

2.3.3 社会システムアーキテクチャー

(1) 研究開発領域の定義

社会システムアーキテクチャーは、社会インフラなどのさまざまなシステムが相互に接続された社会システムのシステム要素と要素間の関係性を定義・具体化する研究開発領域であり、社会システムのアーキテクチャー設計、マネジメントを通じて、経済・環境・技術の変化に対応し、社会を構成する人々の、身体的、精神的、社会的に良好な状態を意味するウェルビーイング (well-being) を維持、発展させることを目的としている。

(2) キーワード

System of systems、アーキテクチャー、ELSI、システムズエンジニアリング、ウェルビーイング、自律システム (Autonomous Intelligent System: A/IS)、ESD (Education for Sustainable Development)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

インターネット、モバイルネットワーク、Internet of Things (以下、IoT) 技術の発展により、さまざまなモノやシステムが相互につながるようになってきた。さらに、急速に進展する人工知能技術やそれを搭載するロボットなどの新技術も、今後社会システムに浸透していくと予想される。社会で利用されるさまざまなシステムが相互接続され大規模複雑化した社会システムは、いわゆる System of Systems (以下、SoS) となり、社会に影響する新たな課題をもたらすことが懸念される^{1),2)}。システムアーキテクチャーとはシステムの基本的な概念または特性であり、システム要素と要素間の関係性を定義・具体化したものであり、システムの設計や進化の原則となる。その役割はシステム全体の構想を示し、相互運用性を高め、関係する人の意思決定に貢献することにある。社会システムを SoS として捉え、SoS のアーキテクチャーを定義・具体化することで、倫理、法律、社会など多岐にわたる分野横断的な専門家や利害関係者が社会の目指す姿を描き、ELSI を考慮した対話によって社会的合意を形成し、それに基づき SoS の分析と統合を行うプロセスと仕組みを実現することが可能となる。さらに、SoS に対するシステムズエンジニアリング³⁾ を活用することで、必ずしも運用、管理が及ばない複数のシステムで構成されている社会システムを、経済的、政策的、技術的な環境変化のもとでもライフサイクル全般にわたって進化させることができるようになる⁴⁾。

[研究開発の動向]

システムのアーキテクチャーは、コンピューターアーキテクチャーが典型的な例であるが、システムを構成する複数の要素と、それらの要素間の関係を定義するものである。社会を支えるインフラストラクチャーも、電力システム、交通システムあるいは防災システムなどシステムとして構築されるようになった。近年はインターネットを含む通信ネットワークに接続されたコンピューターシステムによって管理、統制される、いわゆるサイバーフィジカルシステム (Cyber Physical System: CPS、以下 CPS)⁵⁾ となってきている。これは、さまざまなシステムが相互接続され大規模複雑化した SoS である。

SoS は、大規模かつ複雑でネットワーク化されているため、個々のシステムは独立して動作可能でありつつも相互に関係があり、それぞれ異なるライフサイクルを持つ。SoS は、個々のシステムを最適化しても、全体の最適性は保証されないという特徴を持つ。このような特徴を持つ SoS を機能させるには、さまざまなシステムが混在することで得られる能力を、構成システムの能力の合計よりも優れたものにするために、計画し、分析し、編成し、統合するプロセスとして、System of Systems Engineering (以下、SoSE) が必要となる。システムズエンジニアリングで検討されるコンセプトである、分析、制御、評価、設計、モデリング、可制御性、可観測性、信頼性などを、どのように拡張して SoS に適用すればよいかという研究が進められている。

SoSEの難しい課題に対処するためのマネジメントフレームワークとして、SoSEのプロセスを時間で展開した波モデル (wave model) が提案されている⁴⁾。そこでは、多岐にわたる進化の繰り返しの中で構成システムの開発を促し、社会システムを追加開発の対象として特徴づけている。外部環境からの社会システムへの継続的な入力への把握と、社会システムの動的な性質に対処するための継続的な分析を行い、社会システムを進化させる。この過程の中で、アーキテクチャーの進化もまた重要となる。社会システムアーキテクチャーは、時間とともに進化する社会システムの持続的なフレームワークを与えると同時に、新たな社会システムアーキテクチャーが追加実装されることで、アーキテクチャー自身も進化する。

また、従来はシステムが提供するサービスはユーザーの要求を実現するプロセスの効率化であったが、社会システムにおいては効率化だけでなく、社会を構成する人々のウェルビーイングを維持、発展させるサービスを提供するシステムとして、社会システムアーキテクチャーが検討されるようになった。SoSとして提供するサービスをEnterprise Architectureとして記述するため、2016年にOMG (Object Management Group) からUAF (Unified Architecture Framework) が発行され、2022年にはVersion1.2が発行された⁶⁾。このUAFのガイドを用いることで、関心事と目的に基づき戦略的計画を策定し、現実と理想のギャップを補うために段階的にその能力を展開し、サービス、リソース、人員による運用コンセプトを考え、リスクや脅威を回避、軽減することにつながるものと期待される。

さらに、システムのマネジメントに関連して、開発と運用が連携し、ビルド、テストなどを迅速に開発するソフトウェア開発手法であるDevOpsが、IEEE標準であるIEEE Std 2675-2021⁷⁾として制定された。この標準では、安全で信頼性の高い方法でソフトウェアとシステムを構築、パッケージ化、展開する一連のプロセスと方法が、開発中や運用中だけでなくシステムのライフサイクル全体を通じて定義されている。

[論文や特許の動向]

本領域においては、全体の論文数はほぼリニアに増加している。欧州の論文数は2015年にトップの米国を抜き、その後も増加率が高い。米国は2015年以降は2位を維持しているが、あまり論文数は増加していない。日本の論文数は2020年まではわずかに増加していたが2021年に減少している。2014年に論文数シェア30%強でトップだった米国が論文数同様2015年に欧州に抜かれて以降、シェアは全体として減少傾向で、2021年には20%になっている。

特許ファミリーの全体数は2015年に半減した後、順調に伸びている。日本の特許ファミリー件数シェアは徐々に増加しているが、特許価値指標 (Patent Asset Index) シェアでは米国が圧倒的に高い。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

アーキテクチャーへの人の組み込み

社会システムの要素システムとして利用されるCPSについては、現実世界にユーザーとして存在する人を陽に考慮することの重要性が指摘され⁸⁾、CPSのループの中に人が介在することを前提とした取り組みがなされている⁹⁾。また、波モデルのプロセスを実現するための仕組みとして、SoSアーキテクチャーに社会ビューを持たせた上で、社会と技術システムの分析結果を踏まえて繰り返しマネジメントを行う仕組みとして、社会的合意をとりまとめた抽象的約定を設けるという提案もある¹⁰⁾。

社会システムに浸透する人工知能技術利用システム

技術の発展により、人工知能 (Artificial Intelligence、以下AI) の活用は避けて通れない。人々の仕事や生活に大きな影響を与えるAIについて政府や国際機関、企業で、AI活用原則ないしは倫理原則が策定されている^{11), 12), 13)}。このように各政府、各企業、各団体が独自の原則を掲げることは、おのおのの姿勢や思想を国際社会、学会や市場に表明することとして大変意義深い。一方で、製品やサービスに搭載される自律

システム、新興技術を設計する際のガイドラインの策定が望まれる。米国電気電子学会（IEEE）の標準策定組織（IEEE-SA）では、高度な知性を持った自律システム（Autonomous Intelligent System）の倫理にのっとった設計のガイドライン（Ethically Aligned Design、以下EAD）¹を提唱している。EADには、その概念のフレームワークとして、“三つの柱”（The Three Pillars of the Ethically Aligned Design Conceptual Framework）が定義され、ユニバーサルな人間の価値観（Universal Human Values）、政治的な自己決定とデータエージェンシー（Political Self-Determination and Data Agency）、技術的信頼性（Technical Dependability）から構成されている。また、人権、ウェルビーイング、透明性などの一般原則と、三つの柱との対応付けについても記載されている。

さらに、IEEEではEADに基づき、透明性、プライバシーなどの倫理を考慮した設計およびそのプロセスに関する標準を策定するプロジェクトP7000シリーズ²が2017年に発足し、これまでに次の標準が承認されている。

- ・ IEEE Std 7000-2021 「システム設計での倫理的懸念に対処するためのモデルプロセス」¹⁴⁾
- ・ IEEE Std 7001-2021 「自律システムの透明性」¹⁵⁾
- ・ IEEE Std 7002-2022 「データプライバシープロセス」¹⁶⁾
- ・ IEEE Std 7005-2021 「従業員のデータガバナンスの標準」¹⁷⁾
- ・ IEEE Std 7007-2021 「倫理駆動ロボティクスと自律システムのためのオントロジーの標準」¹⁸⁾
- ・ IEEE Std 7010-2020 「自律的で高度な知能を備えたシステムが人間のWell-beingに及ぼす影響を評価するためのIEEE推奨プラクティス」¹⁹⁾

また、P7000標準で使用される用語集（Glossary）²⁰⁾も作成されており、自律システムに関するキーワードが整理されている。さらに、ビジネスにAI倫理を利用する価値と必要性、AI倫理の持続可能な文化を醸成するための推奨事項、必要なスキル、人材などについての概要を説明するホワイトペーパー「A Call to Action for Businesses Using AI -Ethically Aligned Design for Business」²¹⁾もリリースされている。

AI開発ガイドラインについては、「2.1.4 AIソフトウェア工学」、「2.1.9 社会におけるAI」に詳細な記載がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

情報処理推進機構のデジタルアーキテクチャ・デザインセンターの活動³

Society 5.0を形成する基盤となるシステム全体のアーキテクチャーを産官学の連携の下で設計・提案し、その設計のための方法論を開発・確立するために、独立行政法人 情報処理推進機構（IPA）にデジタルアーキテクチャ・デザインセンター（DADC）が2020年5月設立された。DADCではSociety 5.0時代のデジタル市場基盤の構築で中心的な役割を果たすために、以下に取り組んでいる。

- ・ Society 5.0を形成するシステム全体のアーキテクチャーを産官学連携で設計・提案し、その方法論を開発・確立する。
- ・ 検討で見た制度的・技術的な課題等について、産官学で連携、または必要な働きかけにより、制度の見直し、各種標準の整備、さらなる研究開発等につなげる。
- ・ アーキテクチャー設計を担う人材を、実践を通じて育成する。
- ・ 上記の取り組みを国際的な協力・連携で行い、世界の課題解決、人を中心とした自由で信頼ある国際社会の発展に貢献する。

1 <https://ethicsinaction.ieee.org/wp-content/uploads/ead1e.pdf>

2 <https://ethicsinaction.ieee.org/>

3 <https://www.ipa.go.jp/dadc/index.html>

以下、経済や環境、技術的な変化に対応し、社会を構成する人々のウェルビーイングを維持、発展させることを目標とした社会システムを構築しようとするプロジェクト等を挙げる。

JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」

国内では、JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域⁴の中で、将来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値の創出を視野に入れ、領域横断的なプロジェクトを実施している。具体的には、以下のような重点テーマがある。

- ・異分野共創型のAI・シミュレーション技術を駆使した健全な社会の構築（令和2年度～）
- ・サイバーとフィジカルの高度な融合に向けたAI技術の革新（令和元年度～）
- ・サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI（平成30年度～）
- ・多種多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築（平成29年度～）

なお、上記の「サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI」の中では、2021年度に「製造業に革新をもたらすスマートロボット技術の開発」および「機械学習を用いたシステムの高品質化・実用化を加速する“Engineerable AI”技術の開発」が、本格研究として採択された。

RISTEX 科学技術の倫理的・法制度的・社会的課題（ELSI）への包括的実践研究開発プログラム（RInCA）

RISTEXの科学技術の倫理的・法制度的・社会的課題（ELSI）への包括的実践研究開発プログラム（RInCA）⁵は2020年度からの新規プログラムで、科学技術の発展に伴い発生する倫理的・法制度的・社会的課題（ELSI）を予見して、責任ある研究・イノベーション（RRI）を行うための実践的協業モデルの開発を推進するものである。科学技術と社会が調和して新たな価値を持続的に創出することを目指している。期待されるアウトプットは、以下とされている。

- ・科学技術の特性を踏まえた具体的なELSI対応方策の創出
- ・研究開発現場における共創の仕組みや方法論の開発
- ・トランスサイエンス問題の事例分析とアーカイブに基づく将来への提言
- ・根源的問いの探求・考察を通じた、研究・イノベーションの先に見据える社会像の提示

SIP第2期 ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術

超スマート社会を実現するために、都市の抱える諸課題に対してICT等の新技術を活用しマネジメントするスマートシティの取り組みが全国各地でなされている。SIP「ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術」の中で、スマートシティのアーキテクチャーの設計が行われている⁶。スマートシティへの取り組みでは、分野、都市ごとに個別に実装されて持続的な取り組みになりにくい、分野間のサービスが統合されないために住民の利便性が向上しにくい、構築されたシステムやサービスが再利用できないために開発コストが高いといった問題があった。スマートシティの構築に関する統一された手法・ルールを定義したリファレンスアーキテクチャーがないことが原因と考え、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議重要課題専門調査会での分野間データ連携基盤の整備に向けた方針の中で提示されたSociety 5.0のリファレンスアーキテクチャーをベースに統一されたスマートシティリファレンスアーキテクチャーを構築し、産官学が共通指針とすべきリファレンスとして提供した。「利用者中心の原則」、「都市マネジメントの役割」、「都市オペレーティング

4 <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html>

5 <https://www.jst.go.jp/ristex/funding/elsi-pg/>

6 https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/a-whitepaper1_200331.pdf

システム（都市OS）の役割」、「相互運用の重要性」の四つの基本コンセプトに基づき構築され、「都市マネジメント」と「都市OS」がスマートシティのサービスを提供する両輪とされている。地域のスマートシティ化により、デジタルによるコスト削減、生産性と付加価値の向上、住民中心の持続可能な地域経営の実現を目指している。

(5) 科学技術的課題

社会システムアーキテクチャーに基づいて社会システムをマネジメントし、さらに、社会システムの分析を行いながら社会システムの進化に合わせて、そのアーキテクチャーを進化させていく、波モデルを実現するための技術的課題は少なくない。社会システムをどのように分析するのか、アーキテクチャーの進化をどのようにマネジメントし統治するのか、社会システムを進化させるときに必要なアーキテクチャーには何を記述しておくべきかについては、さまざまな利害関係者と共に取り組まなければならない大きな課題である。これらの課題は、技術的な観点だけでは解決に至らないこともあると考えられる。社会コンセンサスあるいは社会の合意に基づき、受容される社会システムを形づくる必要があるため、社会科学の分野の研究者、あるいは、地域と密着して活動をしている人々との協働が必要になる。地域やコミュニティーで暮らす人々が身体的、精神的に良好な状態となり、そこに提供されるインフラやサービスに対してどのような意見を持っているのかを適時受け取ることは、社会システムの分析を行う際のもとになる情報を得るために必要と考えられる。

また、その分析に際しては、社会システムの状況をシミュレーションすることが求められるが、いわゆるデジタルツインと呼ばれる技術では、シミュレーションに用いるモデルの粒度を的確に定める必要がある。任意の粒度で適切に分析ができるようにすることは大きな技術課題となっている。このようなシミュレーションモデルを構築するためには、社会システムアーキテクチャーをあらかじめ定義しておくことが必要であるが、現時点では社会ビューポイントを網羅する方法論が確立されていないことも技術課題である。社会システムアーキテクチャーの統治、マネジメントに関しては、ISO/IEC/IEEE 42020 Architecture Processesが策定され、標準としての指針はここに示されているものの、社会システムへの適用に際してのテラリングが課題となる。そして、この課題とともに、社会システムアーキテクチャーとして何を記述する必要があるのかを明確にする必要があり、このためには、社会システムの利害関係者を漏れなく抽出し、すべての関心事を把握することがその基礎となる。このことは社会コンセンサス、社会との合意と密接に関係することであり、社会科学の専門分野の研究者との協働が欠かせないことを意味する。

(6) その他の課題

社会システムのマネジメントに対処するには、社会全体の課題を捉え、できる限りフラットな立場で検討を試みることができるシステムズエンジニアリングの基礎を身に付けることが重要となる。また、広範囲の技術分野と社会科学の分野の専門家や利害関係者との連携が必須になると考えられる。新しく開発された技術が、そもそも持続的で善き社会の構築に貢献できるのか、新たな課題を解決する可能性があるかなどを、多様な分野の専門家や利害関係者と批判的に、多角的に検証できる、倫理的な思考を持ったエンジニアを育成する土壌が必要となる。言い換えるならば、自身の持つ専門性に引っ張られて、考え方が狭くなってしまふことを極力避けなければならない。ELSIを正しく理解し、例えば、「自律」、「共生」といった言葉を正しく理解し行動することができる技術人材こそが、これからの社会システムに欠かせないと考える。ただし、このような意識変革は、技術者などの理系人材にのみ求められるものではなく、いわゆる文系の研究者にも求められると考えられる。そして、両者が共に社会を形づくるために力を合わせることができる研究体制の構築が求められる。そして、「より公正で持続可能な世界を構築する」というESDのマインドを持ってエンジニアがシステムを設計すれば、そのシステムを利用する人も、「より公正で持続可能な世界を構築する」マインドを持ち、結果的に社会全体が身体的、精神的に良好な状態に保たれると期待される。

今後ますます進化するAI、ロボットなどの高度な知性を持った自律システムが、人の代わりに人の仕事・

サービスを提供することになる。そのような時代では、意図せずして人の行動を操作し、人権を侵害し、個人情報乱用する危険性がある。EADでは、自律システム (Autonomous Intelligent System : A/IS) の懸念として、プライバシーへの潜在的な害、差別、スキルの喪失、経済への悪影響、重要なインフラストラクチャーへのセキュリティリスク、および社会的ウェルビーイングに対する長期的な悪影響の可能性を挙げている。そのため、A/ISを設計する技術者が、ELSIを正しく理解することが必要となる。以前から技術者倫理の教育はなされているものの、エンジニアに対してELSIを考慮する教育がなされていないという問題がある。そのため、今後、倫理的な考慮のできるエンジニア、その育成環境の整備が求められる。

国連では「Education for Sustainable Development : Towards achieving the SDGs (ESD for 2030)」⁷が掲げられ、日本でも2019年にG20サミットに関連した教育イベントとして「21世紀の教育政策～Society5.0時代における人材育成～」⁸が開催され、Society 5.0時代や人生100年時代に向けた教育の転換点として、「ESD for 2030」の意義が確認された⁹。このような取り組みをさらに広げていく必要がある

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	システムズエンジニアリングの基礎に対する理解が十分ではなく、SoS 関連の基礎研究が不足している。トップ10%論文数は2019年以降1件。
	応用研究・開発	○	→	企業を中心にIoTへの興味は高く、個別の研究、プロジェクトは実施されていると考えられるが、システム全体あるいはSoSとして検討された研究はほとんど見られないが、IPAでのDADCの設立など、社会システムへのデジタル技術の普及を図る試みがある。特許件数シェアは増加傾向で2022年に6%程度。
米国	基礎研究	◎	→	IEEE、INCOSE関係では、SoSに関する研究は多数あり、標準化に向けての議論がなされている。IEEE SA Global InitiativeによりEAD公開、標準をP7000シリーズとして策定中、IEEE Std 7000, 7001, 7005, 7007, 7010がすでにリリース済み。国家科学技術会議 (NSTC) の人工知能特別委員会 (Select Committee on Artificial Intelligence) による米人工知能研究開発戦略計画は2019年にアップデート。トップ10%論文数は10件前後を維持。
	応用研究・開発	◎	→	ビジネスへの応用を視野にUAFが提案され、それを応用する研究がすでに始まっている。2021年にはUAFガイド1.2が発行された。NSFは他の省との連携によるプロジェクトへの予算化を進めている。特許件数シェアは減少傾向だが2022年で29%程度。
欧州	基礎研究	◎	→	CPSoS、SoSアーキテクチャーに関する研究がなされている。トップ10%論文数は20件前後を維持。
	応用研究・開発	○	↗	個々の分野への応用を視野に入れており、電力が関係するスマートシティへの応用プロジェクトをHORIZON 2020で実施している。さらにHorizon Europeが2021年からの7年間のプロジェクトとして開始されている。産業用データ連携の仕組みとしてGaia-xおよびIDS (International Data Sciences) よりアーキテクチャーが公開されている。Horizon 2020により、接続された自動運転車 (CAV) の開発と利用に関する20の倫理的推奨事項を示した“Ethics of connected and automated vehicles: Recommendations on road safety, privacy, fairness, explainability and responsibility”が2020年9月にリリースされた。欧州AI規制法案 (AI Act) を公表した。特許件数シェアは10%弱。

2.3
俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学

7 <https://www.unesco.org/en/articles/un-general-assembly-highlights-unescos-leading-role-education-2030-agenda>
 8 https://www.mext.go.jp/a_menu/kokusai/2019g20event/1419637.htm
 9 <https://shop.gyosei.jp/library/archives/cat01/0000006828>

中国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。トップ10%論文数は数件程度。
	応用研究・開発	◎	↗	中国製造2025を立ち上げ、2049年までを見通した構想を掲げ、欧州企業との連携をすでに開始している。特許件数シェアは2015年以降上昇しており、2022年には45%程度。
韓国	基礎研究	△	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。トップ10%論文数は1件あるかないか。
	応用研究・開発	△	↘	具体的な研究、プロジェクトは見えない。特許件数シェアは2016年以降減少傾向で、2022年に6%程度。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) Mohammad Jamshidi, ed., System of Systems Engineering: Innovations for the 21st Century (John Wiley & Sons, Inc., 2009).
- 2) Mark W. Maier, "Architecting principles for systems-of-systems," Systems Engineering 1, no. 4 (1998) : 267-284., [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6858\(1998\)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D).
- 3) David D. Walden, et al., eds., INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th ed. (John Wiley & Sons Inc., 2015).
- 4) Judith Dahmann, et al., "An implementers' view of systems engineering for systems of systems," in 2011 IEEE International Systems Conference (IEEE, 2011), 212-217., <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2011.5929039>.
- 5) Community Research and Development Information Service (CORDIS), "Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-physical Systems of Systems," European Commission, <https://cordis.europa.eu/project/id/611115>, (2023年2月5日アクセス) .
- 6) Object Management Group® (OMG®), "About the Unified Architecture Framework Specification Version 1.2," <https://www.omg.org/spec/UAF/1.2/About-UAF/>, (2023年2月5日アクセス) .
- 7) IEEE, "IEEE Standard for DevOps: Building Reliable and Secure Systems Including Application Build, Package, and Deployment," in IEEE Std 2675-2021 (IEEE, 2021), 1-91., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9415476>.
- 8) Sulayman K. Sowe, et al., "Cyber-Physical-Human Systems: Putting People in the Loop," IT Professional 18, no. 1 (2016) : 10-13., <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.14>.
- 9) Azad M. Madni, Michael Sievers and Carla Conaway Madni, "Adaptive Cyber-Physical-Human Systems: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop," INSIGHT 21, no. 3 (2018) : 87-93., <https://doi.org/10.1002/inst.12216>.

- 10) 西村秀和「Society5.0を形づくる」『横幹』12巻1号(2018):33-37., https://doi.org/10.11487/trafst.12.1_33.
- 11) 内閣府 統合イノベーション戦略推進会議「人間中心のAI社会原則(平成31年3月29日)」<https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aigensoku.pdf>, (2023年2月5日アクセス) .
- 12) 人工知能学会倫理委員会「人工知能学会 倫理指針」<http://ai-elsi.org/wp-content/uploads/2017/02/人工知能学会倫理指針.pdf>, (2023年2月5日アクセス) .
- 13) Karen Yeung, “Recommendation of the Council on Artificial Intelligence (OECD),” *International Legal Materials* 59, no. 1 (2020) : 27-34., <https://doi.org/10.1017/ilm.2020.5>.
- 14) IEEE, “IEEE Standard Model Process for Addressing Ethical Concerns during System Design,” in *IEEE Std 7000-2021* (IEEE, 2021), 1-82., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9536679>.
- 15) IEEE, “IEEE Standard for Transparency of Autonomous Systems,” in *IEEE Std 7001-2021* (IEEE, 2022), 1-54., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9726144>.
- 16) IEEE, “IEEE Standard for Data Privacy Process,” in *IEEE Std 7002-2022* (IEEE, 2022), 1-41., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9760247>.
- 17) IEEE, “IEEE Standard for Transparent Employer Data Governance,” in *IEEE Std 7005-2021* (IEEE, 2021), 1-81., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9618905>.
- 18) IEEE, “IEEE Ontological Standard for Ethically Driven Robotics and Automation Systems,” in *IEEE Std 7007-2021* (IEEE, 2021), 1-119., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9611206>.
- 19) IEEE, “IEEE Recommended Practice for Assessing the Impact of Autonomous and Intelligent Systems on Human Well-Being,” in *IEEE Std 7010-2020* (IEEE, 2020), 1-96., <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9084219>.
- 20) Sara Mattingly-Jordan, et al., “ETHICALLY ALIGNED DESIGN: First Edition Glossary,” IEEE Standards Association, https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/other/ead1e_glossary.pdf, (2023年2月5日アクセス) .
- 21) IEEE, A Call to Action for Businesses Using AI - Ethically Aligned Design for Business (IEEE, 2020), 1-20.