

1.3 今後の展望・方向性

1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

「1.2.2 研究開発の動向」に挙げたシステム・情報科学技術分野の動向を大局的に捉え、かつ、区分ごとの歴史背景と潮流を踏まえ、今後重要となる研究の展望と方向性を以下に区分ごとに述べる。

（1）人工知能・ビッグデータ

1.2.2節（1）で述べたように、この区分の研究開発の方向性は、大きく「第4世代AI」と「信頼されるAI」という2つの潮流で捉えられる。それぞれの潮流において重要になる研究開発課題は以下の通りである。

第1の潮流「第4世代AI」は、第3世代AIの中核である深層学習の抱える問題点（大規模なデータと計算資源が必要なこと、想定外の状況に臨機応変に対応できないこと、説明や意味など高次の処理ができていないこと）を克服する新しいAIのアーキテクチャーを探究する方向性である。大規模学習によって、マルチモーダル性と汎用性を大きく向上させた基盤モデル（Foundation Model）が出現し、大きく注目されている。しかし、この力任せのアプローチは人間の知能とは異なる方向に向かうように思える。人間は大量の教師データがなくとも発達・成長し、学習した結果を状況に応じて臨機応変に応用できる。人間の知能から学ぶアプローチとして、即応的な知能（システム1）と熟考的な知能（システム2）から成る二重過程モデルや、身体性や環境とのインタラクションを通じた予測誤差最小化原理に基づく発達・創発モデルが注目され、研究が活発化しつつある。このような基盤モデル、二重過程モデル、発達・創発モデルを中心とした「知能モデルの解明・探究」が、「第4世代AI」に向けた重要な研究開発課題である¹⁾。

第2の潮流「信頼されるAI」については、AIに対する社会からの要請が原則から実践フェーズへ移行する中で、技術開発だけでは必ずしも要請を十分に充足できない問題が顕在化してきた。AIの信頼性だけでなく、社会におけるトラスト（信頼）を、対象真正性、内容真実性、振る舞い予想・対応可能性といった多面から捉えて複合的に取り組むことが必要である。そのため、技術開発だけでなく制度設計や人文・社会科学の知見も結集した総合知による「デジタル社会におけるトラスト形成」が、今後重要な研究開発課題になる²⁾。

「AI戦略2019」においても中核的研究開発課題に設定された「信頼されるAI」が依然重要であることに加えて、「AI戦略2022」では差し迫った危機への対処や社会実装の推進などAI活用が強調されている。上述の「第4世代AI」や「信頼されるAI」の成果が、社会のさまざまな場面で活用されるためには、社会スケールの計算アーキテクチャー、それを支えるデータ基盤・データエコシステム、AIエージェント分散協調メカニズムなどを含む「社会システムを支えるAIアーキテクチャー」が、もう一つの重要な研究開発課題になる。

（2）ロボティクス

研究開発のトレンドは「技術の発展」「実社会への浸透」「人間との共生」という3つの観点で捉えることができる。画像認識や学習機能の実装によって産業用ロボットは工場内の定型的な作業を正確に休まず実施できるレベルに発展し、人間や動物の運動能力を模倣するロボットも登場した。この流れの中で基盤となる技術として、細胞などの生体材料を使ったウェットな「バイオハイブリッドロボット」が新たな潮流として注目される。また、生物が進化の過程で獲得した感覚と運動に関する無意識プロセスの解明など「身体性に宿る知能」もロボティクス研究の新潮流として重要である。

一般社会や家庭で働く知能ロボットの研究開発も盛んになり、手術支援ロボットやロボット掃除機など技術の発展は実社会へのロボットの浸透を促した。工場から飛び出し、人と一緒に働くコワーキングロボット（自動調理ロボット、食器仕分け自動化ロボット、惣菜盛付自動化ロボット等）に見られるように「人間との共生」という視点からは、これまで以上に人間との相互作用が重要になる。開かれた環境に柔軟に適応するロボティクス学理基盤の創出³⁾に加えて、インタラクションやロボットの研究から人間理解を深化させ、新たなインタ

クション技術の創出へとつなげていく「人間中心インタラクション」を国として重点的に取り組むべき研究開発課題として挙げた。

（3）社会システム科学

この区分における3つの技術発展のトレンド「システム化・複雑化」「ソフトウェア化・サービス化」「スマート化」はそれぞれ「安定化」「全体最適化」「社会革新」の方向への発展が期待される。社会システムアーキテクチャー、メカニズムデザイン、計算社会科学など基本的な研究開発領域は変化が少ないが、マッチング理論やオークション理論をビジネスに利用しようという動きが見られる。また、サービスサイエンスは観光・ホスピタリティなど適用範囲を広げている。

デジタル変革は一番変化が大きい研究開発領域で、Web3.0やメタバースなどのキーワードが「経済財政運営と改革の基本方針2022」で取り上げられ、省庁での研究会開催や関連業界団体の複数発足など大きな動きが見られる。メタバースを新しい社会システムとして社会課題解決に活用するため、メタバースでの人間の認知・行動の理解と基本ルール作りに関する研究開発を進める必要がある。国が重点的に取り組むべき研究開発課題として「社会課題解決に向けたメタバースデザイン」を挙げた。

また、Society 5.0の実現に向けては、モノやサービス、システムにITを取り込むことによる「全体最適化」の方向性が極めて重要である。これには、技術のみならずメカニズムデザインや計算社会科学といったデザインのためのフレームワーク設定も求められる。社会課題解決を支援するため、IoT等のセンシング技術で取り込んだ実際の社会活動データから構築された社会モデルを利用して、社会現象を模擬する社会シミュレーターの実現が期待される。このような研究開発課題として「社会デジタルツイン」を挙げた。

（4）セキュリティ・トラスト

「インフラ」「プラットフォーム」「サービス」という3つの大きな流れが社会に広がる中、セキュリティとトラストの重要性が高く認識されるようになってきた。人への攻撃（フィッシング、内部不正等）や製造業への攻撃（マルウェア、ランサムウェア）などサイバー攻撃が高度化・激化しており、重要インフラやサプライチェーンへの攻撃など直接の被害だけでなく2次被害・3次被害も含めて深刻化している。サイバーセキュリティがこれまで以上に重要になってきたことに加えて、サイバーフィジカルシステムといった新しい利用形態の登場でIoTシステムのセキュリティにも注意を払う必要が出てきた。ゼロトラストセキュリティ等の技術が強化される中、人間の脆弱性をつく攻撃が高度化している点も見逃せない。このような人間の認知や思考・意思決定などに影響を与える攻撃からの防御に関する研究開発を進める「コグニティブセキュリティ」が重要である。

また、セキュリティやプライバシーの保護とデータ利活用の両立には、個人情報漏えい対策やコンテンツの不正使用・操作対策のためのデータ・コンテンツのセキュリティを考えることが重要となる。加えて、近年、社会への影響度の点で無視できないのが、情報システムや情報サービスにおける安心・信頼の概念である「トラスト」である。先述の通り、AIの信頼性確保から社会におけるトラスト形成に向けた「デジタル社会におけるトラスト形成」が今後重要となる方向性である。

（5）コンピューティングアーキテクチャー

この区分における科学技術および応用の方向性は、連携の広がり観点から「一つのコンピューター」「複数のコンピューター」「インターネット」「モバイル」「森羅万象」という大きな5つの流れで理解される。一台のコンピューターから始まり、複数のコンピューターが接続されるようになり、インターネットの普及とモバイル通信ネットワークによって利用者もサービスも爆発的に増大してきた。これまでコンピューターはムーアの法則に支えられ着実に性能向上してきたが、2003年頃にCPUクロック速度が上限に達し、2004年頃からはマルチコアが主流となった。このようなムーアの法則による性能向上の限界や、深層学習に代表されるような

ワークロードの変化などにより、新たなコンピューティングアーキテクチャーへの期待が高まっている。

また、インターネットの社会浸透を背景にクラウドコンピューティングやIoTへの期待が高まり、処理内容に応じて柔軟な構成を実現するデータ処理基盤やIoTアーキテクチャーの重要度が増してきている。Society5.0の実現に向けて、スマートフォンなどのデバイスとクラウドコンピューティングの組み合わせによりさまざまなサービスを実現するデジタル社会基盤の構築も求められる。一方で、ソフトウェアの世界ではアルゴリズムの独占は難しく、学習や分析に用いるデータが競争力の源泉となることが顕在化してきている。経済安全保障の観点からも、資源であるデータを活用することが産業上の重要課題である。本俯瞰報告書では「データ共有」を国として重点的に取り組むべき研究開発課題として挙げた。

（6）通信・ネットワーク

「超多数・超低遅延・超高速大容量・超低消費電力」「通信と処理の融合、柔軟性・拡張性の向上」「ネットワークサービスの高度化・複雑化」の3つの流れの中で、近年 Hyper-Giants によるネットワークのプライベート化を軽減するための新たなネットワークアーキテクチャーの検討が進められている。通信基盤技術としては、5Gの次の世代に相当する Beyond 5G (6G) の実現に向けた研究開発が活発化しており、量子通信ネットワークも古典セキュリティとの融合・衛星系を含むグローバルネットワーク構築などの実用化に向けた検討が進んでいる。

とりわけ通信と計算処理を融合する計算基盤としてのネットワークへと向かう研究開発が活発化しており、計算リソースを含めたマルチドメイン・マルチレイヤオーケストレーションの検討も進んでいる。国として重点的に取り組むべき研究開発課題に「ネットワークのスマート化」を挙げた。

（7）数理科学

数理科学は、科学的・社会的課題に対して基盤的役割を担っている。その役割は本質的に内在する抽象性や普遍性、演繹的思考と紐付いた論理性に起因する。社会との関係から「モデル基盤、データ駆動、モデル選択」「計算根拠、評価、設計」の3つの流れに分けるが、そこには新たな演繹的研究も生まれる。

「モデル基盤、データ駆動、モデル選択」：現象の機構の数理的解明と現象の数理的予測を行う数理モデリングが理学・医学・工学から社会人文科学までの広大な領域に利用されている。また、数理モデルをコンピューター上で計算するための数値解析は不確実性とも結びつき、現象の背後にある普遍的なメカニズムを理解するためのデータ解析の重要度も高まっている。そこではトポロジーや表現論などがかつて予見されなかった活躍の場を得ている。

「因果と最適意思決定」：人間の合理的な意思決定を支援するための予測・最適化は社会問題解決に有効な手段であるが、日本では利活用が限定的である。因果関係の導出を軸にした因果推論は経済・金融・保険での実践的利用が多く、最適なパラメータの取り出しなどと合わせて意思決定の根拠に利用できると期待される。これらの共通部分にある「最適化」を国として重点的に取り組むべき研究開発課題として挙げた。それは群論、数理物理や調和解析などともつながっている。

「計算根拠、評価、設計」：計算可能性や複雑性などを評価する計算理論、機械学習やCPSなどのシステムを理解するシステム設計はDXの進む社会には必須である。ここには、圏論のような抽象的手法の有用性が広がっている。

1.3.2 日本の研究開発の現状と課題

前節までにシステム・情報科学技術分野を7つの区分に分けてそれぞれの分野の動向を俯瞰し、社会・経済の動向も含めた日本の置かれた環境、現在の日本の取り組み状況やポジションについて述べた。ここでは研究開発領域の発展の方向性を総合的に精査し、国として重点的に取り組むべき研究開発課題を選定するための視点について紹介する。

本俯瞰報告書では各俯瞰区分の研究開発領域を

- ・ビジョン（1.1.1 社会の要請、ビジョン）
- ・トレンド（1.1.2 科学技術の潮流、変遷）
- ・選定基準（1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図））
- ・社会環境・世界情勢の変化（1.2.1 社会・経済の動向、1.2.4 主要国の科学技術・研究開発政策の動向）
- ・CRDS内外有識者との議論（付録2 検討の経緯）

の視点から総合的に精査した。その際に、現時点の状況だけでなく、3つのビジョン/トレンドに沿ってこれまで実行されてきた国の戦略・プログラムを通して、継続的に強みが育成・蓄積されてきていることを踏まえ、ビジョン実現に向けて、今後さらに推進すべきと考えられるものを重視した。

研究開発領域の発展の方向性は世界各国が競って取り組んでいる方向性でもあり、その中で日本が国際競争力を構築・維持していくため、あるいは、国として自立した安全安心な社会を維持していくためには、単に技術発展の方向性だから取り組むというのではなく、国際競争力を構築するシナリオを持った研究開発戦略が必要である。本俯瞰報告書では国際競争力の確保に向けたシナリオとして4つの基本的な考え方を示し、これらが国として重点的に取り組むべき研究開発課題のそれぞれとどのように対応しているかを表1-3-1にまとめた。各テーマの内容やトレンドの中での位置付けは1.3.3節にまとめる。

（1）強い技術を核とした骨太化

既に保有している、あるいは、育ちつつある強い技術を足掛かりとして、技術の国際競争力を骨太化する作戦・シナリオである。例えば、最先端研究開発支援プログラムFIRST、革新的研究開発推進プログラムImPACT、戦略的創造研究推進事業CREST・ERATO等で生み出した中核技術に、周辺技術をかけあわせて、強みを出させる技術領域を拡大・強化するといった作戦・シナリオがその一例である。

（2）強い産業の発展・革新の推進

既に保有している、あるいは、育ちつつある強い産業を足掛かりとして、国際競争力のある技術群を育てる作戦・シナリオである。日本に強みのある産業において、現存する課題や将来直面する課題を見極め、それらを解決するための技術開発を推進し、その成果を産業に投入していくことで、その産業とそれを支える技術群の競争力を育成・拡大する。その際に、インクリメンタルな課題解決・技術改良だけでなく、サービス産業の生産性向上も含め、国際競争力を維持できるように産業構造・産業基盤を革新するような技術も、視野に入れて取り組むことが必要である。

（3）社会課題の先行解決

課題先進国として、先端技術の社会受容性で先行できることを生かして、国際競争力を構築する作戦・シナリオである。日本は課題先進国と言われ、特に人口減少・少子高齢化の問題が深刻なものとして認識されているとともに、震災を通して環境問題・省エネ対応等への取り組み意識が高い。このような日本の状況は、人手作業の自動処理への置き換えや、環境問題・省エネ対応等に伴う生活パターンの変化等への抵抗感が他

国に比べて少ないという点で有利である。つまり、この種の社会課題解決のための先端技術導入・環境変化に対する社会受容性の面で、他国に先行できるチャンスがある。そして、社会課題の先行解決ができれば、それを日本に遅れて同様の社会課題に直面していくであろう他国に事業展開していくことが狙える。

(4) 経済安全保障上の重要基盤技術の確保

経済安全保障上の重要基盤技術については、国として重点的・継続的に研究開発を促進し、保有・強化しなくてはならないという考え方である。特定の先端技術やその研究開発に使われる情報が不正に外部で使われた場合や、その技術を使った物質やサービスを外部に頼ることで外部からの行動により安定的に使えなくなった場合には、国と国民の安全が脅かされる恐れがある。このような懸念が想定される先端技術は、経済安全保障推進法では「特定重要技術」として、先端的で重要な技術の研究開発を進め、その成果を適切に活用することが示されている。特定重要技術研究開発基本方針に挙げられた20の技術分野のうち本俯瞰分野に関連の深い技術分野として「③人工知能・機械学習技術」「④先端コンピューティング技術」「⑤マイクロプロセッサ・半導体技術」「⑥データ科学・分析・蓄積・運用技術」「⑧ロボット工学」「⑨量子情報科学」「⑪脳コンピュータ・インターフェース技術」「⑬高度情報通信・ネットワーク技術」「⑭サイバーセキュリティ技術」がある。

表 1-3-1 国として重点的に取り組むべき研究開発課題と4つのシナリオ

	国として重点的に 取り組むべき 研究開発課題	4つのシナリオ			
		(1) 強い技術を 核とした骨太化	(2) 強い産業の 発展・革新の推進	(3) 社会課題の 先行解決	(4) 経済安全保障 上の重要基盤技術 の確保
デジタル安全 保障に対する 総合知による 取り組み	デジタル社会におけるト ラスト形成	●		●	●
	コグニティブ セキュリティ			●	●
	データ共有		●		●
スマート化・ 自律化の根本 である知能の 原理探求	知能モデルの解明・探 究 / 身体性に宿る知能	●	●		
	人間中心 インタラクション	●		●	
	バイオハイブリッド ロボット	●	●		
	最適化	●			●
サステナブル 社会のための ICT 基盤	社会課題解決に向けた メタバースデザイン			●	●
	ネットワークの スマート化	●	●		●
	社会デジタルツイン				●
	社会システムを支える AI アーキテクチャー	●			●

1.3.3 わが国として重要な研究開発

①重要な研究開発

本項では、国内外の社会・経済の動向や研究開発の現状、今後の展望などを俯瞰した中から見えてきた、わが国として今後重要となる研究開発について記述する。日本・世界の研究開発の現状とわが国の課題を見据え、1.3.2節の考え方に基づいて国として重点的に取り組むべき11の研究開発課題を抽出した。これらの研究開発課題は図1-3-1に示した通り、3つのビジョンに向かう3つのトレンドの中、近年とりわけ重要度が高まっている3つの潮流に分類できる。

「(ビジョン3) 社会課題解決と人間中心社会の実現」に向かう「(トレンド3) 社会的要請との整合」の中では経済安全保障の視点や国のAI戦略における信頼されるAIの重視などを受けた「デジタル安全保障に対する総合知による取り組み」が求められる。「デジタル社会におけるトラスト形成」「コグニティブセキュリティ」「データ共有」といった研究開発課題が含まれる。

「(ビジョン2) データ駆動型・知識集約型の価値創造」に向かう「(トレンド2) あらゆるもののスマート化・自律化」の中では応用の進むAIやサービスロボットを基礎づける学理基盤の構築や数理的アプローチを含む「スマート化・自律化の根本である知能の原理探求」への期待が高まっている。国として重点的に取り組むべき研究開発課題として「知能モデルの解明・探究/身体性に宿る知能」「人間中心インタラクション」「バイオハイブリッドロボット」「最適化（離散・非線形）」が含まれる。

「(ビジョン1) サイバー世界とフィジカル世界の高度な融合」に向かう「(トレンド1) あらゆるもののデジタル化・コネクティッド化」の中ではあらゆる社会システムの基盤となる「サステナブル社会のためのICT基盤」が重要となる。「社会課題解決に向けたメタバースデザイン」「社会デジタルツイン」「ネットワークのスマート化」「社会システムを支えるAIアーキテクチャー」を国として重点的に取り組むべき研究開発課題に挙げた。

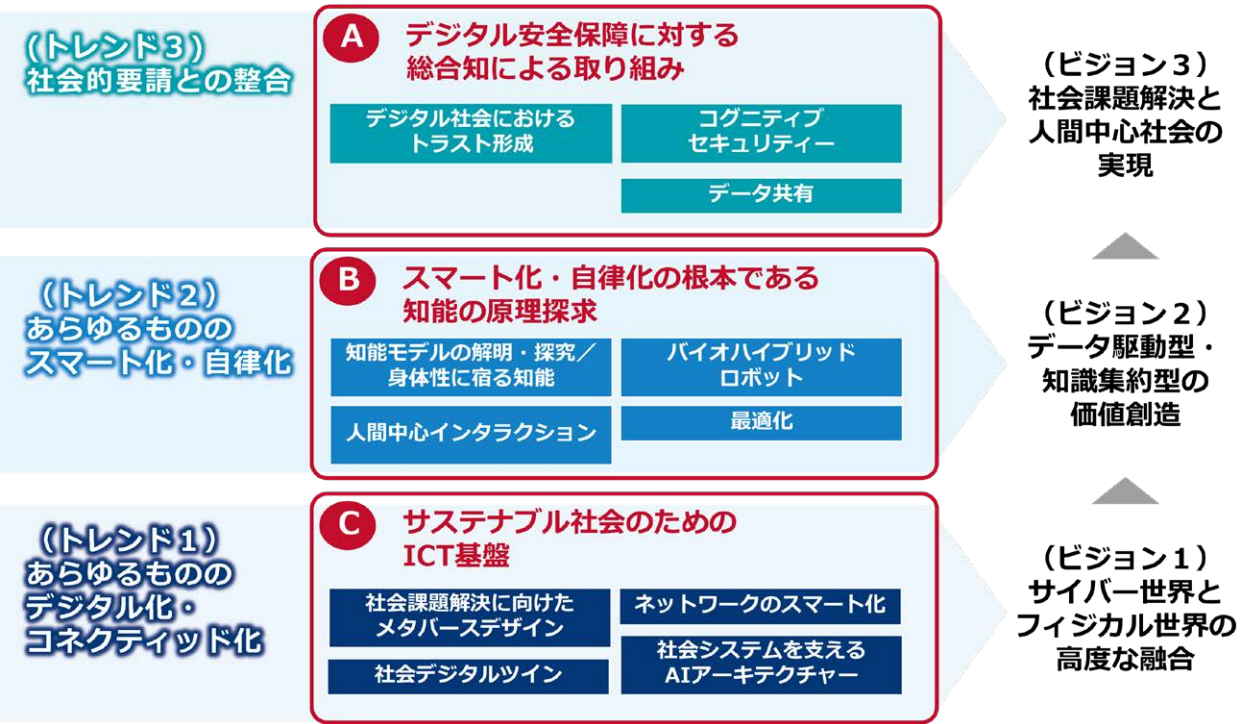


図1-3-1 3つの技術トレンドと国として重点的に取り組むべき研究開発課題の関係

(1) デジタル社会におけるトラスト形成

デジタル化の進展に伴い、社会におけるその働きがほころびつつあるトラスト（信頼）の確保を目指す総合的な研究開発テーマである。技術開発や制度設計による社会的トラストのよりどころの再構築、それが社会の中で有効に機能するように社会・人間による受容性、具体的なトラスト問題の分析・検証など、幅広い学際的な研究開発が必要である。このテーマは「(シナリオ1) 強い技術を核とした骨太化」「(シナリオ3) 社会課題の先行解決」「(シナリオ4) 経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.1.9 社会におけるAI」「2.3.4 メカニズムデザイン」「2.4.6 データ・コンテンツのトラスト」「2.4.7 社会におけるトラスト」を参照のこと（対応する戦略プロポーザル：「デジタル社会における新たなトラスト形成」²⁾）。

(2) コグニティブセキュリティ

人間の認知や思考、意思決定などに悪影響を与える攻撃からの防御に関する研究開発テーマである。フィッシングやフェイクニュース、デマなどは個人から国家まで幅広い影響を与えており、近年では米国DARPAでも安全保障上重要と考え、取り組みを開始している。このテーマは「(シナリオ3) 社会課題の先行解決」「(シナリオ4) 経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.1.5 人・AI協働と意思決定支援」「2.4.3 データ・コンテンツのセキュリティ」「2.4.4 人・社会とセキュリティ」を参照のこと。

(3) データ共有

政府や行政機関が持つビッグデータの流通・共有を円滑に行うためのデータベース基盤の構築を目指すテーマである。共通語彙やAPI整備など技術面の他、プライバシーや情報セキュリティなど法制度やガイドラインなどの課題解決も求められる。このテーマは「(シナリオ2) 強い産業の発展・革新の推進」「(シナリオ4) 経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.3.1 デジタル変革」「2.3.3 社会システムアーキテクチャー」「2.5.4 データ処理基盤」を参照のこと。

(4) 知能モデルの解明・探求/身体性に宿る知能

現在の深層学習の課題を克服し、人間と親和性が高く、実世界で発達・成長する、新しいAIの理論・アーキテクチャーにつながる研究開発テーマである。1.3.1 節(1)で述べたように、大規模学習による基盤モデル、即応型（深層学習）と熟考型（知識・記号推論）を融合した二重過程モデル、身体性や環境インタラクションに基づく発達・創発モデルなどのアプローチが進められている。これには、計算脳科学や認知発達ロボティクスのような人間の知能に関する研究成果・知見が有用であることに加えて、1.3.1 節(2)で述べたような、生物が進化の過程で獲得した感覚と運動に関する無意識プロセスの解明などもヒントになる。人工知能研究とロボット研究の融合的な推進も重要になる。このテーマは「(シナリオ1) 強い技術を核とした骨太化」「(シナリオ2) 強い産業の発展・革新の推進」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.1.1 知覚・運動系のAI技術」「2.1.2 言語・知識系のAI技術」「2.1.7 計算脳科学」「2.1.8 認知発達ロボティクス」「2.2.6 自律分散システム」を参照のこと（対応する戦略プロポーザル：「第4世代AIの研究開発-深層学習と知識・記号推論の融合-」¹⁾）。

(5) 人間中心インタラクション

人間は他の人や機械、あるいは環境などとインタラクション（相互作用）することによってさまざまな知的、あるいは身体的な活動を行っている。このインタラクションをより高度に、創造的にするためには、情報技術によって得られるデータも利用して人間そのものの行動や認知に関する理解を深め、その結果を人工知能やインターフェース機器といった情報技術の向上にフィードバックするという学術のインタラクションが必要である。

情報技術と人間理解に基づくことによって、働くことや学ぶことといった日常生活に加えて、スポーツや芸術活動においても、より創造性の高い、それぞれの人に寄り添ったインタラクション環境が実現される。このテーマは「（シナリオ1）強い技術を核とした骨太化」「（シナリオ3）社会課題の先行解決」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.1.3 エージェント技術」「2.2.5 Human Robot Interaction」を参照のこと。

（6）バイオハイブリッドロボット

生体もしくは生体材料からできた部品と人工物からできた部品を組み合わせ、生体特有の運動や感覚といった機能をアクチュエーターやセンサーとして利用したロボットである。バイオハイブリッド・ロボットには、昆虫に小型のMEMSマシンを移植して電磁パルスで制御するDARPAの「Cyborg Insect」のように生体そのものを利用するものと、ラットの心筋で作ったアクチュエーターで遊泳するアカエイ型のロボット（ハーバード大学）のように生体の一部を部品として利用するものに大別される。生体の一部を利用した超高感度なタンパク質センサーの開発など医療応用も含む。このテーマは「（シナリオ1）強い技術を核とした骨太化」「（シナリオ2）強い産業の発展・革新の推進」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.2.2 生物規範型ロボティクス」を参照のこと。

（7）最適化

最適化はひろく社会において最適な行動や手段、設計などを定める指針を与えるための研究開発テーマである。社会問題解決に有効とされるが、日本では利活用が限られている。最適化問題は、制約条件や目的関数により離散と連続、線形と非線形などに大別される。特に、自然保護やナースケジューリングに用いられ、計算複雑性理論、組合せ論とも関連の深い離散最適化、幾何学や機械学習と関連の深い非線形最適化の重要度が高まっている。「（シナリオ1）強い技術を核とした骨太化」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.7.1 数理モデリング」「2.7.3 因果推論」「2.7.4 意思決定と最適化の数理」「2.7.5 計算理論」を参照のこと。

（8）社会課題解決に向けたメタバースデザイン

社会課題解決の取り組みを支援するために、誰もが安心・安全に参加できるメタバースの実現を目指す研究開発テーマである。没入感が高い新しい活動空間であるメタバースの利用が広がっている。アバターを使ったりリモート就労やリモート教育をはじめ、ひきこもり、地域活性化などの社会課題への活用もはじまっている。一方で、メタバースでのなりすましや誹謗・中傷、フェイクニュースなどは、個人から国家まで幅広く、これまで以上に影響を与える懸念がある。アバターを介した人の認知・行動、人・社会への影響の理解のための基礎研究、メタバースのルール設計、空間を構築するためのコンピューティング技術などの学際的研究により、誰もが安心・安全に参加できるメタバースの実現が期待されている。

（9）ネットワークのスマート化

高度化・複雑化するネットワークサービスの要求に合わせ、自動的・自律的にリソース配分や構成を決定し通信と処理を融合する計算処理基盤としてネットワークをスマート化する研究開発テーマである。通信と処理を融合する方向性で日本が先行する光電融合、ディスアグリゲートドコンピューティング、ローカル5G、情報指向ネットワークといった研究開発成果の強みを生かした、分散・非集中型アーキテクチャーによるサステナブルな社会インフラとしての将来ネットワーク基盤技術の確立が期待される。このテーマは「（シナリオ1）強い技術を核とした骨太化」「（シナリオ2）強い産業の発展・革新の推進」「（シナリオ4）経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.5.5 IoTアーキテクチャー」「2.5.6 デジタル社会基盤」「2.6.1 光通信」「2.6.5 ネットワークコンピューティング」「2.6.6 将来ネットワークアーキテクチャー」を参照のこと。

（10）社会デジタルツイン

社会課題解決を支援するために、IoT等のセンシング技術で取り込んだ実際の社会活動データを解析し構築された社会モデルを利用し、社会現象を模擬する社会シミュレーター実現に必要な研究開発テーマである。このテーマは「（シナリオ4）経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.3.2 サービスサイエンス」「2.3.3 社会システムアーキテクチャー」「2.3.5 計算社会科学」を参照のこと（対応する戦略プロポーザル：「進化的社会システムデザイン～自然科学と社会科学の連携協調による持続可能な社会の実現～」⁴⁾）。

（11）社会システムを支えるAIアーキテクチャー

AI技術がさまざまな社会システムに組み込まれて動作する世界（ユビキタスAI）において解決すべき技術課題として、多数のAIシステム/エージェント間の交渉・協調・連携や望ましいメカニズムデザイン、社会システムスケールの効率的な分散協調AIアーキテクチャー（AI向けチップから計算機クラスターやエッジ・クラウドまで総合的に捉えて）、それらを支えるデータ基盤・データエコシステム等に取り組む研究開発テーマ。このテーマは「（シナリオ1）強い技術を核とした骨太化」「（シナリオ4）経済安全保障上の重要基盤技術の確保」による推進を念頭におく。詳細は研究開発領域「2.1.3 エージェント技術」「2.1.5 人・AI協働と意思決定支援」「2.3.3 社会システムアーキテクチャー」「2.3.4 メカニズムデザイン」「2.5.4 データ処理基盤」を参照のこと。

②研究開発体制・システムのあり方

研究開発戦略の立案には、研究開発課題に合わせた推進方策やシステムを考える必要がある。本項では「社会デジタルツイン」「デジタル社会におけるトラスト形成」を例にその留意点を述べる。また、新たな方策としてオープンプラットフォームの構築と競技会型の研究開発の活用について戦略プロポーザル「リアルワールド・ロボティクス～開かれた環境に柔軟に適應するロボティクス学理基盤の創出～」³⁾の提案を紹介する。

（1）社会デジタルツイン

社会デジタルツインのように情報科学分野と社会科学分野が連携して推進する研究においては、着手できるところから始めるというアジャイル開発的なアプローチも重要である。現状得られるデータで描ける社会モデルを構築するところから始め、描けた社会モデルに基づいてシミュレーションを進め、精度を高めていく。その際、社会モデルの構築からシミュレーションに至るプロセスと、シミュレーション結果とをオープンにすることで、外在的な視座からのさまざまな指摘を受け、その指摘を試行しながら取り込んでいくことが重要である。データの偏りやELSI、少数派の扱いなど、人文科学的な問題意識や多くの意見をつまびらかにしつつ、それらの課題を一つ一つ、多くの関与者とともに整理していくことが必要である。

段階的に、あるいは並行して適用範囲を広げていき、スマートシティやシビックテックの取り組みとの連携といった、実社会での課題解決に向けた実験的活動にも取り組んでいくことが考えられる。それに向けたシミュレーションを行い、より多様なステークホルダーからのさまざまな指摘を受け止め、少しずつ改善していき、そのプロセスで関与者との対話を広げながら、社会の課題の解決に向けたシミュレーションとして、精度とともに社会の受容性も高めていく。また、計算機の中のシミュレーションでは発見できない思わぬ事象、ユーザー側の共感や忌避感などは、実際にユーザーの体験を共有していくことで顕在化する面があるだろう。試行錯誤を重ねながら実装されていくことが重要となる。

このように、社会科学の問題意識にのっとり、情報科学の手法でフィジカル世界をサイバーに投影し、シミュレーションを重ね、最適解を模索し、現実世界へのフィードバックを試みるそのプロセスと結果は常にオープンにして、社会科学や人文学、広くさまざまなステークホルダーの議論を喚起することが重要である。もちろん、初期の段階から一部でもステークホルダーを巻き込んだ取り組みの試行を奨励すべきである。

また、基本的な価値観の優先順位を切り替える場面もあり得る。例えば、コロナ禍の緊急事態下において、感染の拡大を把握、抑制する観点から個人の行動をトレースすることの可否を判断するように、どのような条件なら個人のプライバシー保護を緩めることができるか、というような社会における価値判断（比較衡量）を必要とする事例があり得る。規制の強化や緩和等、有事に備えた検討にあたって、社会デジタルツインはシミュレーションの予測結果というエビデンスを持って議論・合意形成のための素材を提供することができる。

これらのプロセスの中で、人間をどこまで客体化して扱い得るか、少数派への対応やセーフティネットによりどこまでカバーするか、自治体などの行政がカバーする範囲はどこまで、市民社会が担う範囲はどのあたりか、といった論点も深められていくことが期待される。

取り組みを加速するため、現実の社会の課題解決に向けたデジタルツインを推進するファンディングプログラムが設定され、新たな研究コミュニティの育成と社会課題解決型研究開発の双方の推進を図ることが重要である。プログラム設計においては、多様なステークホルダーの参画を促すことや、現実の課題を抱える自治体などの参画が重要であり、柔軟で機動的な運用が可能となるような設計に留意すべきである。

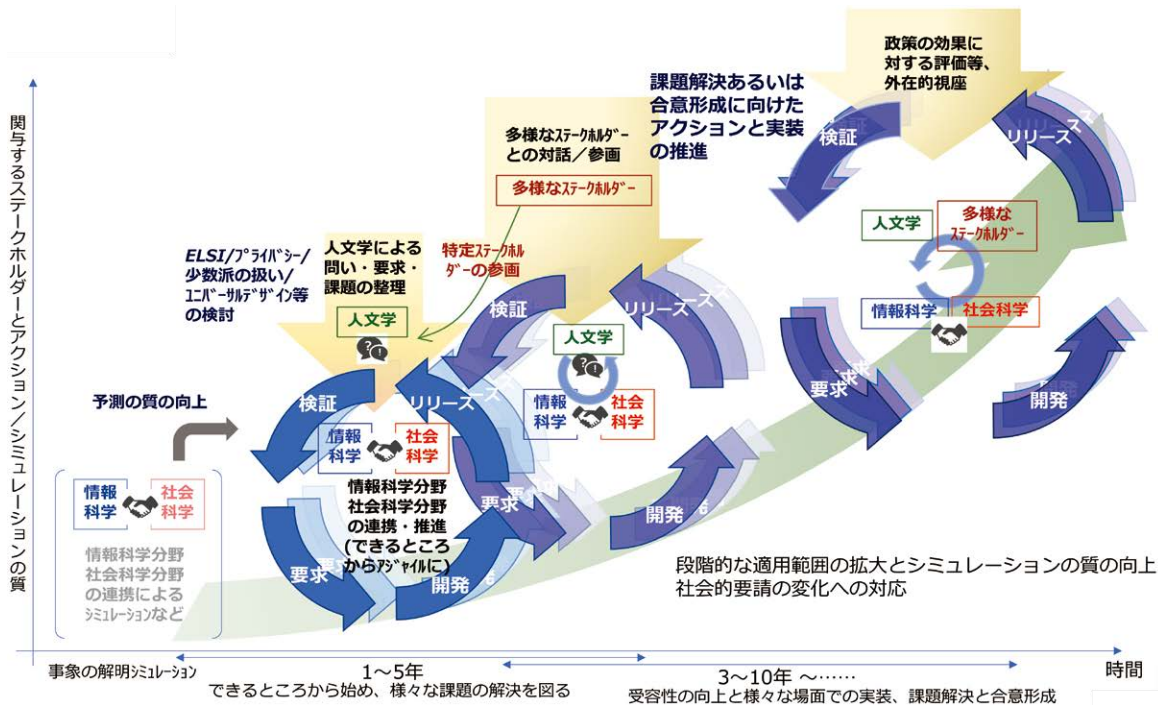


図1-3-2 「社会デジタルツイン」の推進方策と時間軸⁴⁾

(2) デジタル社会におけるトラスト形成

デジタル社会における新しいトラストの仕組みとそれによるトラスト問題対策の全体ビジョンを描いて共有し、具体的トラスト問題と共通基礎の両面からの取り組みを連携して進める形への変容が重要である。これを実現するために考えられる推進方法の全体像を図1-3-3に示す。研究コミュニティや研究体制がどのような形に変容するのが望ましいかについての考えを中央の青枠内に示した。変容を促進するための方策として考えるべきポイントを、青枠部分への3つの緑矢で示した。以下、その内容を順に説明する。

[方策1：分野間の知見共有・連携促進の場作り]

全体ビジョンを共有した分野横断・総合的なトラスト研究という方向性について、研究コミュニティから

幅広い共感を得られることが、活発な研究開発の出発点になる。研究者個人の人脈や出会いを通してボトムアップにリーチできる範囲には限界があることから、分野間の知見共有・連携促進の場作りにはトップダウンな施策が望まれる。オープンに参加者を集めた公開型のセミナーシリーズやワークショップ、シンポジウムの開催が、研究コミュニティの立ち上げや活性化に有効と考えられる。

また、このような場が、全体ビジョンの共有、幅広い研究事例の把握、分野横断の共同研究のタネの発見の機会となり、分野横断・学際的な研究コミュニティの活性化も期待できる。

【方策2：学際的トラスト研究の継続的活動体制と人材育成策】

さまざまな研究分野に波及するトラスト共通基礎研究を骨太化し、研究者層を厚くしていくためには、方策1のような仕掛けをトリガーとしつつも、学際的トラスト研究の継続的な活動体制を作っていくことが必要である。研究活動の母体ができることで、研究人材の育成にもつながる。具体的には、学会・研究会の立ち上げ、学際的活動をコーディネートする人材やチームへの助成、学際的トラスト基礎研究を推進する拠点あるいはバーチャルな連携体制の構築などが、打ち手の候補として考えられる。

また、新しいトラストの仕組みの社会受容性の面では、日本社会の特性や日本人のメンタリティーを踏まえることが重要である一方、国際社会や他国との違いを最初から意識しておくことも重要である。米国IT企業がインターネット上のプラットフォームをほぼ支配している現状を考えると、「デジタル社会におけるトラスト形成」において、海外動向や海外から見た日本社会という視点から分析・考察できる人材の育成も必要と考える。

なお、分野横断・文理融合的な「総合知」に取り組むことに対する阻害要因が指摘されている。阻害要因の一例として、（1）テニユアポストが少ない、（2）「総合知」への取り組みは研究論文になりにくい一方、任期付きポストでは論文業績が必要、（3）個別分野で業績を上げながら、「総合知」に取り組まなければならないという高いハードルが現実、といったことが挙げられる。これはトラスト研究に限った問題ではなく、根本的な打ち手は簡単ではないが、方策2の中でも考慮しておく必要がある。

【方策3：ファンディングプログラムによる推進・加速】

方策2によってトラスト共通基礎研究を育成する一方で、より具体的な問題解決型の目標を設定し、それをファンディングプログラムによって推進・加速することも、重要な打ち手になる。複数のターゲット（ファンディングプログラムの候補）設定があり得るが、個別の問題解決にとどまらず全体ビジョンを踏まえた共通化も意識することが重要である。

方策3に関連する動きとして、図1-3-3の青枠内の左下パートに、既に進行している国の戦略に基づく活動体制、ファンディングによる活動、関連する政策提言活動を「対象真正性」「内容真実性」「振る舞い予想・対応可能性」「ガバナンス（ルール整備・プロセス管理）」という現在のスコープに沿ってまとめた。今後これらの活動について、そのスコープの拡大や取り組みの連携が期待される。

このようなファンディングによって、トラストを軸とした技術戦略で、わが国が国際的にリードするポジションを獲得することも狙い得る。また、これに関連して、欧米が人権や公平性などを基本に置いた理念・正義を押し出して、国際的なルールメイキングを先導している状況に対して、わが国はトラストを軸とした立ち位置が取り得るであろう。

【方策1～3の時間軸】

方策1は2022年から取り組んでいくとともに、方策2も模索し、1・2年程度で方策2に重点を移行させる。方策3も方策1を通して具体的な目標設定を進めるのがよい。優先度の高い目標を中心に複数のファンディングプログラムを立ち上げることが可能であろう。競争的研究費の公募を早期に行った場合、情報系が中心になった研究開発に、人文・社会科学系が協力するような形態での応募が多くなると思われる。一方、方策1・2を通じた議論・連携が深まった時期になれば、人文・社会科学系の存在感がより高まった研究開発の比率

が増加すると期待される。しかし、それには長期的な時間軸を見込んでおく必要がある。わが国が総合的なトラスト研究開発で先行し、技術戦略においても国際的にリードするポジションを狙うためには、迅速な打ち手も必要であろう。まずは方策1を実行し、その中で方策3の目標とタイミングを見定めていくのがよいと考える。推進形態として、方策3は具体的な目標を掲げた有期プロジェクトが想定されるのに対して、方策2は共通基礎研究としての継続的な育成が望ましい。

推進体制では情報系と人文・社会科学系と産業界が参画した強力なフォーメーションを組んでいる英国研究・イノベーション機構（UKRI）の「TAS（Trustworthy Autonomous Systems）Programme」が参考になる。ただし、TASはAI・自律システムにフォーカスしており、さらに広いスコープで、わが国が同様の強力なフォーメーションを組むことができるかは、大いにチャレンジングな課題である。方策3と併せて、強力なフォーメーション構築に向けたステップも設計していく必要がある。

「デジタル社会における新たなトラスト形成」は、ビジネスの発展やDX（デジタルトランスフォーメーション）を左右するものであり、産業界からの期待・関心も大きい。人々にトラストされるサービス・製品を提供していくことは、企業の使命・責任だとも言える。それと同時に、新たなトラストの仕組みが人々に活用され、社会に浸透していくかは、国の政策とともに企業の取り組みが担うところも大きい。上で言及した方策3のフォーメーションはもちろん、方策1のようなより早期のステージから学术界だけでなく産業界も参画した形で進め、産学でビジョン・方向性を共有した取り組みが望まれる。

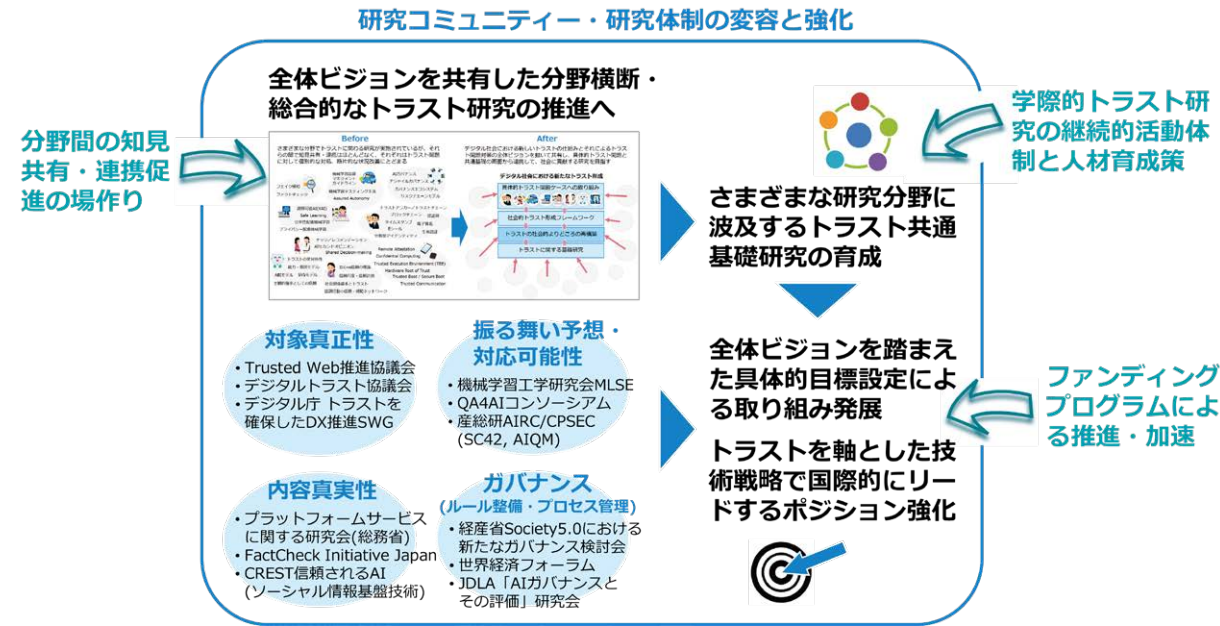


図1-3-3 「デジタル社会における新たなトラスト形成」の推進方策と時間軸²⁾

(3) リアルワールド・ロボティクス

ロボット技術の革新は、少子高齢化、災害対応など、日本が直面する社会的課題に対し、非常に有効な解決手段の一つと期待されている。「ロボット新戦略」等に掲げられている将来像でロボットに求められているのは、工場の生産ラインのような「閉じた環境」ではなく、われわれが生活している多様で動的な「開かれた環境」でのさまざまな非定型の作業である。「開かれた環境」は多種多様な要素からなり、これらが相互に影響を及ぼしあいながら、常に変化する環境である。

しかしながら従来のロボットの要素技術の性能を向上するのみでは「開かれた環境」に対処することは困

難である。なぜなら、従来のロボットはセンサーにより未知の空間の情報を精密に測定してモデル化し、論理演算による行動計画に従い行動しているが、開かれた環境では、センサーがすべての情報を取得できない、さまざまな要素が複雑に関係しモデル化が困難である、状況が刻々と変化する、といった要因により、行動が破綻してしまうためである。

開かれた環境に柔軟に適応するロボットの実現と将来の社会実装に向けて、図1-3-4に示した

- ① 開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究
- ② 基礎研究段階からの社会・経済的影響評価の推進
- ③ 基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築
- ④ 競技会型の研究開発の活用

の4つのアクティビティを相互に連携しながら実施することが重要である。

研究開発課題として、開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究の推進（①）と、基礎研究段階からの社会・経済的影響評価の推進（②）が挙げられる。基礎研究では、適応する知能・適応する身体という二つのアプローチから、開かれた環境における多様性と動的な状況への対処に取り組む必要がある。ここでは、ロボットの知能面と身体面の研究を個別に推進するのではなく、双方が連携することで統合したシステムとしてのロボットを構築することが重要である。また、社会・経済的影響評価では、特に基礎研究段階から検討すべき研究課題として、ロボットに感じる安心、プライバシーの保護、社会とのインタラクション、および、新しい法制度の仕組み（責任分配）がある。

これらの研究開発課題に加えて、研究開発基盤として基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築（③）、競技会型の研究開発の活用（④）が重要である。ロボットのソフトウェアおよびハードウェアに関するオープンプラットフォームを提供することにより、ロボティクス研究に対して異分野からの研究者の参入を容易とし、システム統合に関する理論的基盤の確立が促進される。また、競技会型の研究開発により、研究成果の他チームによる再現や相互比較による有効性の検証が可能となり、基礎研究から応用研究や、さらには製品化への橋渡しが促進される。

開かれた環境に柔軟に適応するための研究開発や、ロボットに対する社会受容性の向上やルール作りに関する取り組みを基礎研究段階から実施することで、各応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現し、わが国の産業競争力の向上に寄与するとともに、少子高齢化、多発する自然災害など、日本が直面する社会的課題に対して有効な解決手段の一つとなると期待される。

【基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築】

ロボティクス研究への異分野研究者の参入を容易にし、分野融合的な研究実施体制によりシステム統合に関する理論的基盤を確立するためには、オープンプラットフォームの整備が有効である。

ロボティクスにおける研究プラットフォームの一例として、オープンソースで提供されるロボット向けのメタ・オペレーティングシステム ROS（Robot Operating System）が挙げられる。ハードウェアのプラットフォームとしては、トヨタが開発した生活支援ロボット HSR（Human Support Robot）の開発コミュニティによる研究開発促進の取り組みがある。これらのプラットフォームは

- ・ロボットやソフトウェアを個別に開発する場合に比べ大幅なコスト削減が見込まれる。
- ・幅広い分野の研究者やユーザー等の研究コミュニティへの参加が容易となる。
- ・コミュニティによる共有・連携・再利用が研究を加速する共創の場となる。

という利点が見込める一方で、「研究が画一化し新規性のある研究を阻害する恐れがある」「自由な改造や

機能追加が可能なオープンなハードウェアプラットフォームが少ない」「企業開発のハードウェアには仕様等の情報について非公開の部分が存在する」などの問題点も指摘されている。

現状では、ロボティクス研究においてプラットフォームが技術の発展を十分に促進できているとは言い難い。これらの問題点を解消し、さらなるロボティクス研究の発展に寄与することを可能とするオープンプラットフォームの設計が求められる。同時に、プラットフォームが異分野の研究者にとっても活用しやすいものとなる仕組みづくりも重要となる。特に、ROS上に構築した異分野研究者の参入を容易にするためのソフトウェア基盤と実ロボットを用いた研究実施を容易にするためのオープンなハードウェアプラットフォームの新規開発が重要である。

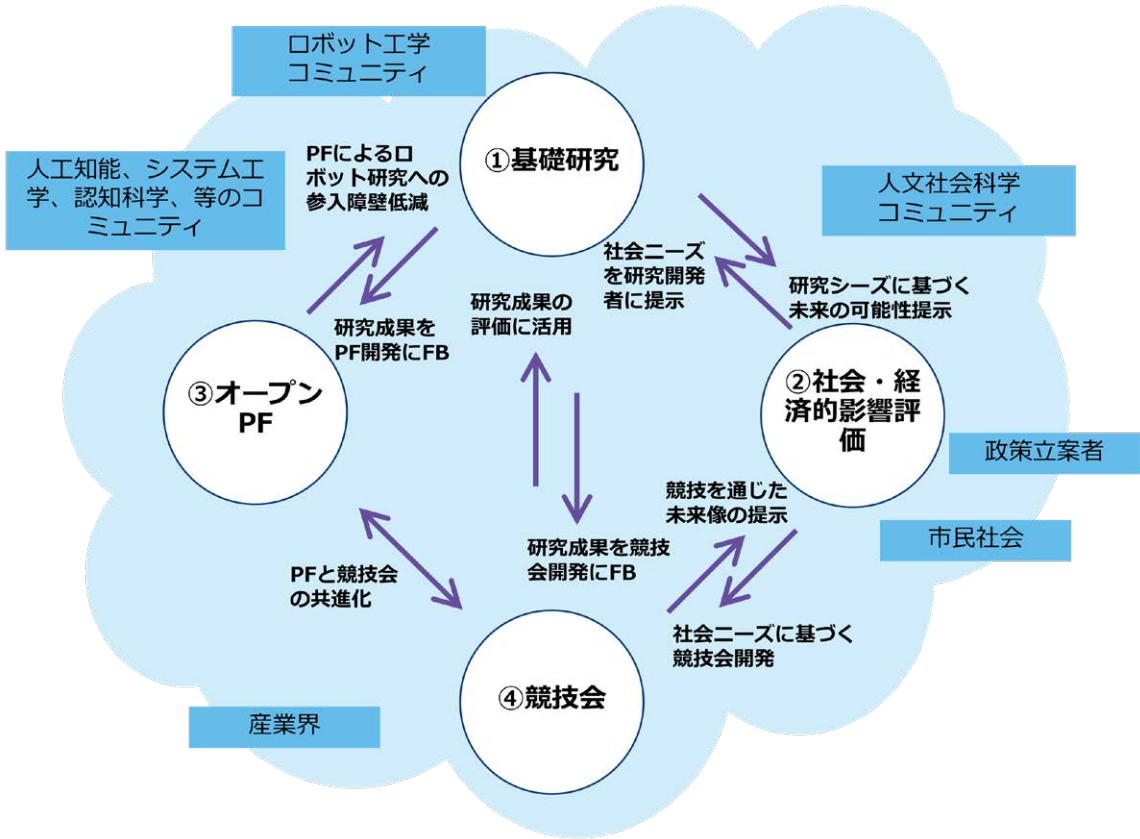


図1-3-4 「リアルワールド・ロボティクス」の研究開発を推進する4つのアクティビティ³⁾

〔競技会型の研究開発の活用〕

基礎研究から応用研究への橋渡し促進のため、競技会の枠組みの活用し、実環境に近い場面設定にて、リアルタイムにハードウェアが動くことを客観的に評価する体制を整備することが重要である。画像認識分野においては、競技会ILSVRC（the ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge）において深層学習が好成績を挙げたことから、その有効性が研究者コミュニティに広く認知され、深層学習研究が大きく発展したという事例が知られている。このように競技会を通じたロボティクス研究の発展が期待される。ロボットに関する競技会の事例として、2050年までに自律型ロボットのチームがサッカーでW杯優勝チームに勝つことを目指してロボット開発を推進する国際的なプロジェクトであるロボカップや、2018年および2021年に開催されたWorld Robot Summit（WRS）において実施されたロボット競技会等が挙げられる。これらの競技会では、将来のロボットに期待されるタスクを想定した課題設定がなされ、それに解を与えるロボットのパフォーマンスを競いあうことで、技術開発の加速を図っている。

競技会が研究開発にもたらす利点として、以下の三つが挙げられる。

- ・チーム間の競争が研究開発を加速する。競技タスクに対する考察と経験の共有により理解が深まる。
- ・プラットフォームとタスクを共有することで、あるチームから提案された手法を別のチームでも再現でき、新規手法の優位性や問題点の検証が容易になる。
- ・ルールを設定し、点数をつけることで、課題に対処するロボットの能力を定量的に評価できる。さらに、ロボット競技会を通じて、新たなロボットを取り入れた未来像を人々に提示することにより、ロボットに対する一般の理解を増進するとともに、社会受容の障壁となる問題点の抽出が可能となる。

一方で、「論文になりにくい」「競技会で設定されたミッションに特化したロボット開発に陥りやすい」「競技参加準備のために多大な負担がかかり、他の研究ができなくなる」「競技場の設定が複雑・大規模で、自拠点での準備やロボットの性能評価への活用が難しい」などの問題点も指摘されており、現状ではロボティクス研究において競技会が十分に活用されているとは言い難い。

これらの問題点を解消し、ロボティクス研究の発展をさらに促進するような競技会の設計が求められる。特に、競技会でのタスクを完遂することだけが目的となってしまうような仕組みの導入が必要である。例えば標準性能試験法の導入、プラットフォームの活用、簡便な競技設定などを取り入れるべきである。

ロボットはさまざまな要素技術の複合により機能するため、その能力の優劣を判断することは容易ではないが、ロボットの具体的な性能を測定する標準性能試験法を競技会の競技設計に導入することで、異なるロボット間で能力の定量的かつ客観的な比較評価が可能となる。また、基礎的研究と実際の製品との関連づけや、標準的なベンチマーク手法として論文等での活用も期待できる。

ロボット、シミュレーター、開発環境等の共通プラットフォームを競技参加者に提供することで、参加者の負担を軽減し、競技への参加を促進することも期待できる。各競技者が共通のプラットフォームを用いることで、課題の共有や新規手法の再現が容易となり、研究の促進も期待できる。加えて、「競技場を小面積にする」「使用する機材や操作対象となるオブジェクトは世界中のどこでも容易に入手可能な物品で構成する」など競技設定の簡便化も重要である。競技会で活用することによりプラットフォームの限界や問題点が明らかになり、それが新たなプラットフォーム開発につながるという競技会とプラットフォームの共進化が期待できる。

参考文献

- 1) 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「戦略プロポーザル：第4世代AIの研究開発-深層学習と知識・記号推論の融合-」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-SP-08.html>, (2023年3月3日アクセス)。
- 2) 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「戦略プロポーザル：デジタル社会における新たなトラスト形成」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-SP-03.html>, (2023年3月3日アクセス)。
- 3) 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「戦略プロポーザル：リアルワールド・ロボティクス ～開かれた環境に柔軟に適應するロボティクス学理基盤の創出～」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-SP-02.html>, (2023年3月3日アクセス)。
- 4) 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「戦略プロポーザル：進化的社会システムデザイン～自然科学と社会科学の連携協調による持続可能な社会の実現～」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-SP-01.html>, (2023年3月3日アクセス)。
- 5) 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「戦略プロポーザル：Society 5.0実現に向けた計算社会科学」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2020-SP-02.html>, (2023年3月3日アクセス)。