

社会をアーキテクチャでデザインする

Designing Society with Architecture

石原 裕士

要約 複雑化する社会的課題を解決するためには、デジタル技術を前提に、法規制、ビジネス、情報システムといった社会そのものを、System of Systems と呼ばれる一つのシステムとみなして一体的に設計しなければならない。デジタルを前提とした社会構造のアーキテクチャ設計を担う組織として、2020年にデジタルアーキテクチャ・デザインセンター（DADC）が発足し、アーキテクチャの設計と、アーキテクチャが社会実装されるための取り組みを行っている。

社会構造の設計においてアーキテクチャ設計が求められる理由は、背景や関心の異なるステークホルダ同士の認識を揃えることと、相互矛盾を解く場を作ることにある。アーキテクチャ設計プロセスでは、ビジョン構築、設計範囲の合意、非機能要件の定義、設計情報の管理が課題となる。また、アーキテクチャ設計をマネジメントする際の要点として、人材育成、ステークホルダの早期参画、アジャイルな管理が挙げられる。

Abstract In order to solve increasingly complex social issues, society including laws and regulations, business, and information systems, must be designed as a system, called the “System of Systems”, based on the premise of digital technology. The Digital Architecture and Design Center (DADC) was established in 2020 as an organization responsible for designing architectures, which are digital-based social structures to design architectures and to ensure that architectures are implemented in society.

The reason why architectural design is required in the design of social structures is to align the perceptions of stakeholders with different backgrounds and interests, and to create a place to resolve mutual contradictions. In the architectural design process, there are several tasks such as vision building, agreeing on the scope, defining non-functional requirements, and managing design information. In addition, human resource development, early stakeholder involvement, and agile management are key elements in managing architectural design.

1. はじめに

Internet of Things (IoT) と呼ばれる一連の技術と、データサイエンス関連技術の普及と高度化により、様々な業界・分野で、現実世界（フィジカル空間）をセンサーで観測し、デジタルツインと呼ばれる電子的な仮想空間（バーチャル空間）内で問題の最適解を求め、人間の行動を支援するシステムやロボットを通じてフィジカル空間にその解を反映させる、サイバーフィジカルシステム（Cyber-Physical System, 以下CPS）の実現が期待されている。特に日本国政府が2016年に策定した第5期科学技術基本計画^[1]では、CPSにより経済・社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会としての Society 5.0 の実現が方針として掲げられている。

また、クラウド化を背景に、ビジネスを構築する様々なシステムが as-a-Service 化されたことにより、様々な事業者が API として提供するサービスを組み合わせることで、一企業、一

個人では実現できない価値を創造し、提供できるようになっている。こうした API エコノミーと呼ばれる商圈も、経済発展や社会的課題の解決には欠かせない要素である。CPS や API エコノミーのユースケースは様々なものが考えられるが、例えば、道路や発電所などのインフラがセンサーで自ら故障を検知、サイバー空間で修復方法を検討するとともに、電子商取引のための API を介して資材調達・工事調達などを行い、ロボットを用いてインフラを修復する自動インフラ保守サービスが実現すれば、労働力不足やインフラ老朽化といった社会的課題に対応できる可能性がある。こうしたサービスは CSV^{*1} の好例ともいえる。

しかし、このようなシステムを限られたステークホルダだけで作り上げることは困難である。先ほどの自動インフラ保守サービスの例で言えば、インフラ事業者、センサーメーカー、データ分析事業者、資材手配サービス事業者、工事事業者、ロボット運用事業者など、ドメインを跨いだサービス連携、データ連携が欠かせない。さらに、各処理の品質や安全性の担保、事故が起こったときの原因分析や責任追及といった安全性・信頼性に関する要件、各ステークホルダのビジネスの持続可能性、調達における透明性や健全性の確保、インフラ情報の海外流出防止などの要件も満たさなければならない。加えて、人間が作業することを前提とした法規制がある場合、その法規制の見直しも求められる。

すなわち、CPS や API エコノミーで社会課題を解決しようとした場合、個別の情報システムやビジネスの設計だけでなく、CPS や API エコノミーといったデジタルシステムを中心に「社会」そのものを適切に「デザイン（設計）」することが求められる。

本稿では、この課題に国として取り組むために、2020 年に独立行政法人情報処理推進機構（以下、IPA）に発足した、デジタルアーキテクチャ・デザインセンター（以下、DADC）の取り組みについて紹介するとともに、CSV 経営の推進という視点からも重要な、社会をデザインするためのポイントについて解説する。2 章で社会デザインについて、3 章でアーキテクチャと DADC について述べ、4 章でアーキテクチャ設計のプロセス、5 章でアーキテクチャ設計のマネジメントについて述べる。

2. 社会のデザインにおける課題

本章では、デジタルシステムを前提とする社会のデザインと、そのデザインにおいて発生する課題について、System of Systems というキーワードを中心に述べる。

2.1 System of Systems

システムという単語には様々な定義がある。本稿では、DADC のアドバイザーボードを務める慶応義塾大学大学院の白坂教授による「複数の構成要素から成り立ち、複数の要素が相互に作用しあう集合体のこと」^[2]という説明を用いることにする。この説明によれば、システムとは必ずしも意図をもって作られるものとは限らず、人間社会や生態系のように自然発生するものも、システムの一つであると捉えることができる。

システムを構成する要素はサブシステムと呼ばれ、各サブシステムもまた一つのシステムとして、さらにサブシステムを持つという階層構造を形成している。

System of Systems (SoS) とは、システムの中でも「運用の独立性」「管理の独立性」「進化的開発」「創発的振舞い」「地理的な分散」という五つの特徴を持つものである^[3]。こうした特徴を持たない、従来のプロダクトのようなシステムは、Monolithic System と呼ばれる。

例として、カメラで撮ったものをプリントするシステムを考える。このとき、デジタルカメラとプリンターを接続するシステムと、ポラロイドカメラのように撮影機能と現像機能を一体化したシステムの2通りが考えられる。このとき、前者はカメラとプリンターという二つの独立したシステムをサブシステム^{*2}とする SoS、後者は撮影機構と現像機構をサブシステムとする Monolithic System である。先の五つの特徴について、この例を用いて比較したものが表1である。

表1 SoS と Monolithic System の違い

	デジタルカメラとプリンター (System of Systems)	ポラロイドカメラ (Monolithic System)
運用の独立性	システムを分解し、それぞれ独立に運用できる	システムは分解できず、一体的に運用される
管理の独立性	サブシステムはそれぞれ独立に調達され、別個のものとして管理される	サブシステムは同時に調達され、一体のものとして管理される
進化的開発	任意のシステムをサブシステムとして接続し、システムに他の機能を追加できる(例: パソコンを追加することで画像編集が可能となる)	任意のサブシステムの追加によるシステムへの機能追加はできない
創発的振る舞い	システムの振る舞いは利用者が利用時に発想し、利用者が責任を負う形で事後的に決定する	システムの振る舞いは製造者が製造時に発想し、製造者が責任を負う形で予め規定されている
地理的な分散	サブシステムは物理的に離れており、電子データでやりとりする	サブシステムは物理的に同じ場所があり、基本的に物理機構を通じてやりとりする

先に述べた CPS や API エコノミーといったデジタルシステム、そしてそれを利用する社会は、センサー、アクチュエーター、Web サービスとその背後にある企業など、相互独立したシステム同士の連携であり、SoS に分類される。SoS には「進化的開発」「創発的振る舞い」に起因した機能・規模の予見の難しさ、「独立」「分散」したシステムをつなぐものであることから様々なステークホルダが関与するため、設計・運用が難しいという課題がある。

2.2 デジタルシステムを前提とする社会のデザインにおける課題

SoS の特徴を踏まえた社会デザインにおける具体的な課題について、本節で述べる。

2.2.1 サブシステム間連携の定義

SoS であるか Monolithic System であるかを問わず、システムを機能させるには、各サブシステムが連携することが重要である。そのためには、接続仕様(インタフェース)と相互作用(機能・データ)を、連携する各サブシステム間で揃えておかなければならない。

Monolithic System では、サブシステムの開発はシステム開発の範囲内で行われるため、接続仕様や相互作用は、範囲内にいる担当者同士の「すり合わせ」によって調整できる。しかし、進化的開発を前提とする SoS では、設計時点ではどのサブシステムと連携するかは不明である。よって、サブシステムを提供する全ステークホルダが従うべき仕様や作用を予め

標準として定義し、全ステークホルダがその標準に従うように仕向ける「標準化」が求められる。

標準化は、その標準に従うステークホルダが多いほどステークホルダ自身にメリットがあるというネットワーク外部性の特性を持つ。標準化活動を一部企業などの範囲で行った場合、規模が拡大しないため、ネットワーク外部性によるメリットを十分享受できず、規模の大きなグローバル標準に取って代わられる懸念がある。また、ネットワーク外部性は、そのネットワークに一度参加してしまうと、他のネットワークへの変更が難しくなるロックイン効果をもたらすことが知られている。そのため、国外企業に有利な標準が形成されてしまうと、サブシステムを担う国内企業は長期にわたって不利益を受け、我が国の経済発展を阻害する懸念がある。

規格争いという言葉があるとおおり、標準化は国際競争である。この分野において日本は遅れを取っているという指摘があり^[4]、作ったシステムを持続可能なものとするには、ステークホルダ同士が協調したうえで、国際化まで見越した標準化戦略が求められる。

2.2.2 安全性・信頼性の確保

SoSにおいて、各サブシステムは互いに異なる主体により運用、管理される。そのため、悪意あるサブシステムや、品質の低いサブシステムがシステムに混入することで、システム全体の品質が低下する恐れがある。また、障害原因の分析や切り分けなどが難しいため、障害回復に時間を要するなどの恐れもある。

SoSを社会インフラとして扱うには、SoS全体の安全性・信頼性を確保するための仕組みが求められる。具体的には、異常を起こしたサブシステムを切り離す仕組み、複数のサブシステムを跨いで取引を追跡する仕組み、信頼できるサブシステムかどうかを認証する仕組みなどが考えられる。こうした仕組みは特定のサブシステムだけに実装されるものではなく、SoSを構成するすべてのシステムに実装されるべきものであるため、ステークホルダ同士が協調しなければならない。これに加えて、個々のサブシステムの安全性や信頼性の保証、安全に相互接続できる仕組みなど、全体の基盤となるサブシステムが求められる。

2.2.3 法制度・ビジネスなどとの一体的検討

Monolithic Systemであることを前提とした法規制や経営戦略によって、SoSが実現できない可能性がある。法規制の例として、完全自律運転のロボットや自動運転車が事故を起こした場合、現行の製造物責任法では、製造者の利益と被害者救済のバランスが取れた対処ができないため、事故減少や社会課題解決に寄与できたとしても、社会実装に至らない可能性がある^[5]。一方で、法規制には国民の権利を守るという重要な根拠があること、経営戦略の見直しは組織設計や採算計画などに大きな影響を与えることから、臨機応変に変化させることは難しい。

法規制に関しては、CPSやAPIエコノミーのメリットと、もともとの規制によって守られる国民の権利を両立できるような制度のあり方を検討し、実際の立法・行政プロセスに反映することが求められる。また、ビジネスにおいては、CPSやAPIエコノミーに参加することで得られる効果を定量化し、囲い込み戦略との経済的比較ができるようにしたうえで、企業の参加を促すことを、技術の進歩と一体的に進めていかなければならない。

3. アーキテクチャと DADC

本章では、前章で述べた課題を踏まえて、アーキテクチャ設計が求められる理由と、アーキテクチャ設計を担うことを目的として設立された DADC について述べる。

3.1 アーキテクチャの意義

アーキテクチャ記述の国際標準 (ISO/IEC/IEEE 42010:2011. 以下, ISO 42010) によれば, システムのアーキテクチャは「要素, 関係, 設計と進化の原則として具体化された, そのシステムの基本的な概念または特性」と定義される^[6]. すなわち, そのシステムの「要素 (サブシステム)」「要素間の関係」「それらを設計・改善する手法」を整理したものといえる。

なお, ISO 42010 では, アーキテクチャは概念的なものであり, アーキテクチャを具体的に記述した資料群を「アーキテクチャ記述 (Architecture Description)」, ステークホルダの関心事 (Concern) に応じて描かれる様々な図表を「アーキテクチャビュー (Architecture View)」と呼ぶ. アーキテクチャビューの集合体がアーキテクチャ記述であり, 各アーキテクチャビューはステークホルダの関心事に基づいて複数のものが作られる. ただし, 全てのアーキテクチャビューは, アーキテクチャと整合していなければならない. これらの関係を図1に示す.

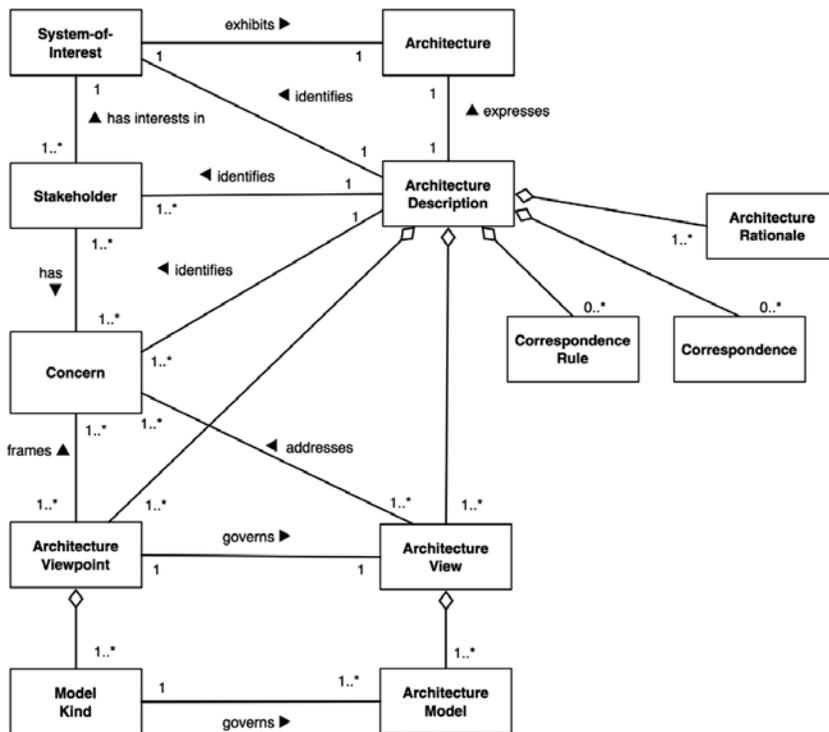


図1 ISO 42010におけるアーキテクチャの用語とその関係

2章に述べたように, SoSによる社会デザインの課題の一つは, サブシステム間の標準化を行うことである. そのためには, SoSの全体像と, 各サブシステムの定義を全員が理解したうえで, 連携する要素同士と, 連携を実現する具体的な方式を示すことが求められる. さらに, 安全性や信頼性といった技術的課題への対応, 経済性, 関係法令のあり方の検討も求められる.

こうした検討のために、様々なドメイン、レイヤーのステークホルダが集まって議論するにあたり、関心事項や背景・知識の異なるステークホルダが、何ら共通認識を持たずに議論することは有益ではない。

サブシステムの定義や関係をもとに、全体を表現するアーキテクチャ記述は、こうしたステークホルダ間の違いを埋め、共通認識を形成したうえで議論する際の「見取り図」として重要な役割を果たす。このアーキテクチャ記述の作成が、アーキテクチャ設計の最大の意義である。

また、アーキテクチャ設計のもう一つの意義として、相互矛盾を解決する場を作ることが挙げられる。異なるステークホルダの要求を全て受け入れようとするすると相互矛盾が発生し、全体像を描くことができなくなる。例えば「ロボットの認証を緩和して利用を推進すべき」という要求と「ロボットの認証を強化してより高い安全性を確保すべき」という要求は、そのままでは両立できない。

これらの要求をともに解決できる現実的な方法をステークホルダとともに考える場が、アーキテクチャ設計の場であり、アーキテクチャ設計の効果でもある。上述の例で言えば「ロボットの安全度をデジタルで検証することで、認証の負荷を下げつつ、安全性を確保する」といった方法が考えられる。このデジタル技術は、新たなサブシステムとして定義され、アーキテクチャの一部をなす。

3.2 DADCの目的とスコープ

DADCは、2020年の改正情報処理促進法に基づき、社会全体でのデータ連携・共有の基盤づくりを担うことを目的として発足した組織である。具体的には、政府から依頼を受け、ある領域を中心としてシステムやデータ連携にかかるアーキテクチャの設計を行うとともに、本節で述べるインキュベーションラボを通じて、アーキテクチャ設計の支援を行っている。また、産業競争力確保の観点から、産業界全体のアーキテクチャ設計能力を高めるため、民間企業におけるSoSアーキテクトの輩出もDADCの狙いとしている。大多数を占める民間企業からの出向者に対して、SoSの設計を担うシステムズエンジニアリング教育の提供や、人材確保に関する検討なども行っている。

2022年時点でのDADCの具体的な業務は「自律移動ロボット」「企業間取引」など、特定のドメインを対象としてアーキテクチャを検討するとともに、それらが実装されるように、サブシステムや規制を担うステークホルダの具体的な活動を促すことである。そのために、有識者からの意見収集、関係省庁への法規制等のあり方提案、国家プロジェクトによる技術開発との連携、業界団体との共同による議論を繰り返しながら、アーキテクチャの検討、詳細化と、社会実装の推進を図っている。

インキュベーションラボでは、社会課題の解決を前提に「制度・ルールの見直し」「業界を横断する連携」「多数のステークホルダの協働」が求められるテーマを民間から広く募集し、有望なものは6か月間を目安に実現性の評価とアーキテクチャ設計に向けた準備を行い、優れたものはDADCのプロジェクトとして正式に立ち上げる。評価は、産業の活性化につながるか、サイバー・フィジカルの融合、異分野連携、制度やルールを含むガバナンス改革などDADCで取り組むべきテーマか、といった観点から行われる。一方、6か月の活動の結果、アイデアの有効性が認められない、民間の活動で十分解決可能などの結論に至った場合は、プロ

プロジェクトには昇格せず、DADCでの活動は終了となる。ただし、DADCのプロジェクトに進まなくても、6か月間の活動で見えた方向性にそって、民間を中心に活動を継続することは可能である。

3.3 公的機関がアーキテクチャ設計を担う理由

アーキテクチャ設計を公的機関であるIPAが担う理由としては「中立性」と「公的課題の解決」の側面が挙げられる。

2.2.2項にて、SoSによる社会デザインには、関心の異なる様々なステークホルダの協働が不可欠であると述べた。これを民間企業が自発的に行うには、自社がどこで競争するかを明確にし、競争しない部分をオープンにして他者との協働で補うことで、互いの得手不得手を補うオープン&クローズ戦略を取らざるをえない。しかし、日本企業はオープン&クローズ戦略が苦手であるという指摘^[7]があるとおり、戦略的な協働の気運は欧米企業に比べて高くない。そのため、社会実装を迅速に進めるには、少なくとも当面は公的機関が中立的な立場で取り組むことが望ましいと考えられる。

また、現在我が国が抱える公的課題は多岐にわたっている。具体的には、少子高齢化に伴う労働力減少への対応、G7各国中最低とされる労働生産性の向上、技術やデータの流出を防ぐ経済安全保障、新技術の利用やサービス展開において国内企業が外資系企業に劣後し国際競争力を喪失しつつある状況の打開などが挙げられる。これらはいずれも個社の取り組みでは解決が難しい課題である。そればかりか、海外企業・製品をサプライチェーンに組み込むことで海外依存が進み、経済安全保障面で悪影響を与えるなど、企業の存在目的である経済合理性の追求が、かえって問題を進行させてしまう恐れさえある。

EUにおいて、グローバル企業に対する参入障壁を設けつつ、ライフサイクル全体にわたるデータ流通の活性化を意図して官主導で進められたGAIA-X^[8]は、まさに官主導のアーキテクチャの例である。DADCでは、図2に示すように、グローバル企業の参入そのものは許容しつつも、グローバル企業による独占・寡占などが起こらない共存共栄型のアーキテクチャ構築を、我が国が目指すべき方向性として掲げている。こうした観点での検討は一企業の利害を超えるものであり、公的機関が主導して進めていくことが適当であると考えられる。

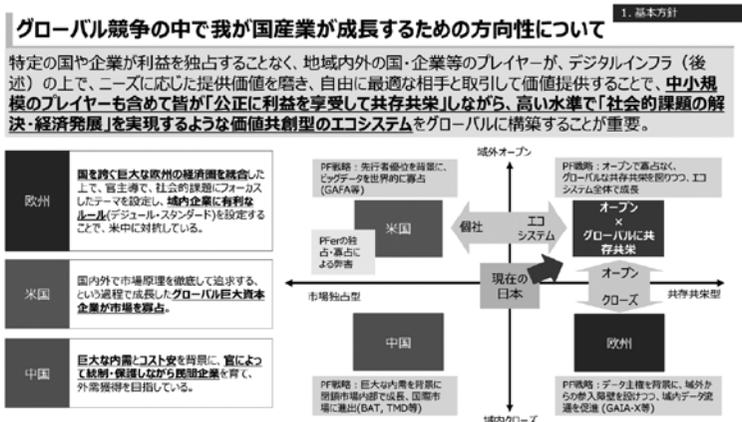


図2 欧米中の産業成長のポジショニング比較と日本の方向性^[9]

4. アーキテクチャ設計のプロセスとその課題

本章では、DADCで筆者が参画した自律移動ロボットプログラムでの経験をもとに、社会をデザインするためのアーキテクチャ設計プロセスと、その課題、対処方法について考察する。

自律移動ロボットプログラムは、ドローンや、地上走行ロボット（サービスロボット）など、フィジカル空間を自律的に移動するロボットに関するアーキテクチャを検討するプログラムである。ロボットの運行管理を中心に、地図・気象情報などの空間情報の利用、市民の納得感（社会受容性）の確立、採取データの利用、効果的なインフラ整備、ロボットを活用したビジネス、自律移動ロボットのエコシステムを通じたステークホルダ間の連携や、連携した際のガバナンスのあり方、アーキテクチャの利用促進のあり方などの総合的な検討を行ったものであり、設計結果は2022年7月にアーキテクチャ報告書としてデジタル庁に提出され、一般公開されている^[9]。

2021年度末時点ではドローンと地上走行ロボットをスコープとしており、最終的には空飛ぶクルマや自動運転車といった領域もスコープに含めることを想定している。

4.1 将来ビジョン検討

アーキテクチャ設計の目的は、その領域で解決すべき課題を踏まえ、将来こうあるべきという理想像（ビジョン）と、現状のまま技術開発や制度整備が線形に進んだ場合、将来こうなっているという予想（フォーキャスト）とのギャップを分析し、ビジョンを実現するための取り組みを示すという、バックキャスト型アプローチにより決定される（図3）。よって、アーキテクチャ設計の前提として、目指すべきビジョンが求められる。

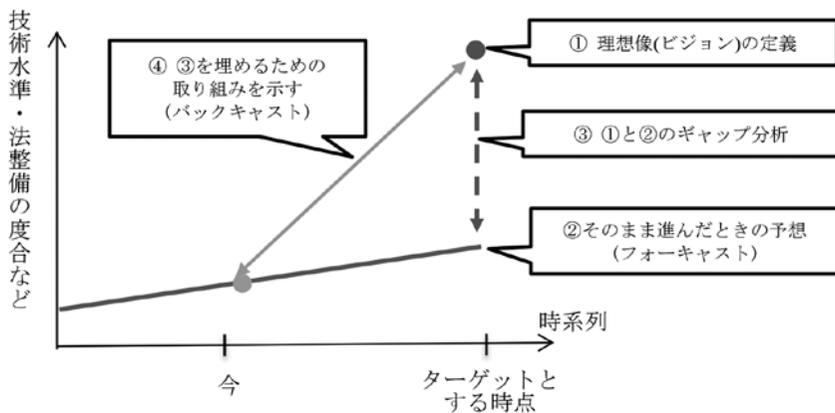


図3 バックキャスト型アプローチのイメージ

自律移動ロボットプログラムのアーキテクチャ設計はデジタル庁の依頼^[10]に基づくが、依頼文書で提示されたビジョンは「中長期的には年間500万フライトを上回るなど活用され、社会的課題の解決や産業の発展につながる」という抽象的かつ中長期的なものである。一方、サブシステムの開発等を担うステークホルダの関心事は具体的かつ直近のものであることが多く、想定される期間も1～3年単位と比較的短期である。このギャップにより、ステークホルダにとってはアーキテクチャ検討に参画する意義を持ちにくく、また、アーキテクチャ設計担当者にとっても検討の目的が曖昧なままではチームメンバー同士の意思が揃わないという問題が

あった。

2025年までのビジネスや法整備の方向性はある程度確定しているという現況や、市場の進化の度合いなどを踏まえ、DADCでは、2030年を当面のターゲットとしてビジョンを検討する「将来ビジョン検討」の活動を実施した。

ビジョン検討は、一般的なアーキテクチャ設計における範囲外の活動であり、アーキテクチャ設計着手時点で既に決まっているべきものである。しかし、抽象度の高い目標を実現するための要素を論理的に構想し、ステークホルダの関心事にあわせて図表として整理するという点では、ビジョン検討はトップレベルのアーキテクチャを検討する作業であるともいえる。

将来ビジョン検討活動では、2021年12月にデジタル庁より提示されたデジタル原則^[11]を踏まえ、デジタル完結・自動化・全体最適化という基本コンセプトを定めたうえで、学識経験者等の助言をもとに、ロボットを多業種で利用するマルチドメイン、一つのミッションで輸送とデータ採取など様々な目的をこなすマルチパーパス、様々なロボットが人手を介さずに自在に連携できるマルチモーダルなどの具体的なコンセプト(図4)を定めた。

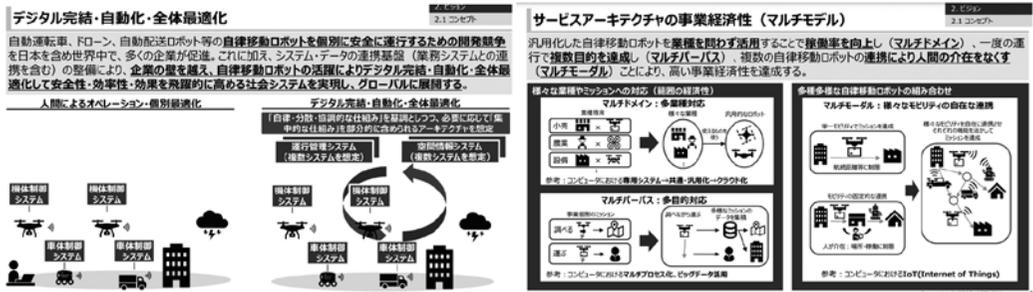


図4 自律移動ロボットの将来ビジョンのコンセプト(報告書^[9]より抜粋)

そして、事業者には「将来こうなったら望ましいのではないか」「社会的課題がこのようなシステムで解けるのではないか」という提案に近い形で、将来における自律移動ロボットのユースケース(図5)を、医療・インフラ・農業・物流などの様々なドメインにおいて検討し、将来目指すべき姿としてのビジョンを定義した。



図5 自律移動ロボットのユースケース概観(報告書^[9]より抜粋)

さらに、コンセプトを踏まえて便益算定対象項目を定め、ビジョンが実現された場合の便益を長期的に試算し、アーキテクチャに従って社会実装を進めた際に各参加者が得られる投資利便益を定量的に検討できるようにした(図6)。

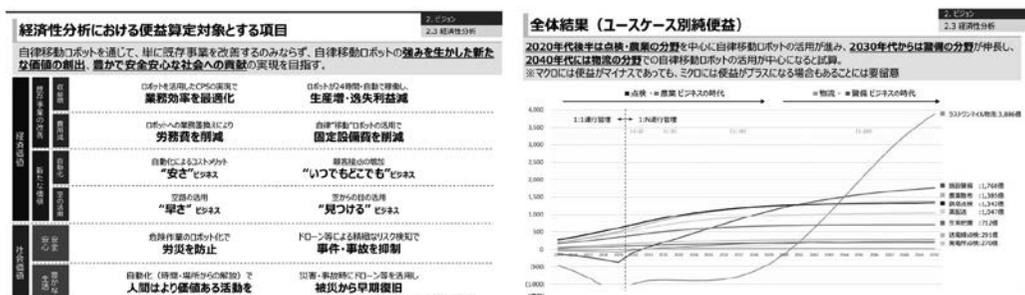


図6 ビジョンが実現された場合の経済効果試算(報告書^[9]より抜粋)

4.2 段階的詳細化によるアーキテクチャ設計

4.1節に示したビジョン検討結果に基づくバックキャストによりアーキテクチャ設計の目的が明らかになり、アーキテクチャ設計に着手できる。アーキテクチャ設計は、基本的に次の1)～6)のプロセスを進める。なお、アーキテクチャ設計の対象となるシステムのことをSoI(System of Interest)と呼ぶ。

- 1) SoIの定義：SoIと関係するSoI外のステークホルダ、SoIのライフサイクルを定義
- 2) ユースケースの定義：SoIを通じて実現される、ステークホルダの要求を定義
- 3) 機能の抽出：1)、2)を実現するために、SoIに要求される機能を抽出
- 4) 機能設計：3)で抽出した機能同士の連携を定義
- 5) 物理設計：4)を実現するために、SoIを複数のサブシステムに分解
- 6) 機能の割り当て：4)を5)に割り当てる

5)の段階で一段詳細化されたサブシステムが、実装担当者が扱える詳細度になるまで、サブシステムごとにこの工程を繰り返して行く。このように、1回ではなく何度も繰り返して詳細化していくことを、段階的詳細化と呼ぶ。

本節では、この段階的詳細化の過程における課題と、DADCでの取り組みについて述べる。

4.2.1 アーキテクチャ設計の順序

デジタルシステムと社会、すなわち組織や制度を設計する手法として「デジタルシステムを先に設計し、それにあわせて社会を設計する」というアプローチと、「社会を先に設計し、それにあわせてデジタルシステムを設計する」というアプローチが考えられる。特にデジタル技術が広く普及し、人間の意思決定やコミュニケーションにデジタルシステムが深く関係する昨今の状況を踏まえると、前者のアプローチに着目すべきである。経済産業省在職中に、DADC設立のきっかけとなるアーキテクチャの議論を省内でリードした東京大学の西山圭太は、著書『DXの思考法』の中で、後者のように組織がアーキテクチャを規定する「コンウェイの法則」から、前者のようにアーキテクチャが組織を規定する「逆コンウェイの法則」への転換が、デジタル化の現在地であると述べている^[12]。また、DADCも、DADCが設計するアーキテクチャ

を「異なる事業者間・社会全体でのビッグデータやシステムの連携を可能にする、全体の設計図」として、前者を前提とした定義をしている^[13]。

しかし、少なくとも 2022 年の時点で、多くのステークホルダにとって馴染み深いのは後者のアプローチであり、デジタルシステムありきの考え方を受け入れてもらうのは難しい。特に自律移動ロボットはハードウェア的な安全性の確保も重要な要素であるため、前者のアプローチではステークホルダから理解を得るのが難しい。結果として、アーキテクチャ検討活動自体に関心を持ってもらえない、アーキテクチャをもとに設計した組織や制度を理解してもらえないといった問題が生じる。一方で、後者のアプローチを進めようとしても、ドメインの全体像を理解している人がいないため、SoI を定義できないという問題に行き当たる。

DADC では前者のアプローチをとった上で、多くのステークホルダがデジタルシステムをイメージしやすい箇所を先に描くとともに、その周辺へと範囲を広げていくアプローチで SoI の全体像を検討した。検討結果である SoI の全体像を図 7 に示す。

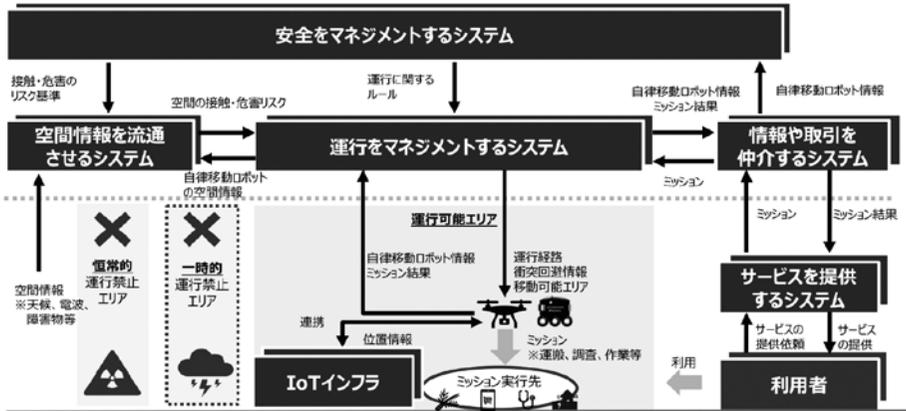


図 7 自律移動ロボットの SoI (報告書^[9]より抜粋)

検討の起点としたデジタルシステムは、自律移動ロボットの状態を把握し、安全かつ効率的な運行を担う「運行をマネジメントするシステム」である。特にドローンでは、国内外で検討がなされているドローン運航管理システム (UTM: Unmanned Aerial System Traffic Management) がこれに該当する。この周辺にあるシステムとして、運行に用いる地図や気象などの情報を提供する「空間情報を流通させるシステム」、ロボット運行とビジネスニーズ (「サービスを提供するシステム」) を結びつける「情報や取引を仲介するシステム」がある。また、それらの安全性や信頼性確保のための規則・基準情報の提供や、ログデータ等の分析による安全性・信頼性向上を図る「安全をマネジメントするシステム」が、それぞれサブシステムとなる。自律移動ロボットプログラムでは、システムごとにチームを分け、相互に連携しながら詳細検討を進めている。

4.2.2 非機能要件の検討

4.2 節で示したアーキテクチャ設計のプロセス 2) ではステークホルダへのヒアリングや業務フローの分析などを実施して要件を獲得する。しかしそれだけでは、目的を実現するための機能以外の要件、例えば安全性やセキュリティ、ビジネスの採算性などのような非機能要件が

抜け落ちてしまう恐れがある。そのため、プロセス3)の段階でこうした要件を網羅的に抽出する。

情報システムであれば、IPAが公開している非機能要求グレード等が網羅性の基準となるものの、「社会」において体系立てられた非機能要求リストは存在しないため、どのように網羅性を担保するかが課題となった。

この問題を図1のアーキテクチャ定義に従って表現すると、作るべきアーキテクチャビューを規定する「視点」である Architecture Viewpoint 群をどのように定義するかという問題であるといえる。図1に基づいて考えると、一つはステークホルダの関心事 (Concern) であり、もう一つは既知の Architecture Viewpoint 群を利用する方法である。当初はステークホルダを起点とし、政府機関などを網羅的にリストアップして整理したうえで、それぞれの関心事を想像するという方法で行った。この方法は、不足していた要件の獲得には一定の成果があったが、網羅性という観点で十分とは言い難い問題があった。

そこで、特にドローンの法整備において先行する、欧米の政府組織が発行したドローンの ConOps (Concept of Operations) と呼ばれる文書の構成を分析して、非機能要件の大枠を作成した。ConOps とは各ステークホルダが果たす役割や、整備すべき機能をまとめた文書であり、検討の起点となるアーキテクチャである。特に欧州の ConOps である CORUS は社会的影響や経済性の確保といった側面にもフォーカスしていたため、これをもとに「なんのためにこの規則があるのか」を整理することで得られた「安全性、経済合理性、社会受容性」のフレームを踏まえるとともに、さらに人材・技術という基盤整備を含めた循環的な相互関係を、ストラテジーとして示した (図8)。

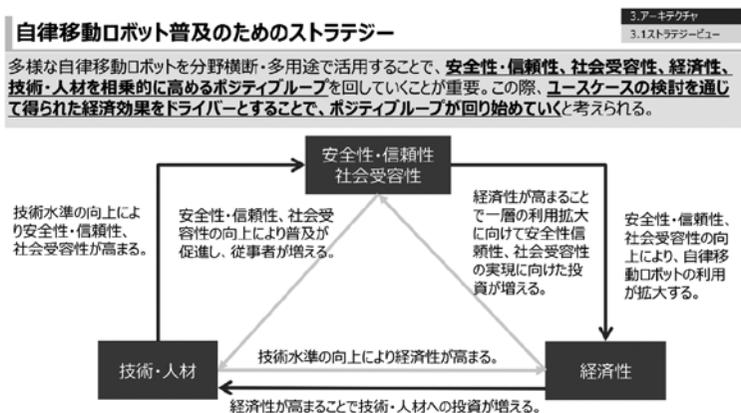


図8 自律移動ロボットの機能要件の全体像 (報告書^[9]より抜粋)

また、これに基づいて「事故=内的な脅威+外的空間からの脅威」「空間=フィジカル+サイバー」「収益=売上-コスト」のような一般的なフレームワークの視点から分解していくことで、網羅性を高めるとともに、SoIが具備すべき能力であるケーパビリティを定義した (図9)。

自律移動ロボットプログラムでは諸外国の先行事例を参考としたが、仮にそうした事例がまったくない場合、抜け漏れを許容してステークホルダの関心をベースに進めていくか、類似した SoI を持つ別分野の Architecture Viewpoint 群を参考にする方法が考えられる。

のリサーチや選定，利用方法や記法の統一，ツールの出力をわかりやすくするための図の用意といった問題があり，現時点では，情報への番号付与に基づく関連付けと，アーキテクトや専門家のレビューによる整合性確保という原始的な方法が中心となっている．この分野は，従来のシステム開発における要件定義・設計・実装のトレーサビリティ確保の延長線上にあるものであり，今後の技術進化が期待される部分でもある．

4.3 アーキテクチャに基づいた社会実装の推進

アーキテクチャを描いても，ステークホルダが参加しない限り SoS は実現されず，当初の目的である社会的課題の解決は達成できない．

さらに，こうした社会構造は国際競争の一つであり，国内のステークホルダが一丸となって SoS を社会実装したとしても，携帯電話のエコシステムであった i-mode がスマートフォンの普及によって駆逐されたように，外国産のグローバルな技術・サービスに敗北してしまう懸念がある．この場合，経済安全保障や産業競争力強化といった目的が達成されない恐れがある．

そのため，DADC では，アーキテクチャ設計時点で経済性や国際化についても考慮し，エコシステム全体の持続可能性を考慮した設計を行うとともに，複数のチャンネルによるステークホルダとの連携体制を構築し，国内外でアーキテクチャが実装されるための活動を行っている．

DADC では，法規制や社会受容性といった国内向けの非ビジネス領域に関して，経済産業省を通じて当該領域やデジタル法制の規制・推進を担う監督省庁との意見交換や相互理解のための場を設けることで，アーキテクチャ設計に対する理解と気運を高めたり，業界団体を通じて民間側での検討を促進したりといった活動を行っている．国外向けには，ISO や ASTM といった国際標準化団体での国際標準策定に関わった経験を有するメンバーを中心に，既存の国際標準化動向を収集するとともに，アーキテクチャに基づいて策定された標準を国際標準化するための検討を進めている．

国内向けの法規制に関しては，デジタル庁において，デジタル法制審査制度の検討が進められており，2022年8月にデジタル法制審査チームが発足した点に着目したい^[15]．これは，各省庁が提出する法案をデジタル庁が事前審査し，アナログ規制を前提とした法案を再検討させる制度であり，いわばデジタル版の内閣法制局である．将来的にはこうした制度と連携することで，デジタル化にそぐわない法規制が行われる問題を解消できる可能性がある．

5. アーキテクチャ設計のマネジメントとその課題

4章ではアーキテクチャ設計の手順面の課題について述べてきた．本章では，アーキテクチャ設計をマネジメントする観点からの課題と，その対応について述べる．

5.1 アーキテクトの確保・育成

アーキテクチャ設計を担う人材であるアーキテクトに求められる能力について，DADC でも整理を進めており，中間報告書として公開している^[16]．アーキテクト人材に対する要求定義について，図 11 に示す．

DADC では，全メンバーに対して，着任時に白坂教授によるアーキテクチャ設計講義の受講を義務付けるとともに，思考様式やエンジニアリングに関するワークショップ等の学習機会を提供することで，図 11 におけるアーキテクチャデザインを学習する機会を与えている．

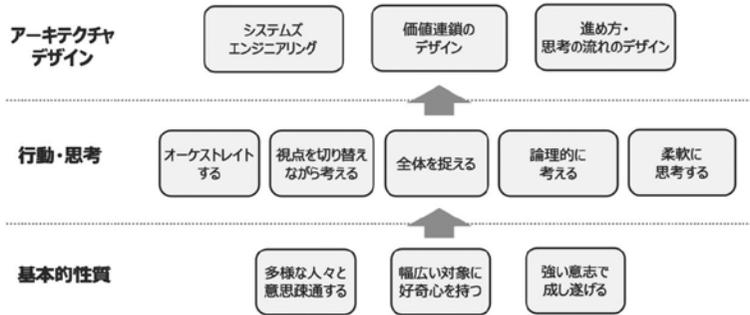


図 11 アーキテクト人材の要求定義 (中間報告書^[16]より抜粋)

図 11 で着目すべき点は、アーキテクト人材の要求に、基本性質、行動・思考といった側面があることである。すなわち、知識を正しく身に着ければ優秀なアーキテクトになれるというものではなく、図 12 のように、基本性質や行動・思考様式という、容易にはコントロールしがたい要素も条件であるという仮説に基づいている点である。

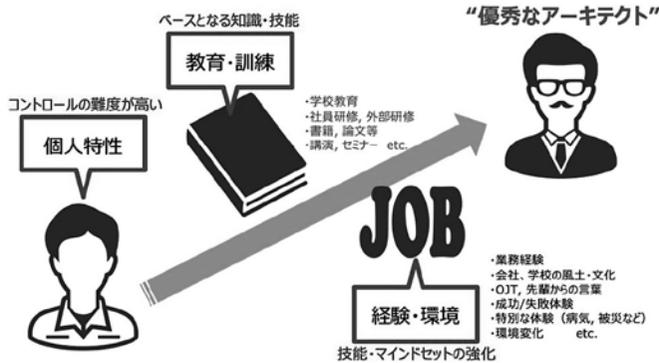


図 12 アーキテクト人材育成の仮説 (中間報告書^[16]より抜粋)

また、近年、デザイン思考やアート思考のように、様々なクリエイティブ職に着目し、その思考様式を抽象化してビジネスに広く取り入れるアプローチが注目を集めている。その中でもアーキテクトに着目して『アーキテクト思考』を提唱する細谷功は、アーキテクト思考の中核となる思考方法を「抽象と具体の往復」としており^[17]、これは図 11 に挙がる行動・思考とほぼ合致する。その上で、こうした資質が特に求められるのは企業の創業期であり、安定期に入った企業ではこうした思考が重要視されなかったこと、また、日本の文化的特徴である「人種的な多様性の低さ」「平等主義」「島国としての閉鎖性」「セクショナリズム」などの存在から、アーキテクトの基本的性質が十分活かさない状態にあると指摘している。

これらを踏まえると、アーキテクトの基本的性質、すなわち適性を有していても、組織的、文化的背景によって自己の適性を認識できず、適切な機会・教育・訓練などが与えられない状態の人材がいる可能性がある。こうした適性を客観的に見出すために、アーキテクト適性評価のような指標が求められるが、DADC の中間報告書では今後の検討事項となっており、継続的な検討が待たれる。

現状でアーキテクト人材を組織的に育成するには、様々な人にアーキテクチャ設計の経験機会を与え、適性を有する人材を発掘するという確率的アプローチと、アーキテクトの需要や業務内容、インセンティブに関する情報を与えることで、アーキテクトの適性を自覚する人材が自発的に手を挙げるように促すアプローチが考えられる。DADCを離任したメンバーは、後者の情報発信などにおいて有効な役割を果たすことができるものと考えられる。

5.2 ステークホルダの早期巻き込み

アーキテクチャ設計は、5.1節で述べた能力を有するアーキテクトが主導することになる。しかし、ステークホルダによる理解と批評を経ないと、独りよがりなアーキテクチャになる危険性がある。一方で、アーキテクチャ設計の初期段階では抽象度が高いため、ステークホルダが理解や批評をしてくれないというジレンマがある。DADC発足当初に立ち上げたプロジェクトのなかには、ステークホルダの理解や参画が得られず、他プロジェクトの構成要素として検討するという形に建付けを変更したものもある。

このジレンマを超えるには、特に初期の段階では、アーキテクチャによらずにステークホルダの参画を促す方策が求められる。自律移動ロボットプログラムにおいては、監督官庁や業界関係者、学識経験者とのコネクションを有する専門家が早期に参画したことが大きな成功要因であった。

こうした優れた人材を確保するには、アーキテクチャ設計プロジェクトの早い時点で、アーキテクチャを通じて解くべき課題に共感を示す組織・人物にアプローチし、参画を求めるというリクルーティングが望ましい。しかし、4.1節で述べた通り、ビジョン検討自体もアーキテクチャ設計の一種であるため、そこにステークホルダの参画を要するというジレンマを抱えることになる。

自律移動ロボットプログラムでは、アドバイザリーボードメンバーからのアドバイスを受け、欧米法令の調査分析など、一般的な国内事業者がリサーチしない分野のリサーチなどを通じて、アーキテクトの専門性を高めたことで、比較的早い時期に専門家の参画を得ることができた。アーキテクトも専門領域に対する理解をある程度深め、プロフェッショナル同士の対話ができるような環境を作ることが重要である。

5.3 アーキテクチャ設計プロジェクトの管理

4章で述べた通り、アーキテクチャ設計は段階的詳細化によって進められ、実装の役割を担うステークホルダが実装できるようになるまで詳細化する。しかし、抽象度が高い段階ではサブシステム自体の抽象度も高く、どのステークホルダに割り当てるか決めることができない。結果として、現在の作業が全体のどこにあたるのかという立ち位置を見失いやすくなり、作業進捗の把握が難しくなる。特に5.2節で述べたようなドメイン知識に歩み寄る活動は、アーキテクチャ設計の進捗には直接貢献するものではないにもかかわらず一定の作業が発生するため、全体を考えるとアーキテクト本来の業務の進捗が置き去りになってしまうことがある。

さらに、設計作業の管理についても、プロセスは4.2節で述べた1)～6)の繰り返しであるため、現在1)～6)のどこであるかは管理できるものの、それは全体の進捗を意味しない。これはアジャイル開発などの反復型開発に近い性質を持っており、ウォーターフォール型の、予め確定させた成果物に対する事前計画と進捗率に基づいた管理方式は馴染まないと考えられ

る。よって、プロダクトオーナーに相当する役割を持つ人物がアーキテクトチームに深くコミットし、外部フィードバックに基づいて優先課題を日々決めながら、プロフェSSIONAL同士の対等な関係に基づいて進めていくという、アジャイル開発のスタイルを取る事が望ましい。

ただし、DADCのような公共機関や大企業の場合、中途半端な状態のものを公表することは大きな混乱を招くため、アジャイル開発に見られる頻繁なリリースは社会的に許容されにくい問題がある。よって、ステークホルダのフィードバックに基づいた優先順位決定はしにくくなり、プロダクトオーナーの優先順位決定能力が大きなウェイトを占める。そのため、アジャイル開発同様、プロダクトオーナーがオーナーシップを持って進められるように十分な権限を委譲するか、十分な権限を持つ人物をプロダクトオーナーとして任命すべきである。自律移動ロボットプログラムでは、IPAを所管する経済産業省の担当官がプロダクトオーナーとして積極的にコミットし、作業の優先順位などを決めていった経緯がある。

6. おわりに

本稿では、SoSという性質に起因する設計上の課題と、アーキテクチャ設計が求められる理由、そして実際にアーキテクチャ設計を進める上での課題について述べてきた。それぞれジレンマのある難題であり、一律にこうすればよいという性質のものではない。しかしながら、DADCが発足してから2年半が経過した現在、自律移動ロボットの分野に関しては、産官学のステークホルダの巻き込みにある程度成功し、社会実装に向けた動きが徐々に具現化されつつあり、課題を乗り越えていくことは不可能ではないといえる。

3.2節で述べた通り、民間におけるアーキテクト人材の育成は、DADCの狙いの一つでもある。CSVの実現を従来の個社の情報システムで全て賄うのは非現実的であり、フィジカルとサイバーの連携であるCPSや、他社サービスの利用であるAPIエコノミーへの参画などは必須といえる。また、DADCの活動は「制度、組織、情報システムを、デジタルシステムを中心に改めて設計する」ことであり、これは企業におけるDX(Digital Transformation)とほぼ同じである。

よって、具体的にビジョンを整理し、全体俯瞰に基づいて設計するというアーキテクトの経験や知識は、CSVを意識した新規ビジネスのみならず、企業のDXという側面においても欠かせない戦力になるものと考えられ、DADCの今後の活動は、DADCが設計するアーキテクチャそのものだけでなく、知識の体系化や人材輩出といった面からも注目すべきものであると言える。2022年末には、アメリカの人気職種ランキングにおいて、データサイエンティストに代わり企業全体のシステムとビジネスを設計するエンタープライズアーキテクトが首位に立ったといった報道もあり^[18]、既にこの動きは現実のものとなりつつある。

本稿を通じて、DADCが行うアーキテクチャ設計活動の意義だけでなく、様々な分野でアーキテクチャ設計に取り組む意義と、その実践における課題とアプローチについて理解が深まれば幸いである。

最後に、DADC関係各位、DADCへの出向を支援して下さった皆様、出向期間に業務面でご迷惑をおかけした皆様に、この場を借りて感謝いたします。

- * 1 ハーバード大学のマイケル・ポーターが提唱する「共有価値の創造 (CSV: Creating Shared Value)」では社会的価値の創出と経済的利益の両立が掲げられている。
- * 2 SoSを構成するシステムは構成システムと呼ばれるが、Monolithic Systemとの対比を優先し、本稿ではサブシステムと呼ぶ。

参考文献

- [1] 「第5期科学技術基本計画 本文」, 内閣府, pp.10-13., 2016.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>
- [2] 白坂成功, 「システムズエンジニアリング入門」, 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科, <https://www.ipa.go.jp/files/000056124.pdf>
- [3] Mark W. Maier, “Architecting Principles for Systems-of-Systems”, Systems Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 267-284, 1998.
- [4] 市川芳明, 「「乗り遅れた日本」がルール形成で主導権を握るには」, Forbes Japan 2022年8月号, p35, 2022.
- [5] 小林正啓, 「ロボット法のこれから—事故の責任, 予想される法規制等」, 日本ロボット学会誌 Vol. 36 No. 4, pp. 262-265, 2018.
- [6] “Systems and Software, Engineering — Architecture Description”, ISO/IEC/IEEE 42010, 2022. <http://www.iso-architecture.org/42010/>
- [7] 小川絏一, 「オープン&クローズ戦略 日本企業再興の条件」, 翔泳社, 2015年12月.
- [8] 藤野直明, 「GAIA-X (ガイア-エックス) とカテナ-Xの衝撃 データ連携による巨大なエコシステムの台頭」, 野村総合研究所, 2022, (2023/1 閲覧).
https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1
- [9] 「自律移動ロボットアーキテクチャ設計報告書」, 経済産業省/デジタルアーキテクチャ・デザインセンター (DADC), 2022年7月.
https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/9f4e70e2-2335-4181-8293-258c12549d31/78a5c260/20220927_policies_mobility_report_02.pdf
- [10] 「情報処理の促進に関する法律第五十一条第一項第八号に基づく依頼について」, 内閣総理大臣 岸田文雄, 2021年12月1日.
https://www.ipa.go.jp/dadc/architecture/pdf/wg_document-of-request_autonomous_mobilerobot_20211201.pdf
- [11] 「デジタル原則に照らした規制の一括見直しプラン」, デジタル臨時行政調査会, 2022.
https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/cb5865d2-8031-4595-8930-8761fb6bbe10/e3650360/20220603_meeting_administrative_research_outline_07.pdf
- [12] 西山圭太, 「DXの思考法 日本経済復活への最強戦略」, 文藝春秋, 2021年4月.
- [13] 「アーキテクチャとは」, IPA デジタルアーキテクチャ・デザインセンター DADC (2023/1 閲覧). <https://www.ipa.go.jp/dadc/join/what.html>
- [14] Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - An Introduction, FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION, 09/08/2018.
<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf>
- [15] 「デジタル臨時行政調査会作業部会 法制事務のデジタル化検討チーム (第6回)」, デジタル庁, 2022年9月12日 (2023/1 閲覧).
<https://www.digital.go.jp/councils/administrative-research-wg-legal-practice-team/ea34cbf5-2400-4be3-b223-2f3f33f51aa9/>
- [16] 「アーキテクト人材開発・育成に関する中間報告書」, IPA デジタルアーキテクチャ・デザインセンター DADC, 2021年7月.
https://www.ipa.go.jp/dadc/architecture/pdf/pj_report_hrd_doc_20210726.pdf
- [17] 細谷功, 坂田幸樹 「構想力が劇的に高まる アーキテクト思考——具体と抽象を行き来する問題発見・解決の新技法」, ダイヤモンド社, 2021年9月.
- [18] 「DXの人気職業に異変 「企業の設計士」, 米で初の首位」, 日本経済新聞, 2022/12/21, (2023/1 閲覧).
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF28DB20Y2A021C2000000/>

※ 上記参考文献に含まれる URL のリンク先は、2023年1月16日時点での存在を確認。

執筆者紹介 石原 裕 士 (Hiroshi Ishihara)

2009年日本ユニシス(株)入社。日本ユニシスのシステム開発標準フレームワークの開発・適用、保守に従事。2020年、IPA DADCに出向、自律移動ロボットに関するアーキテクチャ設計に従事し、現在に至る。

