

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

社会システムとは社会インフラなど、社会で利用されるシステムの総称である。社会システムは社会を持続的に発展させていくというゴールに向けて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システムである。このように、それぞれが独立したシステムとして動作しつつ、相互に関係しているシステム全体をシステムのシステム (SoS: System of Systems) と呼ぶ。社会システムアーキテクチャーは経済や環境、技術的な変化に対応し、社会を構成する人々の、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に、SoSである社会システムのアーキテクチャー定義と、マネジメントに関する研究開発領域である。

(2) キーワード

System of systems、アーキテクチャー、ELSI (Ethical, Legal and Social Issues)、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 (A/IS: Autonomous Intelligent System)、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)}。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、システム要素とそれらの間の関係性を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めざす姿を描き、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]

当初、社会を支えるインフラストラクチャーは個別に構築され、運用されるものであった。組み込み計算機の発達に合わせて計算機が組み込まれ、インターネットといったネットワークの発達に合わせて、同種のインフラストラクチャー同士がネットワークで結合されシステムになった。IoT の概念に合わせて、システム同士をネットワーク結合して運用するようになり、システムのシステムである SoS が誕生した。電力システム、交通システムあるいは防災システムなどは、複雑に相互関係性をもつ複数のシステムから構成されている SoS である。SoS はライフサイクル全般にわたりマネジメントすることが困難なシステムを含むことがある。また、SoS はイ

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、サイバーフィジカルシステム (CPS: Cyber Physical System、以下CPS)⁵⁾ となっている場合もある。SoSは独立して動作可能なシステムが、ある共通したゴールに向けてネットワークされ、大規模な統合システムになっている。SoSは大規模で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るが、相互関係があり、要素である構成システムは、それぞれ異なるシステムライフサイクルを持つ。そのため、個々のシステムを最適化してもSoS全体の最適性は保証されないという特徴をもつ。

このような特徴をもつSoSを機能させるには、既存、もしくは、新規のシステムが混在することで得られる能力を、構成要素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) が必要と考えられる¹⁾。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、信頼性などを拡張してSoSに適用することが研究されている。

このような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、文献4では、SoSEのプロセスを時間で展開した波モデル (wave model) を提示している。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。

(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⁶⁾、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⁷⁾。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の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度を設けるという提案もある⁸⁾。

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^{9), 10), 11)}。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、おのこ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)¹²⁾ 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、三つの柱の対応付けについても記載されている。

〔注目すべき国内外のプロジェクト等〕

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¹³⁾の試みの中で、産学官が連携し、Society 5.0を形づくるための基盤として、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を構成しようとしている。システム連携を行うことでCPSを形成し、これを社会に組み込む際に人々との相互作用を考慮し、社会を持続可能なものとするために、社会をSoSとして考え、SoSアーキテクチャーに基づきこれをマネジメントしようとしている。

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¹⁴⁾。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システム（都市OS）の役割」、「相互運用の重要性」の4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めざしている。

情報処理推進機構のデジタルアーキテクチャ・デザインセンター設立

Society5.0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、情報処理推進機構（IPA）にデジタルアーキテクチャ・デザインセンターが2020年5月設立された。このセンターは

- ・異なる事業者間や社会全体でのデータやシステムの連携を容易にするための全体の設計図を作る「アーキテクチャー設計」
- ・設計を主導できる専門家の育成を担う「専門家の育成」
- ・将来的にアーキテクチャー設計が必要となりうる領域に関する調査および関係機関との連携方法の検討・情報交換等を行う「調査および国際連携」

の三つの機能を有している。

IEEEの標準策定プロジェクト

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¹⁵⁾が2017年に発足している。P7000シリーズは、P7000「システム設計中に倫理的懸念に対処するためのモデルプロセス」、P7010「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」、P7014「自律的で高度な知能を備えたシステムにおけるエミュレートされた共感における倫理的考慮の標準」など、13プロジェクトが存在する。その中でまず、P7010で検討されたドラフトが標準として承認され、2020年5月に公開¹⁶⁾された。今後順次、P7000シリーズが公開される見込みである。また、同時にP7000標準で使用される用語集(Glossary)¹⁷⁾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。

(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つつ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 Processes¹⁸⁾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ー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、社会科学の専門家との協働が欠かせないことを意味する。

(6) その他の課題

SDGs (Sustainable Development Goals)¹⁹⁾が2015年に国連から発行されている。これからのSociety5.0時代において、SDGsを達成し持続させていくには、現在および将来にわたりSDGsを推進する担い手として、先端技術を担い地球と社会の持続性に配慮できる人材の育成が必須となる。国連では、すべてのSDGsに貢献するための人材を育成する教育を提供することをめざし、「Education for Sustainable Development : Towards achieving the SDGs (ESD for 2030)」が掲げられている²⁰⁾。「ESD for

2030」は「ESDに関するグローバル・アクション・プログラム（GAP）」の後継枠組として、2019年12月国連総会において採択された決議に盛り込まれた。

「ESD for 2030」では、教育に関わるゴールであるSDG 4のみならず、教育がすべてのSDGs達成に向け重要なものであり、そのゴールは17のSDGsの達成を通じて、より公正で持続可能な世界を構築することである。また、「ESD for 2030」のアプローチとして「変容をもたらすアクション」(Transformative Action)、「構造的変革」(Structural Change)、「技術の未来」(The technological future)が挙げられており、個人の意識改革と行動変容のプロセス、社会課題の構造的理解と困難な状況の人々への共感、社会課題を解決しようとする新興技術に対する批評（評価）的思考（Critical Thinking）が重要になる。このような動向を受けて、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～」²⁰⁾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²¹⁾。

SoSである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、倫理的な思考をも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、自身のもつ専門性に引っ張られて、考え方が狭くなってしまう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」「協生」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思う。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に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、両者がとも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も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り、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、個人情報を利用する危険性がある。EADでは、自律システムの懸念として、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、自律システム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。従来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。

制度面での課題としては、社会システムについての活動で実証試験などを実施するために長い時間を要することがある。また、市民が積極的に参画して進める活動も社会システムを考える上では極めて重要なものである。このため、社会実証試験を実施するための制度面でのバリアーを低くすることが求められる。ただし、安全面、セキュリティ面での配慮は、社会への影響の度合いに応じて重要となるため、こうした社会実証試験を行うための制度作りを進める必要がある。

(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。
	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。
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、具体的な標準をP7000シリーズとして策定中。 国家科学技術会議(NSTC)の人工知能特別委員会(Select Committee on Artificial Intelligence)による米国人工知能研究開発戦略計画2019年アップデート ²²⁾ 。
	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。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。
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。 OECD人工知能のガイドライン”Recommendation of the Council on Artificial Intelligence” ¹⁰⁾ 。
	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計画されている。
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。
	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。
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。
	応用研究・開発	△	→	具体的な研究、プロジェクトは見えない。

(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rend ※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

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学

関連する他の研究開発領域

- ・都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康) (環境・エネルギー分野 2.2.11)
- ・水循環 (水資源・水防災) (環境・エネルギー分野 2.2.3)
- ・水利用・水処理 (環境・エネルギー分野 2.2.4)
- ・電気エネルギー利用 (電力ネットワークマネジメント) (環境・エネルギー分野 2.1.8)

参考文献

- 1) Mohammad, Jamshidi, ed. *System of systems engineering: innovations for the twenty-first century*. John Wiley & Sons, 2011.
- 2) Maier, Mark W. "Architecting principles for systems-of-systems." *Systems Engineering* 1, no. 4 (1998): 267–84.
- 3) *A Guide for System Life Cycle Process and Activities*. 4th ed. Systems Engineering Handbook. Wiley, 2015.
- 4) Dahmann, Judith, George Rebovich, Ralph Lowry, JoAnn Lane, and Kristen Baldwin. "An implementers' view of systems engineering for systems of systems." In *Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International*, 212–17, 2011. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2011.5929039>.
- 5) "Definitions used throughout the project. Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-Physical Systems of Systems." Accessed January 29, 2021. <https://cordis.europa.eu/project/id/611115>.
- 6) Sowe, Sulayman K., Eric Simmon, Koji Zettsu, Frederic Vaulx, and Irena Bojanova. "Cyber-Physical-Human Systems Putting People in the Loop." *IT Pro, IEEE Computer Society*, February 2016. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.14>.
- 7) Madni, Azad M., Michael Sievers, and Carla Conaway Madni. "Adaptive Cyber - Physical - Human Systems: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop." In *28th Annual INCOSE International Symposium*, 2018. <https://doi.org/10.1002/inst.12216>.
- 8) 西村秀和. 「Society5.0 を形づくる」. 横幹, 特集「Society5.0、超スマート社会に向けた新しい価値を創造する各学会の取り組みと他分野との研究展望」, 12, no. 1 (2018年): 33–37. https://doi.org/10.11487/trafst.12.1_33.
- 9) 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」, 参照 2021年1月29日. <https://www8.cao.go.jp/cstp/aigensoku.pdf>.
- 10) 人工知能学会 倫理委員会. 「人工知能学会倫理指針」, 参照 2021年1月29日. <http://ai-elsi.org/wp-content/uploads/2017/02/人工知能学会倫理指針.pdf>. 11 OECD Legal Instruments. "Recommendation of the Council on Artificial Intelligence." Accessed January 29, 2021. <https://www.oecd.org/going-digital/ai/principles/>.
- 12) IEEE. "Ethically Aligned Design, First Edition (EADv1e)." Accessed January 29, 2021. <https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/documents/other/ead1e.pdf>.

- 13) 「JST未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域」. 参照 2021年1月29日. <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html>.
- 14) 内閣府. 「スマートシティリファレンスアーキテクチャー ホワイトペーパー (日本語版)」. 参照 2021年1月29日. https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/a-whitepaper1_200331.pdf.
- 15) “IEEE ETHICS IN ACTION.” Accessed January 29, 2021. <https://ethicsinaction.ieee.org/>.
- 16) “IEEE Std 7010™-2020: IEEE Recommended Practice for Assessing the Impact of Autonomous and Intelligent Systems on Human Well-Being.” Standards Committee of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, Approved May 5, 2020.
- 17) “ETHICALLY ALIGNED DESIGN First Edition Glossary.” Accessed January 29, 2021. https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/documents/other/ead1e_glossary.pdf.
- 18) “ISO/IEC/IEEE 42020:2019(E), First Edition, Software, Systems and Enterprise — Architecture Processes,” July 2019.
- 19) “SDGs (Sustainable Development Goals).” Accessed January 29, 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- 20) UNESCO. “UN General Assembly highlights UNESCO’s leading role in the Education 2030 Agenda.” Accessed January 29, 2021. <https://en.unesco.org/news/general-assembly-highlights-unescos-leading-role-education-2030-agenda>.
- 21) 文科省. 「2019年G20サミット教育関連イベント「21世紀の教育政策～Society5.0時代における人材育成～」 G20 2019 JAPAN Summit Related Event on Education」. 参照 2021年1月29日. https://www.mext.go.jp/a_menu/kokusai/2019g20event/1419637.htm.
- 22) ぎょうせい. 「教育 Insight「21世紀の教育政策」で持続可能な開発目標に貢献」. 参照 2021年1月29日. <https://shop.gyosei.jp/library/archives/cat01/0000006828>.
- 23) NITRD. *THE NATIONAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT STRATEGIC PLAN: 2019 UPDATE*. Accessed January 29, 2021. <https://www.nitrd.gov/pubs/National-AI-RD-Strategy-2019.pdf>.

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学