の現状と今後期待される展開, 表面技術, Vol.65, No.10 (2014), pp.464-469.

(39) 科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ「ブレイン・マシーン・インターフェース(BMI)」分野報告書, JST(国立研究開発法人 科学技術振興機構)研究開発戦略センター (2007) <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2006/WR/CRDS-FY2006-WR-15.pdf>

(40) 長谷川良平, ブレイン・マシーン・インターフェースの現状と将来, 電子情報通信学会誌, Vol.91, No.12 (2008), pp.1066-1075.

(41) 高橋毅, 多対多対応型モバイルテレメディスン遠隔医療システムの開発と実用化, ICT イノベーションフォーラム 2013, 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)予稿集 B-16. [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000256448.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000256448.pdf)

(42) 遠隔医療のさらなる活用について, 厚生労働省(2022)<https://www.mhlw.go.jp/content/12601000/000918554.pdf>

(43) 行形 毅, コロナ禍における遠隔医療(オンライン診療)(<特集>with コロナにおける新たな生活様式を支える技術), 日本機械学会誌, 125巻, 1244号(2022), pp.26-29.

(44) 増野淳, 留場宏道, 5Gを活用した超高精細 8K 映像伝送に関する実証試験, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, No.49 (2019), pp.18-24.

(45) 田村俊世, ウェアラブルセンサ, 非接触センサの医療応用, 医工学, Vol.90, No.1 (2020), pp.11-23.

(46) 竹村昌敏, 今泉英明, 次世代医療としての遠隔医療と人工知能, 情報処理, Vol.59, No.7 (2018), pp.592-595.

(47) 富士フィルム(株), 医療 AI <https://www.fujifilm.com/jp/ja/healthcare/medical-ai> (参照日 2023年10月10日)

(48) オンライン診療その他の遠隔医療に関する事例集, 厚生労働省 医政局総務課(令和5年8月) <https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/001140242.pdf>

(49) 杉本真樹, XR (Extended reality: VR・AR・MR) とテレプレゼンスによる遠隔医療・手術ナビゲーション・ロボット支援手術, 日本コンピュータ外科学会誌, 22巻, 3号(2020), pp.159-163.

(50) 理化学研究所プレスリリース [https://www.riken.jp/press/2022/20220215\\_2/index.html](https://www.riken.jp/press/2022/20220215_2/index.html) (参照日 2023年10月9日)

(51) 経済産業省資料 [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050\\_keizai/pdf/003\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050_keizai/pdf/003_03_00.pdf)(参照日 2023年10月9日)

(52) 尾崎丈夫, 高齢者生活支援ロボットの現状, 日老医誌, Vol.57 (2020), pp.224-235.

(53) 平田雅之, 体内埋込型ブレイン・マシーン・インターフェース, 神経治療, Vol.33, No.3(2016), pp.399-404.

(54) NEDO ホームページ <https://wakasapo.nedo.go.jp/seeds/seeds-0221/>(参照日 2023年10月9日)

(55) 齋藤彰, AIの進化は故障解析に何をもちらすか〜その期待とリスク〜, REAJ 誌 Vol.40, No.2 (2018), pp.64-71.

(56) 三和田靖彦, X線 CTによる形状計測とボリュームモデリングの現状と課題, 精密工学会誌, Vol.82, No.6 (2016), pp.497-501.

(57) 新谷紀雄, 自己修復材料の研究開発の現状と期待される展開, 表面技術, Vol.65, No.10(2014), pp.464-469

(58) 武岡真司, 鉄祐磨, 山岸健人, 有機材料(薄膜型生体デバイス), 人工臓器, 46-3(2017), pp.173-175

(59) 田中聡久, 東広志, 非侵襲生体信号の処理と解析 - II - ブレイン・コンピューティング・インターフェース, システム / 制御 / 情報, 62-4(2018), pp.159-165

(60) 廣瀬智博, 山崎理, 伊藤宏平, 高橋克彦, 市原直彦, ARと画像認識を搭載したナビゲーションシステムの開発, PIONEER R&D, 21-1(2012), pp.1-10

(61) 柳澤琢磨, 朝矢修己, レーザープロジェクターによる拡張現実型ヘッドアップディスプレイ, 光学, 43-10(2014), pp.464-468

(62) 究極の AR ディスプレイ 未来のウィンドウを拓ける光学技術, [http://ex-press.jp/wp-content/uploads/2018/09/p14-17\\_ft\\_ar\\_vr\\_displays.pdf](http://ex-press.jp/wp-content/uploads/2018/09/p14-17_ft_ar_vr_displays.pdf) (参照日 2023年10月1日)

(63) 増田健一, 露峰祐衣, 北田智之, 八川剛志, 羽賀剛, 量子コンピューティングによる配送計画の最適化, 住友電工テクニカルレビュー, 202(2023), pp.91-94

(64) Brent J. Lance, et al., Brain-computer interface technology in the coming decades, Proceedings of the IEEE, Vol.100(2012), pp.1585-1599

(65) 内閣府, 量子未来社会ビジョン(案), <https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/11kai/siryoz2.pdf>(参照日 2023年10月17日)

(66) 沼田崇志, 朝康博, 対話エージェントにおける VR, 知識と情報, 33-3(2021), pp.82-88.

(67) 安藤厚志, 音声感情認識の技術動向 - 深層学習に基づく手法とその最新研究 -, 日本音響学会誌, 79-1(2023), pp.72-79

(68) 片岡仁美, 共感と医療について(エンパシースケールを中心に), 日本内科学会雑誌, 101-7(2010), pp.1103-1107.

(69) 四反田功, 辻村静也, 体液から発電可能な自己駆動型バイオセンサの開発とヘルスモニタリングへの応用, 表面技術, 74-1(2023), pp.38-42

(70) 阿久津聡, 勝村史昭, 徳永麻子, 後藤恵美, 木村誠, コロナ禍で加速したテレワーク時代の共感マネジメント・コミュニケーションモデルの提案と実践手法の検討, マーケティングジャーナル 41-1(2021), pp.54-67.

(71) 生駒響, 竹内勇剛, テレプレゼンスロボットの行動による遠隔地間での共同注意の生成, HAIシンポジウム 2023, G-9.

(72) 平成 27 年度健康寿命延伸産業創出推進事業健康経営に貢献するオフィス環境の調査事業『健康経営オフィスレポート』, 経済産業省, [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/healthcare/downloadfiles/kenkoieiooffice\\_report.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/healthcare/downloadfiles/kenkoieiooffice_report.pdf) (参照日 2023年9月30日)

(73) NECヘルスケア・ライフサイエンス ホワイトペーパー, NEC, <https://jpn.nec.com/safercities/healthcare/wp/dl/LifeScience.pdf> (参照日 2023年9月30日)

(74) 再生医療・遺伝子治療の産業化に向けた経済産業省の取組について, 経済産業省, [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/saisei\\_saibou\\_idensi/dai4/siryoz1-2.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/saisei_saibou_idensi/dai4/siryoz1-2.pdf) (参照日 2023年9月30日)

(75) 安田和弘, 岩田浩康, 没入型 VRによるリハビリテーション支援:特性と臨床応用, 日本ロボット学会誌, Vol.41, No.4 (2023), pp.33-37.

(76) 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST) 研究開発戦略センター (CRDS), 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2023年) 2.2.3 バイオセンシング, pp.170-180.

(77) 志賀 卓弥, 齋藤 浩二, 補助人工心臓の現状と今後の展開, 日本集中治療医学会雑誌, Vol.27 (2020), pp.177-183.

交通・物流部門

<正員>

林 憲孝

◎(株)SUBARU 技術本部 主査

◎専門:機械工学、自動車工学

機械力学・計測制御部門

<正員>

佐々木 卓実

◎北九州市立大学 国際環境工学部 准教授

◎専門:機械力学、振動工学、除振、ダンピング

<正員>

丸山 真一

◎群馬大学 理工学府 教授

◎専門:機械力学、機械振動、非線形振動、連続体振動

流体工学部門

<フェロー>

亀田 正治

◎東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻 教授

◎専門:流体工学、混相流、高速流、流体計測

機素潤滑設計部門

<正員>

板垣 貴喜

◎木更津工業高等専門学校 機械工学科 教授

◎専門:機械要素の振動、騒音、トライボロジー

機械材料・材料加工部門

<正員>

荒尾 与史彦

◎早稲田大学 准教授

◎専門:複合材料、ナノ材料

技術と社会部門

<フェロー>

筒井 壽博

◎引削商船高等専門学校 商船学科 教授

◎専門:流体機械工学、システムデザイン、技術教育

スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門

<正員>

倉元 昭季

◎東京工業大学 工学院 システム制御系 助教

◎専門:生体工学、人間工学、自動運転

技術ロードマップ委員会 委員長

<フェロー>

山崎美希

◎(株)日立ハイテク ものづくり・技術統括本部 主管技師

◎専門:環境配慮材料設計・システム設計、製品企画論、技術開発戦略策定



# 社会像 3. リアルとバーチャルの調和に基づく 個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会

## はじめに

### 日本機械学会メンバーが 2050 年実現させたい社会像の説明

前述の通り、日本機械学会は、2021 年から 2023 年にかけて、メンバーたちが描く三つの理想的な 2050 年の社会像に関する議論を深化してきた。本稿で解説する社会像 3『リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会』に関しては、日本機械学会内の 22 部門から、該当する 8 部門の代表者が参加して精密な議論を進行してきた。これらの部門は、ロボティクス・メカトロニクス、生産加工・工作機械、情報・知能・精密機器、設計工学・システム、計算力学、生産システム、バイオエンジニアリング、および宇宙工学であり、それぞれが独自の専門知識を活かしながら新しい技術領域の開拓を進めてきた。

本テーマは以下の三つの観点から考察されている。

**観点①**：この社会は、リアルとバーチャルが共存しており、対面や移動の重要性が保たれつつ、バーチャル空間での活動も拡大している。デジタルツインや先端のハードウェア技術が、多様な体験や表現方法を拡充している。

**観点②**：多様性と個人の尊重が社会の中心にあり、多様なバックグラウンドを持つ人々が共存する環境で、情報の共有やプライバシー保護も確実に実施されている。

**観点③**：労働は楽しみながら行われるという基盤があり、競争があってもそれが人々のモチベーションとなり、楽しみを求める文化が確立している。休息を取る文化、例えばサバティカルも導入され、生活全体でのバランスが重視されている。

以上の観点から、リアルとバーチャルの調和に基づいた個人と社会の融合が、私たちの生活や社会に多大な影響を与える可能性があると言える。

## 2050 年社会像実現のための課題の抽出

**観点①**では、社会像を具現化するための課題が関連キーワードとワークショップの結果に基づいて抽出された。初めに明らかになった課題は規模と範囲が多様であったが、アンケート調査により「バーチャル空間とリアル空間のシームレスな統合」が主要な課題として特定された。この課題を中心に図 1 に示す関連課題が整理され、統合された。その結果、包括的な課題として「次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新」が明らかになった。この包括的な課題を解決する技術を特定する過程で、

課題は再分解され、表 1 に示すように、4 つに分解された課題と、それぞれの課題の詳細な定義が示された。

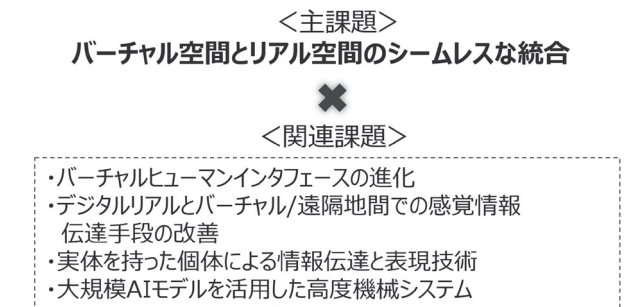


図 1 主課題と関連課題

表 1 課題 1「次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新」の分解

分解課題	定義
バーチャル空間とリアル空間のシームレスな統合	リアル空間とバーチャル空間の間で自然なインタラクションが可能な人間インタフェースの開発である。また、ユーザーがバーチャル空間内で直感的に操作できるような新しいインタフェース技術の研究である。
デジタルリアルとバーチャル / 遠隔地間での感覚情報伝達手段の改善	バーチャル空間とリアル空間の間での感覚情報（視覚、音、触覚など）の高度な同期と伝達技術が向上する。また、リアルタイムに遠隔地の情報をバーチャル空間に伝え、ユーザーにリアルな体験を提供する手段の研究である。
実体を持った個体による情報伝達と表現技術	リアルなロボットやエージェントを活用して、バーチャル空間内の情報をリアル空間に反映させる技術の開発である。また、実体を持った個体がバーチャル空間とリアル空間の情報伝達や相互作用に活用される方法の研究である。
大規模 AI モデルを活用した高度機械システム	デジタルツインの精度向上に AI 技術を活用し、高度な機械システムの予測・制御をリアルタイムで実現するための大規模 AI モデルの研究開発。バーチャル空間とリアル空間のデータの連携とリアルタイム性を向上させる AI 技術の進化である。

**観点②**でも、社会像を実現する課題がキーワードとワークショップ結果に基づき抽出された。観点①と同様に、課題規模の統一のためアンケートが実施され、図 2 に示す主課題と関連課題が区別された。これにより、「デジタルを活用し

た設計開発環境・組織のマネジメント」という包括的な課題が明らかになった。この課題を解決するため、再分解が必要であり、その詳細は表2に示されている。

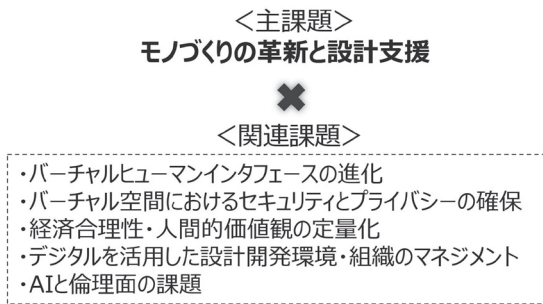


図2 主課題と関連課題

表2 課題「デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント」の分解

分解課題	定義
バーチャルヒューマンインタフェースの進化	デジタル技術を活用した設計支援システムやCAD/CAMのインタフェースを進化させ、人間とコンピュータがシームレスに連携する環境を構築。
バーチャル空間におけるセキュリティとプライバシーの確保	デジタル化された設計データや個人情報の共有と保護を両立させるためのセキュリティ対策やプライバシー保護技術の研究が必要である。
経済合理性・人間的価値観の定量化	デジタル技術を活用して、モノづくりにおける経済合理性と人間的価値観を定量化し、バランスの取れた設計と製品の開発を支援することである。
AIと倫理面の課題	AIの活用に伴う倫理的な課題を検討し、モノづくりにおけるAIの適切な利用と人間との共存を促進するための研究が必要である。

観点③においても、社会像を実現するための課題はキーワードとワークショップに基づいて特定された。課題の規模統一のためアンケート調査が実施され、図3に示す主課題と関連課題が区別された。これにより、「持続可能なワークライフバランスとパフォーマンス最適化の実現」という包括的な課題が明確となった。この課題を具体的に解決する技術や手法を明らかにするため、課題の再分解が行われ、その詳細は表3に記載されている。

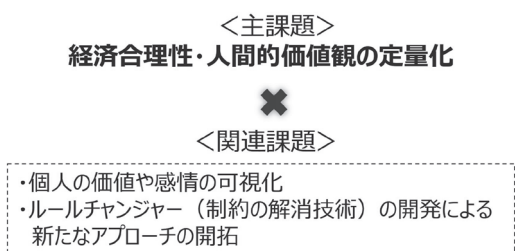


図3 主課題と関連課題

表3 課題「持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化の実現」の分解

分解課題	定義
経済性と人間性の統合指標	競争と楽しさのバランスを実現するために、個々の仕事やプロジェクトの経済合理性を定量化するだけでなく、従業員の人間的価値観も考慮した定量化手法の開発が必要。経済的な成果だけでなく、従業員の幸福度や満足度、ワークライフハーモニーの指標を組み込むことで、より持続可能な組織の運営が可能である。
個人の価値や感情の可視化	仕事やプロジェクトの達成において、個々の従業員の価値や感情の重要性を可視化する技術の開発が重要。個人の強みや特性をデータとして収集・分析し、適切なタスクの割り当てやキャリアの選択に役立てることで、従業員のモチベーションやパフォーマンスを向上することである。
ルールチェンジャー（制約の解消技術）の開発による新たなアプローチの開拓	競争と楽しさのバランスを実現するためには、従来の働き方やビジネスモデルにとらわれず、新たなアプローチやルールチェンジャー（制約の解消技術）の開発が必要。柔軟な労働時間制度の導入、自己決定権の強化、休職制度の活用など、従業員のワークライフバランスを向上させるための制度やプロセスを開拓することが重要である。

以上のように、本稿では、『リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会』というテーマを掲げ、この三つの観点から区分した社会像の、課題1「次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新」、課題2「デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント」、課題3「持続可能なワークライフバランスとパフォーマンス最適化の実現」という包括的な課題が抽出された。

## 課題1. 次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新(図4)

### バーチャル空間とリアル空間のシームレスな統合

#### バーチャルリアリティ技術とユーザインタフェースの統合技術

リアル空間とバーチャル空間をシームレスに連携させるための技術の進展により、ユーザは物理的な現実空間とデジタルなバーチャル空間との間で、違和感なく、直感的な移動やインタラクションが可能となる<sup>(1)(2)</sup>。特に、各年度の本会ロボティクス・メカトロニクス講演会においては、「VR」や「触覚・ハプティクス」、「遠隔操作」などのキーワードが急増しており、この領域での研究が活発になっている<sup>(3)</sup>。

2050年を視野に入れた現代社会において、デジタル技術の進化が進む中、バーチャル空間での活動は日常生活においても普及している<sup>(4)</sup>。それにもかかわらず、バーチャル空間とリアル空間の間の技術的な障壁は依然として存在する。ユーザが両空間を自由に行き来し、直感的に操作でき



# 次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新

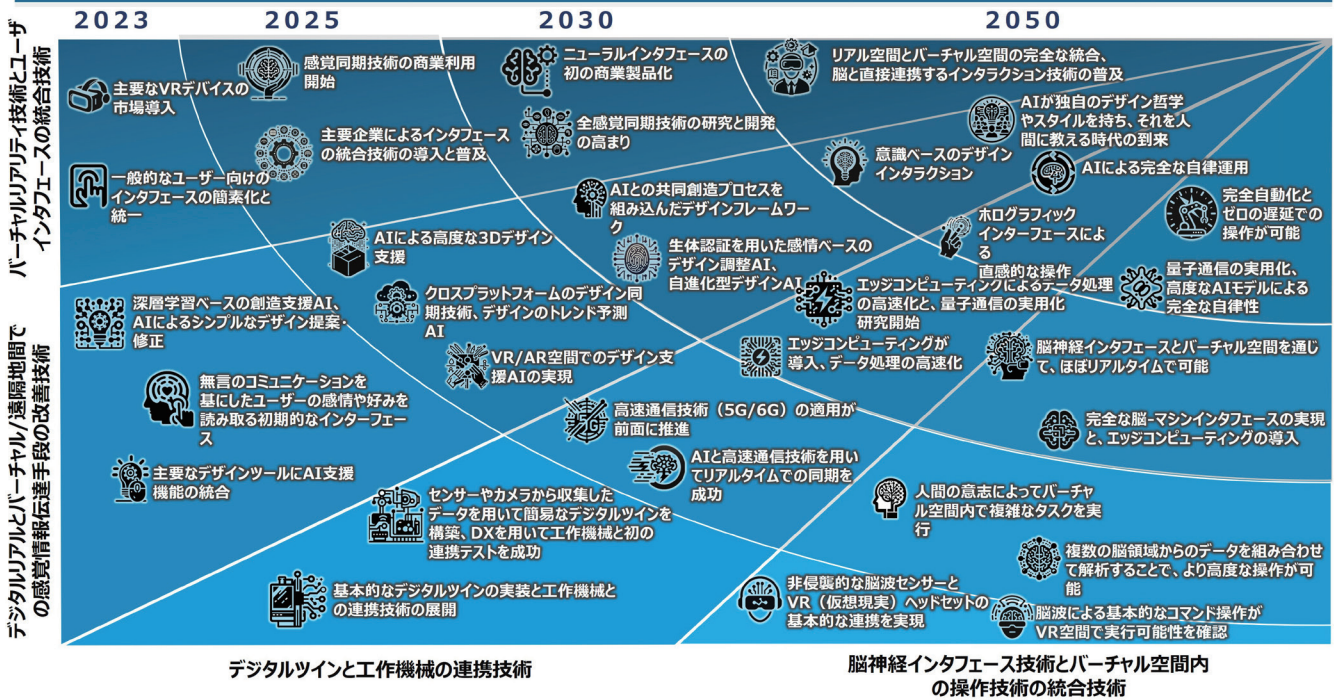


図4 課題1「次世代デジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションのための技術革新」のための技術ロードマップ(図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

る環境を整えることによって、生活の質が向上するだけでなく、新しいビジネスチャンスも生まれる可能性が高い。

このシームレスな統合を達成するためには、高度なクロスリアリティ技術(XR)と、人間中心のインタフェース設計が不可欠である。具体的には、3D映像技術、センサ技術、人間の動きや感覚を捉える技術、さらにはこれらをバーチャル空間に反映させる技術の統合、およびこれらの技術をユーザー中心で最適化する研究が必要とされる。

究極的な目標は、ユーザーがリアル空間とバーチャル空間の間を自然で直感的な動きで行き来できる環境を構築することである。これにより、生活の質の向上はもちろん、新しい形態のコミュニケーション、学習、エンターテインメント体験といった、まだ想像すらつかない新しい価値の創造が期待される。

2023年現在において、技術的な焦点は「基本的な感覚同期技術の開発」と「3D視覚技術の最適化」に置かれる。この年の目標は、拡張現実(XR)の体験を初期段階で洗練し、初のシームレスな統合体験をユーザーに提供することである。また、この年にはさまざまなVRデバイスが市場に登場する<sup>(5)</sup>。一般ユーザー向けのインタフェースがよりシンプルかつ統一されると予測される。

2025年の展望では、技術的な進展はさらに加速し、「感覚同期技術の高度化」が進行する。タクトイル(触覚)、温度感<sup>(6)</sup>、嗅覚<sup>(7)</sup>といった多様な感覚が同期されるようになる。さらに、「AIとの統合によるパーソナライズドインタフェース」の

実現が予想される。この段階の主要な目標は、リアルとバーチャルの間でシームレスな遷移を可能にし、ユーザーが直感的な操作で高度なバーチャル体験を享受できるようにすることである。そして、感覚同期技術が商業展開され始め、主要企業がこの統合技術の導入と普及を推進することとなる。

2030年の展望を考慮すると、技術的な取組みは「完全な人間中心設計の実現」と、より先進的な「ニューラルインターフェースおよび脳波解析によるインタラクション」に集中する。この段階での目標は、ユーザーにバーチャル空間をリアル空間と同等に感じさせる体験を提供し、全感覚によるバーチャル体験を実現することである。重要なマイルストーンとして、2020年代前半から始まったいくつかのニューラルインターフェースの試験<sup>(8)</sup>が、この時点で製品化されるとともに、全感覚同期技術の研究と開発が活発に行われることが予測される。

2050年の展望として、技術的な取組みは「リアル空間とバーチャル空間の完全な統合」および「脳と直接連携するインタラクション技術の普及」に焦点を当てる。この年の大きな目標は、バーチャルとリアルの境界がない一体化した生活を社会全体で実現し、すべての人々が直感的にバーチャル空間を活用できる社会を築くことである。そして、バーチャル空間での実務、教育、日常生活が一般化し、人々の生活の中心がバーチャル空間へと移行する可能性が高くなることが予測される。

## デジタルリアルとバーチャル / 遠隔地間での感覚情報伝達手段の改善

視覚情報の同期と伝達に関しては、遠隔地からの情報をリアルタイムで取得し、圧縮して送信する技術が進展している。具体的には、高解像度のカメラや3Dスキャナーが対象の視覚データの捕捉に用いられる。次世代の高速通信プロトコルを通じて、これらのデータはリアルタイムでバーチャル空間に送られる。そして、VRヘッドセットやARグラスを用いて、ユーザにリアルタイムで視覚体験を再現する。聴覚情報の同期と伝達も同様に重要である。環境音や特定の音声を高品質のマイクロフォンで取得し、これらの音声データもリアルタイムでバーチャル空間に送信される。ユーザは、高品質のヘッドフォンやサラウンドスピーカーによってリアルな音響体験を得る。触覚情報も、その重要性が増している。触覚センサを用いて物体の質感や温度を捕捉し、この情報もリアルタイムでバーチャル空間に送信される。ハプティックデバイスや触覚フィードバックスーツを用いて、ユーザにリアルな触覚体験を提供する。

視覚、聴覚、触覚が融合することで、遠隔地での完全な感覚体験がリアルタイムで可能となる。これにより、遠隔教育から仮想旅行、遠隔医療まで多岐にわたる分野でリアルな感覚体験が共有できるようになる。

2023年現在において、深層学習に基づく創造支援AIが主流となっている。このAIによって、デザイナーのアイデアが補完され、創造プロセスの速度が向上する。さらに、AIが基本的なデザインエラーを自動で修正する機能やシンプルなデザイン提案も行う。無言のコミュニケーションに基づいた初期段階のインタフェースも開発されている。この時点での重要なマイルストーンは、主要なデザインツールとAIの統合である。

2025年の展望では、高度な3DデザインのAI支援が焦点となる。複雑なデザインタスクの半自動化が可能であり、効率化と市場への迅速な適応が促進される。クロスプラットフォームにおけるデザイン同期技術も進化し、異なるプラットフォームでのデザイン作業が円滑となる。また、デザインのトレンドを予測するAIによって、市場動向に迅速に対応することが可能である。この期間のマイルストーンは、VR/AR空間でのデザイン支援AIの実現である。

2030年の展望を考慮すると、AIとデザイナーが共同で創造するプロセスが普及する。新しいデザインフレームワークが開発され、人間が到達しえなかった創造領域が探索される。感情ベースのデザイン調整をする生体認証AIや、継続的に学習する自進化型デザインAIも導入される。この時点でのマイルストーンは、個々のユーザの属性や好みに応じたデザインの自動生成である。

2050年の展望では、デザインの概念そのものが再定義される。意識ベースのデザインインタラクションが可能となり、AIが独自の「感性」を持つようになると予想される。量子コンピューティングによるデザインシミュレーションと最適化も進行し、人間の感性とAIの計算能力が完全に融合する新たな芸術・デザイン領域が形成されると考えられる。この時代の象徴的なマイルストーンは、AIが独自のデザイン哲学やスタイルを持ち、それを人間に教える段階に至ると予想される。

## 実体を持った個体による情報伝達と表現技術

### デジタルツインと工作機械の連携技術

デジタルツインと工作機械の連携技術は、近年、製造業や工業分野におけるイノベーションの核となっている<sup>(9)</sup>。この技術の核心は、現実世界の物理的オブジェクトやシステムと、それをデジタルで模倣した「デジタルツイン」との連携にある。この連携によって、工作機械の動作や設定のバーチャル空間での変更は、リアルタイムで現実世界に反映される。逆に、現実世界の動作や状態もデジタルツインに即座に反映される<sup>(10)</sup>。このリアルタイムな双方向の連携により、製造プロセスの最適化、故障予知、保守の効率化など、多様な利点が期待されている。

デジタルツインと工作機械の連携技術の開発の第一歩は、データの収集である。具体的には、センサやカメラを用いて、物理的な形状、動作特性、状態変化など、対象オブジェクトやシステムから詳細な情報を収集する。次に、これらの収集された情報を基にデジタルツインを構築する。バーチャル空間で対象の詳細なデジタルモデルを作成することで、現実世界のオブジェクトと同様の動作や反応を持つデジタルツインを実現する。完成したデジタルツインと現実世界の工作機械を連携させる次のステップは、通信技術や高速ネットワークを用いて、リアルタイムで双方の状態や動作を同期させることである。これにより、現実世界とバーチャル空間との間で一貫性が確保され、互いに影響を与え合うことが可能になる。このリアルタイムな連携によって、シミュレーションと実際の運用がより密接に連携され、設計段階での誤差や不具合を早期に発見し、修正することができる。

2023年現在においては、基本的なデジタルツインの実装と工作機械との連携技術が進行中である。この段階での主要な目標は、バーチャル空間と物理空間との基本的な連携を確立することである。具体的には、工作機械の動作や加工を模倣する簡易的なデジタルツインが構築され、センサやカメラから収集されたデータを用いてこのデジタルツインと実機との連携が実用段階に入っている<sup>(11)(12)</sup>。

2025年の展望では、高度なデータ解析の導入、AIによる自動同期の達成、そして高速通信技術(5G/6G)の活用が注目される。この年の目標は、リアルタイムでの高精度な同



期を可能にし、運用段階に突入することである。この目標を達成するためには、AIと高速通信技術を活用してリアルタイムの同期を成功させ、産業界での実運用事例を創出することがマイルストーンとなる。

2030年の展望を考慮すると、さらに進んだ技術が導入される見込みである。具体的には、全自動化が達成され、エッジコンピューティングが採用されることでデータ処理の高速化が図られる。さらに、量子通信の可能性も探求が始まる。この年代の目標は、事実上の即時同期と全自動操作を実現することである。ここでのマイルストーンは、エッジコンピューティングによるデータ処理の加速と、量子通信の実用化に関する研究が始まることである。

2050年の展望では、量子通信が完全に実用化され、ホログラフィックインターフェースが導入され、AIによる完全な自律性が確立されることが期待される。この時点での目標は、人の介入を必要としない全自動化を実現することであると考えられる。この目標達成のマイルストーンとして、量子通信による遅延のほぼ消失、ホログラフィックインターフェースによる直感的な操作、そしてAIによる全自律運用が挙げられる。

## 大規模 AI モデルを活用した高度機械システム

### 脳神経インタフェース技術とバーチャル空間内の操作技術の統合技術

2050年に向けて、機械システムはいっそうの複雑性を増し、高度な自動化とリアルタイム制御が不可欠となることが予想される。そのため、単にデータを収集・分析するだけでなく、それを即時に行動に移せるような高度なAIモデルが不可欠である。

まず、デジタルツインの基礎研究から始め、機械学習や深層学習の手法を用いて精度の高い予測モデルを構築する<sup>(13)</sup>。その上で、バーチャル空間とリアル空間のデータ連携を高度化し、リアルタイムでの高精度な制御が可能なAIアルゴリズムを開発する。また、脳神経インタフェース技術とバーチャル空間内の操作技術を統合し、直感的かつ高速な操作が可能なシステムを設計する。この技術の最終的な目標は「人と機械がシームレスに連携する未来」である。具体的には、脳神経インタフェース技術とバーチャル空間内の操作技術の統合により、人間の意志や感覚を直接、高度な機械システムに伝達することができる。これにより、より複雑な作業でも人の介入を最小限にしなが、効率的かつ正確に作業を遂行することが可能となる。それが、2050年に目指す次世代のデジタルコミュニケーションとシステムインテグレーションの実現に繋がると考えられる。

2023年現在においては、脳神経インタフェース技術とバーチャル空間内の操作技術の初期研究と基本的な連携が焦

点である。具体的には、非侵襲的な脳波センサとVR(仮想現実)ヘッドセットの基本的な連携を実現し、シンプルなコマンドでバーチャル空間内のオブジェクトを操作する<sup>(15)</sup>ことが目標である。この段階でのマイルストーンは、脳波による基本的なコマンド操作がVR空間で実行可能になることである。

2025年の展望としては、高度なデータ解析とAIの融合により、より精密な操作を行えるシステムの開発が推進される見通しである。ここでの目標は、人間の意志によってバーチャル空間内で複雑なタスクを実行できるようにすることである。複数の脳領域からのデータを組み合わせて解析することで、より高度な操作が可能になる。

2030年の展望を考慮すると、完全な脳-マシンインタフェースの実現と、エッジコンピューティングの導入を目指すことと予想される。この段階での目標は、実世界での機械やロボットに対する制御が、脳神経インタフェースとバーチャル空間を通じて、ほぼリアルタイムで可能となることである。マイルストーンは、リアルタイムでの高度なタスク実行が可能になること、そしてそれが産業界での実用事例として認知されることである。

2050年の展望では、完全に直感的なインタフェースとゼロ遅延を目指すことと予想される。この時代の技術的挑戦は、脳とマシンが高度に統合され、人の意識や感覚レベルでマシンを制御できるようにすることである。このためには、量子通信の実用化や、高度なAIモデルによる完全な自律性が求められる。マイルストーンは、人の介入をほとんど必要としない全自動化と、ほぼゼロの遅延での操作が可能となることである。

## 課題 2. デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント(図 5)

### バーチャルヒューマンインタフェースの進化

#### 力覚、触覚など五感を活用したリモート情報伝達技術

本技術はバーチャルヒューマンインタフェースの進化に不可欠であり、目的は人間とコンピュータのインタラクションをより直感的かつ自然なものにすることである。具体的には、設計開発や組織マネジメントにおいて、物理的な感触や反応をバーチャル空間で体験し、リアルな感覚情報を共有・操作することが目標である。

現代のデジタル作業環境と人間の感覚の間にはギャップが存在する。多くの設計開発や組織のマネジメントは、視覚や聴覚に依存したデジタルインタフェースを通じて行われている。しかし、人間の感覚は多様であり、触覚や力覚、臭覚や味覚まで、多くの情報が非言語的に処理されている。この多様な感覚情報の制限により、作業効率、決定品質、

# デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント

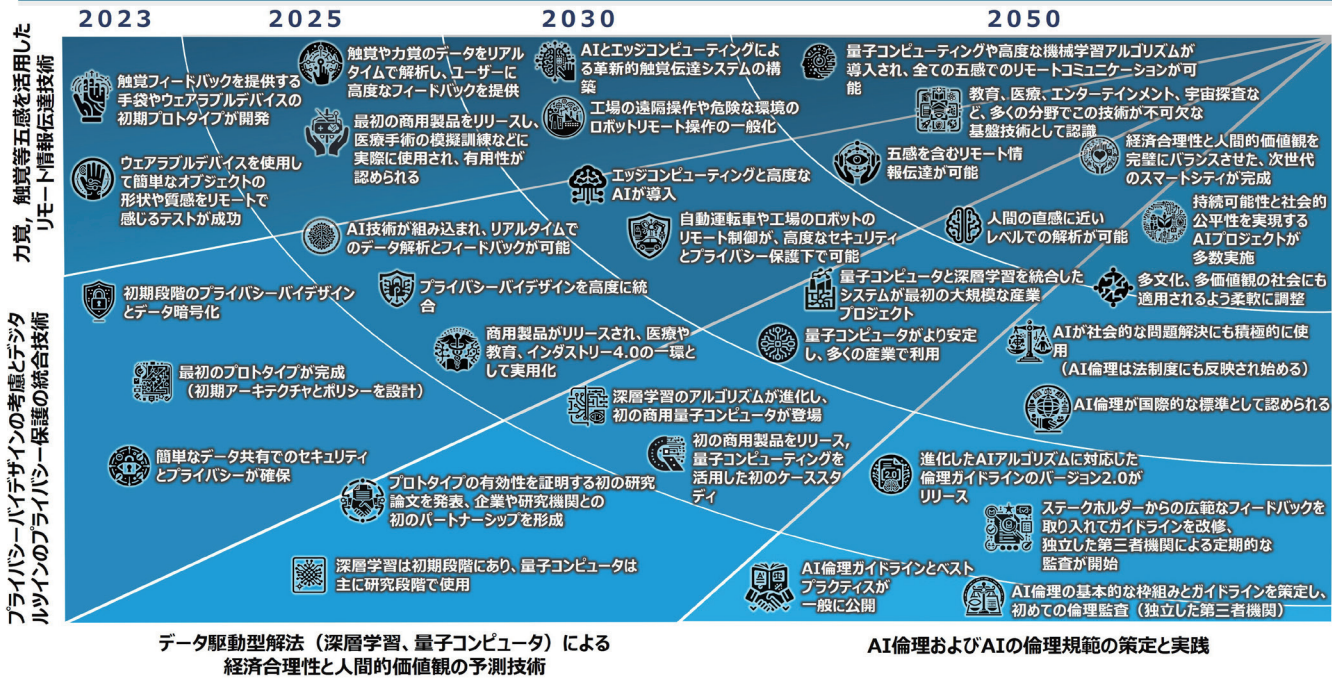


図5 課題2「デジタルを活用した設計開発環境・組織のマネジメント」のための技術ロードマップ  
 (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

そしてコミュニケーションの質が低下する可能性がある。例として、プロトタイピングの段階で、物理的な素材の感触や重量をリアルタイムで感じるができなければ、設計者はその素材の適用性を完全に理解できないかもしれない。また、リモート作業が普及している現在では、感覚情報を共有することで、チームメンバー間の理解が深まり、より効率的な協力が可能となる。

本技術を実現するためには、多角的な研究開発が必要である。初めに、人間の神経系についての基礎研究から始め、触覚、力覚、臭覚、味覚などの感覚情報が脳にどのように送信され、処理されるかを理解する。次に、この理解を基にして高精度のセンサとアクチュエータのハードウェアを開発する。このハードウェアは、感覚情報をデジタルデータに変換するだけでなく、逆の処理も可能である。さらに、これらのハードウェアを制御するソフトウェアを開発し、リアルタイムで感覚データを処理できるようにする。AI技術も活用し、感覚データの解析と処理を高度化する。これらの技術要素を統合してプロトタイプを作成後、実世界でのテストを重ね、製品化に向けた調整を行う。最終目標は、この五感を活用したリモート情報伝達技術を、既存のデジタル設計開発環境や組織のマネジメントシステムに統合することである。

また、この技術は、設計開発環境や組織のマネジメントにおける人間とコンピュータ間のコミュニケーションを革新する目的を持っている。具体的には、人間の五感一視覚、聴覚、触覚、味覚、臭覚一をデジタルテクノロジーで模倣また

は拡張することを最終目標としており、これによりリモートでの情報伝達や作業がより自然で効率的に行えるようになると考えられる。例えば、現行の設計プロセスでは設計者が視覚や聴覚に依存したデジタルインタフェースを主に使用しているが、この技術の導入によっては、触覚で素材の質感を感じたり、力覚で機械の抵抗を体験することも可能になる。その結果、製品設計プロセスが劇的に効率化され、短期間で高品質な製品が開発できると期待される。

組織のマネジメントにおいても、この技術はコミュニケーションの質を高める可能性がある。具体的には、リモートワークが普及している現代において、従業員間のコミュニケーションがテキスト、音声、画像に限られがちであるが、五感を活用したリモート情報伝達技術を用いることで、会話のニュアンスや緊急性、さらには共感までを遠隔で伝達することが可能になる<sup>(15)</sup>。これにより、作業の効率と従業員の満足度が向上すると考えられる。

2023年現在においては、手袋型のウェアラブルデバイスが触覚フィードバックの初期プロトタイプとして開発されている。このデバイスには、皮膚に直接触れる部分に約50個の微細な圧力センサが配置され、物体の形状や表面質感をリアルタイムで捉える機能を有している。この段階での目標は、これらのセンサデータを用いて、人間の触覚や力覚を高度に模倣するアルゴリズムを開発することである。具体的には、硬度や温度、湿度など、多種多様な物質属性を精確にシミュレートするコーディングが行われる。マイルストーン



としては、このウェアラブルデバイスを用いた実証実験で、遠隔地の物体の形状や質感を確実に感じ取れることが確認される。

2025年の展望としては、先進のAI技術が触覚と力覚のウェアラブルデバイスに組み込まれるようになると予想される。このAIは、数百個のセンサからのデータをリアルタイムで解析し、より繊細な触覚と力覚のフィードバックをユーザに提供できると期待される。この段階での目標は、この高度なフィードバックが商業や研究の現場で実用であると証明することであると考えられる。具体的には、遠隔医療におけるクリニカルトライアルを行い、その結果を学術論文で発表することが期待される。マイルストーンとしては、最初の商用製品のリリースと、その有用性の実証が計画されている。

2030年の展望を考慮すると、高度なAI技術とエッジコンピューティングの統合により、新たな触覚と力覚の情報伝達システムが構築されると期待される。このシステムは、大量のセンサデータを即座に解析し、その結果をリアルタイムでユーザにフィードバックできる。具体的には、工場の機械や遠隔地にいるロボットを、現地にいるかのように操作することが可能となると予想される。この段階での目標は、この先端技術をインダストリー4.0（第四次産業革命）において広め、リモート操作を一般化することである。

2050年の展望では、量子コンピューティングと先進の機械学習アルゴリズムが、触覚、力覚だけでなく視覚、聴覚、嗅覚、味覚に至る全感覚に対応したリモートコミュニケーション技術を導入している。このシステムは、人間の五感を超高精度でシミュレートし、リアルタイムで情報を伝達できる。例えば、医療分野では遠隔地にいる医師が、現地での手術と同等の感覚で操作を行うことができるようになる。目標は、高度な自動化とリアルタイムの五感情報伝送を人の介在なしに実現することである。

## バーチャル空間におけるセキュリティとプライバシーの確保

### プライバシーバイデザインの考慮とデジタルツインのプライバシー保護の統合技術

2050年までにデジタルを活用した設計開発環境を構築し、組織マネジメントの課題を解決するためには、バーチャル空間におけるセキュリティとプライバシーの確保が不可欠である。そのため、設計データや個人情報の共有と保護を高度に両立させた、新しい形のセキュリティ対策とプライバシー保護技術が求められる。具体的には、「プライバシーバイデザインの考慮」と「デジタルツインのプライバシー保護技術」が主な焦点であると考えられる。

2050年までに普及が予測される五感リモート情報伝達技術は、新しい形態のコミュニケーションとデータ共有を可能にする革新的な手法である。この技術によって、例えば設計

者は、物理的なプロトタイプを作成しなくても、リモートで他のエンジニアやステークホルダーと詳細な設計情報を共有できるようになる。エンジニアや管理者も同様に、高度なシミュレーションやテスト結果を瞬時に共有し、解析することが可能となる。しかし、このような先進的なリモート技術が広く普及することで、新たなセキュリティとプライバシーの課題が顕在化する<sup>(16)</sup>。五感をフルに活用したデータ共有は、従来のテキストやビデオ、音声情報よりもはるかに繊細かつ多面的な情報を含む。例えば、医療分野でのリモート手術では、患者の個人情報や生体データがリアルタイムで送受信されるため、これらの情報が漏洩しないようにガイドラインが設けられている<sup>(17)</sup>。また、工業分野でのリモート操作では、企業秘密に該当するような高度な設計データや製造プロセスが関与する機会が多く、これらの情報が第三者に悪用されると、企業にとって大きな損害を与えるリスクがある。さらに、エンターテインメントや教育分野では、ユーザの感情や反応もデータとして収集される可能性があり、このような個人を特定できる情報(PII)も適切に保護する必要がある。これらの理由から、五感リモート情報伝達技術の普及とともに、それに対応した高度なセキュリティ対策とプライバシー保護技術が必要である。

プライバシーバイデザインの考慮とデジタルツインのプライバシー保護技術は、高度なセキュリティとプライバシーの確保を目指す上で欠かせない要素である。まず、プライバシーバイデザインのアプローチは、技術の設計段階からセキュリティとプライバシーを基本に置く方法論である<sup>(18)(19)</sup>。具体的には、システム設計の初期段階でデータ暗号化のプロトコルを定め、アクセス制御の階層を設定することが重要である。また、どのユーザがいつ何をしたのかを追跡できるように監査証跡を組み込むことで、不正アクセスやデータ漏洩の際に迅速な対処と原因究明が可能となる。次に、デジタルツインのプライバシー保護技術は、リアル世界のオブジェクトやプロセスとそのデジタルレプリゼンテーションを連携させる技術である。このデジタルツイン技術によって、リアルタイムでのデータ収集、解析、そしてフィードバックが可能になる。この過程で生じるデータは極めて繊細なため、匿名化や仮名化の技術を用いて個人を特定できない形に変換することが必要である。これらの技術は、各々が独立しているだけでなく、相互に連携し合ってより強固なセキュリティとプライバシーの確保を可能にする。例えば、デジタルツインで生成されたリアルタイムのデータは、プライバシーバイデザインの考慮に基づいて暗号化され、しかもそのアクセス権限は厳格に制御されることが考えられる。

2023年現在においては、初期段階のプライバシーバイデザインと基本的なデータ暗号化技術が採用される予定であ

る。主な目標は、プライバシーを基本的なレベルで保護するための初期アーキテクチャとポリシーを設計し、実装することである。この方針は、システム全体の安全性とデータ保護を向上させるための基盤を作るものである。年末までには最初のプロトタイプが完成し、このプロトタイプを用いて簡単なデータ共有でもセキュリティとプライバシーが確保されることが期待される。

2025年の展望としては、AI技術がシステムに組み込まれることで、リアルタイムでの高度なデータ解析とフィードバックが可能になる。具体的には、AIが動作の異常検出やデータの解釈を瞬時にを行い、その情報をリアルタイムでユーザや他のシステムにフィードバックする。さらに、データの匿名化や仮名化技術が導入されるため、ユーザの個人情報は高いレベルで保護される。この段階の主な目標は、プライバシーバイデザインの原則をさらに高度に統合し、商業環境での実用に耐えうるレベルのセキュリティとプライバシー保護を確立することである。この目標に向けて、具体的なアクションプランやガイドラインが策定され、実際に製品開発に反映されることが期待される。2025年のマイルストーンとしては、商用製品が市場にリリースされ、その有用性が認められることである。特に、医療、教育、そしてインダストリー 4.0 といった分野で、この技術は多大な影響を与えると予測される。

2030年の展望を考慮すると、エッジコンピューティング<sup>(20)</sup>とさらに進化したAI技術がシステムに導入される。これにより、リアルタイムでの高度なデータ解析が可能となると期待される。具体的には、エッジコンピューティングの採用によりデータの処理速度と反応性が大幅に向上し、高度なAIアルゴリズムと連携することで、精緻な動作調整や故障予測、リアルタイムの意思決定までもが行えるようになると予想される。この段階での主要な目標は、インダストリー 4.0 やスマートシティの発展を見据え、リモート操作が日常的に行える環境を整備することである。具体的には、多様な機器やシステムを遠隔で安全かつ効率的に制御できるようなインフラを構築することが期待される。2030年のマイルストーンとしては、自動運転車や工場のロボット、産業用ドローンなどが高度なセキュリティとプライバシー保護のもとでリモート制御可能となると予想される。例えば、自動運転車では遠隔でのエマージェンシーストップが可能になると考えられる。その一方、工場のロボットはリアルタイムでのデータ解析によって故障が即座に察知できるようになると期待される。これらの技術進展によって、人々の生活はさらに便利で安全、そして効率的になると期待される。

2050年の展望では、量子コンピューティングと高度な機械学習アルゴリズムが一般的に導入されることが考えられる。特に、量子暗号や量子通信を用いたセキュリティの強

化が実現され、既存の暗号手法を凌駕するセキュリティレベルが達成されると期待される。さらに、高度な機械学習アルゴリズムの発展によって、音、香り、触感、味覚など五感すべてを模倣・伝送する技術も実用化される。目標は、人の介在を極力減らし、リアルタイムで五感情報を遠隔地に伝送できるようにすることである。具体的には、教育現場ではリモートでも実験を行える環境が整い、医療分野では遠隔手術が五感を通してより精密に行えるようになると期待される。2050年のマイルストーンとして、この技術が教育、医療、エンターテインメント、宇宙探査といった多様な分野で基盤技術として認識され、導入されるようになると期待される。例えば、宇宙探査では遠隔での地形調査や生物探索が五感を用いて行え、教育では歴史的な場面や科学実験を生徒が五感で“体験”することが可能となる。これらの進展は、社会全体での効率と生活の質を大幅に高める。

### 経済合理性・人間的価値観の定量化

#### データ駆動型解法(深層学習、量子コンピュータ)による経済合理性と人間的価値観の予測技術

データ駆動型解法による経済合理性と人間的価値観の予測技術は、モノづくりの設計から製品開発、さらにはマネジメントに至るまでのプロセスに対し、高度な定量分析を可能にすると考えられる。具体的には、深層学習を用いて大量の消費者データ、製品使用状況、マーケットトレンドを解析し、量子コンピュータを活用して複雑な計算を高速に処理する。この統合的なアプローチによって、経済合理性と人間的価値観を精緻にモデル化し、未来の製品設計や組織戦略に応用することが可能になると考えられる。

デジタル技術の急速な進化は、企業や組織に新たなチャレンジと機会を提供している。一方で、その進化は経済合理性を中心に設計される傾向が強く、長期的な持続可能性や従業員・顧客からの信頼を損ねるリスクをもたらす可能性がある。そのため、単なる利益追求にとどまらず、「人間的価値観」を経営に取り入れる必要が高まっている。さらに、人間的価値観は一般に主観的であり、多くの場合、その定量化や評価が困難である。

このような課題に対応するためには、人間的価値観と経済合理性の双方を定量化し、それらのバランスを最適化する手段が必要である。深層学習や量子コンピューティングを活用したデータ駆動型解法は、この問題に対する有効な解決策であると考えられる。まず、データ収集の段階では、消費者の購買履歴、オンラインでの行動パターン、製品の使用状況、さらには社内の従業員評価や市場動向に至るまで、多岐にわたる情報を集める。この情報収集にはIoTデバイスやウェブトラッキングツール、アンケートやインタビュー、そして既存のデータベースなどが活用される。収集したデー



タを深層学習アルゴリズムや量子コンピュータを使用することで、経済合理性（例えば、製品の販売数、コスト削減量など）と人間的価値観（例えば、顧客満足度や従業員のモチベーション）の間の相互作用やトレードオフを高速に計算する。量子コンピュータの高度な計算能力により、膨大な数のシナリオを短時間で評価できると考えられる。これらの解析結果を基に、未来の製品開発や組織のマネジメント戦略に対する具体的な提言ができると考えられる。

2023年現在、深層学習は複雑な人間的価値観や経済合理性のモデル化には、まだ限界がある。また、量子コンピュータはこの時点で非常に高価であり、計算能力も限定的であるため、主に大学や専門研究機関で基礎研究が行われている。初のプロトタイプアルゴリズムは、具体的には消費者の購買行動と製品評価に関する小規模なデータセットを使用して、経済合理性と人間的価値観の相関関係を分析する。このプロトタイプは主に Python で実装され、初めてディープラーニングライブラリ（例えば、TensorFlow または PyTorch）と組み合わせられる。2023年には、プロトタイプアルゴリズムの有効性を検証するための初の研究論文が査読付きの学術ジャーナルに掲載されることが期待される。この論文の成功に続いて、大手製造業者や研究機関との初の共同研究プロジェクトが立ち上がることが期待される。

2025年の展望としては、深層学習のアルゴリズムが高度に進化し、より複雑なデータセットに対応できるようになる。さらに、この年には初の商用量子コンピュータが市場に登場すると期待される。この商用量子コンピュータは、既存のクラシックコンピュータよりも高速な計算能力を持つと予想される。この段階の目標としては、進化した深層学習アルゴリズムと商用量子コンピュータを初めて実世界の商用製品やサービスの設計・生産に活用する。具体的には、自動車産業や医療機器の設計、さらには小売業の在庫管理など、多岐にわたる業界でこの技術が採用される。マイルストーンとしては、この年に初の商用製品がリリースされる。この商用製品は、消費者の購買傾向や製品評価に対する予測精度が格段に向上し、市場での成功を収める。

2030年の展望では、データ駆動型解法が経済合理性と人間的価値観の予測技術が前面に出てくると予想される。特に、量子コンピュータと深層学習を統合したシステムが、最初の大規模な産業プロジェクトとして出現し、量子コンピュータの安定化と多くの産業での利用が進むと期待される。

この期に、高度な AI 技術とエッジコンピューティングが組み合わせられ、新しい触覚と力覚の情報伝達システムが開発されると予想される。このシステムは、大量のセンサデータをリアルタイムで処理し、高度な解析を即時に実施する能力を持つと考えられる。これにより、例えば、工場の機械や遠

隔地のロボットを、現地にいるかのような感覚で操作可能になると予想される。この技術は、インダストリー 4.0 の一部として導入され、製造業や建設業、緊急時の救助活動など、多岐にわたる分野での実用化が進むと期待される。具体的なマイルストーンとしては、自動運転車の遠隔操作や、危険な環境でのロボット操作がこの技術の応用例として挙げられる。これらの応用は、緊急時や災害時において、人命を危険にさらすことなく、効率的かつ安全な作業を可能にする。このように、2030年にはこの技術が多くの産業や研究分野で基本的なインフラとして認知され、その重要性がいっそう高まることが予想される。

2050年の展望では、量子コンピュータの技術が高度に進化し、現実的な時間枠内で非常に複雑な計算が可能になる。これにより、高度な気候モデリングから複雑な生物学的シミュレーションまで、多くの難問が解決されると期待される。一方で、深層学習もまた大きな進展を遂げ、人間の直感に近いレベルでの解析や判断が可能となると予想される。結果として、アートや文学、さらには哲学に至るまで、人間の創造性を豊かにする新たな可能性が拓かれる。目標としては、この高度な技術が世界中の多くの産業や社会基盤に浸透し、それを基盤として機能するようになることである。具体的には、医療、交通、エネルギー、教育といった多くのセクターで、人間中心のデータ駆動型の意思決定が行われると予想される。最も注目すべきマイルストーンとしては、経済合理性と人間的価値観を完璧にバランスさせた次世代のスマートシティの完成が期待される。この都市は、量子コンピュータと深層学習を活用して設計・運営され、高度なエネルギー効率、優れた公共サービス、そして持続可能な環境を実現すると予想される。このスマートシティは、従来の都市が抱える多くの問題、例えば交通渋滞、エネルギーの無駄、社会的不平等などを大幅に削減し、高い生活の質と持続可能性が確保されると期待される。

## AIと倫理面の課題

### AI 倫理および AI の倫理規範の策定と実践

AI 技術とその適用が社会全体に広がる中で、倫理的な問題を予防・解決するための重要な要素である。具体的には、AI のデータ収集、処理、意思決定プロセスにおける透明性、説明可能性、公平性、プライバシーを保護するための一連のガイドラインと実践方法がこの領域に含まれる。また、AI システムが採用する倫理規範は、多文化、多価値観の社会に適用可能で、時代や状況に応じて柔軟に調整できるように設計されるべきである。

AI 技術の普及が日常生活に多大な影響を及ぼしているが、これと同時に倫理的な問題も急速に増加している。特に、大量のデータが必要とされる AI システムの運用は、個人の

プライバシーに重大な影響を与える可能性があり、データのコントロールを個人が失うケースも少なくない。加えて、AIによる自動化が進展することで、多くの職種が消失する可能性が出てきており<sup>(21)</sup>、社会的不平等の増大が懸念される。また、AIアルゴリズムが持つ潜在的な偏見により、特定の社会的または民族的グループに対する不公平な判断が行われることがある<sup>(22)</sup>。このようなアルゴリズムの透明性と説明責任も、社会全体でのAI技術への信頼を確立する上で重要な課題である。さらに、AI技術のセキュリティと安全性に対する懸念も高まっている。高度な自動操作能力が悪用された場合、その影響は極めて重大であり、特に自動運転車や情報生成においてリスクがある<sup>(23)</sup>。最後に、AIの決定が文化的価値観や社会的規範に影響される場合、その結果として一部の人々やコミュニティが不利益を被る可能性もある。以上の理由から、AI技術の発展と並行して、その倫理的側面を確実に考慮する必要があり、これが怠られると社会全体の信頼や持続可能性などが脅かされる可能性が高い。

AIと倫理に関する課題の解決には、いくつかの綿密な手法とプロセスが必要である。まず、多様なステークホルダーの参加が不可欠である。これには技術者だけでなく、法律家、社会学者、一般市民、さらには特定の利害関係者やマイノリティグループまでが含まれる。それぞれの専門家や関係者が持つ多角的な視点と知識は、より公平で包摂的な倫理規範を策定するために欠かせない。次に、透明性の確保が重要である。これは、AIアルゴリズムの開発過程、使用されるデータセットの起源と性質、そしてAIがどのように意思決定を行うのかに関する情報が公開されるべきであるということの意味する。透明性は、AI技術に対する一般の信頼を構築する基礎となる。さらに、公平性と無差別の確保も必要である。具体的には、データセットが偏見のないものであり、アルゴリズム自体も公平な結果を生成するように設計されていなければならない。これには、さまざまな文化、性別、年齢、社会経済状況といった要素を適切に反映させるデータセットの選定と、そのデータに基づいて設計されるアルゴリズムの検証が含まれる。説明可能性<sup>(24)</sup>、すなわち、AIシステムがどのようにして特定の結果や判断に至ったのかを、一般の人々が理解できる形で明示することも必要がある。これは、専門的な知識がない利用者でもAIの動作を適切に評価できるようにするためであり、特に高度な機械学習アルゴリズムの「ブラックボックス」性を解消するために重要である。最後に、継続的な監視と評価が必要である。これは、策定された倫理規範やガイドラインが実際に適用され、その効果が正確に評価されるためのものである。具体的には、定期的な監査、パフォーマンス指標の追跡、そしてステークホルダーからのフィードバックを通じて、規範やシステムの運

用状況を把握し、必要な調整や改善を行う。

2023年現在においては、AI倫理に関するいくつかの重要な進展がある。初めてのAI倫理ガイドラインとベストプラクティス<sup>(26)</sup>が一般に公開されることで、開発者や研究者、さらには一般の人々にも、AIをより倫理的に安全な方法で適用するための指針が提供される。このガイドラインとベストプラクティスの公開は、AI倫理の基本的な枠組みとガイドラインを策定するという目標に直結している。さらに、独立した第三者機関がAIの説明可能性と透明性を評価する初の試みも行われる。この試みによって、AIシステムがどれだけ一般の人々に理解され易く、透明であるかが評価される。具体的なマイルストーンとしては、まずAI倫理に関する初の白書が公表される。この白書には、AIがどのように倫理的な問題に対処すべきか、何が許されるのか、何が許されないのかといった基本的な方針が詳細に説明される。次に、小規模なプロジェクトでこれらのガイドラインの有効性が試験される。このプロジェクトは、AI倫理ガイドラインが現実の問題解決においてどれだけ効果的であるのかを検証するためのものである。最後に、AIの透明性と説明可能性のための評価基準が設定される。この基準は、独立した第三者機関による評価の際の指標となるものである。これらの活動と評価を通じて、2023年はAI倫理の土台を確立する重要な一年であると言える。

2025年の展望としては、AIの倫理的側面に関してさらなる進展が予測される。技術面では、より進化したAIアルゴリズムに対応した倫理ガイドラインのバージョン2.0がリリースされる。この新しいガイドラインは、既存のガイドラインをアップデートする形で、多様なステークホルダーから得られた広範なフィードバックを組み込むことが目標である。さらに、AIシステム自体が一定の倫理的基準を自動で維持できるように、自動調整メカニズムが組み込まれたAIシステムも出現する。具体的なマイルストーンとしては、最初にステークホルダーからの広範なフィードバックを基にガイドラインが改修される。このフィードバックは、技術者、法律家、社会学者、一般市民など多様な人々から収集され、ガイドラインが現実の問題やニーズにより適切に対応できるよう調整される。次に、AI倫理に関する教育プログラムが各レベルで普及し始める。大学や研究機関、企業などでAI倫理教育が行われるようになり、これによってより多くの人々がAIの適切な運用方法について理解を深める。最後に、独立した第三者機関による定期的な監査が開始される。これはAIシステムの説明可能性、透明性、公平性を評価し、必要な改善や調整が行われるための重要なステップである。これらの技術進捗とマイルストーンにより、2025年頃はAIの倫理的運用においてさらなる成熟を遂げる一年となる見込みである。



2030年の展望では、AI技術が社会的な問題解決に積極的に使用されるようになり、それに伴いAI倫理は法制度にも反映され始めるという重要な変化が見られる。目標としては、AI倫理規範が法的にも認められ、これに違反した場合には明確な罰則が設けられるようになると予想される。具体的なマイルストーンとしては、まずAI倫理が国際的な標準として認められることが期待される。多国籍の機関や国際組織が参加する形で、AI倫理規範が全世界に拡散され、多くの国で法的な制度として採用されると考えられる。次に、AIを用いた社会的実験でこれらの倫理規範が適用され、成功を収めることが期待される。例えば、都市計画、健康診断、犯罪予防などさまざまな分野でAIが導入され、倫理規範に基づく運用が行われる。これにより、AIの社会的な有用性と倫理的な運用が両立する方法の実証が期待される。最後に、多くの国で法制度にAI倫理規範が組み込まれる。これにより、AIを不適切に運用した企業や個人に対する罰則が明確に定義され、実際に適用されるようになると予想される。

これらの技術進捗とマイルストーンを達成することによって、AI倫理はより高いレベルでの社会的認知を得るとともに、持続可能で公平な社会づくりにおいて不可欠な要素となると期待される。

2050年の展望におけるAIの倫理規範は、全世界で広く受け入れられ、多文化、多価値観の社会にも適用されるよう柔軟に調整されていることが予想される。目標としては、AIが持続可能で公平な社会に貢献し、その信頼性と効用が全世界で確立される状態を作り出すことである。具体的なマイルストーンとしては、まずAI倫理規範の全世界的な標準化の達成が期待される。国際的な協調により、AI倫理の基本的な枠組みが各国の法制度やガイドラインに組み込まれ、全世界で共通の倫理規範が形成されることが考えられる。次に、持続可能性と社会的公平性を実現するAIプロジェクトが多数実施され、成功を収めることが期待される。これは、環境保全から医療、教育、経済の公平性に至るまで、多岐にわたる分野でAIが倫理的な観点から責任を持って運用される例を創出する。そして、AI倫理規範が時代や状況に応じて柔軟に調整され、継続的な改善が行われることが予想される。この過程で、新たな技術進展や社会的変化に対応した規範のアップデートが定期的に行われ、多文化、多価値観の社会にも適切に対応することが期待される。

### 課題3. 持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化の実現(図6)

#### 経済性と人間性の統合指標

#### バーチャル空間とリアル空間でのロボット制御技術の融合技術

本技術はAIの適用拡大と倫理的課題への対応において極めて重要な要素となる。この技術により、シミュレーションを仮想環境で行い、現実世界でのロボット操作とシームレス

に連携させることが可能となり、これによってパフォーマンスの最適化が実現されると考えられる。経済性と人間性を融合させた指標の利用により、バーチャルと実空間の相互作用がワークライフハーモニーとパフォーマンスの最適化に持続的に寄与することが期待されている。

この技術の必要性は、複数の背景に起因している。テクノロジーの急速な進化は、人々のバーチャル空間での労働や生活を身近なものにし、この傾向は新型コロナウイルスのパンデミックや地球環境問題への危機感によって加速されている。結果として、労働の場やコミュニケーションの手段が多様化し、それぞれに個別の倫理的問題や挑戦が生じている。また、社会が持続可能性や人間中心の価値に注目し、企業評価においても環境、社会、ガバナンス(ESG)の観点重要視されており、従業員の幸福度やワークライフバランスが評価の要素として組み入れられている。AIとロボティクスの普及によって、バーチャル空間と実空間の境界が曖昧になっており、遠隔医療、オンライン教育、バーチャルオフィスなどがその例である。このような状況下では、新しい倫理規範の策定とそれに基づくガイドラインが不可欠である。

この統合技術を実現するためには、以下の4つの主要機能の導入が求められる。第一に、シミュレーションと実際の操作を可能にする高度なシミュレーションプラットフォームの開発が必要である。例えば、遠隔医療においては、取得されたデータを利用してバーチャル空間で医療診断を行い、その結果をリアルタイムで現場に適用する機能が必要である。次に、経済性と人間性の統合指標<sup>(27)</sup>を使用することで、この統合技術の影響と倫理性を総合的に評価することが可能となる。例えば、遠隔医療プラットフォームのROI(投資収益率)が高いだけでなく、患者の治療結果や満足度もこの指標<sup>(28)</sup>で測定される。また、バーチャル空間と実空間が交錯する現代においては、プライバシーの保護、データの安全性、社会的公平性に関する新たな規範を策定し、それに基づくガイドラインを業界の専門家や倫理学者、一般利用者からのフィードバックを取り入れながら更新することが必要である。

最終的には、バーチャル空間と実空間が有機的に統合され、効率性と人間性が共に向上する社会を目指している。この統合技術により、遠隔医療では効率かつ高品質の医療サービスが提供され、患者、家族、医療従事者の満足度が向上することが期待される。

2023年現在は、バーチャル空間での基本的ロボット制御技術とそのプロトタイプの開発に焦点を当てている。バーチャル空間でロボットを簡単に配置・操作できる環境を設計し、実空間でのテストを行うことがこの段階での目標となる。技術的な進歩とマイルストーンとしては、まず、実機の制御をバーチャル空間内のロボットに適用する基本モジュールの開発、次にデジタルツインを用いた複雑な環境下での動作計

# 持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化の実現

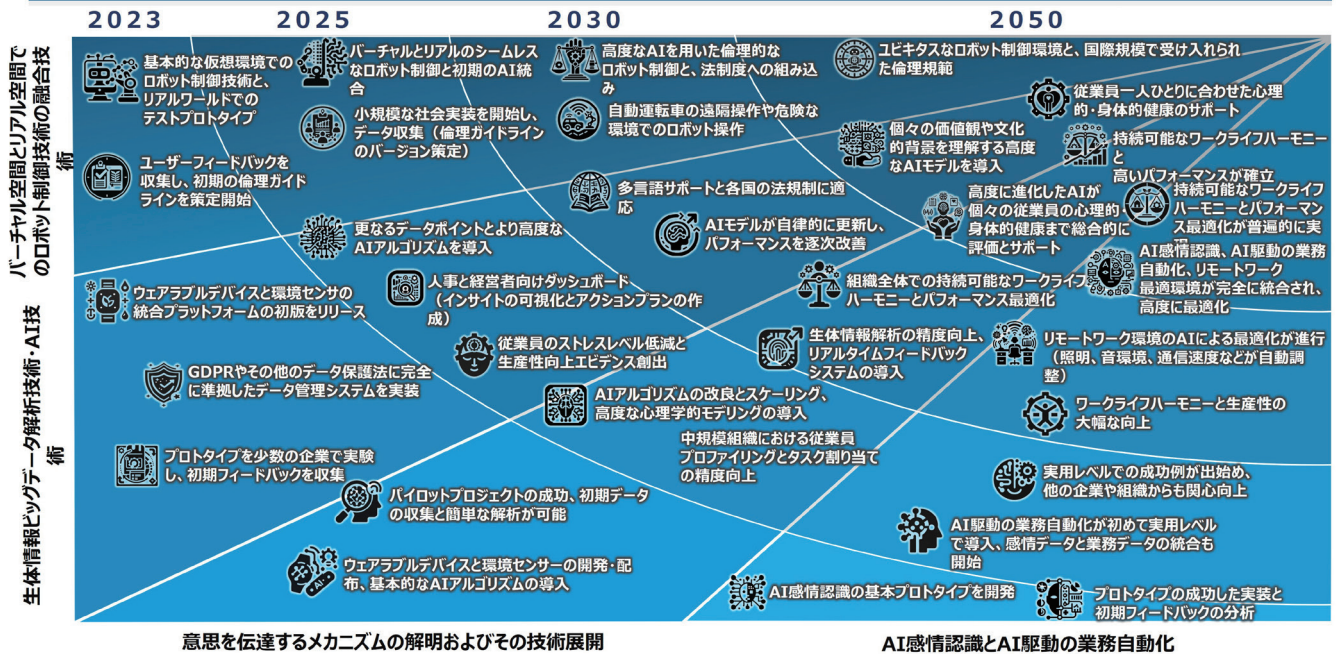


図 6 課題 3 「持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化の実現」のための技術ロードマップ (図中のアイコンは Open AI のイメージ生成ソフト DALL・E3 により生成)

画の機械学習、そして、バーチャル空間での物理的挙動のリアルな再現性を向上させることが挙げられる。また、ロボットユーザーからのフィードバックをもとにした倫理規程とガイドラインの初期案の策定が開始されると予想される。

2025年の展望としては、バーチャルと実空間でのロボット制御と初期 AI の統合が主要課題である。バーチャルと実空間のロボットが同じ動作をする環境を構築し、初期段階の AI によって効率性と人間性を同時に向上させることを目指すと考えられる。技術進捗のマイルストーンには、バーチャルと実空間の連携技術の完成、実作業環境への導入、倫理ガイドラインと統合指標のバージョン 2.0 のリリースが含まれる。さらに、実際の作業環境とバーチャルシミュレーションとの間のフィードバックループを確立し、進化的な改善の促進が期待される。

2030年の展望では、AI の高度統合と法的枠組みの確立が中心であると考えられる。バーチャル空間でのシミュレーションと実世界でのロボット制御の最適化を目標としている。AI を活用した高度なロボット制御アルゴリズムの開発、国際的な倫理ガイドラインの承認、バーチャルと実空間の融合技術の社会実装と法制化などの主要な進歩が期待される。これには、自動運転車の遠隔操作や危険な環境でのロボット操作の最適化も含まれる。

2050年までの展望では、バーチャル/実ロボット制御環境の完全統合と世界的な倫理基準の確立が期待される。この融合技術が全世界の標準となり、持続可能で公平な社会構造への寄与が目標となると予想される。全世界での「経

済性と人間性の統合指標」の採用、倫理ガイドラインと法的枠組みの国際的標準化、そして AI と人間の協働によるロボット制御が日常化することが見込まれる。最終的には、ユニバーサルなロボット制御環境が実現し、国際的に受け入れられた倫理規範が定着することが期待される。

## 個人の価値や感情の可視化

### 生体情報ビッグデータ解析技術・AI 技術

本技術は、個人の価値や感情を可視化する上で中心的な役割を果たす<sup>(29)~(31)</sup>。この技術は、作業員一人ひとりの生体情報、感情、行動パターンなどの多様な心理・身体データをリアルタイムで収集し分析する。AI はこれらのデータから有益な洞察を引き出し、タスク割り当てやキャリア提案、そして心理的・身体的健康に至るまで総合的なサポートを提供する。2050年に持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンスの最適化が求められる背景には、環境的、社会的、経済的な複合要因が存在する。環境的な要因としては、AI や自動化の進展に伴い、より複雑で創造的な業務が人間に求められるようになる。社会的な要因では、多様性と包摂性の尊重、超高齢化社会における労働人口減少の対策が挙げられる。経済的な要因としては、全従業員がパフォーマンスを最大限に発揮することの重要性が増している。

これらの背景から、社会で個人が感じることや貢献できることを明確にし、それを支援する技術の必要性が生まれる。このニーズに対して、「生体情報ビッグデータ解析技術・AI 技術」が有効な解決策を提供し、持続可能な社会構造への貢献が期待される。



データ収集の段階では、人々が日常生活や職場で高機能のウェアラブルデバイスを装着することになる<sup>(32) ~ (35)</sup>と考えられる。このデバイスは、心拍数やストレスレベル、皮膚の導電性などの生体情報をリアルタイムで捉え、環境センサによっては作業環境の温度や湿度、照明レベル、さらにはロボットの作業効率までも記録する。これらのデータ収集は、AIの解析精度と信頼性を高めるための高品質なデータセットを作成するために重要である。収集したデータはセキュリティを確保したクラウドサーバーに送信され、そこで進んだAIアルゴリズムがリアルタイムでデータを解析する。その結果、作業者の感情変動やパフォーマンスが定量化され、各個人の特性に応じた行動計画が立案される。AIが生み出した洞察は社内に蓄積され、個々に適したタスク割り当てやキャリアの提案、そしてワークライフバランスの改善に寄与する措置を支援する。このフィードバックループは継続的にシステムに戻され、常に作業環境に適合したAIによる精密な分析と提案が可能になる。これにより、組織の生産性と作業者の満足度が持続的に向上すると期待される。

2023年現在においては、「生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術」の開発が初めての重要なステップを踏み出す予定である。第一のマイルストーンとして、ウェアラブルデバイスと環境センサが一体となったプラットフォームのプロトタイプが開発され、リリースされることとなる。このプラットフォームは、作業者の生体情報、感情、行動パターンを含む多様なデータをリアルタイムで収集する能力を持つ。また、データのプライバシーは、2023年の時点でGeneral Data Protection Regulation (GDPR) やその他のデータ保護法に完全に準拠したシステムにより確保される<sup>(36) (37)</sup>。このシステムの使用により、個人のプライバシーは守られるとともに、安心して使用できる環境が提供される。主な目標は、このプロトタイプを選ばれた先進的な企業でテストし、初期段階のフィードバックを収集することにある。フィードバックは、生体情報の収集精度、AIによる分析の有用性、システムの使い勝手を含む予定である。したがって、2023年は「生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術」にとって基礎となる年であり、その成功が将来の発展に寄与すると期待される。

2025年の展望では、この技術の開発はいつそう進み、初期の商用バージョンがリリースされる見込みである。このバージョンでは、さらに多くのデータポイントの収集が可能になり、進化したAIアルゴリズムが採用される。これにより、AIは作業者個々の状態や要望にさらに細かく応じられるようになる。加えて、人事部門や経営層向けのダッシュボードが新たに開発され、収集データから得られる洞察を視覚化し、行動計画の策定を容易にする。目標は、この商用バージョンが複数の大企業で採用され、その効果を実証し、技術の

さらなる発展へとつながることである。また、導入された企業において、従業員のストレスレベルが低減し、生産性が向上する初期の証拠を提供することも目指されていることが考えられる。したがって、2025年はこのプロジェクトにおける商用化へ向けた重要なフェーズになると期待される。

2030年の展望では、「生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術」はさらに進化し、グローバルな規模での導入が実現されると期待される。この段階では、多言語対応や各国の法規制に適合した形での展開が行われ、技術の普及と認識の拡大が期待される。特に、「自動フィードバックループ」が導入されることで、AIモデルは自身のパフォーマンスを継続的に自己改善し、より精度の高い分析と提案が可能になると考えられる。目標は、この技術が多様な産業で広く採用され、持続可能なワークライフハーモニーの新しいスタンダードとなることが期待される。

2050年の展望では、「生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術」はさらに大きな進歩を遂げ、個人の価値観や文化的背景を理解し、それに基づく精緻な分析と提案が可能な「人間中心のAI」の実現が予想される。また、「パーソナライズされた健康と福祉」の支援も実際に提供されるレベルに到達する見込みである。目標は、この技術が広く認知され、社会全体にポジティブな影響を及ぼし、人々のモチベーションと満足度を向上させることである。これにより、企業や組織、社会全体の持続可能な成長に寄与すると期待される。

#### 意思を伝達するメカニズムの解明およびその技術展開

本項は、従業員一人ひとりの内面的な価値や感情を可視化し、定量化する技術の開発に向けたものである。この技術領域では、ユーザインタフェース、言語処理技術、心理学的指標、脳波や生体信号を含む多角的なデータの統合と解析が行われる。これにより、従業員個人の価値観や感情が明示され、業務への適用が可能になる。

この技術の必要性は、職場の多様な文化、価値観、スキルセットを持つ人々を理解し、尊重することが企業全体の競争力向上につながるためである。また、リモートワークやフレキシブルワークが普及する中で、従業員の感情や価値観をリアルタイムで把握する新たな手法の開発が急務となっている。企業が従業員のメンタルヘルスを理解することは、持続可能な働き方を促進する上でも重要である。AIや機械学習技術の発展に伴い、従業員の仕事への情熱やスキルを正確に理解することが、より高度で専門的な役割への適応を求められている。また、チーム内のコミュニケーションを円滑化し、効果的な協力を可能にするためにも、互いの価値観や感情の理解が重要となる。これらの点から、従業員の価値や感情を理解し可視化する技術は、今後さらに重要になると言える。

データ収集段階では、心拍数や皮膚の電気抵抗といった生体情報をリアルタイムで収集するウェアラブルデバイスを使用する<sup>(38)(39)</sup>。また、従業員の心理状態や職場での経験に関する情報を得るために、インタビューやアンケートが定期的実施される。会議や日常のコミュニケーションにおける言語使用パターンも、録音データの解析を通じて調査される可能性がある。次のAI解析フェーズでは、収集された各種データを統合し、進んだAIアルゴリズムと心理学的モデリングを用いて、従業員の感情の変動やストレスレベル、コミュニケーションスキルを多角的に評価する。可視化のステップでは、ダッシュボードやレポートにより解析結果を表示し、経営層から従業員までがアクセス可能にする。これにより、個々の従業員の状態やその業績への影響をリアルタイムに把握できるようになると考えられる。

2023年現在は、薄膜生体センサの技術<sup>(40)(41)</sup>が初期段階を迎え、基本的な生体情報をリアルタイムで取得するセンサが実用化されると予測される。これらのウェアラブルデバイスは、従業員の生体情報や行動データをリアルタイムで収集し、初歩的な人工知能(AI)アルゴリズムによる初期のデータ解析を行うことができる。目標は、これらの技術を用いて小規模なパイロットプロジェクトを立ち上げ、基本的なデータ収集と解析のフレームワークを構築することである。この段階では、従業員は日常生活でウェアラブルデバイスを使用し、収集されたデータはAIアルゴリズムで解析される。初期データの収集と簡単な解析が成功すれば、プロジェクトは次のフェーズへと移行し、さらに進んだデータ解析や応用が可能になると考えられる。

2025年の展望では、改良されたAIアルゴリズムにより、より多くのデータを迅速かつ正確に処理するスケールアップが可能になることが期待される。また、心理学的モデリングも導入され、従業員の心理状態や感情、行動傾向をより詳細に解析することが可能になる。中規模組織での実用化テストを通じて、従業員のプロファイリングとタスク割り当ての精度を高めることが目標である。初の商用プロジェクトのローンチは、この技術の商用化における重要なマイルストーンとなる。

2030年の展望では、「生体情報ビッグデータ解析技術・AI技術」がさらに進化し、グローバルでの導入が進むと予測されている。各国の法規制に対応し、多言語サポートが追加されることで、さまざまな文化背景を持つ国々でもこの技術が普及すると期待される。AIモデルは自動フィードバックループを通じて自身をアップデートし、より精度の高い分析を行う。この技術が複数の産業で広く採用され、持続可能なワークライフハーモニーのスタンダードとなることが期待される。

2050年の展望では、人間中心のAIが導入され、個々の価値観や文化的背景を理解し、精緻な分析と提案を行う

レベルに到達していると予想される。心理的、身体的健康に対する総合的な評価と個別のサポートが可能になり、社会全体が健康で活気に満ちた働き方へと移行すると予想される。この技術の普及により、社会全体の生活の質が向上し、多様性が自然と尊重される持続可能なワークライフハーモニーと高いパフォーマンスが確立できる社会形成の促進が期待される。

## ルールチェンジャー（制約の解消技術）の開発による新たなアプローチの開拓

### AIによる感情認識とAI駆動の業務自動化

2050年に向けて、持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化を実現するために開発される技術である。この技術は、AIを用いて従業員の感情をリアルタイムで捉え、そのデータに基づいて業務を自動化し、適切に調整する機能を持つ。21世紀の労働と生活スタイルの変化に適応するため、企業や組織は単なる効率追求を超えた持続可能な成長を目指している。従業員の多様なニーズに対応し、最高のパフォーマンスを発揮するための環境の提供が必須である。新しい労働パラダイムでは、従業員の感情や心理状態がパフォーマンスに影響を与えるため、これをリアルタイムで把握し適切に対応するシステムが重要である。リモートワーク環境の生産性や快適さも現代の主要な課題の一つである。これらの課題に対して、従来の方法に縛られず、柔軟な労働時間制度や自己決定権の強化、休職制度の活用など、多角的かつ革新的なアプローチが求められる。「AIによる感情認識と業務自動化」は、多くの制約を解消するための重要な技術となる。

AI感情認識<sup>(44)~(48)</sup>では、ウェアラブルデバイスや環境センサを通じて心拍数、体温、声のトーン、表情などのデータをリアルタイムで収集し、AIアルゴリズムによる解析で従業員の感情状態を評価する。AIによる業務自動化では、感情データと業務データを総合的に分析し、業務の優先度を自動調整し、効率的なタスク割り当てを実現する。

以上の一連のプロセスを通じて、新しい働き方が可能となり、持続可能なワークライフハーモニーと高いパフォーマンスを実現することが期待される。

2023年現在においては、AIによる感情認識技術の基本プロトタイプ開発が技術的な焦点となっている。この段階での目標は、従業員の心拍数や表情をリアルタイムで捉える基礎的機能の実装にある。このプロトタイプは、初期テストフェーズで企業内の限られたチームや部門に適用され、基本的なフィードバックの収集が行われる。具体的な目標は、新システムへの適応度と、感情読取りの効率性を初期評価し、フィードバックを集めることである。最終的なマイルストーンは、プロトタイプの成功した導入と初期フィードバックの詳



細な分析にあり、これが今後の技術改善と展開戦略の礎となる。

2025年の展望では、AI駆動の業務自動化が実用化の段階に入る。AIによる感情認識技術と業務自動化の統合により、感情データと業務データが連携し、従業員の感情状態に応じた自動的な業務割り当てや調整が実現する。目標は、中規模組織でのパイロットテストを実施し、統合システムの効率性や従業員の働きやすさ、その他のパフォーマンス指標を詳細に評価することである。この年のマイルストーンとしては、実用レベルの成功例が報告され、他の企業や組織からも関心向上ことが期待される。

2030年の展望では、リモートワーク環境がAIによりさらに最適化されていくことが予想される。具体的には、AIが照明、音環境、通信速度といった作業環境の各要素を自動で調整し、従業員が集中しやすくストレスを感じにくい労働環境を提供するレベルに達すると予想される。この先進的なリモートワーク環境最適化技術が広く企業や組織に採用され、標準化されることが期待される。個々の従業員のニーズに合わせた最適化が実現し、一人ひとりが最も効率的かつ快適に働けるようになることが期待される。マイルストーンは、ワークライフハーモニーの向上と生産性の大幅な改善である。この技術導入により、明確なROIが得られると予想され、それは生産性の向上のみならず、従業員の満足度や健康状態にも肯定的な効果をもたらすと見込まれる。結果として、企業や組織がこの技術へのさらなる投資を積極的に行うことが期待される。

2050年の展望では、「AI感情認識とAI駆動の業務自動化」技術が高度に最適化され、完全に統合されると考えられる。個々の従業員の感情や状態に合わせた自動調整により、最高のパフォーマンスを発揮できるようになる。目標は、この技術が普遍的に実現し、個々の従業員が心地よく、効率的に働ける環境が広がることである。この進歩により、持続可能なワークライフハーモニーとパフォーマンス最適化を実現する「新しい働き方」が標準となることが期待される。

## おわりに

### 「リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会」の実現と技術ロードマップ

本稿では、社会像3「リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会」の実現に向けた議論を行った。本テーマに関与する7つの部門代表から成るメンバーがワークショップを通じて反復的に討議し、2050年に実現を目指す社会像とそれを支える技術ロードマッ

プを策定した。この社会像の具現化には、各部門の専門分野が融合し、新たな技術領域を創出することが求められる。希望する社会像を三つのカテゴリーに分け、それぞれから導き出される包括的な課題を細分化し、解決策を明らかにした。その上で、日本機械学会のメンバーが対応可能な技術を中心に、合計12の技術について議論を深めた。これらの技術項目には、2023年現在から短期的には2025年、そして中・長期的には2030年と2050年の技術的展望が設定され、達成すべき目標とマイルストーンが具体化された。

#### 参考文献

- (1) 内閣府ムーンショット目標1「2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub1.html> (参照日 2023年 10月 1日)。
- (2) Yokoe,K.,Aoyama,T.,Fujishiro,T.,Takeuchi,M. and Hasegawa,T., An immersive micro-manipulation system using real-time 3D imaging microscope and 3D operation interface for high-speed and accurate micro-manipulation, ROBOTMECH Journal,<https://doi.org/10.1186/s40648-022-00228-6>
- (3) 2023年までの日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会投稿キーワード統計については、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 2024 (宇都宮)にて公開予定。
- (4) 内閣府 Society 5.0, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/) (参照日 2023年 10月 1日)。
- (5) Apple vision pro, <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>, Meta quest3 <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/> (参照日 2023年 10月 1日)。
- (6) 慶応大学プレスリリース「遠くにも温もりや冷たさを伝えるウェアラブルインタフェース「サーモグローブ」を開発」, <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/files/2017/9/29/170929-2.pdf> (2017年 9月)。
- (7) 東工大ニュース「多成分調合型の嗅覚ディスプレイを用い、多様な香りを再現」, <https://www.titech.ac.jp/news/2022/063555>(2022年 9月)。
- (8) neuralink インプラント型脳インタフェース, <https://neuralink.com/> (参照日 2023年 10月 1日)。
- (9) 新井寛,ものづくりを取り巻く環境とデジタルツイン活用の議論,日本機械学会誌, Vol.124,No.1231 (2021), pp.4-5.
- (10) 河野大輔,計測とデジタルツインの関係から探る将来像,日本機械学会誌,Vol.124,No.1231 (2021), pp.14-17.
- (11) 安藤知治,工作機械におけるデジタルツインの活用,日本機械学会誌,Vol.124,No.1231 (2021), pp.18-21.
- (12) 藤田智哉,高橋宣行,FA-IT 統合ソリューションによる工作機械デジタルツインの実現,日本機械学会誌,Vol.124, No.1231 (2021), pp.23-25.
- (13) X.Liu,D.Jiang,B.Tao,F.Xiang,G.Jiang,Y.Sun,J.Kong,G.Li,A systematic review of digital twin about physical entities,virtual models,twin data,and applications,Advanced Engineering Informatics,Vol.55,(2023),doi.org/10.1016/j.aei.2023.101876.
- (14) 石本 浩気,加藤 優貴,北崎 充晃,バーチャルリアリティソーシャルネットワークサービス VRChatにおける身体所有感実験環境の構築と検証,基礎心理学研究,Vol.40,No.2,(2021),pp.121-134.
- (15) 早川 裕彦,大脇 理智,石川 琢也,南澤 孝太,田中 由浩,駒崎 掲,鎌本 優,渡邊 淳司,高実在感を伴う遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア「公衆触覚伝話」の提案,日本バーチャルリアリティ学会論文誌,Vol.25,No.4,(2020),pp.412-421.
- (16) 高橋克巳,デジタルツインコンピューティングの倫理的・社会的課題,応用物理,Vol.91,No.8,(2022),pp.484-490.
- (17) 遠隔手術ガイドライン,一般社団法人日本外科学会 遠隔手術実施推進委員会 編 (2022). <https://jp.jssoc.or.jp/uploads/files/info/info20220622.pdf>(参照日:2023年 10月 13日)。
- (18) 堀部政男,JIPEEC,プライバシー・バイ・デザイン,日経 BP,(2012).
- (19) Ann Cavoukian,"Privacy by Design:The 7 Foundational Principles,"Office of the Information and Privacy Commissioner of Ontario(2009). <https://www.ipc.on.ca/wp-content/uploads/Resources/7foundationalprincip>

- les.pdf(参照日:2023年10月13日).
- (20) 千川尚人, エッジコンピューティング, 映像情報メディア学会誌, Vol.73, No.4, (2019), pp.707-709.
- (21) 平成28年版情報通信白書 第1部 第3節 人工知能(AI)の進化が雇用等に与える影響, 総務省  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/n4300000.pdf> (参照日 2023年10月10日).
- (22) 横山 美和, AIと人種・ジェンダー問題についてアメリカから学べること, 産学官連携ジャーナル, 2021年12月.  
[https://www.jst.go.jp/tt/journal/journal\\_contents/2021/12/2112-02\\_article.html](https://www.jst.go.jp/tt/journal/journal_contents/2021/12/2112-02_article.html)(参照日 2023年10月10日).
- (23) 小林雅一, AIビジネスの本命「自動運転」が、「生成AI」のようにスピーディに普及しないわけ, 生成AIの最前線・3, DIAMOND online.  
<https://diamond.jp/articles/-/328279> (参照日 2023年10月10日).
- (24) Mihály Héder, "Explainable AI: A Brief History of the Concept". ERCIM News, No.134(2023), pp.9-10.  
<https://ercim-news.ercim.eu/images/stories/EN134/EN134-web.pdf>(参照日 2023年10月10日).
- (25) Giulia Vilone, Luca Longo, "Notions of explainability and evaluation approaches for explainable artificial intelligence". Information Fusion, Vol.76(2021), pp.89-106. doi:10.1016/j.inffus.2021.05.009.
- (26) AI原則実践のためのガバナンス・ガイドライン ver.1.1, 経済産業省,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/ai\\_shakai\\_jisso/pdf/20220128\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/ai_shakai_jisso/pdf/20220128_1.pdf)(参照日 2023年10月10日).
- (27) Sachs, J.D., From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals. The Lancet, 379(9832), (2012), 2206-2211.
- (28) Ekeland, A.G., Bowes, A., & Flottorp, S., Effectiveness of telemedicine: A systematic review of reviews, International Journal of Medical Informatics, (2010).
- (29) Mondal PP, Galodha A, Verma VK, Singh V, Show PL, Awasthi MK, Lall B, Anees S, Pollmann K, Jain R. Review on machine learning-based bioprocess optimization, monitoring, and control systems. Bioresour Technol. 2023 Feb;370:128523. doi: 10.1016/j.biortech.2022.128523. Epub 2022 Dec 22. PMID: 36565820.
- (30) Videtič Paska A, Kouter K. Machine learning as the new approach in understanding biomarkers of suicidal behavior. Bosn J Basic Med Sci. 2021 Aug 1;21(4):398-408. Doi: 10.17305/bjbm.2020.5146. PMID: 33485296; PMCID: PMC8292863.
- (31) 早野 順一郎, 生体信号計測・解釈研究のこれまでとこれから, 生体医工学, 2021, Annual59巻, Abstract号, p.214, 公開日 2021/10/17, Online ISSN 1881-4379, Print ISSN 1347-443X, <https://doi.org/10.11239/jsmbe.Annual59.214>,
- (32) Chen S, Bashir R. Advances in field-effect biosensors towards point-of-use. Nanotechnology. 2023 Sep 25;34(49):492002. Doi: 10.1088/1361-6528/acf3f0. PMID:37625391; PMCID:PMC10523595.
- (33) Ali A, Ashfaq M, Qureshi A, Muzammil U, Shaoukat H, Ali S, Altabey WA, Noori M, Kouritem SA. Smart Detecting and Versatile Wearable Electrical Sensing Mediums for Healthcare. Sensors (Basel). 2023 Jul 21;23(14):6586. Doi: 10.3390/s23146586. PMID: 37514879; PMCID: PMC10384670.
- (34) Li Y, Li Y, Zhang R, Li S, Liu Z, Zhang J, Fu Y. Progress in wearable acoustical sensors for diagnostic applications. Biosens Bioelectron. 2023 Oct 1;237:115509. Doi: 10.1016/j.bios.2023.115509. Epub 2023 Jul 5. PMID:37423066.
- (35) Song Z, Zhou S, Qin Y, Xia X, Sun Y, Han G, Shu T, Hu L, Zhang Q. Flexible and Wearable Biosensors for Monitoring Health Conditions. Biosensors (Basel). 2023 Jun 7;13(6):630. doi: 10.3390/bios13060630. PMID:37366995; PMCID:PMC10296135.
- (36) Ahmed M, Dar AR, Helfert M, Khan A, Kim J. Data Provenance in Healthcare: Approaches, Challenges, and Future Directions. Sensors (Basel). 2023 Jul 18;23(14):6495. doi: 10.3390/s23146495. PMID: 37514788; PMCID: PMC10384601.
- (37) <https://www.ppc.go.jp/enforcement/infoprovision/EU/> (個人情報保護委員会 国際関係 諸外国・地域の法制度 EU(外国制度))
- (38) Jeyanthi, P., Analysis of heart rate variability and skin conductance response for wearable health monitoring devices. Procedia Computer Science, (2017), 115, 34-41.
- (39) Chen, M., Ma, Y., Song, J., & Lai, C. F., Skin resistance measurement using a wearable bioimpedance sensor. In Proceedings of the 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (2019), pp. 2299-2302.
- (40) Wang, X., Gu, Y., Xiong, Z., Cui, Z., Zhang, T., & Silk, A., Carbon nanotube-based three-dimensional and flexible electronics. Advanced Materials, (2015), 27(45), 7094-7101.
- (41) Someya, T., Bao, Z., & Malliaras, G. G. The rise of plastic bioelectronics. Nature, (2016), 540(7633), 379-385.
- (42) Hamel, G., & Valikangas, L., The quest for resilience. Harvard Business Review, (2003), 81(9), 52-63.
- (43) Chesbrough, H., Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology. Harvard Business Press, (2003).
- (44) Ekman, P., An argument for basic emotions. Cognition & Emotion, (1992), 6(3-4), 169-200.

- (45) Picard, R. W., Affective computing. MIT Press, (1997).
- (46) D'Mello, S., & Kory, J., A review and meta-analysis of multimodal affect detection systems. ACM Computing Surveys (CSUR), (2015), 47(3), 43.
- (47) Liu, D., & Zhang, D., A survey of affective computing and its applications. IEEE Transactions on Affective Computing, (2017), 8(2), 148-166.
- (48) McKeown, G., & Valstar, M. F., Fully automatic recognition of the temporal phases of facial actions. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), (2012), 42(1), 28-43.

ロボティクス・メカトロニクス部門

<正員>

山下 智輝

◎(株)前川製作所 技術企画本部 技術研究所 知能システム技術グループ 主任研究員

◎専門:食品ロボット、画像認識、人工知能

生産加工・工作機械部門

<正員>

佐藤 隆太

◎名古屋大学大学院 工学研究科 オークマ工作機械工学寄附講座 特任教授

◎専門:生産工学、数値制御工作機械、運動制御

情報・知能・精密機器部門

<フェロー>

五十嵐 洋

◎東京電機大学 工学部 教授

◎専門:ヒューマンインタフェース、人工知能

設計工学・システム部門

<正員>

木下 裕介

◎東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻 准教授

◎専門:シナリオ設計、ライフサイクル工学、設計工学

計算学部部門

<正員>

下山 幸治

◎九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 教授

◎専門:流体工学、設計工学、データ科学

生産システム部門

<正員>

小野里 雅彦

◎北海道大学大学院 情報学科研究院 システム情報科学部

◎専門:生産システム工学

バイオエンジニアリング部門

<正員>

正本 和人

◎電気通信大学 脳・医工学研究センター 教授

◎専門:機械工学、生体医工学、生体計測、脳微小循環

宇宙工学部門

<正員>

中村 和行

◎(株)テクノソルバ 代表取締役

◎専門:宇宙機構造、宇宙用展開構造、構造解析

技術ロードマップ委員会 委員長

<フェロー>

山崎美稀

◎(株)日立ハイテク ものづくり・技術統括本部 主管技師

◎専門:環境配慮材料設計・システム設計、製品企画論、技術開発戦略策定