# SYSTEMS ENGINEERING

# VISION2035

よりよい世界のためのエンジニアリング解決策





システムズエンジニアリングビジョン2035の目的は、以下の多様な利害関係者コミュニティ(全体)に、システムズエンジニアリングの戦略的な方向性を**インスパイアし、ガイドする**ことです。

- エンジニアリング・リー ダーと経営層
- ・ エンジニアリング実践者
- 専門家組織
- ・ 研究者、教育者、および学生
- 標準化団体
- ・ツールベンダー
- 政策立案者

#### **ADDRESS**

今後のシステムズ エンジニアリング の課題への対処



探査システム



発電/エネルギーシステム



輸送システム

#### **BROADEN**

システムズエンジ ニアリング実践者 の拡大

#### ALIGN

システムズエンジ ニアリングのイニ シアチブ間の連携

#### **PROMOTE**

システムズエンジ ニアリングの研 究、教育、実践の 推進



情報システム



ヘルスケアシステム



通信システム



システムズエンジニアリング・ビジョン2035のウェブ版は、INCOSEのウェブサイトから取得できます。www.incose.org/sevision

#### iii 全体の要約

#### **CHAPTER 1**

01	システムズエンジ	ニアリングのグロ	コーバルコンテキスト
----	----------	----------	------------

- 02 人類と社会のニーズ
- 03 世界的なメガトレンド
- 10 テクノロジーのトレンド
- 11 利害関係者の期待
- 12 企業を取り巻く環境

#### **CHAPTER 2**

#### 17 システムズエンジニアリングの現状

- 18 歴史的な展望
- 19 役割と能力
- 20 システムズエンジニアリングの実践
- 21 産業への適用
- 22 システムズエンジニアリングの基礎
- 23 教育と訓練
- 24 課題

#### **CHAPTER 3**

#### 29 システムズエンジニアリングの未来

- 30 概要と紹介
- 31 デジタルトランスフォーメーションの影響
- 33 モデルベースの実践
- 42 理論的な基礎
- 43 主要な社会的課題に適用されるシステムズエンジニアリング
- 44 未来のシステムズエンジニアリング従事者の育成
- 47 2035年のシステムズエンジニアの1日

#### **CHAPTER 4**

#### 55 システムズエンジニアリングのビジョンの実現

- 56 進むべき方向性
- 57 コラボレーション
- 57 エンジニアリング・エコシステムの変革
- 58 システムズエンジニアリングの課題
- 59 具体的な提言
- 61 トップレベルロードマップ

#### 62 2035年までのシステムズエンジニアリングのまとめ



# VALUE STATEMENT

システムズエンジニアリングがもたらす価値



システムズエンジニアリングは、部分が連携して 全体の目的を確実に達成することを目的としています。

- ・多様な利害関係者が必要とする、能力、信頼性、持続可能性、社会的受容性、 および使いやすさのために、バランスの取れた解決策を設計する
  - ・進化するテクノロジーと要求に適応する
    - ・複雑さとリスクを管理する

# EXECUTIVE SUMMARY

このビジョンは、グローバルなシステムコミュニティのためにシステムズエンジニアリングの戦略的方向性をインスパイアし、ガイドすることを目的としています。このコミュニティには、組織のリーダー、実務家、学生、およびそれらのコミュニティーを支える教育者、研究者、専門家組織、標準化団体、ツールベンダーが含まれます。

このビジョンは、企業またはプロジェクトのシステムズエンジニアリング能力を進化させるための戦略を開発するために使用できます。

これによりまず、絶えず変化する環境に対処で き、利害関係者への対応が強化され、競争力が高ま ります。

このビジョンは、現在および将来の課題に対応するため、この分野を前進させ個々人のスキルを伸ばすために、直接的な投資を支援し、共同的な取り組みをサポートすることにも使用されます。

最後に読者は、企業の競争力に影響を与えるトレンドと、システムズエンジニアリングがこれらのトレンドにどのように対応するかについての洞察を得ることができます。これにはデジタルトランスフォーメーション、持続可能性、スマートシステム、複雑さの増大、モデリング・シミュレーション・視覚化の進歩が含まれます。

#### このビジョンは4つのチャプターから構成されます:

#### **CHAPTER 1**

システムズエンジニアリングを取り巻く世界情勢について説明します。これは、システムズエンジニアリングの実践に変化をもたらすと予想される主要な傾向と影響要因のいくつかをまとめたものです。これらの要因は次のとおりです。

- 社会的および環境的条件
- テクノロジー
- システムの性質
- 利害関係者の期待
- ・ 企業と人員

#### CHAPTER 2

システムズエンジニアリングの能力、実践、基礎、および現在の課題を含む、システムズエンジニアリングの現在の状態を強調しています。これは、システムズエンジニアリングの基本要素が、小規模から大規模まで、あらゆる種類のシステムに適用されるという事実を示していますが、業界や組織によって成熟度に大きな違いがあります。

#### CHAPTER 3

変化する世界情勢と現在の課題に対処するために必要なシステムズエンジニアリングの将来の状態について説明します。これは、デジタルトランスフォーメーションと、完全なモデルベースシステムズエンジニアリング環境への方向性に対応しています。ここでは、理論的基礎と将来の有能なシステムズエンジニアリングの労働力を開発するために必要な教育とトレーニングに触れています。また、システムズエンジニアの日常生活が2035年にどのように見えるかについての例も提供します。

#### **CHAPTER 4**

このビジョンを実現するために何が必要かを説明します。 これは、一連のシステムズエンジニアリングの課題と、システムズエンジニアリングを現在の状態から将来の状態に移行させるために必要なハイレベルのロードマップを示します。また、ロードマップを進化させて実装するために、グローバルシステムコミュニティ間の協力の必要性を強調しています。

### 変わりゆく世界環境

私たちは、技術の進歩や新しい科学的発見とともに、地球規模の社会的、経済的、政治的、物理的環境が絶えず変化する世界に住んでいます。 世界は高度に相互接続され、ますます相互依存し、情報が即座に共有され、企業は1つのグローバル市場で競争します。

テクノロジーの進歩のペースは加速し続けており、それがシステム解決策の性質に影響を与え、 社会へのポシティブとネガティブの効果をもたらすことになります。 世界的な相互依存関係



社会経済的な傾向としては、世界中の多くの場所で都市化、寿命の大幅な増加、貧困の減少が見られます。このような傾向は、21世紀を通して続く可能性が高いでしょう。

#### テクノロジーの変化の影響



同時に、人口の増加や世界的な経済状況の改善により、消費と廃棄が増大し、大気、水、土壌、生物多様性などの天然資源に負荷がかかっています。 また、自然災害やパンデミック、政治・経済の混乱は、世界中の地域や国々を脅かし続けています。

・経済の混乱 ています。 Rights Regulation Annual Regulat

地球環境と天然資源に対す る需要は増大しています。

### システム・技術の性質の変化

こうした環境変化に対応するため、システムソリュー ションは、デジタル技術、材料技術、電力変換・エネ ルギー貯蔵技術、バイオテクノロジーなど、新しい技 術を活用していきます。これらのソリューションは、 企業や消費者に価値を提供すると同時に、社会にも恩 恵をもたらし、限りある天然資源へのストレスを抑制 することができます。これらのシステムソリューショ ンは、交通、農業、エネルギー生産、ヘルスケア、そ の他多くのサービスなど、社会のあらゆる側面に適用 されます。

多くのシステムソリューションは、その機能を実現す るための組込みソフトウェアやアプリケーションソフ トウェアが増え、処理するデータ量も増えています。 たとえば、グローバル市場で商品を購入するために用 いられるサービスを提供するシステムが数多くありま す。その他のシステムソリューションは、物理的なプ ロセスを制御するためのセンサー、処理、ネットワー ク、データストレージを含むサイバーフィジカルシス テム (CPS) として特徴付けられることが多くなっ ています。

これらのシステムは、多くの場合、他のシステムと 相互接続され、より広範なシステムの一部としてリ ソースやデータを共有します。例えば、スマートビ ルディング、スマート交通、スマート公共施設、ス マート廃棄物管理システムなどは、スマートシティ の一部です。

これらのシステムは、機械学習を含む人工知能 (AI) を活用することで、環境や条件の変化に適応 できるようになりつつあります。また、これらのシ ステムは相互に接続されているため、サイバー脅威 に対する脆弱性など、システム設計上の課題も発生 しています。

社会がシステム性能の向上から恩恵を受けるように なると、消費者やユーザーはシステムにより多くの 期待を寄せるようになります。これには、システム の能力、信頼性、持続可能性、価格への期待が含ま れます。また、社会や環境に与える影響を考慮し、 より社会的に受け入れられるシステムであることが 期待されています。さらに、ユーザーもまた、シス テムがより自律的で、シームレスに相互作用し、自 分の要求を理解し、それに応えてくれることを期待 しています。



# 企業への要請

システムの性質は、

これらのシステムを開発、生産、運用、サポートする 企業は、利害関係者の期待に応えるため、グローバル 市場で激化する競争に直面しています。そのため、コ ストとサイクルタイムの削減、持続可能性の向上、規 制の変更、サイバー脅威、サプライチェーンの混乱へ の対応と同時に、革新的な製品とサービスを提供する ことが求められています。企業が競争力を維持するた めには、従業員のスキルを継続的に進化させる必要が あります。

知識は企業の重要な資産です。企業が学び、進歩し続 けるためには、知識を適切に管理する必要がありま す。デジタル技術は、あらゆる情報のデジタル表現と セマンティックな統合を通じて、企業が知識を取得、

再利用、活用、保護する方法を変革することを可能に します。AI の広範な応用を含む進化するデジタル技術 は、自動化と自律化によってますます複雑なタスクを 実行できるようになり、人間がイノベーションを通じ て価値を付加する機会をさらに提供することになりま す。



デジタルトラン スフォーメー ションによるナ レッジの共有

### システムズエンジニアリングの実践を進化させる

システムズエンジニアリングは、歴史上、技術的な取り組みに適用されてきた側面があります。しかし、工学的な学問分野として正式に確立されたのは、20世紀初頭から中頃にかけてのことです。システムズエンジニアリングは、航空宇宙、防衛、電気通信の各産業で増大する課題に対処するために適用されました。過去数十年の間に、システムズエンジニアリングの実践は国際規格として体系化され、知識体系が共有されるようになりました。また、システムズエンジニアリングの専門

家認定制度や数多くの学位プログラムも存在します。他の多くの産業も、複雑化するシステムに対処するために、システムズエンジニアリングの手法を 認識し、採用し始めています。

ソフトウェアやデータのコンテンツの増大、システムの相互接続性の増大、利害関係者の期待の競合、その他多くの社会的、経済的、規制的、および政治的考慮事項等に起因する複雑さは、複数のシステムから構成されるシステム(SoS)の文脈でシステムを設計する際、考慮する必要があります。



システムズエンジニア リングは、増大する複 雑性とリスクを管理し ながら、利害関係者に 価値をもたらします。

システムズエンジニアリングは、システムの各要素が 連携して全体の目的を達成することを目的としていま す。このため、システムズエンジニアリングは、シス テム要素、分野、ライフサイクル、および企業を横断 的に統合することで、複雑さとリスクに対処する必要 があります。システムズエンジニアリングは、性能、 信頼性、セキュリティ、プライバシー、コストなど、 多様でしばしば競合する利害関係者のニーズと期待を 満たすシステムソリューションのバランスをとりま す。これを達成するために、システムズエンジニアリ ングは本質的に学際的であり、各学問分野と影響を受 ける各利害関係者の表現と考察を含める必要がありま す。システムズエンジニアリングは、解決策が利害関 係者のニーズと期待を満たすことを保証するために、 ハードウェア、ソフトウェア、テスト、および専門エ ンジニアリングを含む全体的な技術的取り組みをガイ ドし、指揮を執る必要があります。

システムズエンジニアリングの実践はさらに進化し、ますます増大するシステムの複雑さと企業の競争力の要求をサポートします。 2035年までに、システムズエンジニアリングは、そのツールと方法でデジタルトランスフォーメーションを活用し、システムの統合された記述的および分析的なデジタル表現を使用して、



主にモデルベースになります。 システムの設計、分析、シミュレーションモデル、没入型テクノロジー、および分析フレームワークにより、幅広いトレードオフ空間の探索、迅速な設計の進化が可能になり、システムのライフサイクル全体にわたる共通の理解が得られます。

自動化された効率的なワークフロー、デジタルスレッドの構成と品質管理、統合されたツールチェーン、およびAIにより、システムズエンジニアリングはシームレスに連携し、変化に迅速に適応できます。 2035年までに、モデルベースの再利用手法は企業の投資を効果的に活用します。これらのプラクティスには、リファレンスアーキテクチャとコンポ

ーザブルデザイン、プロダクトラインエンジニアリング、およびデザインパターンが含まれます。システムとユーザーのモデルを使用した人間中心の設計により、よりシームレスなユーザーとシステムの相互作用が可能になります。

2035年までに、システムズエンジニアリングの実践は、システムズエンジニアリングのカリキュラムの一部として一貫して教えられる一連の理論的基礎およびその他の一般原理に基づくようになります。これらの基礎は、システムズエンジニアリングを幅広い業界ドメインに適用するための共通の基盤を提供します。システムズエンジニアリングの教育とトレーニングでは、グローバルに分散した開発チーム間のコラボレーションを可能にするために必要な技術、ビジネス、社会経済、リーダーシップ、および

ソフトスキルに対応します。システムズエンジニアリングの教育とトレーニングは、変化する慣行、ツール、テクノロジー、およびアプリケーションドメインに遅れないように、キャリアを通じて継続されます。システムズエンジニアリングの労働力は、さまざまな産業および社会技術システムアプリケーションにわたる中小企業、大企業からの高まるニーズをサポートします。

この変化する世界では、システムズエンジニアリングは、複雑さとリスクを管理しながら、利害関係者の価値を提供し、変化に対応するために進化し続ける必要があります。このビジョンは、第3章で説明するシステムズエンジニアリングの将来の状態を達成するために必要な5つのカテゴリで次のシステムズエンジニアリングの課題を特定します。



#### **Applications**

1.システムズエンジニアリングは、主要な社会的課題に革新的なソリューションを提供します。

2. システムズエンジニアリングは、あらゆる規模のプロジェクトや企業に価値を示し、ますます多くのドメインに適用されます。

3. システムズエンジニアリングは、ますますダイナミックで不確実な環境を予測し、効果的に対応します。



#### **Practices**

4. シミュレーション、学際的分析、および没入型視覚化環境と統合されたモデルベースのシステムズエンジニアリングが標準的な手法です。

5. システムズエンジニアリングは、ますます複雑になるシステムを定義、実現、および維持するための分析フレームワークを提供します。

6. システムズエンジニアリングは、製品ラインエンジニアリング、パターン、構成可能な設計手法などの再利用手法を広く採用しています。



#### Tools and Environment

7. システムズエンジニアリングのツールと環境は、デジタルエコシステムの一部としてシームレスで信頼できるコラボレーションとインタラクションを可能にします。



#### Research

8. システムズエンジニアリングの実践は、広く受け入れられている理論的基礎に基づいており、システムズエンジニアリングのカリキュラムの一部として教えられています。



#### Competencies

9. システムズエンジニアリングは、標準的な工学のカリキュラムの一部であり、継続的な学習環境によってサポートされています。

# 1 THE GLOBAL CONTEXT

システムズエンジニアリングのグローバルコンテキスト

2035年のシステムズエンジニアリングは、地球環境、つまり世界的なメガトレンドと壮大なエンジニアリングの課題によって形作られます。 それはまた、システムの根底にあるテクノロジーと進化する企業の作業環境によっても形作られます。 幅広い社会的、技術的、企業のトレンドに沿った利害関係者の期待も、システムズエンジニアリングの実践に影響を与えます。

システムズエンジニアリングの

グローバルコンテキスト

**CHAPTER 1** 

このセクションでは、設計されたシシスムの創成を 動機付けるグローバルなコンテキスト、非常に幅広 い目的、およびエンジニアリング、特にシステムズ エンジニアリングが対応しなければならないこれら のシステムの性質の変化に焦点を当てます。

システムズエンジニア

リングの未来

CHAPTER 3



システムズエンジニア

リングの現状

CHAPTER 2

システムズエンジニアリングの

ビジョンの実現

CHAPTER 4



#### 人類と社会のニーズがシステムソリューションをドライブする

#### ▶ 国連のサステナビリティーの目標は人類のニーズの代用として機能します

国連の持続可能な開発目標(SDGs)は、地球を保護しながら繁栄を促進するために、貧しい国、豊かな国、中所得国のすべての国が行動を起こすことを求めています。

SDGsは、貧困の撲滅のためには、経済の成長を促し、教育、健康、社会保障、雇用機会などのさまざまな社会的ニーズに対処する一方で、気候変動と環境の質に取り組んでいく戦略と密接に関連させる必要があることを示しています。



United Nations Sustainable Development Goals: https://sdgs.un.org/goals

システム設計は、SDGsに取り組む上で中心的な役割を果たします。全米技術アカデミー(NAE)は、21世紀の工学上の主要な課題(NAE Grand Challenge for Engineering)を特定しました。これらの個別に生成された先見の明のある課題は、グローバルに関連し、基本的な社会的ニーズに対処するエンジニアリングの機会に焦点を当てることにより、SDGsを補完します。大規模で複雑な、設計された社会技術システムは、NAEの主要な課題を達成するための鍵となることが多く、それによって物理的、心理的、経済的、文化的、人間的、社会的ニーズを満たします。 NAEビジョンの実現には、すべての工学分野からの多大な貢献が必要になります。

#### 全米技術アカデミーのグランドチャレンジ

- 高度な個別学習
- 太陽エネルギーの効率化
- バーチャルリアリティの強化
- 脳のリバースエンジニアリング
- より良い薬のためのエンジ・ ニアリング
- 高度な健康情報学
- 都市インフラの復旧と改善

- 安全なサイバース ペース
- きれいな水の提供
  - 核テロの防止
- 核融合からのエネル ギー供給
- 室素循環の管理
- 炭素隔離技術の開発
- 科学的発見のための ツール設計

 ${\sf NAE\ Grand\ Challenges\ for\ Engineering:\ http://www.engineeringchallenges.org/challenges.aspx}$ 

いかなる人間が設計したシステムも、現実の社会的、物理的、文化的、および経済的環境に適用する必要があります。 また、システムソリューションに適用されるテクノロジーは、関連する

地方あるいは地域の能力とリソースに合わせて適合させる必要があります。世界の情勢はこれらのシステムソリューションに強く影響するため、その情勢を形成する重要な世界的な傾向を調べることは有用です。

2035年のシステムズエンジニアリングビジョンのために定義した以下のすべてのメガトレンドに共通して言えることは、システムレベルの振る舞い、および個々のコンポーネントのモニターとコントロールのためにソフトウェアに実装される能力の役割が拡大し続けることです。



#### 世界的なメガトレンドは未来のシステムを形成します

世界的なメガトレンドは、技術の進歩と相まって、世界的な社会経済の変化によって推進(および実現)されています。 私たちは世界的な富の増加を経験しており、国連が提示するタイプの問題、つまり、改善された医療、清潔な生活環境、社会的平等、教育などに対する需要の増加に対処することへの利害関係者の期待が高まっています。 また、富の増加は、技術的能力の向上と、化石燃料ベースのエネルギーから移行しつつ、責任ある持続可能な方法でこれらの技術を適用する社会的意欲を育てます。

#### いくつかの重要な属性 システムの性質に影響を与える世界的な社会経済的変化のための重要な属性

- ・ 極度の貧困の減少
- ・ ヘルスケアへのアクセスの改善
- ・ 出生率と乳児死亡率の低下
- ・ 所得水準の上昇
- ・ 特に女性の教育レベルの向上
- ・ 電化の増加
- ・ 栄養の改善
- ソーシャルコミュニケー ションのコミュニティへ の依存性の向上
- インターネットへのアクセスの増加

#### メガトレンド 2035年までにシステムズエンジニアリングに影響を与えると予想されています













**1.** サステナビリティー **2.** 相互依存の世界 **3.** デジタルトランス フォーメーション

4. Industry 4.0/ Society 5.0

**5.** スマートシステム **6.** 複雑さの増大

これらのグローバルな社会経済的メガトレンドは、すべての業界とドメインに製品とサービスを提供するシステムのニーズと期待を醸成します。例えば、輸送、ヘルスケア、スペース利用、通信、エネルギーの生産と流通、教育、食料生産、そしてあらゆる形態の近代的なインフラトラクチャーなどです。

#### システムはさまざまなドメインに対応します



社会の変化は、大きな社会的ストレス、都市のインフラストラクチャの要求、および農業、環境衛生、持続可能性に対するシステムの課題の増加を生み出す可能性があります。 情報の信頼性は、個人データの保護とともに、情報の供給者と消費者にとって大きな課題となります。

# GLOBAL MEGATREND

### 環境のサステナビリティーは 高優先課題に

経済活動に起因する再生不可能な資源の消費には、より良いグローバル管理、リサイクル戦略、持続可能な政策、地域の行動、およびエネルギー変換やクリーンな輸送と製造のためのインフラストラクチャなどのサポートシステムがますます必要になります。

環境の変化は生活条件の変化をもたらし、生物 多様性、気候、地球規模の熱移動、淡水の利用可 能性、および人間の栄養と幸福に必要なその他の 天然資源に影響を与えます。

全体的な環境の質が優先され、グローバルな協力が必要になります。 環境の持続可能性への関心が高まる傾向にあるため、いくつかの重要な社会的およびシステム上の緊急課題が発生します。

システムの特性である持続可能性のためのエン ジニアリングは、設計されたシステムの社会的影響を定期的に評価する新世代のエンジニアを生み 出すでしょう。



▶人間の活動が気候に与える影響は、設計されたシステムと公的/私的ポリシーの評価に深く根付いています。

▶ 地球温暖化などの気候変動の悪影響を緩和するために、わかりやすく単純で斬新な多くのシステムが生まれるでしょう。









▶世界の化石燃料 ベースのエネル ギー経済は、ク リーンで再生可能 な資源に基づくも のに変えられるで しょう。

持続可能なシステムを生産し持続可能な方法で行動するシステムプロバイダーとオペレーターは、 世界の人々から信頼され、報酬が与えられます。

# GLOBAL 2

### 相互接続された世界は 相互依存性を高めます

コミュニケーション、情報、およびモビリティ機能の進歩によって促進されるグローバルコミュニティは、より高いレベルの政治的および経済的相互依存をもたらします。これにより、リソースを共有し、グローバルなパートナーシップでシステムを相互接続する必要が生じます。政府と企業は、サポートするインフラストラクチャシステムの有効性に依存して、グローバルに絡み合っています。今日稼働している多くのシステムは、この相互依存の影響を想定してなかった、もしくは無視していました。企業自体が、相互接続されたエンジニアリングと維持を必要とする、ますます複雑なシステムになりつつあります。

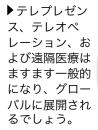
過去70年間の世界の輸出額の指数関数的成長は、経済的相互依存の重要な指標です。この相互依存により、世界的な災害救援、公衆衛生、情報、知識と技術の共有のための新しいコラボレーションメカニズムが生まれていますが、バランスとグローバルな公平性を達成しながら、経済的および財政的課題に対応するための、より進んだ政策の調整が求められます。



▶今日のインター ネットは、地球規模 で宇宙空間を利用し たインターネットに よって補完されるで しょう。



ト共有されたグロー バルメディアを介し たコミュニケーションは、社会的願望を 平準化し、知識の格 差を減らすことに貢献します。



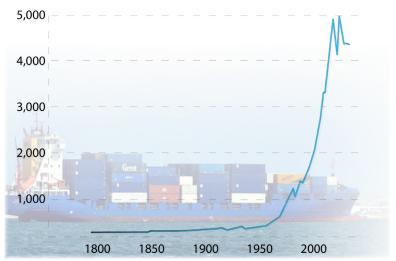


私たちが共通の運命に結びついている相互依存 の世界に住んでいるという現実はもはや無視で きません。

-Nelson Mandela

### 世界全体の輸出額

(インフレ率で補正)



Our World in Data: https://ourworldindata.org/trade-and-globalization

# GLOBAL 3

## デジタルトランスフォーメーションが 製品と働き方を変える



企業および政府機関は、それらの情報のロバストなデジタル表現への移行と、設計、開発、製造、ロジスティクス、およびビジネス分析のための企業体とサプライチェーン全体での意味的な情報統合によるプロセスと製品の最新化に積極的に取り組んでいます。ナレッジエンジニアリング、情報表現、モデルキュレーション、およびデータ分析が、意思決定と共同作業の方法の下支えとなります。価値は、最終製品だけでなく、サービスの提供によってますます消費者に提供されるようになります。デジタルトランスフォーメーションは、これらのアプローチを習得して採用する、よりアジャイルで競争力のある企業体に利点をもたらします。

したがって、エンジニアリングの性質、特にツールと方法は、過去数十年よりも大きく変化するでしょう。システム設計のモデリング、シミュレーション、分析、および忠実度の高いデジタル表現によって可能になる視覚化およびエンドツーエンドのソリューションは、すべてのエンジニアリングの分野の実践で主流になるでしょう。 AI は、システムのライフ サイクル全体でますますツールに統合されるようになります。

システムのデジタル表現は、高度な没入型の 環境を含む仮想現実(VR)や拡張現実(AR)を使 用して、設計とマージン (物理的なもののみな らず性能と安全性) の調査を可能にします。 製 品と製造環境のデジタル表現は、すべてを包括 するものになります。 デジタル表現として使わ れるデジタルツインは、製品のライフサイクル 全体を表す際に一般的に使用されるようになり ます。 これにより、エンジニアは対象システム の中に入り込むことで、さまざまな視点から、 コンセプト的にも物理的にも設計と生産方法を 探求することができます。 特殊なビジュアライ ゼーションによって、エンジニアが時間的に変 化する振る舞いを理解するのに役立ちます。 不 確実性の分析と代替案の分析は、かつてないほ ど迅速かつ厳密になります。

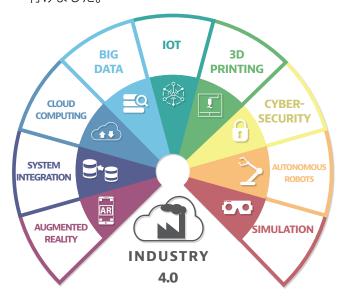


▶ デジタル表現への依存度が高まるにつれ、データと知的財産を保護するために、サイバーセキュリ組みが必要になります。

# GLOBAL 4 MEGATREND

## INDUSTRY 4.0 と SOCIETY 5.0 が 変革戦略を支える

産業は、新しい社会的および技術的課題に適応することによって、自らを再発明する過程にあります。 マシン、倉庫、ロジスティクス システム、およびサイバー フィジカル システム内のエンジニアリングのグローバルな相互作用と相互依存性により、自立した自動化プロセスの無限の柔軟性が生まれます。 ドイツ技術アカデミー (Acatech)は、この開発を「Industry 4.0」と名付けました。



業界は、過去300年にわたって、原始的な機械化から大量生産、電子ベースの自動化、そして現在では計算、ネットワーク、および物理プロセスを統合するシステムとして定義されるサイバーフィジカルシステムへと進化してきました。組み込みのコンピューターとネットワークは、物理プロセスが計算に影響を与えたり、その逆のフィードバックループを使用して、物理プロセスを監視および制御します。インダストリー4.0のアプローチでは、生産のロジックと制御が大幅に変化し、スマートファクトリーの基盤を形成します。製品は監視され、生産と出荷の状態が把握され、サイクルのすべての段階で個別に一覧化されます。

大規模なシステムのすべてのコンポーネントの記録は、顧客、メーカー、およびサプライ チェーンに対して透明化されます。 デジタルツインは、システム開発ライフサイクル全体の中心です。 相互作用するツールとプロセスのデジタル チェーンは、ライフサイクルを通じてシームレスであり、参加プレーヤーのすべての間の関係で確立され、関係者全員に利用され、信頼されています。

Society 5.0 は、社会-サイバーフィジカル システムの未来に明確に目を向けています。 すなわち、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会課題の解決を両立させた人間中心の社会です。 Society 5.0 では、フィジカル空間のセンサーからのデータがサイバー空間に蓄積され、人工知能 (AI) によって分析され、その結果がさまざまな形でフィジカル空間の人間にフィードバックされます。

これらの傾向は共に、国連の持続可能な目標、世界経済フォーラムの勧告、そして世界の人々、特に若い世代の価値観の変化に対応していきます。

#### **SOCIETY 5.0**

日本は、Society 5.0 を国家の優先事項と投資を形作る国家戦略政策として確立しました。 Society 5.0 は、情報化時代を超えた社会の次の大きな変革として構想されています。

「Society 5.0 は、デジタル トランスフォーメーションと多様な人々の創造性が融合し、持続可能な発展につながる「問題解決」と「価値創造」をもたらすイマジネーションソサエティです。 国連で採択された持続可能な開発目標(SDGs)の達成に貢献できるコンセプトです。」

- Nakanishi, H., 世界経済フォーラム年次総会、2019 年

Society 5.0: https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5\_0/index.html

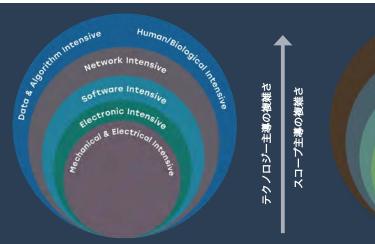
# GLOBAL 5 MEGATREND

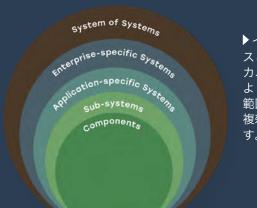
#### システムの複雑さの爆発

複雑さはシステム設計から生じます。これは、依存関係、脆弱性、およびリスクを生み出す結合の増加が一因であり、これらはシステム管理者、スポンサー、および公共政策の意思決定者によって理解されるよう顕在化させる必要があります。より高度な性能と効率化に対する要求の増加によって、複雑さは増していきます。これらの要求の増加は、ソフトウェアと自律性を備えたシステムの適用性を増加させる一方で、テスト

の困難性を増し、サイバー脅威を招くことになります。高度に結合し、予測不可能で変化し続けるエコシステムの中に分散した(複数の)システムが相互作用しているアプリケーションドメインや市場の間で、複雑さが増しています。また、複雑さは業界、市場、アプリケーションドメインの境界を曖昧にしています。システム障害の可能性は、これらのシステムを運用する複雑な組織によって悪化することがよくあります。

▶ますます複雑 なテクノロジー のレイヤーが統 合されるため、 時間の経過とと もに複雑さが増 します。





▶インターフェイ スとガバナンスメ カニズムの急増に より、システムの 範囲が拡大すると 複雑さが増しま す。

システムの複雑さが増す例は次のとおりです。

#### ▶ スマートハウス は、

スマート サーモスタットとさまざまなセンサーによって制御され、暖房、空調、照明、およびセキュリティサブシステムを含み、エネルギー消費、快適性、安全性などの機能を最適化するために、インターネットや携帯電話に頻繁に接続されます。

#### ▶ 最新の自動車 には、

高度な運転支援システム用のイン テリジェントナビゲーションシス テムおよび複数のコントロー ラー、電力管理、サスペンション 管理など、それ自体でも複雑な多 くのサブシステムが含まれていま オ

#### ▶ 白物家電 には、

洗濯機など、センサーと驚くほど 大量のソフトウェアが含まれてお り、機能と保守性が大幅に向上し ています。

# ▶コンピューティング、モバイル、およびウェアラブル デバイス には、高度な計算、センサー、および通信機能を備えています。

#### ▶エネルギーネットワーク

は、必然的にSoS(システムオブシステムズ)であり、インテリジェントなセンサー、エネルギー管理プロセッサー、洗練された物流およびサイバーセキュリティシステムによってサポートされる、発電、送電、配電を含む地理的および管理的に分散された要素で構成されています。

#### ▶ 医療患者システム は、

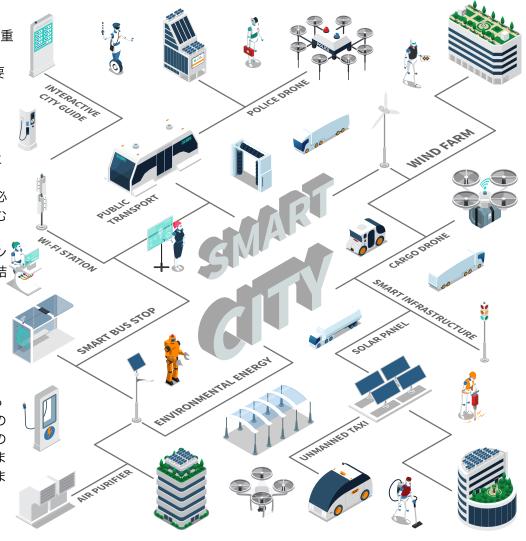
ペースメーカー、心臓弁、神経刺激装置、心臓除細動器、センサーから、歩行障害者向けのウェアラブル閉ループ輸液制御デバイスと外骨格技術に至るまでの、埋め込み型メカトロニクスデバイスを含みます。

# GLOBAL 6 MEGATREND

#### スマートシステムの増殖

- ▶ AI、自動化と自律機能、およびシステムの機能的動作とシステムの機能的動作とシステムの自己診断と修復のための高度なセンサーを採用したスマートエレメントが一般的になるでしょう。 ただし、多くのAI ベースのアプローチに内在する非決定性により、システムの検証可能性、安全性、および信頼の問題が生じます。
- ▶システムはますますシステムのより大きなシステムの一部となり、強化されたインテリジェンスと機能的価値を生み出しますが、モムーズなシステムの進化に対する課題ももたらします。オントロジーに基づく形式的な情報表現は、システム要素が互いの状態を認識するための基礎となります。
- ▶スマートシステムは、農業、都市 複合体、住宅、電化製品、健康、金 融サービス、エネルギー、電気通 信、民間および公共交通機関、国家 安全保障など、さまざまな分野で一 般的になるでしょう。 インテリ ジェンスはデバイスに近づき、中央 制御から遠ざかります。

- ▶ユーザーエクスペリエンスに重点を置いた人間中心の設計は、 スマートシステムの成功の重要な要素となります。
- ▶固定化された設計点のために システムを設計するのではな く、継続的に進化するために必 要なデータと情報の流れを含む ようにシステムは設計されま す。対象システムを作成するシ ステムと対象システム自体が結 合されます。
- ▶消費者は、時間の経過ととも に陳腐化する製品を所有するの とは対照的に、ひとりひとりの ニーズに合わせたサービスをま すます提供されるようになりま す。



自律機能と個人の行動に関する情報の利用が増加するため、スマートシステムが確実かつ安全に機能し、個人情報を 保護することに対する公共的信頼が、社会全体にわたる懸念事項となっています。



#### テクノロジーの進歩がシステムの性質を形作る

テクノロジーの進歩は新しいシステムソリューションを可能にし、システムのニーズはテクノ ロジーの進歩を刺激します。



技術の進歩とシステムソリューションは相互に大 きく依存しています。 システム設計は主に利用可 能な技術に基づいていますが、技術が進歩するにつ れて、新しい設計ソリューションが可能になり、利 害関係者の価値が高まります。 エンジニアは、利 害関係者のニーズを満たす設計への潜在的なアプリ ケーションについて、テクノロジーを継続的に評価 する必要があります。

技術開発者は、適切に努力し、進化するシステムの ニーズと期待に対処するように求められています。 システムでの新技術の適用とデモンストレーショ ンは、技術の進歩の有用性を検証することができま す。

#### 材料の進歩と製造

...新しい機械的、化学的、光学的、および/または 電気的特性を備えた新しい材料をあらゆる規模の システムに導入し、パフォーマンスと信頼性を向 上させます。

#### 高度なモデリングとシミュレーション

…複雑なシステムソリューションを表現す る上で重要な役割を果たし、デジタルデ-タを、没入型の人間と機械の相互作用に よって検索および変更できる仮想およびデ ジタル拡張表現に変換します。



#### エッジコンピューティング

ターネットアクセスを促進します。

…ほぼすべてのデバイスの計算リソースと制御リ ソースをクラウドに接続することで、インターネッ ト・オブ・エブリシングを促進し、ユーザーエクス ペリエンスを向上させ、データの処理を高速化、低 遅延にし、コストを削減します。

…高度なフォトニクス、無線周波数コーディング

技術、ソフトウェアベースの無線などは、世界中

の人々に高速でワイヤレスのユニバーサルイン

#### 自律性と人工知能(AI)

...コンピューティング、ソフトウェア、ス マートセンサー、ロボット工学、エネルギー 貯蔵技術、および人間の集中的な相互作用の アプリケーションを介して大幅に 進歩します。

ビッグデータと分析

...データソースの数と複雑さが 大幅に増大するため、キーテクノロジーとして進化 し続けます。これらのテクノロジーはSociety5.0 を推進し、社会-サイバーフィジカルシステムの進 歩を可能にします。

#### 生物/生命科学とナノテクノロジー

…組み込まれ、大幅に小型化されて、医薬と ヒューマンコンピュータインタラクションにおけ る多くの領域を変革します。

#### 地理空間技術

通信技術

... 電子商取引、公衆衛生管理、 スマート農業、国家安全保障、 サイバーセキュリティ、土地管理、 サプライチェーンロジスティクス、ソーシャ ルメディア、観光、災害軽減などの多くの分野を 前進させます。

#### 発電、貯蔵、および変換

…より効率的で、分散型で、環境に優しく、柔軟 なエネルギーシステムを可能にし、地方、地域、 および国の発電源を統合します。

#### 量子情報科学

…自然法則を最小スケールで利用して、大規模なコ ンピューティング、安全な通信、ナビゲーション、 およびセンシングのアプリケーションに活用されま す。

多くのシステム特性は、利害関係者の価値を形作るグローバルな社会的および技術的傾向を反映します。 システムの利害関係者には、システムユーザー、システムスポンサー、および政策立案者が含まれます。



#### 肥大化する利害関係者の期待



**1. SIMPLE** システムソリューションは、期待される機能を提供する必要がありますが、設計の複雑さを可能な限り隠し、シンプルなユーザーインターフェイスを備え、当然のことながら障害に耐え、使いやすいものでなければなりません。 人間中心の設計を採用し、ユーザーエクスペリエンス全体を考慮することは、システムの受け入れにとってますます重要になります。



**6. SMART** スマートシステムは、変化する未知の環境に対処したり、人間のオペレーターを支援したり、製品やサービスを提供するために自己組織化することができます。社会的、機能的、物理的な要求を統合して、運用環境でレジリエントな価値のあるシステムソリューションを作成する必要があります。



**2. TIMELY** 顧客の需要と市場の状況が、システムの成功につながり、スポンサー価値をもたらすことを保証するよう、システムは、タイムリーに開発され使用されなければなりません。



7. SUSTAINABLE 利害関係者は、世界的な緊急課題と市場の力の結果として、システムとサービスが環境的に持続可能なこと、たとえば廃棄物や気候変動への望ましくない影響を最小限に抑えることを要求します。 システム特性としての持続可能性は、責任ある企業のサステナビリティ倫理と同様に強調されます。



3. SAFE ソフトウェアを多用する設計によって駆動されるシステムは、人間、環境、および財産の安全性が重要な懸念事項であるアプリケーションでますます使用されています。

システムの複雑さが増す中で、安全性とレジリエンスのレベルがますます高まることを保証する必要があります。



8. MAINTAINABLE システム開発者は、製品ライフサイクル全体にわたる保守コスト、製品の多様性の管理、事前に計画された製品の開発と廃棄、配備されたシステムから得られた知識の獲得と廃棄、および運用中にアップグレードを実行する機能を考慮する必要があります。 エンジニアは、展開されたシステムに対するサポートの、しばしば矛盾する技術主導の要求のバランスをとることができなければなりません。



**4. SECURE** システムの複雑さ、グローバルな接続性、およびITへの依存により、システムの脆弱性が発生します。 不要な侵入を回避したり、侵入の結果を軽減したりするための課題は非常に大きくなっています。

脅威は、システムのライフサイクル全体と実装されたソリューションを通じて継続的に評価され、アドホックな脅威と組織化された(国家的アクター)脅威の両方に対するセキュリティとサイバー防御を確保する必要があります。



アーキテクチャを壊すことなく、さまざまなパフォーマンスと機能に適応できます。 これは、初期インフラストラクチャへの投資または非経常的なエンジニアリングコストに関連する高コストのため、重要な特性です。モケーラビリティと適応性は、システムの立ち上げ時からの考慮事項であり、単一のアプリケーション用に最適化された製品にスケーラビリティがしばしばもたらすコセフリクトを調整する必要があります。

9. SCALABLE スケーラブルシステムは、基本的な



5. STABLE AND PREDICTABLE 将来のシステムは、運用上のニーズを満たし、顧客の受け入れを達成し、効率的に運用し、意図しない結果を最小限に抑え、不利益を回避し、期待された価値を提供するために、安定性、信頼性、および予測可能でなければなりません。システムは、さまざまなユースケースとストレス条件にわたって顧客の安定性の期待と一致するように検証する必要があります。



10. AFFORDABLE システムが実行可能であるためには、総所有コストの観点で手頃な価格である必要があります。システムは、スポンサーとユーザー、そして多くの場合、一般の人々に価値を提供する必要があります。開発者は、すべての利害関係者の観点からシステムの価値を理解し、これらの、多くの場合競合する価値を設計上の意思決定に組み込む必要があります。

システムプロバイダーの信頼とシステム製品およびサービスの信頼は、利害関係者にとって重要な上記の10の特性の多くにまたがっており、将来的にはますます重要になります。

システムがより複雑になっていくあいだに、ビジネスモデルの変化、エコシステムとパートナーシップの進化、および人的 資本の管理の課題への取り組みの結果として、企業もより複雑になっていきます。



#### 企業を取り巻く環境

#### グローバル化と 多様性

企業は、競争力のある効率 性を求めて、多様性、革新 性、新しいコラボレーショ ン手法を取り入れ、より大 きなグローバリゼーション に向けて前進し続けます。

# サステナビリティ倫理

持続可能性は、企業文化と 製品の重要な属性になります。 企業は、従業員だけで なく顧客を引き付けて維持 するために、前向きな倫理 的アイデンティティを確立 する必要があります。

#### システム思考

製品、生産、および組織の複雑さの問題に対処するために、システム思考の企業文化に対する需要が高まります。 分散した複数の分野のチームは、デジタルツールによってサポートされる集合的なシステムビューを生成します。

#### テクノロジーへの期待

未来で成功できる企業は、 新しいテクノロジーを予測し、迅速に取り入れます。 技術が市場で証明されるの を待つだけでは十分ではあ りません。企業にとって最 も意味のあるテクノロジー を理解するには、システム の観点が必須になります。



#### サプライチェーンの統合

現代のサプライチェーンは、機能性のトレードオフとリスクの判断が的確にできる、システムを熟知した幾層もの下請け業者に依存していきます。すべてのプロジェクトパートナー間のソフトウェアの一貫性は、デジタル製品と知的財産のシームレスで信頼できる取引のために重要になります。

# エンタープライズインテリジェンス、意思決定、そして学習

企業は、製品とプロセスのノウハウを保護すると同時に、従業員が企業の知的資産に簡単にアクセスして活用できる内部学習環境を構築する必要があります。 企業は、迅速に対応するために柔軟性と十分な適応性を備えている必要があります。

#### 自動化とデジタルトランス フォーメーション

企業のデジタルトランスフォーメーションにより、定量的な意思決定、 合理化された開発プロセス、および 自動化への依存度が高まります。 ソフトウェアロボットは、物理的な ロボットを補完して、製品とサービ スの品質をさらに向上させ、生産コ ストを削減します。



#### 未来の教育システム

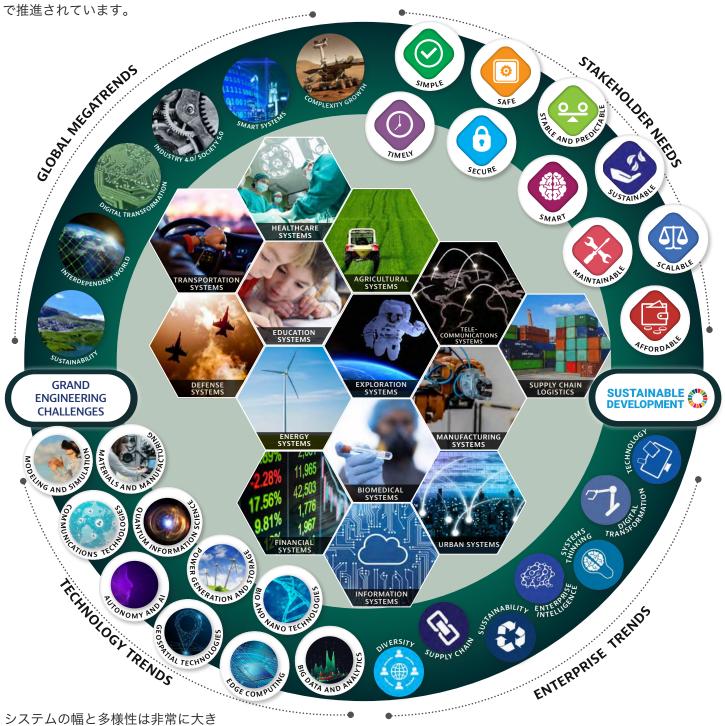
…デジタル検索を介して従業員が情報をすぐに利用できるようになり、多くの日常的な作業がロボットとAIによって実行されるようになります。 トレーニングは、人間のスキル、創造性、リーダーシップ、読解力、分析スキルに集中する必要があります。教育システムは、STEMと社会科学/人文科学のカリキュラムの間の伝統的な障壁を打ち破ることによって、この労働力の移行をサポートする必要があります。

Workforce of the Future: https://www.weforum.org/agenda/2021/01/davos-agenda-2021-society-and-the-future-of-work-skills-gap-jobs-of-tomorrow-diversity-inclusion-worker-well-being/

### システムソリューションに影響を与え

#### る要因

システムは、テクノロジーの能力に応じて変化するソリューション、製品、およびサービスを提供します。 しかし、システムは、グローバルな利害関係者のニーズと期待、およびこれらのシステムを開発および運用する企業の動向によって、社会的、規制的、および政治的な制約の中で推進されています。



システムの幅と多様性は非常に大きく、人工的に設計された、もしくは 人工的に設計されていない社会シス テムおよび環境システムが含まれま す。



#### 将来のシステムは...

…価値を創造するために、ますます多様化する 社会的ニーズに対応します。

…意図しない結果を招かないようにしながら、 技術革新を活用します。

> …利害関係者の要求と期待に応えるために、より賢く、 自己組織化され、持続可能で、資源効率が高く、 堅牢安全で、本当に信頼できるようになります。

…業界、経済、社会の世界的なトレンドに合わせていき、今度は将来のシステムがシステムへのニーズと期待に影響を与えるようになるでしょう。

…進化し続ける多様な労働力が、ますます高度になるツールを使ってイノベーションを起こし、競争圧力に対応することによって、作られるでしょう。

…人工知能の広範なアプリケーションによる複雑さの増大と予測可能性の低下により、エンジニアリング上の大きな課題が発生します。



21世紀の大きな課題は、本質的にグローバルなものになるでしょう。 気候変動が生態系の大惨事を引き起こすとどうなりますか?

コンピュータがますます多くのタスクで人間を上回り、ますます多くの仕事でそれらを置き換えるとどう なるでしょうか? バイオテクノロジーによって人間をアップグレードし、寿命を延ばすことができるとどう なるでしょうか?

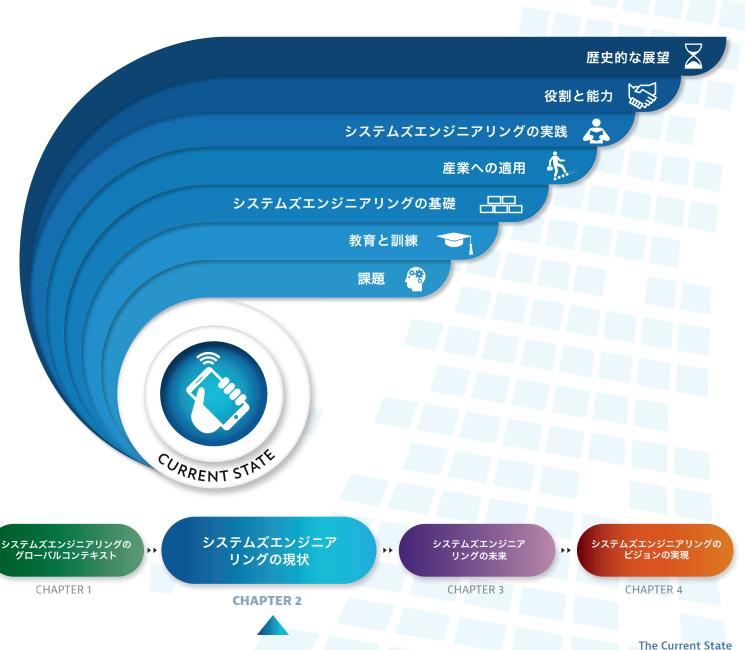
間違いなく、これらの質問をめぐって大きな議論と激しい対立が生じるでしょう。 しかし、これらの議論が私たちを互いに孤立させるようには思えません。それは逆です。これらの議論は私たちをこれまで以上に相互依存させるでしょう。

-21 Lessons for the 21st Century, Yuval Noah Harari, (2018)



# **THE CURRENT STATE**システムズェンジニアリングの現状

システムズエンジニアリングの現状を理解し、将来 の状況を予測する必要があります。この章では、シ ステムズエンジニアリングの実践の現状と、業界全 体でのそれらの導入に焦点を当てます。これには、 システムズエンジニアリングの基礎の現状、教育と トレーニング、およびシステムズエンジニアリング コミュニティが直面している課題が含まれます。



#### 歴史的な展望

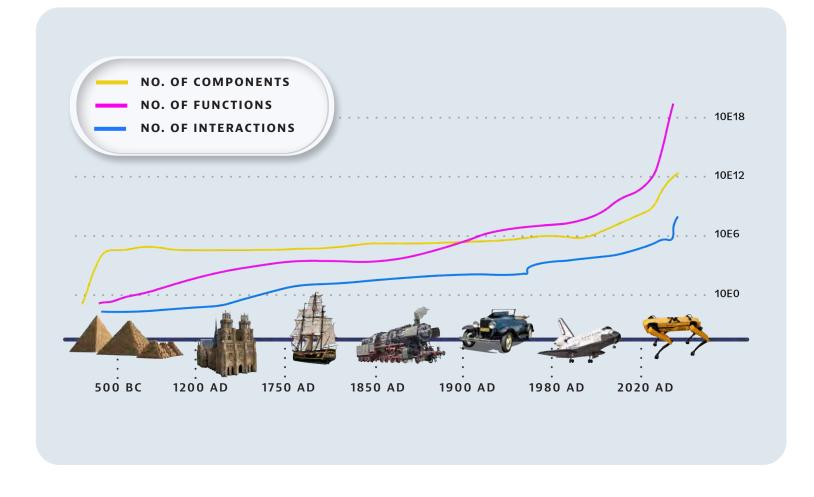


今日のシステムズエンジニアリングの実践は、グローバルコンテキスト、その歴史的進化、およびそれらが適用される業界分野の影響を受けます。 成功したエンジニアらは、何世紀にもわたってシステム思考を実践してきており、その実践は多くの場合、直感によるものでしたが、それだけでなく、建物、水道橋、船、下水道の設計と建設からの経験が増えるにつれて、経験則によってもなされるようになりました。

これらの直感は、多くの場合、適用される業界分野特有のツールと実践に体系化されています。今日、システムズエンジニアリングは、大小の企業でより広く評価されています。 一部の企業には専任のシステムズエンジニアがいますが、多くの企業には、システムズエンジニアリング手法を使用して設計する、業界専門のエンジニア(ドメインエンジニア)がいます。

今日、システムズエンジニアリングは理論的基盤を強化し、ベストプラクティスと標準を拡大しています。エンジニアは、モデルベースのシステムズエンジニアリング、デジタルトランスフォーメーション、プロダクトラインエンジニアリングなどの新しい概念をますます使用するようになり、システムズエンジニアリングの原則、実践、洞察を採用する業界分野が増えています。これは、非常に大規模なシステム、システムオブシステムズ(SoS)、複雑な社会技術システム、および非常に小規模なシステム、IoTデバイス、および生体内医療デバイスに当てはまります。

今日のエンジニアは、大規模な小型衛星群を設計および運用し、火星へのミッションを計画し、新しいワクチンを開発し、気候変動に対処しています。 さらに、継続的な技術的進歩と、システムズエンジニアリングの他の分野との融合により、最先端技術は急速に進化しています。





#### ▶ システムズエンジニアリングは、製品、ミッション、および組織の成功に直接貢献します。

今日のシステムズエンジニアは、機械工学、航空工学、ソフトウェア工学、電気工学など、他の工学分野の出身であることがよくあります。しかし1つのドメインで優れたエンジニアになることは、必ずしも優れたシステムズエンジニアになるとは限りません。

システムズエンジニアは、全体的に考える人 (holistic thinkers)であり、コミュニケーションがうまい人(strong communicator)であり、システムとその使われ方についての広い視野を持ち続けると同時に、関連性を持つ細部にまで注意を払わなければなりません。

システムズエンジニアは、幅広い知識とスキルのバランスを身に付け、デジタルトランスフォーメーションやシステムオブシステムズ(SoS)などのグローバルな問題やトレンドを認識している必要があります。

幸いなことに、システムズエンジニアリングコミュニティは、システムズエンジニアの役割の定義、トレーニング、およびキャリア開発の指針となる、コンピテンシー、知識体系、およびカリキュラムを進化させてきました。これらのコンピテンシーはシステムズエンジニアリング分野の多くをカバーしていますが、必ずしも一人がすべての分野で専門家である必要はなく、システムズエンジニアリングチームの複合的な経験によって、特定分野のアプリケーションに必要となるスキルが提供されることになります。



#### システムズエンジニアリングのコンピテンシー分野

#### コアとなるシステムズ エンジニアリングの原則



- ・システム思考
- ・ライフサイクル
- ・ ケイパビリティ エンジニアリング
- ・エンジニアリング全般
- ・ クリティカルシンキング
- ・ システムのモデリングと分析

#### 専門家としての コンピテンシー



- ・コミュニケーション
- ・ 倫理とプロフェッショナリズム
- 技術的リーダーシップ
- ・ ネゴシエーション
- ・ チームダイナミクス
- ・ファシリテーション
- エモーショナルインテリジェンス
- ・コーチングとメンタリング

#### 技術的な コンピテンシ



- ・要求の定義
- ・ システムアーキテクティング
- ・ デザイン・フォー・エックス
- · 統合
- ・インターフェース
- ・ 検証
- · 妥当性確認
- 遷移
- ・ 運用とサポート

#### システムズエンジニア リングのマネジメント コンピテンシー



- 計画
- ・監視と統制
- ・ 意思決定マネジメント
- ・ コンカレントエンジニアリング
- ・ ビジネスと企業の統合
- ・ 取得と供給
- 情報マネジメント
- 構成マネジメント
- リスクと機会のマネジメント

#### 統合コンピテンシー



- ・ プロジェクトマネジメント
- 財務
- ・ロジスティクス
- · 品質

Abstracted from INCOSE Systems Engineering Competency Framework, INCOSE Technical Product Reference: INCOSE-TP-2018-002-01.0

# システムズエンジニアリングの実践

現在、多くのシステムズエンジニアリング手法が標準と見なされていますが、他の手法も登場しています。 すべてのシステムズエンジニアリングの実践は、成熟度曲線を持っていると考えることができます。

システムズ エンジニアリングの実践は、さまざまな業界に適応しています。

このページの下の図は、多くのシステムズエンジニアリング手法のいくつかと、それらが成熟度曲線のどこにあるかを示しています。 これらは単なる例示です。 実際のプロジェクトでは、下図の EMERGING やTRANSITIONING 内の手法の実践の模範となるものが数多く存在しており、そのいくつかはこの章の後半で紹介されています。

システムズエンジニアリングの実践は、多くの標準、ガイドブック、およびシステムズエンジニアリングの知識体系のガイドに体系 化されています。



システムズエンジニアリングの実践は、ゆりかごから墓場までのソリューションライフ サイクルをカバーする業界分野特有のプロセスに組み込まれています。



システムズエンジニアリングは、ますます多くのアプリケーション業界分野にわたって基礎として受け入れられていますが、用語、方法、および 実践は、依然として業界や組織全体で一貫して適用されていません。 さまざまなドメインでのカスタマイズは効率性と俊敏性にとって重要ですが、共通のシステムズエンジニアリングフレームワークにより、ドメイン間での知識の共有が容易になります。



#### 産業への適用

システムズエンジニアリングは、航空宇宙および 防衛に広く適用されており、他の業界にもますます 適用されています。 ただし、航空宇宙および防衛 においても、システムズエンジニアリングの実践の 成熟度は、企業間および企業内のプログラム間で 異なります。

システムズエンジニアリングの実践方法は、製品の複雑さ、プロジェクトのサイズ、エンジニアリングチームの経験によっても異なります。 たとえば、システムズエンジニアリングの実践は、業界が市場主導型であるか、強力な規制基準で政府と契約しているのか、製品がコンポーネントまたはサブシステムとして提供されるのか、統合された最終製品またはサービスとして提供されるのかによって異なります。

過去10年間で、アプリケーション業界分野にまたがってシステムズエンジニアリングの用語と実践を標準化することで進歩が見られました。 しかしそれでも、予想されるように、さまざまな業界分野間で大きな違いは残っています。これらの業界分野には、それぞれ独自に推進する力が働き、それがシステムズエンジニアリングの実践(の標準化)に影響を与えますが、共通のフレームワークからのカスタマイズは効率と俊敏性を高めることができます。

**ELECTRONICS** 



**HEALTHCARE** 



**AUTOMOTIVE** 



FACILITIES AND INFRASTRUCTURE



INFORMATION TECHNOLOGY



POWER AND ENERGY



**AEROSPACE** 



**TRANSPORTATION** 



**DEFENSE** 



**LOGISTICS** 

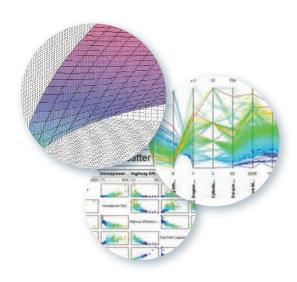


# システムズエンジニアリングの基礎



いくつかの学術プログラムで教えられているシステムズエンジニアリングをサポートする基本的なトピックの一例として、意思決定理論、オペレーションズリサーチ、リスク分析、情報理論、確率論、制御理論、複雑性理論、システム理論、ネットワーク理論、そして急速に成熟している不確実性の定量化とシステム思考<sup>1</sup>の分野が含まれます。

実践に携わるシステムズエンジニアは、数学と科学に基づいたさまざまな分析ツールを使用します。これには、対象システム(SOI)およびシステムの製造とサポートに使用される有効にするシステム(enabling system)を分析するために必要となる基礎的な数学と科学の能力が必要です。システムズエンジニアは、確率と統計を使用してリスクと不確実性を把握する方法を理解し、システムの複雑さを管理するための結合度や凝集度などの原則も理解する必要があります。サイバーフィジカルシステムの場合、今日のシステムズエンジニアは、制御理論と通信の基本的な知識も持っている必要があります。



システムズエンジニアは、確率や統計などの応用数 学ツールを使用して、システムの重要なプロパティ をモデル化します。



システムズエンジニアは、対象システム (systems of interest)に不可欠な関連する科 学的基礎に精通しています。

数学と科学の分析基盤に加えて、システムエンジニアリングは、大規模システムでの数十年の経験を通じて学んだプロセスと手順を進化させてきました。これらには、標準、ハンドブック、およびガイドラインに取り込まれたシステムズエンジニアリングの実践と経験則が含まれます。これらの知識リポジトリと標準は、近年、システムズエンジニアリングの実践の基盤に追加されています。

システムエンジニアリングをサポートするために必要な数学、物理学および社会科学は幅広いため、どのようにこれらの異なる基礎を抽象化して、システムズエンジニアリングの理論的基礎に統合できるかを記述する取り組みが進行中です。これらの基礎は、一般化されたシステムズエンジニアリングのカリキュラムの一部として、より統一的に教えることができます。

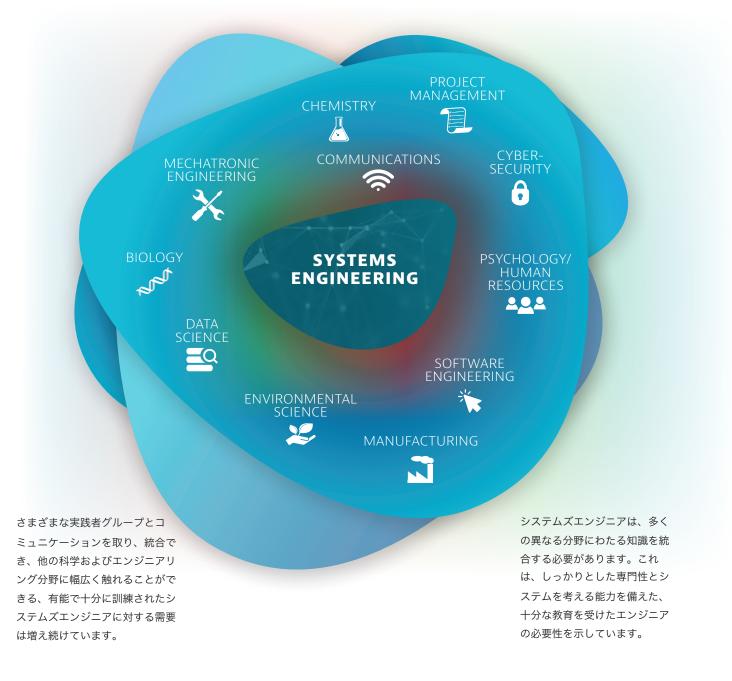
# 教育と訓練



システムズエンジニアに対する多くの応用分野の中での世界的な需要が高まっていて、それに対する供給は足りていません。 実践に携わる多くのシステムズエンジニアは、正式なシステムズエンジニアリングの教育を受けていませんが、「業務に携わりながら」シモテムズエンジニアリングを学んできました。 多くの大企業は、従業員をさらに育成するために社内トレーニングプログラムを開始しています。ますます多くの大学やトレーニングプロバイダーがシ

ステムズエンジニアリングを教えていますが、他の

工学分野と比較すると学生の数は少ないです。 カリキュラムの調和とコンピテンシーの分類に関するさまざまなガイドラインが、システムズエンジニアリング教育を広く活性化するための国際的な取り組みの一環として最近定義されました。 システムズエンジニアリングの研究に新しい学生を呼び込むために、さまざまなプログラムが開始されました。システム思考の重要性は、他の分野でも認識され、教えられています。





## ツールとデータ統合

今日のシステムズエンジニアリングの課題の1 つは、エンジニアリングツールとデータ群が広 く断片的に存在していることです。

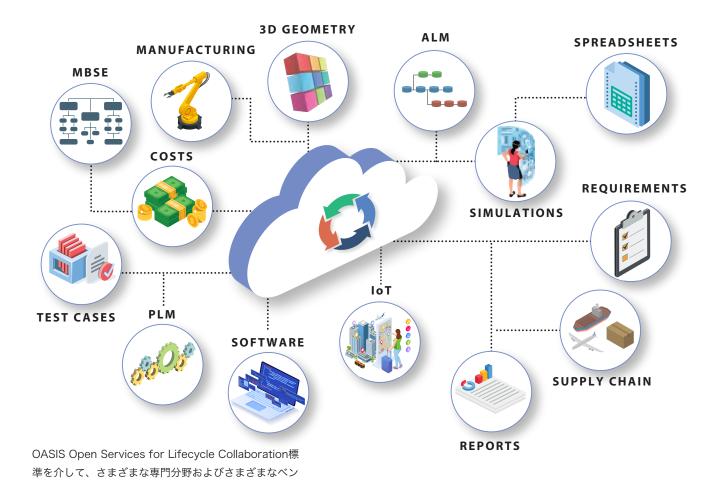
> 各分野に対応する 複数の専用ツール

独自のデータ形式

限定的な標準化

さまざまなドメイン固有のツール間のフェデレー ション、およびデータの統合は、コラボレーション と分析を可能にするための焦点になりつつあります が、多くの障害が残っています。 Functional Mock-Up Interface(FMI)<sup>2</sup> のような新しい標準はシ ミュレーションの相互運用性を改善し、OASIS OpenServices for Lifecvcle Collaboration (OSLC)<sup>3</sup> のような標準はトレーサビ リティと相互運用性を改善するために普及が進んで います。

多くの業界では、システムズエンジニアリングは依 然としてドキュメント中心のプロセスに大きく依存 しています。 デジタルエンジニアリングに新たに 重点を置くことで、新しい機会が開かれるだけでな く、新しい統合の課題も発生します。 Systems Modeling Language(SysML)やUnified Architecture Framework(UAF)などのモデルベー スの標準は、システムや企業向けのモデルベースの システムズエンジニアリングをサポートする標準的 な方法を提供するために進化を続けています。



ダーのツールとデータが統合されます。

<sup>2.</sup> https://fmi-standard.org/ 3. https://www.oasis-open.org/committees/oslc-domains/ charter.php

#### ソフトウェアの複雑さ、俊敏性、そして規模

重要なコンポーネントになりました。ソフトウェアの 規模、複雑さ、相互接続性が高まるにつれ、ソフト ウェアエンジニアリングコミュニティは、俊敏性、進 化、DevOps、および継続的な開発、統合、展開に重 点を置いた新しいアプローチを採用および開発してき ました。

過去50年間で、ソフトウェアは多くのシステムのより システムズエンジニアリングコミュニティは、ソフト ウェアエンジニアリングコミュニティと協力して、サ イバーフィジカルシステム(CPS)へのこれらのアプ ローチを一般化し、ユーザーに新しい価値と機能をよ り早く、より頻繁にもたらし、リスク、規制問題、お よび社会的影響のバランスを取ります。



# AIと自律システムの影響

従来のシステムズエンジニアリングツールと実践 は、運用中に学習と変更を続ける複雑なシステムには 対応していません。

さらに、これらのシステムは、社会的・倫理的に重 要な意味を持ち、設計の一部として考慮される必要が あります。例としては、安全性に影響を与える可能性 のある自動運転車に割り当てられる重要な判断や、シ ステムがプライバシーを侵害する情報を生み出す可能 性がどれだけあるか、などです。

データを収集・整理し、偏りがないことを保証し、 トレーニングセットが運用環境に適切に及ぶことを 保証する方法は、現在開発中です。さらに、これら のシステムの妥当性確認と検証は現在、従来のシス テムズエンジニアリングのアプローチに基づいてい ますが、これらのシステムが決定を下す方法の曖昧 さに対して説明責任を果たすために、新しい技術と 概念が必要になるかもしれません。 学習と進化をし 続けるシステムの継続的な検証の必要性にも対処す る必要があります。



システムズエンジニアリングは、複雑さの増大、相互接続性の 増加、および社会的影響により、より重要かつ価値のあるも のになっています。

システムズエンジニアリングは、そのコンピテンシー、 実践、および基礎を発展させてきました。

システムズエンジニアリングはシステムズエンジニアだけのものではありません。すべてのエンジニアがシステムズエンジニアリングを実践する必要があります。

システムズエンジニアリングの実践の成熟度は、業界 のドメイン、組織、プロジェクトによって異なりま す。

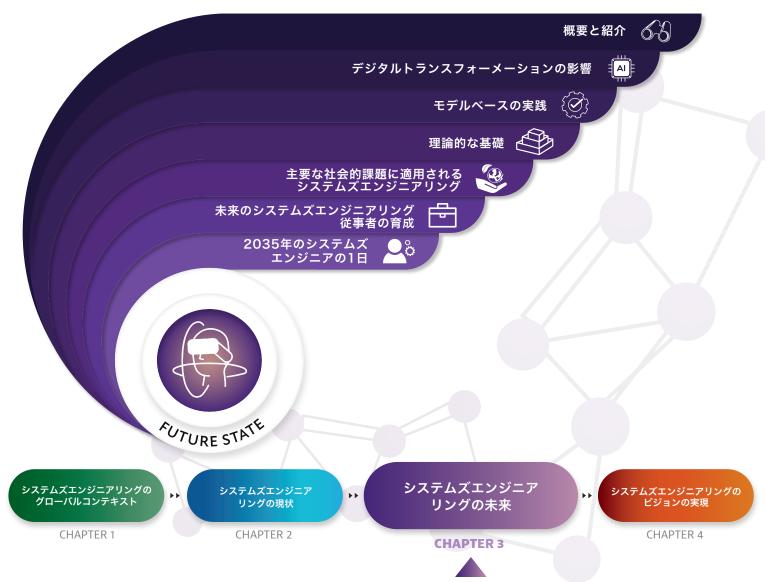
システムズエンジニアリングは、ツールとデータの統合、人工知能と自律システムの影響、ソフトウェアの複雑性、俊敏性、規模の拡大における課題に取り組んでいます。



# **3 THE FUTURE STATE**システムズェンジニアリングの未来

2035年までにシステムズエンジニアリングは、システムズエンジニアリングのグローバルコンテキストに関する第1章で述べた課題とニーズに対応する上で大きな進歩を遂げるでしょう。システムソリューションは、サイバーフィジカルシステム(CPS)および製品サービスシステムとしてますます特徴づけられ、より広範なシステムオブシステムス(SoS)の一部として他のシステムと常に相互接続されます。システムズエンジニアリングの関連と影響力は、大規模な製品開発を超えて、広い範囲の多種多様な設計されたシステムや社会技術システムへのアプリケーションにまで拡大し続けます。さらに、システムズエンジニアリングは、デジタルエンタープライズのための、不可欠な前提条件であり、実現手段となっていきます。

システムズエンジニアリングは、システムと製品の革 新、欠陥の削減、企業の俊敏性、およびユーザーの信 頼の向上が不可欠な、これらのアプリケーションに分 野横断的な視点をもたらします。システムズエンジニ アリングの実践はモデル中心となり、再利用可能な 素の膨大なライブラリを活用して、システムで サイクル全体で増え続ける複雑さとリスクを管理する ための基本的な方法論を提供しながら、利害関係るよう になります。システムズエンジニアリングは、政府や 業界から高い価値を提供する貢献者として広く認識され、システムズエンジニアリングの教育とスキルに対 する需要が高まっていきます。





2035年までに、システムズエンジニアリングは、さまざまな新しい手法を通じてその課題に対応できるようになります。人工知能(機械学習を含む)の使用拡大、通信技術、新しい種類の材料などの高度な技術は、システムの性質、人々がシステムと対話する方法、およびシステムの開発方法に影響を与えます。

システムズエンジニアリングの実践は、システム の複雑さの増大に対処するために、これらのテク ノロジーに適応され、またこれらのテクノロジー によって変革されます。



▶システムズエンジニアリングの未来はモデルベースであり、グローバルなデジタルトランスフォーメーションによって強化された次世代のモデリング、シミュレーション、および視覚化環境を活用して、システムを特定、分析、設計、および検証を行います。忠実度の高いモデル、高度な視覚化、高度に統合された複合領域のシミュレーションにより、システムズエンジニアは、現在の単一の設計で実行できるよりも迅速かつ徹底的に、桁違いに多くの代替設計案を評価・査定できるようになります。



▶大規模なデータセットと専門家のドメイン知識を活用した人工知能は、システムズエンジニアがソリューションをより効率的かつ効果的に提供できるようにアルゴリズムが 開発されるため、システムズエンジニアリングの手法とツール、およびシステム自体に大きな変化をもたらします。



▶大規模なデータセットを理解し、複雑なシステムを評価するために、データサイエンス技術がシステムズエンジニアリングの実践に取り入れられます。 さらに、急速に拡大するデータサイエンスツールのセットは、システムズエンジニアリングの統合分析フレームワークの重要な部分になります。



▶ 人間とシステムの統合の実践は、人間と効果的に相互作用することができ、また増加するシステムの複雑さおよび自律性のレベルを把握し説明できるスマートシステムを設計するために不可欠になります。



▶システムズエンジニアリングの理論的基礎は、システムの現象と利害関係者への 価値 を特徴付ける確立された科学と数学に基づくようになり、システムについての教育と進化する手法・ツールの基礎となります。



▶ システムズエンジニアに対する継続的な教育とトレーニングおよび、エンジニアリングとマネジメントの幅広い職種にシステム思考を浸透させることは、必要な技術的能力とリーダーシップ能力を備えたシステムズエンジニアに対する、ますます多くの需要に応えます。



▶ システムズエンジニアリングは、より多くの中小企業に受け入れられ、システムの複雑 さを管理すると同時に、市場価値を高めるために継続的に適応されます。



#### デジタルトランスフォーメーションの影響

FROM

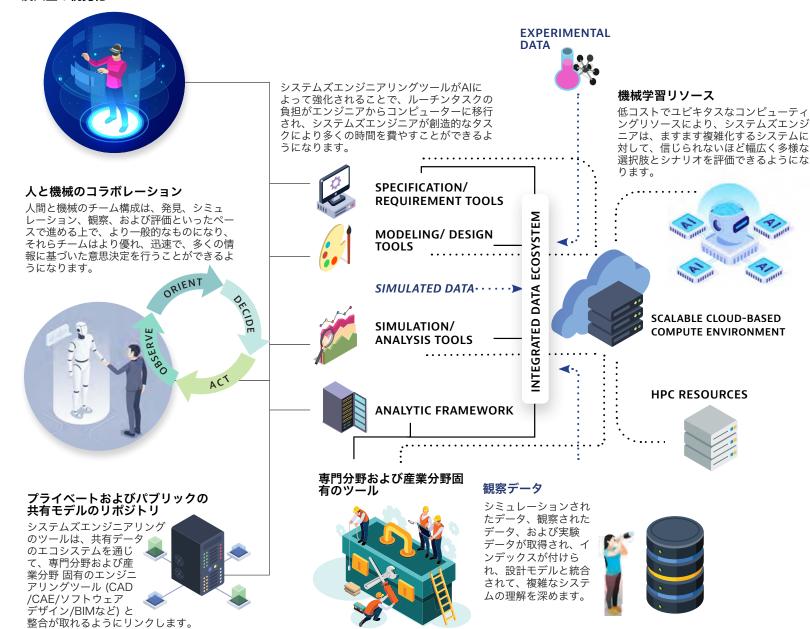
デジタル技術と標準開発の進歩により、モデルベースのシステムズエンジニアリング(MBSE)の実践が可能になっていますが、モデリングエコシステムは多くの場合初歩的で不完全です。

さらに、コンピューティング、クラウドインフラストラクチャ、およびデータディスカバリーは、他の工学および科学分野と比較して十分に活用されていません。

ТО

システムズエンジニアリング環境は、デジタルテクノロジーとモデリング標準の進歩を十分に活用して、忠実度の高いシミュレーション、データの視覚化、およびセマンティックWebテクノロジを使用した設計の探究を迅速にします。システムズエンジニアリングツールは、インターネット接続と知識表現の恩恵を受け、より広範なエンタープライズデジタルエンジニアリング環境の一部として、他の分野やツール環境とのシームレスな情報交換を提供します。さらに、システムズエンジニアはマシンと提携して、ロバストでアジャイルな設計プロセスで創造性と自動化を組み合わせます。

#### 没入型の視覚化



#### AIがシステムズエンジニアリングに与える影響

FROM

現在のシステムズエンジニアリングツールのエコシステムでは、システムズエンジニアリングチームが実行する仕様、設計、および分析するタスクを導き、評価し、最適化するのに役立つサポートが限られています。

データの入力、レポートの作成、および図の整理はすべて手作業であり、高品質のシステム設計を生み出すための付加価値のある作業が損なわれています。さらに、システムズエンジニアリングコミュニティは、高度なアルゴリズムの開発と検証において大きな進歩に貢献してきましたが、新しいシステムでますます多く利用されるようになった AI および機械学習 (ML) アルゴリズムの現在の指数関数的な成長にまでは、システムズエンジニアリングコミュニティはあまり関与できていませんでした。

システムズエンジニアリングツールは、システ ムズエンジニアがデータ入力、整合性チェック、レポート 生成などの日常的なタスクに費やす時間を減らして、創造 的なタスクに、より多くの時間を集中できるようにする、 データ駆動型のコンテキストアウェアなアルゴリズムで強 化されるようになります。その代わりに、システムズエン ジニアは設計意図を示して、ツールが高品質の仕様と設計 を行えるように導くことができます。さらに、システムズ エンジニア自身がAIおよびMLコンポーネントを使用してシ ステムを設計する頻度が高くなりますが、それには新しい システムズエンジニアリングのスキルが必要になります。 システムズエンジニアは、アルゴリズムのトレーニングと テスト用のデータセットの開発において重要な役割を果た します。また、増加している多くの「学習した」ふるまい を行うシステムのための、パフォーマンス、および安全性 の妥当性確認を行う方法を確立していく必要があります。

システムズエンジニアリングのツールと実践のための Alイネーブラー

AI を活用したシステムの構築に必要なシステムズエンジニアリングの実践への影響

ニューラル手法とシンボリック手法を組み合わせた新しい AI技術が登場することで、システムエンジニアリング組織 は、アルゴリズムが対象となる組織やシステムに合わせた サポートを行えるように、設計領域を記述することができ るようになるでしょう。

システムズエンジニアは、AIによって強化された設計ツールが、評価とトレードオフ分析を行うための代替設計案を生成できるように、コンテキストを設定し、ドメインのコンセプトをコード化する上で重要な役割を果たします。

自然言語処理(NLP)技術は、システムズエンジニアがより良い仕様を記述し、曖昧さを取り除き、不適合な要求を特定し、要求が最終設計に与える影響を評価するのに役立ちます。

AIアルゴリズムは、人間が提示する仕様と設計意図に基づいて、適応的な実験計画法と代替アーキテクチャの総合を可能にします。

AIが活用されたツールは、システムズエンジニアと協力した設計作業を推進し、設計意図に沿わない不適切な設計の選択を回避するのに役立ちます。

Alを活用したツールは、システムに対する信頼を構築するために必要なテストを特定して 最適化するのに役立ちます。

システムがより非決定論的になるにつれて (MLが利用されたシステムなど)、システムズエンジニアは、従来のテストのやり方に代わる、分析的なV&V手法を採用する必要があります。

システムズエンジニアは、妥当性確認プロセスの一環として、アルゴリズムが偏っていないことを確認する必要があります。

システムズエンジニアは、力ずくの方法に頼る ことなく、非決定論的なシステムで十分なカバ レッジと信頼性を確保するために、どのように テストの計画と実行を行うか、適応させていく 必要が生じます。

システムズエンジニアリングコミュニティは、AIとML の手法にさらに精通することが必要となります。シス テムでは、これらのアルゴリズムによって有効にな る、より多くのコンポーネントが活用されるようにな るためです。

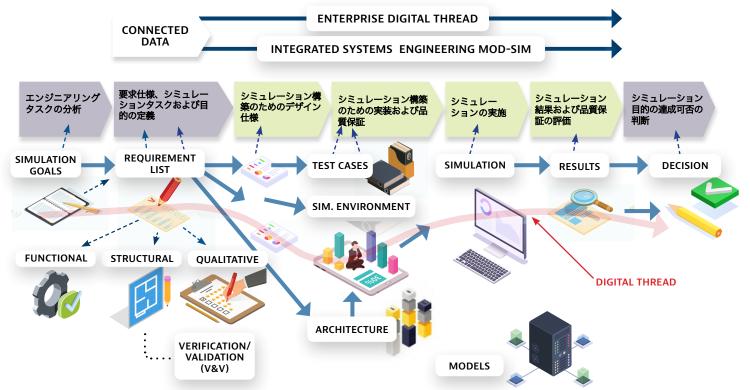
システムズエンジニアは、アルゴリズムのトレーニング データとテストデータを構築および評価して、データの バランスが取れており、システムが動作する実際の環境 を代表していることを確認するという新しい役割を担う ことになります。



#### システムズエンジニアリングの未来はモデルベースが主流になります

FROM モデルベースの手法を取り入れてシステムズエンジニアリングの作業成果物を得るシステムズエンジニアリング組織の数は増えていますが、その採り入れ方は業界セクター間および組織内で一様ではありません。プロジェクトごとにカスタマイズした1回限りのシミュレーションが行われ、特にシステムアーキテクチャ設計と設計の妥当性確認の重要な初期段階では、モデルの再利用はまだ限られています。

システムズエンジニアは、オントロジー的にリンクされたデジタルツインベースのモデル資産を使用して、タスク固有の仮想モデルを日常的に構成します。これらの接続されたモデルはリアルタイムで更新され、仮想現実ベースの没入型設計と探索空間を提供します。この仮想グローバルコラボレーションスペースはクラウドベースであり、サービスとしてのモデリングによって実現され、クラウドベースの大容量コンピューティングインフラストラクチャを活用した大規模なシミュレーションをサポートします。統合されたModSimフレームワークのファミリが存在し、中小企業と政府機関が協力できるようになります。



2035年までに、統一され統合されたMBSE-Systems Modeling and Simulation(SMS)フレームワークのファミリが誕生します。これらはデジタルツインを活用し、企業のデジタルスレッド基盤に完全に統合されています。これにより、効率的なパターンベースのモデル構成とシームレスな「ゆりかごから墓場まで」の仮想探索が可能になります。統合されたAI/MLベースのエージェントは、影響の大きいパラメトリックスタディーと、ノイズ要因の探索を行い、クローズドループの安全性/セキュリティ運用ドメインの設計面の探索をサポートします。

デジタルスレッドベースのMBSE-ModSimフレーム ワークは、ユーザーエクスペリエンスのアジャイルで 効率的なキャプチャ、モデリング、シミュレーショ ン、および理解を可能にします。 仮想的な設計の候補は、製造、保守、アップデート、および最終的な廃棄に至るまで評価することができます。MBSE-SMSフレームワークは、新しいデータの取り込み、セグメンテーション、AI/MLネットワークの再トレーニングをサポートするために、高帯域で双方向の通信接続も活用します。リアルタイムにシステムの異常が検知されると、仮想システム設計に使用される接続されたデータが更新されます。これらのアップに使用され、パフォーマンスデータを収集し、適切なリリースアクされ、パフォーマンスデータを収集し、適切なリリースアクションについてシステムズエンジニアに通知する、探索関づされます。最後に、MBSE-SMSフレームワークは、アジャイルなます。最後に、MBSE-SMSフレームワークは、アジャイルな継続的統合、ビルド、妥当性確認、およびリリースのサイクルをサポートする統合資産ライフサイクル管理システムを提供します。

# MBSE-SMS FRAMEWORK

#### コネクティドデータ

AI/ML ベースのデータ セグメンテーションが統合 された、高度に接続されたデータ、オブジェクト のラベル付け、および経時的なシナリオとオントロジー間のマッピングは、自動化されたデジタルツインの作成、モデルの関連付け、検証と妥当性確認、およびシームレスなシステムズエンジニアリングのトレードスタディをサポートします。



#### モデルベースのシステムズ エンジニアリング

セマンティックに豊富なモデリング標準を使用して作成された MBSE 記述モデルは、システムの抽象化、データのトレーサビリティ、ビューの分離を提供し、システムレベルと製品実現レベルの両方で AI/ML ベースの参照モデルの再利用を活用します。

#### インタラクティブな HMIによる可視化

仮想化された接続サービス、リアルタイム制御アルゴリズム、CPU エミュレーションを使用したインタラクティブなカスタマー HMI エクスペリエンスにより、リアルタイムのシステム応答パラメーターの探索が可能になります。



# Requirements Behavior AI/ML Reasoning AI/ML Reasoning

#### 拡張現実をサポートする忠実度と 完全性の向上

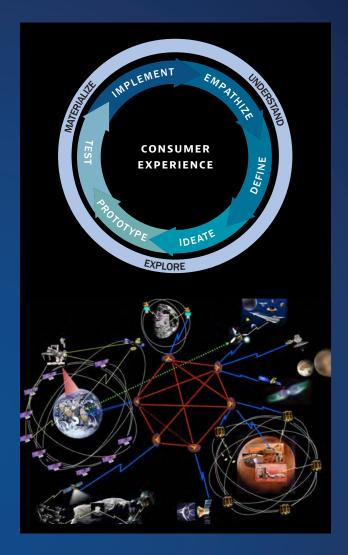
複数のスケールでのリアルタイム シミュレーションを可能にする、複数の抽象化レベルでの階層化されたシミュレーション モデル (単一車両からマルチエージェントのトラフィック、都市インフラフリート、地域/国横断のシミュレーション)



#### 写真のようにリアルな視覚化による 詳細なシナリオ分析

写真のようにリアルなシミュレーションと視覚化により、詳細なシナリオ分析が可能になります。





#### SYSTEMS OF SYSTEMS

実世界のシステムオブシステムズ(SoS)、アクション指向の情報を瞬時に抽出する機会を提供する、クラウドデータレイクに取り込まれた運用設計領域での顧客体験データ

#### ゲームエンジンによるリアルな描写と探索



拡張現実: (xR) 拡張現実(AR)、仮想現実(VR)、 混合現実(MR)





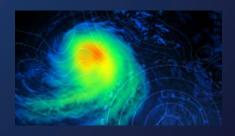
#### 大規模な並列計算

高度なAI/ML 拡張データの視覚化をサポートする 大容量並列コンピューティングは、合成データの 生成と、パフォーマンス、安全性リスク、および セキュリティ脅威に対するディープラーニング ベースのエッジケース探索を提供します。



環境条件、地形、 シーン生成、 およびマップ

忠実度の高い3Dマップ、道路のトポロジー、シーン、天気、交通状況





#### 柔軟でレジリエントなシステムの設計

FROM

システムアーキテクティングは、その場しのぎであることが多く、関連するすべての技術分野(ハードウェア、ソフトウェア、運用、製造、セキュリティなど)からのアーキテクチャ上の懸念を効果的に統合することも、他の利害関係者の懸念を完全に統合することもありません。さらに、システムアーキテクトには、アーキテクチャの運用上のレジリエンシーの評価および最適化を行うための、十分な環境コンテキストや機能不全シナリオが常に含まれているとは限りません。

システムアーキテクト手法は十分に確立されており、ますます複雑化するシステムに関連する幅広い利害関係者の懸念に対処します。システムアーキテクチャ、設計、および分析は、分野、ドメイン、およびライフサイクルフェーズ全体で統合され、単一の一貫した明確なシステム表現を提供します。進化するニーズ、外部コンテキスト、および予想される機能不全シナリオは、アーキテクチャプロセスの中心であり、柔軟でレジリエントで適応性のあるアーキテクチャを実現します。

設計されたシステムは、当初の設計時には考慮されていなかった方法で常に使用されており、新しいユースケースにうまく適応することもあります。しかし2035年に近づくにつれて、システムとそれをサポートするシステム、およびサプライチェーンを、特に柔軟性、堅牢性、レジリエンスに重点を置いて考え下しているでしょう。ロスドリブンシステムズエング(LDSE)やオポチュニティドリブンシステムズエング(LDSE)などの新しい手法は、システムのレジリエンスを最適化することに役立ちます。カフスエンジニアリングなどの手法は、ITシステムやソフトウェアシステムだけでなく、さまざまな種類のシステムのレジリエンスを促進するために適用されます。

レジリエンスは、システムが逆境に直面しても必要な機能を提供できる未来を追求します。2035年までのシステムズエンジニアリングの実践では、事後対応型と予防型の両方の方法で緊急のシステムと運用動作に適応できるシステムが設計されます。

自律システムの出現とコモディティ化は、システムのレジリエンスの必要性を示唆しています。これらのシステムは、幅広い環境条件に対して堅牢であり、予期しない条件に適応し、機能不全条件を予測して回復できる必要があるためです。レジリエントなシステムは、混乱に直面してもミッションを遂行し続けることができます。2035年までに、システムズエンジニアは、さまざまな運用環境、機能不全シナリオ、予期せぬ状況に対するレジリエンスを備えたシステムを評価し最適化するために、忠実度の高いモデリング、シミュレーションおよび分析を、即座に使用することができるようになります。

#### レジリエンスアーキテクチャ

スマートシティは、配備されたセンサー、建物、輸送システム、公共施設など、さまざまなソースからのデータを統合します。このデータは、意思決定者に通知するためだけでなく、変化する状況に自動的に対応するためにも使用されます。高度に相互接続されたスマートシティの性質と、地方自治体の機能間の相互依存の可能性により、レジリエントなアーキテクチャの必要性が高まっています。

レジリエンスのあるスマートシティのアーキテクチャは、システム内およびシステム間の連鎖的な障害のリスクの対処および制限を行い、システム間の統合をサポートし、システムオブシステムズの継続的かつ動的な適応と拡張を促進します。



#### 設計された信頼性のあるシステム

FROM

システムの信頼性は、サイバーセキュリティ、データのプライバシー、システムの安全性、全般的な評判など、多くの特性を含む大まかに定義された概念です。システムがこれらの特性にどのように対処しなければならないかを規定する法的状況は、急速に一貫性を欠きながらも進化していますが、「信頼性」を構成する特性は、システム全体の設計において、常に「二次的な」考慮事項です。しかし、システムの相互接続のレベルが高まり、新しいシステムを強化するためのデータ収集がますます日常的になっているため、組織のリスク面が指数関数的に増加しています。

тс

システムズエンジニアリングでは、「システムの信頼性」の指標を定義しそれを追跡するために、システムの安全性などの従来の視点に加えて、セキュリティー、プライバシー、説明可能性などのさまざまな新しい視点を取り入れています。これには、システムをサイバー脅威から保護し、システムが侵害された場合のユーザーへの影響を最小限に抑えるために、データの最小化と多層防御の原則に基づいた設計が含まれます。自律システムが主流になるにつれて、説明可能性と証明可能な安全性の原則により、システムプロバイダーはこれらのシステムに対する信頼を築き、システム開発者は市場での差別化を図ることができます。

#### 透明性と企業倫理

システムの特性は、信頼性のための方程式の一部でしかありません。システム開発組織の振る舞いと原産国も、ユーザーがシステムについてどのように感じるかに影響します。2035年までに、企業倫理、評判、透明性、特に個人データの使用に関しては、ユーザーがどのシステムを信頼し、どのシステムを避けるべきかを判断する際の中心となるでしょう。



#### サイバーセキュリティ

サイバー環境は常に進化しており、政治的、戦略的、および経済的利益のために攻撃を形成するさまざまな国家アクターなど、新しい脅威が毎日のように出現しています。デジタルインフラストラクチャがますます接続され、自律性に大きく依存するようになるにつれて、サイバーセキュリティはより一層システムの安全性の主要な考え方となり、信頼の基盤を形成します。

2035年までに、サイバーセキュリティは、今日でのシステムパフォーマンスや安全性と同様に、システム設計の基本的な視点になるでしょう。システムズエンジニアリング分野はさらに分野横断的なものへと成長し、サイバーの専門知識をチームに組み込んで、システムのライフサイクル全体を通じてサイバーが考慮されるようになります。さらに、システムのサイバー側面をテストおよび評価するのに役立つモデリングおよびシミュレーションツールがますます普及し、今日には開発ライフサイクルの後期でしか考慮されないことが多すぎるシステムセキュリティの全体像を提供します。

サイバーセキュリティの設計は、システムのコンポーネントを超えて拡張され、システムの弱点を排除するために、サプライチェーンおよび調達部品の分析が含まれます。

#### データと個人のプライバシー

システムは、収集されたデータの運用にますます依存するようになっています。データは、自律システムや、ユーザーの好みや行動を学習して適応するその他のシステムの機能にとって重要です。ユーザーデータに責任を持ち、透明性があり、データの最小化と収集されたすべての個人的なデータを保護するメカニズムを備えたシステムプロバイダーを、ユーザーはますます信頼するようになります。



#### 複雑なシステムの動作を理解するための システムズエンジニアリングの実践へのデータサイエンス手法の導入

システムズエンジニアは、商用のシミュレーションや分析ツールからスプレッドシート、自前のコードまで、さまざまなツールを組み合わせて、パフォーマンス、物理的制約、コスト、およびリスクのモデルを使用してシステムのふるまいを分析します。これらの分析は通常、比較的限られたデータセットに制限されており、システムズエンジニアリングの実践には、複雑なふるまいを理解するのに役立つ大規模なデータセットを相関付ける方法は一般に含まれていません。

システムズエンジニアのツールキットは、データサイエンスツールと手法の導入によって大幅に拡張され、非決定論的システムのパフォーマンスとリスクをより適切に定量化し、システムのふるまいを長期にわたって継続的に監視する能力を向上させます。この拡張されたツールキットにより、より包括的な分析が容易になり、ますます複雑化するシステムを理解するための、非常に大規模で相互接続されたデータセットの収集と探索が可能になります。

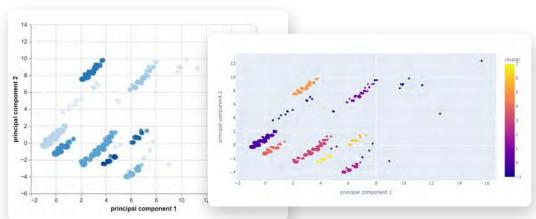
2035年における増大するシステムの複雑さにより、システムのふるまいの分析と予測も難しくなります。サイバーフィジカルシステムは大規模に相互接続され、スマートシステムテクノロジーが組み込まれ、安全で信頼できるものでなければなりません。システムズエンジニアは、システムのふるまいを定量化するために、ますます大きくなるトレードオフ空間と非常に大きなデータセットを使用して、これらのシステムを分析することが期待されます。システムズエンジニアリングの実践には、スマートなデータ収集メカニズムが必要であり、創発的なふるまいを特定し、そのデータを活用して不確実性と予期しない行動を検出、定量化、および管理するための正式および準正式な方法が含まれます。

安価なクラウドコンピューティングリソースと組み合わせたデータサイエンス手法とオープンソースツールの改善は、次世代のシステムズエンジニアリングの実践とツールを強化するのに役立ち、システムズエンジニアは不確実性に対処しながら、起こり得る非決定論的結果をよりよく理解できるようになります。データサイエンス、データ分析、ビッグデータの研究がシステムズエンジニアリングの実践に取り入れられ、データサイエンスがシステムズエンジニアのコアコンピテンシーになるでしょう。

クラスタリング、外れ値検出、確率論的推論などの データサイエンス分野から採用された分析手法は、 一般に、巨大なシステム状態空間を探索して、望ま しくないシステム状態を特定して排除するために使 用されます。システムの健全性の指標として、さま ざまなシステムパラメータを相互に関連付け、監視 し、視覚化するための技術が開発されます。分析技 術は、システムのふるまいをよりよく理解し、シス テムのパフォーマンスやその他の品質特性を改善す るために使用される、運用システムのリアルタイム 監視からの大規模なデータセットを活用します。こ の理解を活用して、よりフェイルセーフ、フォール トトレラント、安全、堅牢、レジリエンスがあり、 適応性の高いシステムを開発することは、システム ズエンジニアリングの実践における基本的な部分に なります。視覚化ツールは、さまざまな利害関係者 固有の視点からのインタラクティブな分析を可能に し、意思決定者が新しい洞察を得

て、what-if分析を実行し、決定の影響を伝達できるようにします。

システムズエンジニアと意思決定者は、 結論を導き出すためのより多くの情報とマシンドリブンな洞察を得ることができます。



#### モデルベースのシステムオブシステムズの実践

システムズエンジニアは、主に分野固有の専用システムの設計に重点を置いています。システムとデバイスはもはやスタンドアローンではなく、より広範なシステムオブシステムズ(SoS)の一部として相互接続されていることが広く認識されています。初期の設計ガイダンスは、アーキテクチャフレームワークと相互運用性についての標準という形で開発されました。

システムオブシステムズ(SoS)は、一連の統一されたモデリングアプローチを仕様して設計されます。一般的なSoSスタイルガイド、パターン、および方法論は、社会技術システム、ヒューマンファクター、サイバネティックス、進化生物学、社会学をSoSに統合するよう実践されます。SoSのモデルベースの検証は、スタンドアローンまたはネット中心のシミュレーションプラットフォームで、サービスエージェントベースのモデル構成を使用して実現されます。システムズエンジニアは、予想されるより大規模なSoSソリューション内で再利用するSoSを仮定して、デザイン・インしておきます。

2035年までに、Systems of Systems Engineering (SoSE)コミュニティは成長し、政府、政策、土木、商業など、さまざまな分野の専門家が参加するようになります。

これらのコミュニティは、「トップレベルの権限」がないにもかかわらず、共同で作業し、別々に所有および運用されている技術システムと非技術システムの集合セットを扱い、広範なシステムアプローチを適用することの集団的な利点を見つけました。これにより、複数の領域を超えてSoSEを実装する新しい機会が開かれます。

SoSEは、社会技術システム理論、オープンシステム原則、ネットワークとネットワーク分析、および相互運用性モデルの側面をシステムズエンジニアリングのベストプラクティスに含めるように進化します。

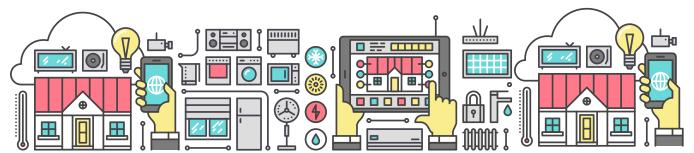
ひとまとめに、これらの実践は、法的、組織的、意味的、および技術的な相互運用性の観点からSoSを捉えて分析するためのフレームワークのコアセットをSoSEに提供します。これらのSoSフレームワークも、INCOSEハンドブックで特定された主要な課題に対処するために長い道のりを歩んできました。

拡張可能で堅牢かつ適応性のあるSoSソリューションを設計および実装するために活用される、新しいSoSEパターンが確立されます。これらのパターンには、データのカプセル化、継承、抽象化などのオブジェクト指向システムズエンジニアリング(OOSE)手法が含まれます。これらのモデルベースの手法は、SoSEパターン、OOA/D(オブジェクト指向分析/設計)、およびAI/MLネットワーク分析を完全に統合し、完全な仮想SoS概念空間を探索する拡張機能を提供します。それらは、システムオブシステムズのコンテキストで、拡張可能で再利用可能なシステムを設計するために使用されます。



SoSは、独立して動作可能であり、特定のより高い目標を達成するために一定期間ネットワーク化された 有限数の構成システムが統合されたものです。

-Jamshidi, 2009



#### ヒューマンシステムインテグレーション手法による 社会技術的複雑システムの理解

FROM

ユーザーエクスペリエンスの設計手法の採用は著しく増加していますが、システムズエンジニアリングチームとユーザーエクスペリエンスチームとの間にはまだギャップがあります。システム分析は、多くの場合、システムのテクノロジー中心の側面のみに焦点を当てるか、システム内の人間を限られた再現度でモデル化するのみです。

システムズエンジニアリングの手法は、ユーザーエクスペリエンスの概念とヒューマンシステムインテグレーション(HSI)手法を統合して、システムでの人間的な要素が設計のあらゆる側面で適切に理解され、考慮されるようになります。さらに、システムがより頻繁に人間と機械のコラボレーションに依存するようになるにつれて、システムの技術要素と人間の要素の相互作用がシステム設計の重要な部分になるでしょう。

2035年に近づくと、社会技術システムはますます自律的になり、より多くのAIが組み込まれ、大規模に相互接続され、協調的で、安全、セキュアで、信頼できるものでなければなりません。システムのふるまいの分析と予測はより困難になりますが、システムズエンジニアは、人間と自然の原理を念頭に置いてこれらのシステムを分析、設計、評価することが期待されます。システムズエンジニアリングの実践には、ヒューマンファクターとユーザビリティの評価、創発的なふるまいの特定、予期しない行動の検出と管理のためのHSIメソッドが含まれます。

HSI手法、人間の行動シミュレーション、ヒューマン・イン・ザ・ループシミュレーション機能の改善は、次世代のシステムズエンジニアリングの実践とツールを強化するのに役立ち、システムズエンジニアは起こりうる非決定論的な結果をよりよく理解し、不確実性に対処できるようになります。

HSIでの研究は、システムズエンジニアリングの実践 に取り入れられ、システムズエンジニアのコアコンピ テンシーになります。



人間はますます「システムの一部」になり、複雑な問題を対し、音声からりまったがいインタョンメカニズラクを利用できるようになります。



2035年までに、ヒューマンマシンインターフェースは進化を続け、現在の傾向に 従って、音声、タッチ、ジェスチャーなど、システムとのインタラクションのた めのさまざまな方法をユーザーに提供しています。HSIは、より多くの人間、機 械、およびプロセスが以前は手に負えなかった問題を解決するため、人間と機械 のコラボレーションにますます重点を置くようになります。

HSIは一般に、統合される必要のあるさまざまな側面を組み込んでいます。たとえば、人的および組織的要因、HSIの計画とプロジェクト管理、マンパワーと職種の進化、人員、トレーニング、そして、労働衛生、安全、環境、居住性、および人間の生存可能性を含む生命の重要性です。HSIは、システムオブシステムズ(SoS)のトポロジー、人間と機械の活動、および創発

特性に関する社会技術的複雑システムに関心を持ちます。

システムは、さまざまな種類の組織、コミュニティ、および非公式のグループを通じて相互に作用します。HSIには、システムの所有者からオペレーター、保守担当者、サポート担当者、エンドユーザーに至るまで、すべての人員の視点が含まれます。

#### 協調的プロセスに向けた取得の変化

プロジェクトのニーズと要求は、組織によって「社内」で準備され、従来の取得プロセスに通知されます。その結果、プロジェクトは、初期段階および最も発展的な段階で、より広範な企業の知識を十分に活用できません。取得者は、システム開発プロセス中での技術的パフォーマンスを評価する能力が限られているにもかかわらず、(供給側の)契約者は情報を共有する動機がありません。リファレンスアーキテクチャは、もし使用される場合、プロジェクトに固有のものであり、システムのデリバリー後に維持されることはありません。

取得者は、「主契約」に先立つプロジェクトの初期段階で業界の知識を活用します。取得者は、複数の組織が統合されたプロジェクトチームを立ち上げ、システムのライフサイクル全体を通じて「賢い」顧客として活動し、進化するリファレンスアーキテクチャとベストプラクティスをベースにして構築できるようにします。共有デジタルエンジニアリングソリューションは、「スマートオペレーション」を含むすべてのフェーズで、すべてのプロジェクト参加者による情報へのアクセスを最大化し、情報の利用を強化します。

#### より良い要求とコンペ前の準備

取得者(政府または業界)が潜在的な川下の供給業者および戦略的パートナーと協力して準備した要求および概念参照アーキテクチャの説明、その後の調達担当による最終決定および入札の発行。 コンペ前のより良いコラボレーションによって、品質要求が高まり、リスクが低下し、提供される機能のコスト管理が改善されます。

#### 共有情報と共有環境

Development

**SHARED** 

**INFORMATION** 

**SMART** 

CUSTOMER

Operations & Maintenan

企業のすべてのメンバーが有益なプログラム情報に最大限にアクセスできるようにし、コミュニケーションを強化し、エラーや資産の重複を減らします。 成熟した構成とバリアント管理を備えた共有デジタル エンジニアリング ソリューションにより、企業は非常に反復的で短いステップ/フェーズで作業でき、動的な「ダッシュボード」と高度な自動化によってサポートされる、大規模で複雑なシステムを管理するために必要な俊敏性と柔軟性を提供し、すべての企業メンバーの知的財産の公正な保護を引き続きサポートします。

#### 契約インセンティブと参入障壁の低下

革新的な価格設定 (および入札) モデルは、目標コストやインセンティブ料金 (リスク レベルに応じて適切な) などのコラボレーションを促進し、リスクテイクの共有と妥当な (ただし最大化された) 利益を可能にします。

標準の採用、および共有環境とテクノ ロジーへのアクセスにより、新しい非 伝統的な組織の参入障壁が低くなりま す。

#### リファレンス アーキテクチャ

企業は、プログラムのニーズとフェーズに一 致する適用可能なアーキテクチャパターンと フレームワークの、実証済みの進化するカタ ログに定期的にアクセスし、維持します。

#### リスクの共同管理

すべての利害関係者がプログラムのリスクを 共有し、共同で管理します。 この取り決め は、リスクに対処するために、企業のより大 きな知識と、取得者と供給者によるライフサ イクル全体の情報への共有アクセスを活用 し、また、予期せぬ事態や紛争につながる問 題を減らします。 リスクの所有権は、リスク を最も適切に管理できる当事者に譲渡されま す。

#### スマートカスタマー

取得者は、自社のチーム、戦略的パートナー、および設計ガイドラインとポリシーのライブラリを利用して、プログラムのすべての段階でシステム/設計の適合性、成熟度、およびリスクを判断できます。 システムズエンジニアリングの知識と能力は、調達の現場で利用可能であり、取得側と供給者との間のより良いコミュニケーションを可能にします。

#### スマートオペレーション

運用はプロジェクト間で、また信頼できるサプライチェーンを通じて統合され、デジタル ツイン、広範なヘルスモニタリング、予防保全を活用して、管理された廃棄までの完全に最適化されたライフ サイクルを実現します。



FROM

システムズエンジニアリングの基礎は、応用の経験から得られ、システムズエンジニアリング知識体系 (SEBoK)、ISO/IEC 15288などのさまざまなプロセス標準、および INCOSE システムズエンジニアリングハンドブックなどのハンドブックとして文書化されています。これらは、高等教育、認証機関、および専門家団体によって教えられ、支持されています。

ΤО

システムズエンジニアリングの基礎は、高度な実践、経験則、システムで観察可能な現象、および形式的なオントロジーに根差した、より強力な科学的および数学的な根拠に基づきます。その基礎は応用分野の間で共有され、特定のアプリケーションの価値を最大化するための手法選択および応用するために追加根拠を提供します。

#### 理論的基礎の下地となる観測可能な現象

2035年までに、システムズエンジニアリングコミュニティは、複数の分野でのシステムズエンジニアリングに関する理論的基礎研究の恩恵を受けています。基礎の組み合わせが追求され、モデル、方法、およびその下地となる数学が定義され、急速に進化する現実世界のシステムおよびシステムオブシステムズ(SoS)から生じる新しい創発的ふるまいに分析的洞察を提供します。 研究の 1 つの分野は、システム相互作用の根底にある、基礎科学に由来する、より一般的な観察可能な現象を特定することです。

もう1つの研究分野は、システムの価値を確立し、最適化するためのベースを提供する、関連する基礎を特定することです。これらの基礎と、それをサポートする数学的ベースの記述モデルは、システム設計と相互作用の空間を仮想的に探索するためのベースを提供します。 理論的基礎に基づく仮想空間は、幅広いSoSトレードオフ空間全体でシステムの価値を確立し、最適化します。 さらなる基礎は、物理科学、社会科学、およびシステム科学からも導出されており、システムズエンジニアリングの理論的基礎の、よりまとまりのあるセットに統合されます。

#### 1. システムとしての事象 (コンポーネント/システムオブシステムズ間の相互作用の法則)

2035年までに、システムズエンジニアリングコミュニティは、システム現象の理論的基礎を理解し、解釈し、実際に活用することの価値を認識するようになります。この現象の研究により、システムズエンジニアは、コンポーネント間の相互作用(状態に影響を与えるエネルギー、力、材料、または情報の交換)を捉える原理と派生理論を得るようになります。 システム現象派生モデルは、ハミルトンの原理に基づいており、STEM 固有の専門化モデルに直接関連付けることができます。

#### 2. 価値選択の事象(顧客体験価値創造)

価値の選択事象が観察可能ならば、製品が意図した運用ドメインのコンテキストで使用されている場合には、システムズエンジニアリングの実践者は、ユーザーの観点で製品が知覚される価値への洞察を得ることができます。たとえば、都市交通における自動運転車です。「プロダクト・イン・コンテキスト」についての顧客/ユーザーの最終的な価値の選択は、製品の「設計された」性能と、製品とその環境の間の相互作用の両方が考慮されます。価値の経験的発見は、アジャイルエンジニアリング手法、実用最小限の製品 (MVP)、フェイルファスト戦略、およびオンラインA/B 実験とテストの主要な目標であり、これらはすべて選択現象を直接観察します。

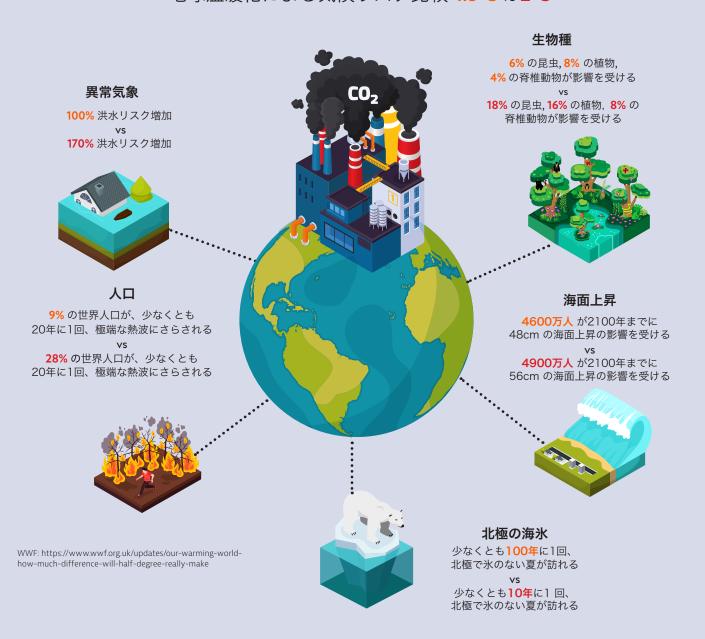
#### 3. グループによるモデルの信頼現象 (人間とモデルの不確実性の法則)

グループによるモデル信頼と呼ばれる観察可能な現象の研究により、モデル信頼に関連する重要な要因を明らかにし、把握するのに役立つフレームワークが提供されるようになります。 モデルの信頼性指標の生成は、モデルの品質、価値、および目的への適合性の評価を提供するための、標準的なシステムズエンジニアリングの実践です。 グループによるモデル信頼という事象は、再利用効率を提供し、意思決定者からのモデルへの信頼感を高めるようになるモデルパターンの開発につながりました。



#### 主要な社会課題に適用されるシステムズエンジニアリング

#### 地球温暖化による気候リスク比較 1.5° C vs 2° C



気候変動、パンデミックへの対応、ヘルスケアへのグローバルなアクセスなどの主要な社会的課題は、その中核にあるグローバルシステムの課題です。 これらの課題に対処するソリューションには、包括的なシステム分析と視点が必要です。 システムズエンジニアは、膨大な数の分野横断的な専門家の構成要員として働き、2035年までに、ますます幅広いシステム思考の視点をもたらし、モデリング、シミュレーション、およびトレードオフ分析を実行して、科学コミュニティの対応する活動を補完します。

上記の世界自然保護基金(WWF)の例で強調されているように、気候変動は、織り交ぜられ相互に依存する多くのシステム要素とともに、私たちが住む地球規模のシステム環境に影響を与えます。システムズエンジニアは、地球環境に貢献する自然と人間のシステム間の相互作用を分析し、公共政策の立案にあたっての情報となる実現可能性、コスト、およびベネフィットのトレードオフをを考慮した緩和策の開発を支援できます。



#### 未来のシステムズエンジニアリング従事者の育成

FROM システムズエンジニアリングが、

今日のシステムの複雑化に対処するための重要なスキルであると認識する業界がますます増えています。 しかし、多くのアプリケーション分野で高度なスキルを持つシステムズエンジニアに対する世界的な需要が高まっており、利用可能な供給を超えています。 大学の大学院プログラムや専門的なトレーニングプログラムの数は増えていますが、ほとんどのシステムズエンジニアは正式なシステムズエンジニアリング教育を受けておらず、「実務で」学んでいます。 これにより、システムズエンジニアを教育するための最低限の基準を確立する能力が制限され、システムズエンジニアが実践とテクノロジの最新の進歩に遅れないようにする能力が制限されます。

教育、トレーニング、メンタリング、および生涯学習のパイプラインが用意されており、強力な学際的能力を備えたより多くのシステムズエンジニアに力を与えています。

システム思考は初等の教育に組み込まれています。 強力な技術および IT コンテンツを含む基本的なシステムズエンジニアリングは、すべてのエンジニアのカリキュラムの一部です。

幅広い教育およびトレーニングプログラムは、システムズエンジニアに必要なシステムズエンジニアリングの基礎を提供し、実践と技術の進歩に常に遅れないようにするのに役立ちます。 プロフェッショナル認定は普及していて、システムズエンジニアのキャリアパスは組織内で十分に確立されています。

#### 将来のシステムズエンジニアに対するニーズの高まりと機能の差別化

システムアプリケーションの増加により、有能で十分に訓練されたシステムズエンジニアに対する需要が高まっています。 これは、一部には、「ハイテク」組織における深くて狭いエンジニアリング専門分野の傾向によるものであり、設計作業の細分化が進み、より優れたシステム統合が必要になっています。

自動化と自律性の増加傾向、ますます高度化するデジタルエコシステム、急速に変化するテクノロジー、およびサイバーセキュリティが高く信頼できるシステムの必要性により、より包括的なシステムズエンジニアリング能力の必要性がさらに高まっています。産業分野とシステムのそれぞれのコンピテンシーをより強く差別化し、補完することが必要であるという認識が高まっています。

これらの例は、十 分な教育を受け、 産業分野とシステ ムの両方の能力を よく備えたエンジ ニアの必要性を示 しています。



▶ 通信・エネルギーネット ワークは、高度な電子工学、 制御、運用、および通信工学 の強力なバックグラウンド と、システム分析の専門知識 を備えたエンジニアが必要で す。



▶ 自動化または自律システム、 例えば自動車や港湾/飛行場のロジスティクスなどには、IT、ソフトウェア、センサー、AI、ML、 通信、サイバーセキュリティ、安全、社会科学のスキルが必要です。



▶ 医療機器またはスマートホーム機器、たとえば、血圧や体温の測定機器などには、センサー、IT、ソフトウェアと通信、およびシステム分析能力のスキルが必要です。

#### 学校と初等教育は継続的に適応していきます

システム思考は、科学、技術、工学、数学の学習を補 完する初期教育に組み込まれます。 初期教育では、事 前に定義された問題や制約に対応する学際的なソ リューションを作成するためのチーム スキルが開発さ れます。

後期の学校教育では、基本的なシステムズエンジニアリングの概念を教えます。たとえば、利害関係者のニーズを収集し理解すること、要求を策定すること、

ソリューションに到達 する前に概念的な代替 案を特定および評価す ることなどです。この ような概念は、データ のソースを理解し、検



証しながら、幅広い視点を考慮します。 教育とメンタリングは、実際の経験と事例プロジェクトに基づいて行われます。

#### 大学は大きな変化を迎える運命にあります



デジタルトランスフォーメーション、新技術、大学のエンが教育に対する需要を大きく変えるでしょう。変化する社会における新しいできるようにするが対処できるようにする

には、学際的で技術的な能力、およびしなやかな(soft and durable)個人的および専門的なスキルを提供する必要があります。 新世代の学生は「自分たちの生活を大幅にデジタル化」しており、コースの提供は、授業が教室でも、バーチャルでも自習でも等しく利用できるように移行し続けます。

システムズエンジニアリングは、システムズエンジニアリング研究、システムインテグレーター、システムアーキテクトなど、さまざまな利害関係者による特定のニーズに応じてさまざまな専門分野に多様化する

可能性があります。さらに、システムズエンジニアリング以外のプログラム (ビジネス プログラムなど) には、特にシステム思考とシステム分析に焦点を当てたシステムズエンジニアリングコースがますます含まれるようになり、すべての意思決定者をシステム思考にするのに役立ちます。

修士号、博士号、または大学院のシステム工学教育には、健全な科学的および技術的スキルに加えて、社会技術、リーダーシップ、および起業家精神が含まれ、幅広いアプリケーションにまたがり、大規模な産業サプライチェーンを含む、しばしば非決定的な複雑システムに、エンジニアが対処できるようにします。システムズエンジニアリングのカリキュラムは、社会政治的で、しなやかなスキルを含むように拡張されます。また、広範なデジタルモデリング、シミュレーション、仮想化、ツールのスキル、最新のアジャイルプロセス、および手法も取り上げます。したがって、学生は、従来の「設計 - ビルド -テスト」から「モデル - シミュレーション - 分析 - ビルド」に移行することを学びます。

#### 企業はシステムズエンジニアリングのキャリアをサポートします

雇用主が主導する、実践的な経験を優先する継続的な学習プログラムが拡大します。 これにより、大学教育から産業界へのスムーズな移行が可能になります。 「社内大学」による初期から中途のキャリアのトレーニングと教育は、企業の慣行に焦点を当て、

組織で使用されるシステム、テクノロジー、および企業固有の慣行と基準に合わせて調整されます。 システムズエンジニアリング認定プログラムは、エンジニアリングのキャリアを通じて、システムズエンジニアリング能力の検証と自己評価をサポートします。

#### トレーニング提供者には重要な役割があります

生涯学習に対するニーズの高まりを考慮して、商用システムズエンジニアリングトレーニング プロバイダーは成長を続け、特別な科目を教えたり深めたりするための「ギャップを埋める人たち」として機能します。システムズエンジニアリングを業界や実際のプロジェクトに適

用し、企業のニーズの変化、新しい技術や方法の開発に柔軟に対応できる経験豊富なシステム インストラクターがいるトレーニング ハウスは、システムズエンジニアリングコミュニティの能力とスキルを向上させるために、引き続き強力な役割を果たします。

# INTRODUCTION TO A DAY IN THE LIFE

2035年のあるシステムズエンジニアの一日

システムズエンジニアリングの将来の状態がどのように進化するかを説明するために、架空の「Day-in-The-Life」ストーリーボードを用意しました。このストーリーボードは、プリヤ・ルマーニという名前の駆け出しのシステムズエンジニアが、「自動運転車両 - 緊急対応プロジェクト」と呼ばれる複雑なシステムオブシステムズ(SoS)のプロジェクトをどのように進めているかを描いています。

ストーリーボードは、2 つの異なるビューを使用して描写されます。それは、プロセス実行ビューと、モデルベースのシステムズエンジニアリング/シミュレーションビューです。

プリヤさんのプロジェクトの概要は、既存の都市型自律走行車 両群(AVF)と都市のエッジクラウドコンピュータインフラ を活用し、協調的な市民(緊急)車両群を構成する緊急対応システム(ER)を開発することです。

私たちは、プロジェクトの開始時にプリヤさんに合流します。 彼女は多様なチームを形成し、スケーラブルでアジャイルなシ ステムズエンジニアリングのフレームワークを開発し、プロ ジェクトの実行に必要なデジタル資産を確立しています。



Priya Rumani

#### 私について

インド出身

コネクテッドな電動おもちゃの車を 作るのが好き

AI/MLのプログラミングを学ぶ

価値ある社会貢献者への道を歩む

世界中を旅し、学び、新しい人々と 出会うことを楽しむ

価値観: 科学とカルマ

既婚・子供2人・ワークライフバラン スは必須





#### 趣味と関心



テクノロジー: エレクトロニクス、コン ピューター ビジョン、ディープ ラーニング



読書: 物理学、数学、電子工学、SF 小説



スポーツ: 水泳とチェス



映画: ドキュメンタリーとSF

#### スキル

UR
CAD
JAVASCRIPT
C++

OPENGL
OPENCV

MODSIM
TOOLS

DEEP
LEARNING

#### 学歴

インド大学機械工学、学士号 - 2021

ミシガン大学生物医学工学、 修士 - 2023

ミシガン大学 生物医学工学、 PhD- 2025

TU デルフト工科大学、NL

#### 職歴

インド大学講師 - 2022年

Ford Motor、RLE International、ドイツでのインターン - 2026

システムズエンジニア - フォード モーター カンパニー、USA - 2028

シニア システムズエンジニア、FMC、Ford of India - 2032

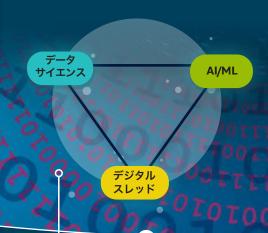
#### コンセプト定義

#### システム定義

#### システム実現

プリヤさんは、顧客と主要な利害 関係者を特定します。彼女は Teams of Teams 共同取得を形成し、動的なダッシュボードを共 有しています。

プリヤさんは、企業全体の PLM、ALM、CAD、CAE ツール、 およびデータレイクの統合の中で作成 された不可欠なデジタルスレッドを活 用して、仮想概念とアーキテクチャの 探索を実行します。





P



リーンポート フォリオ管理



アジャイルプロダク トデリバリー



チームと技術の <u>アジリティ</u>ー



継続的な学習文化

アジャイルプロセスをサポートする、統合およびリンクされたシステムズエンジニアリングのフレームワークは、中小企業をプロジェクトにうまく組み込むための鍵です。



初期のチーム編成では、会社の従業員、大学の学生、および大学の教職員を関与するシステムズエンジニアリング開発計画戦略を活用します。

プリヤさんのデータサイエンスおよびAI/MLチームは、構造化データと非構造化データの両方を更新、取り込み、クリーニング、および正規化するための接続されたデータメソッドを開発しています。これらは、AVF緊急対応ポリシーアルゴリズムと運用モデルの調整の両方を提供するニューラルネットワークの動的に更新されるトレーニングデータとして提供されます。



このチームは、エピックベースのアジャイルシステムズエンジニアリングのスプリントとカスタマーレビューに取り込み、現実世界のAVFでOTA(over-the-air)によるシャドウコードの更新する仮説をテストします。

プリヤさんのチームは、企業政府のポリシーチームと連携し、ミッションのアウトラインについて、社会的に責任があり持続可能性に則った、ユーザー/ビジネスモデルと DevOpsモデルを開発します。

チームは、緊急対応ポリシーの ための重要なSoSデジタルス レッドと、AI/MLのリスクベー スの戦略を特定します。 統合された SE-MODSIM

信頼ある システム

SYSTEMS OF SYSTEMS

#### システムの製造

#### システムのサポートと利用

プリヤさんは、接続された「クラウド」ビジネスインテリジェンスとAI/MLベースのエンジニアリングの再利用されたアセットを利用できる多層AI/ML拡張機能を活用します。

製造チームは、デジタルツインデータをPDクラウドコンテナーから製造コンテナーに転送します。これは、ER通信ハブとフリートトランスポンダーを作成して、パイロットプラントのビルドサイクルを実行するために使用されます。

サービスチームは、デジタルツイン データを使用して、マルチフリート (複数台のフリートへの一斉)のソフ トウェア更新、予知、OTA ソフトウェ ア更新を含む保守および更新戦略を開 発します。





プリヤさんのチームは、写真のように リアルでゲームエンジンがサポートす る没入型のモデリングとシミュレー ションを活用して、利害関係者を直感 的に関与させます。

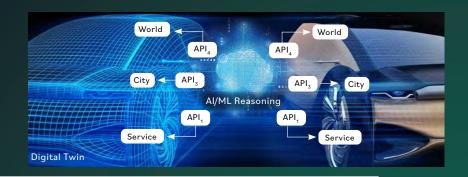
ER展開チームは、接続されたフリートデータを活用して、展開されたノミナルなERの振る舞いを追跡および分析します。必要に応じて、AI/MLモデルとポリシーを更新します。

プリヤさんは、信頼性、スケーラビリティ、および拡張性を念頭に置いて開発されたエンタープライズ用のフレキシブルリファレンスアーキテクチャを再利用します。

# AV EMERGENCY RESPONSE PROJECT

#### コネクティドデータ

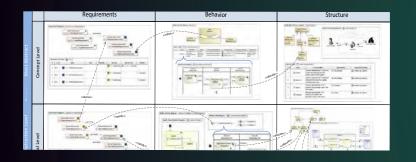
プリヤさんは、データサイエンティストと AIチームメンバーを活用して、SoSシステムのモデリングおよびシミュレーション環境への動的な接続を確立しています。 取得前の共同作業は、中規模企業の共同作業者にフレームワークを提供します。

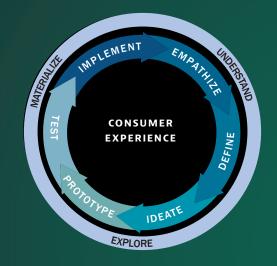


#### モデルベースシステムズエンジニアリング

システムズエンジニアリングチームは、スケーラブルなリファレンスアーキテクチャに対してマイナーな調整を行い、ベースラインの SoS 記述モデルを作成します。トリミングされた SysMLモデルは、モデルベースの製品ラインエンジニアリング (MbPLE) を使用してインスタンス化され、関連するすべての設計および機能モデル要素がリンクされます。

オフショアの ModSim チームは、リンクされた MBSE のユースケースと重要な特性を使用して、適切なレベルのシミュレーション モデル要素の忠実度と完全性を定義します。





フォトリアリズムチームは、緊急の SoS 動作を生成できる仮想環境を生成します。 これは合成データセットで使用され、AI/ML アルゴリズムをトレーニングし、重要な運用モードを特定します。

#### SYSTEMS OF SYSTEMS

プリヤさんは、アーキテクチャの再利用によって、安全性とセキュリティの概念が組み込まれたレジリエントなシステム設計が提供されることを知っています。このプロジェクトは、従来のAVF タクシーおよび配送サービスの運用ドメインを拡張します。これには、検証済みの信頼できるシステムを提供することに特に重点を置く必要があります。仮想モデルベースのシステム分析と調査は、これらの新しい運用シナリオの検証の基本となります。シナリオパラメーターのファジー化と仮想エージェントベースの動的探索から派生した、総合されたシナリオシーンシミュレーションは、安全範囲のキープロセスインジケーター(KPI)と安全ケースを提供します。

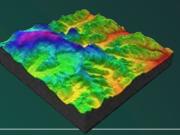
プリヤさんは、SoS チームに、既存の Autono-mous Vehicle Transportation Operation System (AVTOS) 参照パターンをAVF 用に拡張し、包括的ではあるが詳細には至らないSoS ネットワークモデルを作成する任務を課しています。ネットワークモデルは、ER プロジェクトをサポートするクリティカルパスコンポーネントシステムの第一対応者、都市インフラ、緊急衛星通信、交通渋滞システムなどを特定するために使用されます。ミッション クリティカルなスレッドは、成功に不可欠な KPIの開発に集中するために特定されます。



(AVTOS)

#### 環境条件、地形、シーン生成、 およびマップ





拡張現実をサポートする 忠実度と完全性の向上



詳細なシーン、シナリオ、参加者、およびラスト マイルのロボットモデル





#### 量子コンピューティングと 大規模並列コンピューティング

このチームは、量子コンピューティングと重ね合わせ、もつれ、干渉の現象を活用して、AI、分類器のトレーニング、ER システムのセキュリティ暗号化、コード、および重要な ER通信の移動における主要なシステムズエンジニアリングの問題を解決します。 安全で大規模な並列コンピューティングインフラストラクチャは、複雑なミッションの動きをサポートするリアルタイムの AVFパストラジェクトリを提供します。



#### インタラクティブなHMI仮想化

プリヤさんは、ヒューマン システム インテグレーション (HSI)、人間中心設計 (HCD)、およびデザイン思考に力を入れています。 緊急対応 AVF は、「ストレス下にある大衆」が緊急車両システムを信頼し、関係を持ち、簡単に取引できる場合にのみ成功します。 詳細な HSI/HCD ユーザー エクスペリエンスモデルが作成され、VR ベースのシミュレーションでテストされます。 これらのシミュレーションは、シームレスな SSF 運用の有効性を確保するために、緊急事態対応者、フリートコーディネーター、および都市管理スタッフにまで拡張されます。



プリヤさんは修士課程で理論的基礎を学び、体系的なプロジェクト要素のフレームワークを提供する「価値選択現象」の側面を彼女のプロジェクトに吹き込みました。 これにより、ER パフォーマンス KPI の特定と設定がサポートされます。



プリヤさんは主要な利害関係者と対話し、一連のシミュレーションを使用して、プロジェクトの範囲、アプローチ、および最終目標のビジョンに対する直感的な洞察を提供します。 これらのモデルは、コンテンツ、複雑さ、およびシミュレーションの現実性において連続的に「構築」されます。 モデリングアプローチは最小限の実行可能なシミュレーションに基づいており、洞察、意思決定のサポート、およびポリシー作成のサポートを提供するのに十分なモデリングとシミュレーションのみが組み込まれています。 仮想機能は、完全に機能する AVF ベースの ER システムを提供する際の初期のポリシー決定のシステムへの影響を明確に示しています。



システムズエンジニアリングの未来はモデルベースであり、 企業のデジタルトランスフォーメーションによって可能になります。

システムズエンジニアリングの実践は、 システムの複雑さに対処し、企業の俊敏性を実現するために、 大きな進歩を遂げます。

システムズエンジニアリングは、データサイエンスなどの他 の分野の実践を活用して、データの増加を管理するのに役立ちます。

正式なシステムズエンジニアリングの理論的基礎が体系化され、次世代のシステムズエンジニアリングの手法とツールの新しい研究と開発につながります。

Al は、システムズエンジニアリングの実践と、システムズエンジニアリングコミュニティによって設計されるシステムの、いずれにも影響を与えます。

生涯学習に重点を置いた初期教育から始まるシステムズエンジニアリング教育の段階的な変化が起こるでしょう。



# **A** REALIZING THE VISION

システムズエンジニアリングのビジョンの実現

ビジョンを実現するためには、多様な利害関係者のコミュニティに支えられた戦略を策定し、 実行することが必要です。

本章では、システムズエンジニアリングの現在 の姿から未来の姿へ移行するための推奨事項と ロードマップを用いて、戦略の導入を概説します。



システムズエンジニアリングの グローバルコンテキスト

システムズエンジニア リングの現状 システムズエンジニア リングの未来 システムズエンジニアリングの ビジョンの実現

**CHAPTER 1** 

**CHAPTER 2** 

CHAPTER 3

**CHAPTER 4** 





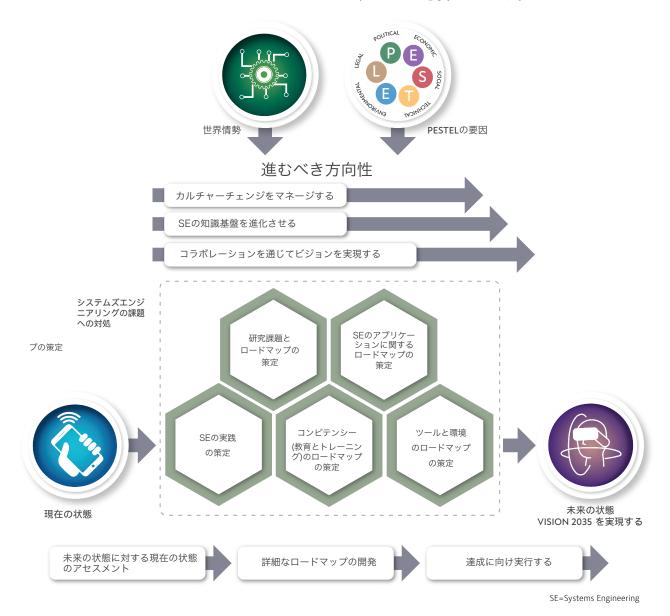
#### 進むべき方向性

戦略や計画の立案には、世界情勢に加えて、1章から3章にて触れた現在および将来の状況のみならず、PESTEL要因(政治、経済、社会、技術、環境、法律)の考慮も必要です。

これらの要因はすべて、必要な変化を全体的かつ包括的な方法で評価する必要があります。その方法はこの移行を可能にするものと阻害するものの両方の観点で行います。

下の図の一連の流れは、前の章の内容から導き出されたものであり、先に進むための主要な実現手段を反映しています。

成功するためには、コラボレーションを促進し、カルチャーチェンジに必要なマインドセットやアプローチを現在から将来の状態に変化していくことを促しながら、一連のシステムズエンジニアリングの課題に取り組んでいく必要があります。





私たちの状況は、過去とは比較にならないのです。 従って、昔なら十分であったかもしれない方法や手段を適用することは不可能です。 考え方を変え、行動を変えなければならない…。

- Albert Einstein (1948) in "A Message to Intellectuals"

# コラボレーション

#### コラボレーションと目指すべき姿

ビジョンの実現は、産業界、政府、学術界、非営利団 体を含むコラボレーションによって可能となります。 この連携は、従来のシステムズエンジニアリングのア プリケーション領域に加え、その他の領域の利害関係 者間のコラボレーションとして構成され、領域を超え た投資や他のリソースを相乗的に活用する機会を提供 し、それぞれの領域独自のニーズを維持しながら共通 のニーズを捉えます。また、利害関係者には、技術的 および社会的なニーズに対してシステムズアプローチ から利益を得ることができる発展途上地域の人々も含 める必要があります。このコラボレーションは、シス テムズエンジニアリングの幅広い利害関係者の関連と インクルージョンを通じて、段階的にビジョンを進化 させるでしょう。これには、専門家団体、産業団体、 標準化団体、科学財団、工学学会、研究者、教育者、 ツールプロバイダーが含まれています。





#### エンジニアリング・エコシステムの変革

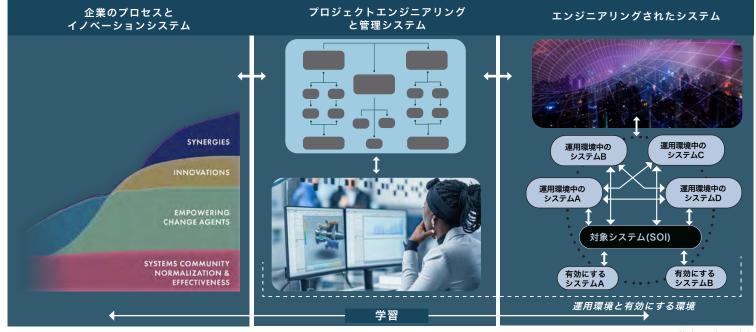
イノベーションに必要なあらゆる要素への変化を促進する

私たちがエンジニアリングするシステム自体の性質の変化や、他のシステムを含む環境との相互作用の変化に対処していくため、システムズエンジニアリングの実践には変化が必要です。

システムズエンジニアリングの実践の変化は、システムのライフサイクルのプロジェクト管理に適用さ

れるプロセス、手法、有効にする環境にも変化を必要とします。

このような変化は、企業が標準プロセスやイノベーション アプローチを進化させていく際にも適用する必要があり、 さらに、企業によって収集され、学習され、一貫して適用 されていくことが求められます。





#### システムズエンジニアリングの課題

本書のビジョンの実現のために、未来に向けてシステムズエンジニアリングが進化し、未来に備えていくために必要な項目を反映したものが、「システムズエンジニアリングの課題」です。このシステムズエンジニアリングの課題は、第2章で概観した「システムズエンジニアリングの現状」と、第3章の「システムズエンジニアリングの未来」の実現に焦点を当てています。

このシステムズエンジニアリングの課題の達成によって、第1章で述べた、グローバルトレンドや社会的課題に対処できるシステムズエンジニアリング能力もまた得ることができます。

どのようにすればシステムズエンジニアリングの 課題を達成できるのか。以下の情報とロードマッ プでは、その初期目標を提示しようと考えていま す。

#### カテゴリーシステムズエンジニアリングの課題



#### **Applications**

1. システムズエンジニアリングは、主要な社会的課題に革新的なソリューションを提供します。

2. システムズエンジニアリングは、あらゆる規模のプロジェクトや企業に価値を示し、ますます多くのドメインに適用されます。

3. システムズエンジニアリングは、ますますダイナミックで不確実な環境を予測し、効果的に対応します。



#### **Practices**

4. シミュレーション、学際的分析、および没入型視覚化環境と統合されたモデルベースのシステムズエンジニアリングが標準的な手法です。

5. システムズエンジニアリングは、ますます複雑になるシステムを定義、実現、および維持するための分析フレームワークを提供します。

6. システムズエンジニアリングは、製品ラインエンジニアリング、パターン、コンポーザブルな設計手法などの再利用手法を広く採用しています。



#### Tools and Environment

7. システムズエンジニアリングのツールと環境は、デジタルエコシステムの一部としてシームレスで信頼できるコラボレーションとインタラクションを可能にします。



#### Research

8. システムズエンジニアリングの実践は、広く受け入れられている理論的基礎に基づいており、システムズエンジニアリングのカリキュラムの一部として教えられています。



#### Competencies

9. システムズエンジニアリングは、標準的な工学のカリキュラムの一部であり、継続的な学習環境によってサポートされています。



#### 具体的な提言(システムズエンジニアリングコミュニティに向けて)

Roadmaps for Progress

▶「CHANGES NEEDED (変化が必要)」としている項目は、第1章と第2章の内容を受けて、第3章でまとめた FROMとTOをもとに導出したものです。

#### システムズエンジニアリングの社会課題解決への寄与

#### CHANGES NEEDED

- 基礎的なシステムズエンジニアリングのコンピテンシーは、大学および大学入学前のカリキュラムに組み込まれています。
- ・ デジタルエンジニアリングの手法とツールにより、技術的要素と非技術的要素の双方の統合分析が可能になります。
- ・ システムズエンジニアリングの応用は、広範な業界分野や非技術的/社会技術的ニーズに対してプラスに働きます。
- ・ システムズエンジニアリングは、多くのエンジニアリング分野を束ねる役割を担い、地球規模の課題 (持続可能性など)に役立ちます。
- ・ システムズエンジニアリングは、産業界および政府のリーダーシップの議題にも含まれています。

#### システムズエンジニアリングの価値を実証する

#### CHANGES NEEDED

- ・システムズエンジニアリングのコアコンピテンシーは、個人やチーム、企業での学習の一環です。
- ・ デジタルエンジニアリングトランスフォーメーションは、すべての分野にわたってシステムズエンジニアリン グの実践とシステム思考を統合します。
- ・システムズエンジニアリングは、ドメイン、ライフサイクル モデル、デリバリーアプローチ、およびソリューション ポートフォリオを横断して効果的に働きます。
- ・強力なシステムズエンジニアリングの実践コミュニティが、応用分野内で形成されます。
- ・システムズエンジニアリングは、あらゆる複雑さに対する解決策への有用性を実証します。さらに、水平方向と垂直方向の両方を統合します。

#### ダイナミックな変化と不確実性への対処

#### CHANGES NEEDED

- ・ データ標準が開発および採用され、効果的なデータの相互接続と交換が可能になります。
- ・ 製品のばらつきや変動に対処するための方法とツールが広く採用されています。
- ・ ナレッジ マネジメントと漸進的な学習は、システムズエンジニアリングの実践と統合されています。
- ・ システムズエンジニアリングでは、ライフサイクル全体でソリューションにダイナミックなフィードバックを組み込みます (アジャイルプラクティスなど)。
- ・ 自動化されたワークフローを含む、人間の作業を支援する技術が増えていきます。

#### MBSE - デジタルトランスフォーメーション

#### CHANGES NEEDED

- ・モデル、アーキテクチャ、およびデジタル ツインを含むデジタル スレッドの使用と管理は当たり前のものとなっています。
- ・モデリングとシミュレーションによる没入型ビジュアライゼーションが組み込まれます。
- ・幅広く信頼されるデジタル環境が確立されています。
- ・信頼できるデータは、不可欠な資産として管理されます。
- ・知識表現を含む、デジタル資産の効果的なセマンティック統合が行われます。
- ・MBSE は AI/ML によってサポートされ、ソリューションの開発を支援します。



#### システムの理解を深めるための分析フレームワーク

#### CHANGES NEEDED

- ・高度なデータ サイエンス、AI/ML、拡張、可視化が統合され、システムのふるまいに関する理解を深めるための分析を支援します。
- 標準とレギュレーションはフレームワークに統合されています。
- ・ライフサイクル全体にわたる広範な要素(持続可能性や社会的受容性など)を分析する能力が開発されます。
- ・システム・オブ・システムズ(SoS)を含め、効果的に総合(synthesis)する能力はこなれたものとなっています。
- ・自然現象がどのように現れ、その複雑さにどう対処すればよいのか、といった自然システムに対する知識は増えてきます。

#### システムズエンジニアリングへの再利用の適用

#### CHANGES NEEDED

- ・システムズエンジニアリングの様々なユースケースに共通する実践が理解され、適用されます。
- ・ バリエーションを考慮したパターンと統一モデルが確立されます。
- ・効果的な再利用の実践が進化し、業界領域を超えて広く適用されるようになります。(プロダクトラインエンジニアリングとコンポーザブルデザイン)

#### デジタル環境向けのシステムズエンジニアリングツール

#### CHANGES NEEDED

- ・ツールよりも、データ/情報に焦点が移ります。
- ・コミュニケーションのための一貫した成果物が確立されます。
- ・情報共有を促進するモデリング言語とデータ交換の標準が開発され、使用されています。
- ・効果的な分散型の情報共有/交換は一般的なものになっています。
- ・代替案と影響を分析するスピードと能力が (桁違いに) 向上します。

#### システムズエンジニアリングの基礎と研究

#### CHANGES NEEDED

- ・新しい原理、現象、概念、経験則、およびテクノロジーが既存の知識と統合されます。
- ・システムズエンジニアリングの理論的基礎を定義し、検証するための研究が開始されます。
- ・ダイナミックな変化や不確実性に対処するシステムズエンジニアリングの実践、ツール、および応用に関する研究が促進されます。
- ・産業界、政府、各種団体は学術界と連携してシステムズエンジニアリングの研究を進め、システムズエンジニアリングの基礎をカリキュラムに組み込みます。
- ・システムズエンジニアリングの研究は、統合されたアプローチへ移行するために、学際的な取り組みを促進します。

#### システムズエンジニアリング教育の発展

#### CHANGES NEEDED

- ・生涯教育/研修によって人材を強化します。
- ・エンジニアリングの卒後教育と大学入学前の教育では、厳選されたシステムズエンジニアリングの概念や システム思考がカリキュラムに組み込まれています。
- ・システムズエンジニアリングのコミュニティと認定機関がチームを組んで、システムズエンジニアリングとシステムのコンセプトを、あらゆる 工学系の認定基準に追加します。
- ・人間のダイナミクスや持続可能性など、非技術的な要求がカリキュラムに追加されます。
- ・実践的な課題解決型の教育や、統合的な手法とアプローチによるトレーニングが進化します。







#### トップレベルロードマップ

#### 2025



APPLICATIONS

業全体の方針に影響を与





目標:分野への応用の拡大:SEは増大する社会的 課題に対する にいまれた





目標: 共通のSE基盤、定 義、オントロジーを用い た実践コミュニティが当た り前になる。SE資産をリア ルタイムに再利用するため の知識管理戦略を強化す





2030

目標: SE教育やSE研究によって 下支えされた基礎やベストプラ

クティスを土台として、インパ

目標: SE基盤に裏打ちされたア

ネジメントをさらに強化する。

ローチをドメイン間で形式化、標 準化する。学術界や産業界と協力 し、知識を浸透させ、ナレッジマ

クトのある応用が行われる。

目標: 合意された言語と用 語によって、標準化に向け て前進する。標準化は、分 野間をまたいだ応用が可能 な、オープンな標準アーキ テクチャによってサポート

システムズエンジニアリンク 体合的かつ全 、 体的な方法での対処が必要 です。

れています。

'AND ENLIPONMENT これらのシステムズエンジニア リングの課題は、互いに完全に独 立ではなく、より重要な課題のみを 反映しているに過ぎません。

このような課題に対処するためには、 私たち自身の能力の向上のみならず、快く 知識や実践、教訓を共有していくことによって、 より解決を容易にします。

RESEARCH この共有については、専門家団体、産業団体、学会などの いくつかの組織やリソース、システムズエンジニアリング知識体系(SEBoK) やINCOSEのプロダクトポートフォリオ等のリソースによって実現可能です。 これらは新しいプラクティス、成果物、新しい技術情報によって定期的に更新さ

必要な達成項目と共有に焦点を当てた取り組みとしては、10以上の組織が参加する、 INCOSE主導のFuture of System Engineering(FuSE)や、多様なシステムズエンジニア リングの研究組織での成果の共有があります。

この図は、システムズエンジニアリングの一連の課題を反映したトップレベルのロードマップです。 後続のセクションには、各課題に関する、より詳細な推奨事項が含まれます。

#### 2035

目標: SEは、エンジニアリ 日原: うとは、エンフーティングと社会の壮大な課題を 解決するための、分野を超 えた「頼もしい」学問分野 である。実践やモデル、 ツールを分野横断的に総合







**REALIZE THE** VISION 2035

目標: ツール・実践の 大多数の採用や組織 化により、分野を横 断したプラクティス の統合。



に実装する。

目標: 標準化された ライブラリを土台にしてシステムを生成 するデザインの幅広 い再利用の確証を得



目標:将来の研究 と応用を導く、領域横断的なSEの 理論的基盤を広範

目標: SEは、 ベーティブな教育 <u>とト</u>レーニング手 法により、すべて の教育レベルと分 野にわたり不可欠

なものとなる。



則を広める。

-(63)-



目標:理論的基礎に根ざし た研究を拡大し、実践を向 上させる。強力な事例と原

目標: システム言語が広く使

用されるようになり、複数

の分野への応用をサポート

する。ライブラリの標準化に向けて取り組む。

目標:各領域の複数の研究 機関でSEの理論的基礎が 教えられ、研究課題を推進 し、より広い資金調達の機 会を開く。



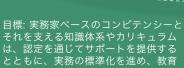


目標: 教育レベルやプログラ ム間をまたがるシステムのビ ルディングブロックを通じ て、STEM への導入を支援す る。継続的な学習機会を設 け、実践を定着させる。













COMPETENCIES

### SYSTEMS ENGINEERING BY 2035

グローバルなコンテキストの変化に対応する、2035年までのシステムズエンジニアリング

デリバーする

#### システムソリューション

(サイバーフィジカル、サービス指向的、社会-技術的なもの等を含む)

# SMART NOUSTRY AUTOMATEN REVELITY BIG DATA

#### デジタルエンタープライズ

- 資産としての知識
- アジャイルで効率的
- イノベーティブ
- 分散した多様な労働力

# 

#### システムの複雑さの増大

- 相互接続性
- データ
- ソフトウェア
- 人間とシステムとの相互作用
- 競合する利害関係者の期待

#### システムズエンジニアリング

全体の目的を達成するために、各要素が連携するようになることを目的 とする。



#### サポートする

#### 実践

- アジャイル
- モデルベース
- 分析フレームワーク
- 信頼、レジリエンス、およびその他の主要な利害関係者の関心事のための設計
- 再利用の促進
- 人間中心の設計

#### ツールと環境

- デジタルエコシステムの一部分
- シームレスなやり取りと信頼で きるコラボレーション
- 自動化されたワークフロー
- マネージドデジタルスレッド
- エンタープライズでの再利用の ためのリポジトリ
- AIアシスト

#### 教育とトレーニング

- 生涯学習
- 技術力とリーダーシップ能力
- アプリケーション領域に合わせた標準化されたカリキュラム
- 標準カリキュラムの一部である理論的
- 基礎とシステムズエンジニアリングの原則
- エンジニアリング分野全体で広く教えられるシステム思考

- ・ 複雑な問題に対してバランスの取れたシステムソリューションを 提供するためのシステムズエンジニアリングに対する業界や政府 全体からの強い需要があります。
- ・ システ<mark>ムズエンジニアリングは非常に価値のある</mark>分野です。
  - すぐに利用できる教育プログラム
  - 確立されたキャリアパス
  - 分野や技術領域を超えて革新し、 リードし、取り組む機会
- ・ 産業界、学術界、政府間のコラボレーションにより、システムズエンジニアリングは進化し続けています。

#### 幅広い用途

- 発電/エネルギーシステム
- ヘルスケアシステム
- 輸送システム
- 防御システム
- 教育システム
- 探査システム
- 農業システム
- 通信システム
- 製造システム
- 情報システム
  - ...その他多数

#### 結果をもたらす

#### 環境への影響

- 天然資源
- 生物多様性
- 気候変動
- 汚染





結果をもたらす

#### 社会の変化

- グローバルな相互依存
- 人口
- 寿命
- 社会経済状況

#### ドライバーとなる

#### 高まる利害関係者の期待

- 能力
- 信頼性
- 使いやすさ
- スケーラビリティと適応性
- 持続可能性
- 社会的受容性
- 手頃な価格

#### **TERMS OF USE**

This Systems Engineering Vision 2035 is offered as a COMMUNITY SERVICE from the International Council on Systems Engineering (INCOSE). INCOSE's intention is to stimulate the world's systems community to think creatively about future developments in the systems and related engineering fields.

We encourage the document's widest use, including reproductions, translations, adaptations/derivatives with only three restrictions:

- 1. Permission for use of images, unless indicated as in the Public Domain, must be acquired for derivative works. Please contact INCOSE for Image contact information.
- 2. Please mark your material derived from Systems Engineering Vision 2035 Copyright © 2021 by INCOSE.
- 3. Commercial uses of this document require INCOSE's prior approval.

In view of the minimal restrictions for any use of this Vision, please send an electronic information copy of any document created with and from this Vision to our INCOSE Administration Office vision@incose.net

#### LIST OF PHOTOGRAPHY/ ILLUSTRATIONS

Front Cover: Cover Image @Alican Akcol /Shutterstock. Page 0: Space Satellite @Dima Zel /Shutterstock, Solar Energy @Animaflora PicsStock / Shutterstock, Transportation @Denis Belitsky /Shutterstock, Healthcare @Ash Tproductions /Shutterstock, Telecommunications @Gyn9037 /Shutterstock. Page ii: Puzzle Piece ©Emerge /Shutterstock. Page iv: Globe @Nikhom / Shutterstock, Retro Phone @BrAt82 /Shutterstock, Future Phone @HQuality / Shutterstock, Earth Resources @Macrovector /Shutterstock, Animals @Andrew Krasovitckii /Shutterstock. Page v: Smart Industry @elenabsl /Shutterstock, Group Thinking @Ellagrin /Shutterstock. Page vi: Complexity Graph @Taylor Riethle. Business Technology @Blue Planet Studio /Shutterstock. Page vii: Puzzle Icon @Fresh Take Design /Shutterstock, Search Icon @Davooda / Shutterstock, Tool Icon @Davooda /Shutterstock, Lightbulb Icon @Alexander Lysenko /Shutterstock, Group Stars Icon @Coosh448 /Shutterstock. Page 2: Sustainable Goals @United Nations. Sustainable Goals 1-17 @United Nations. Page 3: Complexity Growth-Courtesy NASA/Jpl-Caltech. Page 4: Solar Power ©Fit Ztudio /Shutterstock. Page 5: Networks @sdecoret /Shutterstock, Communication Team @idea Ink Design /Shutterstock, Telepresence @sdecoret / Shutterstock, Page 6: Telemedicine @Elnur /Shutterstock, Digital Twin @Chesky /Shutterstock. Page 9: Smart City @Macrovector /Shutterstock. Page 10: Ai @Allies Interactive /Shutterstock, Geo-Location @Illus\_man /Shutterstock. Page 12: Workforce @metamorworks /Shutterstock, Women Engineer ©metamorworks /Shutterstock, World-Economic-Forum ©Word Economic Forum. Page 13: Complexity Growth-Courtesy NASA/Jpl-Caltech, Smart Systems @Alexander Kirch /Shutterstock, Sustainable Goals Logo @United Nations, Global Communication @TechSolution /Shutterstock, Quantum Physics ©Jurik Peter /Shutterstock, Ai ©Allies Interactive /Shutterstock, Solar Power ©Esb Professional /Shutterstock, Geospactial ©Illus\_man / Shutterstock, DNA/Microscope @paulista /Shutterstock, Microchip @Vector Insanity /Shutterstock, Graph @Maxger /Shutterstock. Page 17: Main Icon @Pendi\_design /Shutterstock. Page 18: Robot @Roman Korotkov /Shutterstock. Page 19: Meeting @Flamingo Images /Shutterstock. Page 20: Blue INCOSE Handbook @INCOSE, Green INCOSE Handbook @INCOSE, NASA Handbook -Courtesy NASA. Data Room @Oleksiy Mark /Shutterstock. Page 22: Xray Human @Magic mine /Shutterstock, Periodic Table @Peter Hermes Furian / Shutterstock, Ui Systems @Aleksandr\_a /Shutterstock, NextGen Images on Computer Screen- Courtesy of the Federal Aviation Administration. Page 24: Simulations @Macrovector /Shutterstock, Spreadsheets @Ben Davis /

Shutterstock, Requirements @Beboy /Shutterstock, Supply Chain @Rvector / Shutterstock, Plane @Tele52 /Shutterstock, Reports @Mayrum /Shutterstock, lot @Golden Sikorka /Shutterstock, Software @Zinetron /Shutterstock, PLM @Mvp\_stock /Shutterstock, Test Cases @Aiwd /Shutterstock, Costs ©Vector Dude /Shutterstock, Manufacturing @Golden Sikorka /Shutterstock, 3D Geometry @Rvector /Shutterstock. Page 25: On-Board Diagnostics ©Fernandov /Shutterstock, 1m LOC @Santi Lumubol /Shutterstock, Chevy @Paceman /Shutterstock. Page 30: Simulation @Jiw Ingka /Shutterstock, Ai Brain @Goodstudio /Shutterstock, Cube @Regular /Shutterstock, Tablet ©Vectorpot /Shutterstock, Math @Macrovector /Shutterstock, Student ©Elenabsl /Shutterstock, Graph ©Curiosity /Shutterstock. Page 31: Simulation @Golden Sikorka /Shutterstock, Computer @smashingstocks /Shutterstock, Design @Rvector /Shutterstock, Graph @Macrovector /Shutterstock, Analytic Framework @Alexdndz /Shutterstock, Robot/Human Shake @Dilen /Shutterstock, Model Computer @Vectorsmarket /Shutterstock, Toolbox @aurielaki /Shutterstock, Experimental Data @Rvector /Shutterstock, Computer Cloud @Vectorsmarket /Shutterstock, Ai Robot @Tartila /Shutterstock, HPC Resources @Hilch /Shutterstock, Data Observe @Macrovector /Shutterstock, Data Observe Woman @Macrovector /Shutterstock. Page 33: Notebook, Req List, Results, Test Cases @Vectorpocket /Shutterstock, Documents ©Smashingstocks /Shutterstock, Simulation Computer ©Stonepictures / Shutterstock, Decision @Andrii Symonenko /Shutterstock, Gear @Aiwd / Shutterstock, Blue Print @Rvector /Shutterstock, Clipboard @Alexandr Iii / Shutterstock, Simulation Environment @Macrovector /Shutterstock. Page 34: Connected Data @Jackie Niam /Shutterstock, Systems of Systems -Courtsey of NASA. AI/ML Brain @bestfoto77 /Shutterstock, Interactive HMI @Zyabich /Shutterstock, Digital Car @JLStock /Shutterstock, Detailed Cityscape @thinkhubstudio /Shutterstock. Page 35: Augmented Reality car @Zapp2photo /Shutterstock, Augmented Reality Student @Gorodenkoff / Shutterstock, Augmented Engine @Gorodenkoff /Shutterstock, Planet graph-Courtesy of NASA. Massive Parallel Compute @Fit Ztudio /Shutterstock, Weather Hurricane @Andrey Vp /Shutterstock, Plane Radar @Mr. Teerapon Tiuekhom /Shutterstock. Page 36: Smart City @Faber14 /Shutterstock. Page 37: Handshake @Lidiia /Shutterstock, Lock @Illus\_man /Shutterstock, Pixels @Yuri Hoyda /Shutterstock. Page 38: Graphs @INCOSE. Page 39: Complex Systems ©Bloomicon /Shutterstock. Page 40: Doctors @Aleksandr Lupin /Shutterstock. Page 43: Center Earth Tsunami Polar Bear @Macrovector /Shutterstock, Flood ©Macrovector /Shutterstock, Fire ©Macrovector /Shutterstock, Forest ©Martina Dedic /Shutterstock. Page 44: Human Connection @Vector Stall /Shutterstock, Car @Kosmofish /Shutterstock. Page 45: Engineer Team @Gorodenkoff / Shutterstock, Girl Learning @Metamorworks /Shutterstock. Page 47: Priya Rumani @Monkey Business Images /Shutterstock, India Cityscape @Towering Goals /Shutterstock, Female Scientist @Plataa /Shutterstock. Page 50: Al/ MI Brain @bestfoto77 /Shutterstock, SMS Framework @ INCOSE. Systems of Systems @Ford Motor Company. Page 51: Traffic @Zephyr\_p /Shutterstock, Topology @Quardia /Shutterstock, Car Scan @JLStock /Shutterstock, Apartment Building @vizual3d /Shutterstock, Delivery Van @Chesky /Shutterstock, 3d Model Table @Ford Motor Company. Computer Hallway @r.classen / Shutterstock, Interactive Car Interior @Metamorworks /Shutterstock. Page 55: Top Level Icon ©Di Bronzino /Shutterstock. Page 57: Non Profits ©Dmytro Zinkevych /Shutterstock, Industry @Gorodenkoff /Shutterstock, Government ©Golden Brown /Shutterstock, Academia ©Drazen Zigic /Shutterstock, Female Engineer @Gorodenkoff /Shutterstock. Page 58: Puzzle Icon @Fresh Take Design /Shutterstock, Search Icon @Davooda /Shutterstock, Tool Icon @Davooda / Shutterstock, Lightbulb @Alexander Lysenko /Shutterstock, Group/Stars ©Coosh448/Shutterstock. Page 62: Business Meeting ©INCOSE. Digital Cloud @Blackboard /Shutterstock. Page 63: Earth Fisheye Lens @Pablo Scapinachis / Shutterstock, Stakeholder © Alexander Supertramp / Shutterstock. Back Cover: INCOSE Logo @INCOSE. Vision 2035 Logo @INCOSE.

INCOSE理事会は、このビジョンを策定するために、システムズエンジニアリングビジョンプロジェクトチームをスポンサーとしました。チームのメンバーは以下の通りです。

#### **Christopher Davey**

Ford Motor Company

# Sanford Friedenthal (Lead)

**SAF Consulting** 

#### **Sky Matthews**

IBM

#### **David Nichols**

NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology

#### **Paul Nielsen**

Carnegie Mellon University Software Engineering Institute

#### **Christopher Oster**

**Lutron Electronics** 

#### **Taylor Riethle**

Graphic Designer

#### **Garry Roedler**

**INCOSE** 

#### **Paul Schreinemakers**

How2SE

#### **Emma Sparks**

Cranfield University

# Heinz Stoewer (CTO)

Space Associates and

Delft University of Technology

このビジョンは、2007年に発表した「システムズエンジニアリングビジョン2020」と、2014年に発表した「システムズエンジニアリングビジョン2025」を発展させたものです。このビジョンの内容に直接貢献したガイボーイ、ポールクレメンツ、ハンスピーターデコーニング、リックダブ、デビッドエンドラー、ロバートカーバン、チャールズクルーガー、トムマクダーモット、ポールピアース、トロイピーターソン、アートピスター、ウィリアムシンデル、技術編集支援を行ったリサホーバーマン、予備レビューと最終レビューを加速させてくれたレビュー支援チーム、そしてこのビジョンの多くの関係者によるレビューで貴重な見解やコメントを提供した方々に特別の感謝を捧げるものです。

ビジョン作成者は、ビジョンレビュー、多くの出版物、ビジョンチームの経験など、専門家の意見を参考にしながら、このビジョンの内容を決定しました。システムズエンジニアリングとそれに対応するグローバルな状況に対する変化の予測が正確であるかどうかは、時間が解決してくれるでしょう。このビジョン2035が、世界中のエンジニア、政策立案者、その他の専門家に、自らの将来の進路と戦略について深く考えるきっかけを与えることができれば、このビジョンの目的は達成されたことになるのです。

#### SE VISON 2035のレビュアーからのコメント

"まとめとして、私はこの文書がエンジニアリングコミュニティにとって貴重であり、刺激的であると思います。"

— Costas Stavrinidis, NAFEMS

"この文書は、現代のシステムズエンジニアリングの広範な適用により、より良くつながり、より豊かな世界へと変貌するためのエキサイティングなビジョンを提示しています。"

— Daniel Hastings, MIT

"SE Vision 2035は、私たちが生きる複雑なシステムに関わるための、説得力のある、国際的なコンピテンシーと能力を提示してくれる。"

— Guru Madhavan, US National Academy of Engineering

"未来の課題や機会への向き合い方を予測するために、プロフェッショナルや技術的な組織は何をするべきか。INCOSE主導の、SEコミュニティの未来に向けたプランは、その一事例として称賛に値する。"

— Christopher Nemeth, IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society Liaison to INCOSE

"システムズエンジニアリングをデジタル技術を駆使した価値主導の業務として進化させるための重要な参考文献"

— Grant Veroba, Petronas

"ビジョン2035は、私たちの社会の主要な課題を要約し、それが将来の技術システムとその開発にとって何を意味するのかを 導き出している。"

— Frank Thielemann, Unity AG







"最も強い種が生き残るのでもなく、最も 賢い種が生き残るわけでもない。変化に最 も適応可能な種が生き残る。 "

- Charles Darwin

"失敗は結果として起こり得るもの。 失敗してないのならば、あなたは十分に イノベーティブであるとは言えないでしょう。"

– Elon Musk

"未来とは、予測するものではなく、自分で可能にするものだ。" - Antoine de Saint Exupéry



#### システムズエンジニアリングビジョン 2035

原文タイトル: Systems Engineering Vision 2035

2022年12月 初版 ver 1.0

この日本語版は、INCOSEの許諾のもと、一般社団法人JCOSEの活動として作成されました。

#### 日本語版編集委員:

岩村 篤 (慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 後期博士課程)

武藤 英樹 (慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 後期博士課程)

水野 由子 (一般社団法人JCOSE運営委員会委員)

西村 秀和 (慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 委員長/教授、一般社団法人JCOSE代表理事)

日本語版発行者:一般社団法人JCOSE

本コンテンツの翻訳された日本語の著作権は、全て一般社団法人JCOSEに帰属し、無断での商用利用を禁止します。