

BUILDING THE
SYSTEMS ENGINEERING
**WORKFORCE
OF THE FUTURE**

未来のシステムズエンジニアリング人材の育成

INCOSE SYSTEMS ENGINEERING VISION 2035の補足

システムズエンジニアの教育・トレーニング・
育成のためのガイダンス

PROF. DIPL.-ING. HEINZ STOEWER M.SC. SAC GMBH, & TU DELFT
DAVID NICHOLS JPL/CALTECH

このホワイトペーパーは、経験豊富なシステムズエンジニアが不足し、そのコンピテンシーの必要性の高まっていることを考慮して、専門機関、産業界、学界、政府機関に、この指針への支持と適用を求めることを意図しています。

このガイダンスペーパーは、以下のような全てのタイプのシステムズエンジニアリングに適用できます。

- ・ ハードウェアインテンシブシステム
- ・ ソフトウェアインテンシブシステム
- ・ サイバーフィジカルシステム
- ・ データ&ITシステム
- ・ 自律システム
- ・ 小規模および大規模システム
- ・ コンセプトチュアルシステム
- ・ 社会システム
- ・ 検証・テストシステム
- ・ 生産システム
- ・ メンテナンス&サポートシステム
- ・ メカトロニクス／ロボティクスシステム
- ・ ロジスティクスシステム
- ・ オペレーションシステムズ
- ・ システム・オブ・システムズ(SoS)

このガイダンスペーパーは、以下のような全てのタイプの応用分野に適用できます。

- ・ エネルギー
- ・ ビジネス情報
- ・ 金融
- ・ 地球規模の変動／気候評価
- ・ 航空宇宙・防衛
- ・ 天然資源加工
- ・ ケミカルプロセッシング
- ・ 生物システム
- ・ 社会、経済
- ・ 政府方針
- ・ 医学
- ・ パブリックヘルス
- ・ 教育
- ・ インフラストラクチャー
- ・ スマートシティ
- ・ スマートアグリカルチャー
- ・ サステイナビリティ



エグゼクティブ・サマリー

サイエンス&エンジニアリング

進歩は多くの場合、複数の分野の貢献が統合された結果です。人工臓器、ロボット工学、スマートシティなどがその例です。同時に、知識へのアクセスもかつてないほど速くなっています。システムズエンジニアリング(SE)は統合的な分野であるため、このような発展は、教育全般、特にSEに強い影響を及ぼします。

このホワイトペーパーは、SEコンピテンシーの開発とシステムズエンジニア(SEs)を定着させるためのガイダンスを提供します。INCOSE SE Vision 2035を補完するものとして、企業や教育機関に経験ベースの推奨事項を提供します。

このホワイトペーパーのキーマッセージ

複雑システムには、ほぼすべての製品層またはサービスレベルで、あらゆる分野から十分にトレーニングされたSEsが必要です。プロセスの知識は重要ですが、SEsはエンジニアリングソリューションをリードできなければなりません。

SE教育は基本的に分野横断的であるため、その開発と定着化は、企業、大学、専門教育事業者が提供する継続教育に大きく依存することになります。

SEsは、ほとんどの場合、物理学やコンピュータ/情報科学などの伝統的な学問分野や、制御システム、電気工学、機械工学などの工学分野から、より広範にシステムを統合する能力へと拡張することで成長します。

国連の持続可能な開発目標 (SDGs)は システムへの幅広いニーズを表す

193カ国の全会一致で承認された17の国連SDGsは、私たち世界を変革するためのものであり、人類のニーズがどのようなものかを端的に表しています。その実現には、幅広いシステムアプローチとグローバルな協力が不可欠です。教育は、17の目標の一つです。

Industry 4.0はシステムの実現に 大きな変化をもたらす

インダストリー4.0(およびSociety 5.0)は、ますます複雑化するソフトウェアおよび情報技術(IT)ソリューションの上に成り立っています。第4の産業フェーズは、将来の製品やサービスの開発と製造のための高度な技術を統合したサイバーフィジカルシステムに焦点を当てています。それに伴い増大する複雑性に対応し、持続可能性への期待に応えるには、実行可能で社会的責任ある製品を保証する強力なSEが必要となります。

SEは企業のさまざまな階層で実践されている

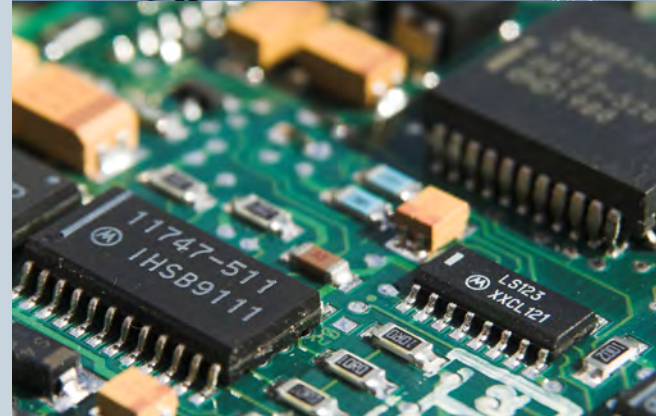
自動車、インフラストラクチャ、宇宙船、グローバルITシステム、サプライチェーンなどの複雑な製品は、納入先商標受託製造企業(OEMs)とサプライヤー(多くの場合、中小企業(SMEs))の、複数の階層のコンピテンシーによって特徴付けられています。これらの製品は、構造、電気、またはソフトウェア、設計などの専門的なコンピテンシーを必要とするサブシステムから、システム製品へと構築されていきます。SEコンピテンシーは、製品の機能性と市場での成功を確実にするために、多くの階層で必要とされます。

技術の進歩はSEのソリューション、方法、 および実践に影響を与える

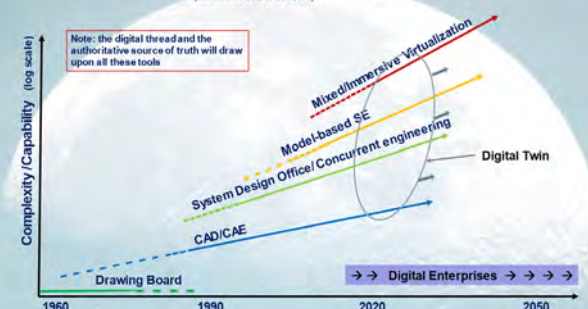
テクノロジーの進歩に伴うデジタルおよびサイバーフィジカルの変革は、SEの実践に大きな影響を与えています。たとえば、MBSE、シミュレーション、デジタルツイン、AI、自動化、ロボティクス、および仮想化環境により、より迅速で優れたSEの実践とソリューションが可能になります。そのためには、入念な導入と広範な従業員トレーニングが必要となります。

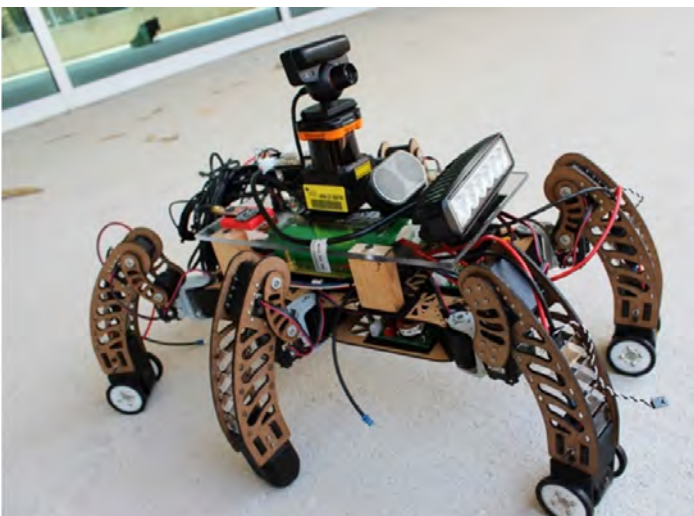
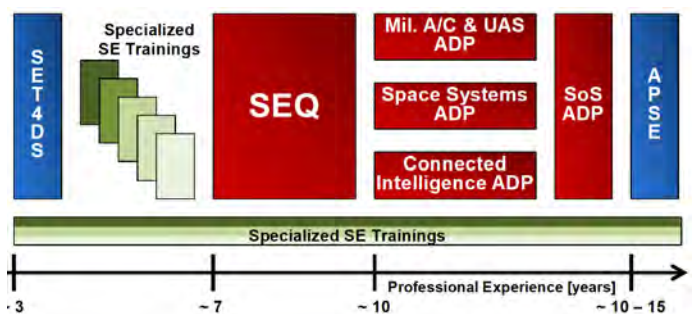
SEツールの重要性と多様性

企業のデジタルトランスフォーメーションには、より強力なデジタルSEツールが必要です。その適用には、プロセスへの適合とSEのトレーニングが必要です。システムモデリング(MBSE)、製品ライフサイクル管理、ソフトウェアエンジニアリング、仮想化、デジタルツインなど、多くの場合互換性のないさまざまな世代のエンタープライズツールを、首尾一貫したSEの実践およびシステムソリューションに統合するには、かなりの教育とトレーニングが必要です。



Systems Engineering (SE) Design Tools Evolution
(Ref: H. Bloembergen, SAC/DOE)





SEの役割が多様化する

システムが複雑化するにつれて、SEの教育とトレーニングもSEの専門分野に焦点を当てる必要があります。このため、システムアナリスト、SEツールキュレーター、アイディエーションエンジニア、システムアセンブリおよび検証SEsなど、さまざまなSEの役割に対する新たな教育とトレーニングの需要が生じます。それは、デジタル化、従来のSE専門性の複雑化、および新しい製品分野への適応という、3つの領域です。

SEの変化に対する教育の要求

分野横断的な開発が増加し、広く利用可能な知識も増えたことが、学生と企業の人材教育とトレーニングに大きな影響を与えます。SE教育はこれまで以上に、技術的側面を、社会的側面および経済学的側面と部分的に統合することによって、このような流れに対応する必要があります。このような教育の統合は、高等教育レベルもしくは専門教育レベルで必要となり、プロジェクトを成功させるプロジェクト管理に役立つものです。ハイブリッドクラスとビデオ対応ツールは、いずれ一般的になるでしょう。SE教育は、小学校から始まり、大学まで続き、専門職として働く間、継続されなければなりません。

成功するSEsと企業には継続的な教育が必須となる

デジタル企業とその従業員は、常に変化する市場、テクノロジー、ビジネス環境を予測する必要があります。そのため、質の高い継続教育は、成功する組織にとってさらに強力な差別化要因となります。Airbus D&Sと米国国防総省は、卒業後の継続教育とトレーニングのアプローチの優れた例です。

キャップストーン・プロジェクトがSE教育のビルディングブロックとなる

SEを学ぶには、理論的な知識に加えて、システムを実現する方法を理解することが必要です。キャップストーン・プロジェクトでは、SEの学生と実践者が、教育のどの段階でも、書籍の知識から実践的な理解への移行を可能とします。彼らは、各分野を統合し、システムを実現していく自信を徐々に得ることができます。顧客レビューとチームプレゼンテーションは、品質とSEの理解を高めるために、キャップストーン・プロジェクトの一部であるべきです。

未来のシステムズエンジニアリング人材の育成

システムズエンジニアの教育・トレーニング・育成のためのガイドライン

特に機械的、電氣的、生物学的、ソフトウェア、人間、環境、社会的要素で構成される、大規模で複雑なシステムの開発と運用を指揮できるエンジニアリング能力の需要は大幅に高まっています。このようなエンジニアは、現在および未来のシステムを構成する多くの分野にわたって、技術的な問題だけでなく、プログラムや社会的な問題も統合できなければなりません。しかし、大規模システムに対するニーズに加えて、より限定された、しかしそれでもしばしば複雑な製品を製造する中小企業(SMEs)も数多く存在します。このような中小企業でも、統合エンジニアリング能力を持つ人材へのニーズは、急激に高まっています。システムズエンジニアリング(SE)は、システムズエンジニア(SEs)によって行われます。エンジニアリングとしての分析、プロセス、技術、そして観点を、社会的システムないしは技術的システムの実現と保守に適用するための学問分野です。

SEsの必要性を促進する多くのグローバルな要因と傾向は、INCOSE Systems Engineering Vision 2035 (SE Vision 2035) で説明されています。

incose.org/sevision.

このホワイトペーパーは、個人、教育機関、および企業に向けて、SEコンピテンシーを開発し、SE人材を定着させる方法を、深く考えるきっかけとなること目的としています。本ペーパーは、INCOSE SE Vision 2035の一部であり補完的な位置付けとして、SE人材の教育環境に影響を与える要因を示し、SE人材をどのように企業で開発し育成することができるのかについてのアイデアを提供します。また企業だけでなく教育機関も、将来にわたって高い能力を持つSE人材を確保するために必要な学術的基盤や継続的教育を強化するためにとることができるアプローチをいくつか提供しています。

1.0 教育・環境に影響を与える要因

歴史家で未来学者のY.N.ハラリは、「次の世代のために未来の教育を開発することは、過去に比べると今日ではより困難です。将来の技術的な身体、脳、魂、心の操作が、それらの存在の確かさを危うくするからです。」(参考文献1)。FruehwaldとH.Poeppelは、彼らの21世紀の知(参考文献2)の特徴付けのなかで、将来の課題はSEの本質である複雑性と単純化に関するものであると述べています。

193カ国が全会一致で承認した国連の17の持続可能な開発目標(SDGs)(参考文献3)は、グローバル社会として前進するために必要な人間や社会の基本的なニーズに取り組んでいます。SDGsのほとんどは、その実現を支援するために、総合的なシステムアプローチと十分な教育を受けたSEsを必要としています。これは適格なシステム分析およびエンジニアリング教育に対する特別な動機付けとなっています。SDGs目標4番は教育に焦点をあてています。

UNESCOは世界会議で、教育テーマ目標4番の位置づけを拡張し、Brussels宣言(参考文献4)を可決しました。"包括的で公平な質の高い教育を確保し、すべての人に生涯学習の機会を促進する。"



図1.1 国連の持続可能な開発目標 (SDGs)は、質の高い継続的な教育が他の多くの目標の達成に大きく関係していることを強調しています。

1.1 デジタルトランスフォーメーションとIndustry 4.0

Industry 4.0 (およびSociety 5.0)は、ますます複雑化するソフトウェアや情報技術(IT)ソリューションの上に成り立っています。多くの企業は、アイデア抽出、設計、実装、運用、製造、および物流支援プロセスの自動化を進め、ビジネス資本と人的資本の機能的な相互作用を促進するプログラムに乗り出しています。このような企業レベルのデジタルトランスフォーメーションには、SE人材とその教育との連携が必要です。Industry 4.0 (参考文献5)とSociety 5.0(参考文献6)というここ数年の2つの具体的な取り組みは、私たちの社会と産業の発展に新たな目標とビジョンを設定し、将来の教育ニーズを形成します。ドイツ技術アカデミーの取り組みであるIndustry 4.0は、私たちが移行しつつある第4の産業フェーズを、サイバーフィジカルシステムの1つとして特徴づけています。自動化、ビッグデータ、自律性、拡張現実など、縦割りの環境に縛られがちな専門性は統合する必要があると考えられています(図 1.2)。

SEの教育とトレーニングは、このような産業と社会の要求の変化に適応する必要があります。Industry 4.0、Society 5.0、先端技術、デジタルトランスフォーメーション、進化する仮想環境は、エンジニアリング教育への要求を大きく変えるでしょう。最近発表されたデジタルエンジニアリングコンピテンシーフレームワーク(Digital Engineering Competency Framework, DECF)は、SE分野における5つのデジタルコンピテンシー(データエンジニアリング、モデリングとシミュレーション、デジタルエンジニアリングと分析、システムソフトウェア、デジタルエンタープライズ環境)を強調するための論理構造を開発しました(参考文献12)。このフレームワークは、一般的なSEスキルに追加する必要のあるデジタルスキルを記述しています。

複数の分野にわたるITコンピテンシー、および個人的・職業的スキルがあれば、新たな要求と変化する社会に対処することができます。デジタルトランスフォーメーションが広く推進されることで複雑性は増大し、成果となる製品が実現可能で、また持続可能性への期待や規制基準に適合することを保証するために、幅広い分析的、技術的、統合的コンピテンシーを備えたSEsが必要となっていきます。

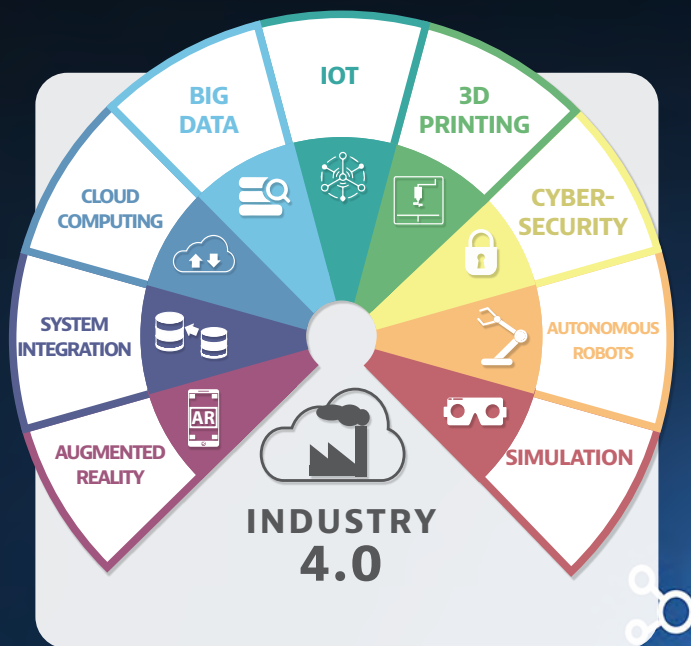


図1.2 Industry 4.0の主要要素

SOCIETY 5.0

デジタル検索によって情報は容易に入手できるようになり、多くのルーチンワークはロボットやAIによって達成されるため、人材のトレーニングはヒューマンスキル、リーダーシップ、我慢強さ、読解力、理解力に集中させる必要があります。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従来の障壁を取り払うことによって、この人材移行をサポートする必要があります(参考文献6)。

Figure 1.3 Society 5.0

1.2 知識へのグローバルなアクセス



現代社会では、情報や知識は天文学的なスピードで増加しています。幸いなことに、最新の知識管理システムと検索技術により、知識へのアクセスはかつてないほど容易になっています。情報が広く利用できるようになった今日、工学の学生は、単なる事実について教師から講義を受ける必要がなくなりました。なぜなら、情報は容易に入手可能であり、多くの場合、通常の教室での講義よりもわかりやすい形式であるからです。しかし、知識を活用するには、慎重な評価が必要です。今日正しいと思われたことが、明日には誤りであることが証明されるかもしれません。エンジニアは、情報を処理し、統合し、解析し、批判的に評価し、利用する方法を学ぶ必要があります。エンジニアには、人生のあらゆる分野で応用できる適応力が必要です。現実の場面でその知識をどのように応用するかを教えずに、考えや事実だけを教えることは、もはや十分ではありません。

1.3 SEの分野横断的な性質

複雑システムへの適用は、多くの分野で今後も拡大し続けるでしょう。例えば、エネルギー、モビリティ、通信ネットワーク、航空宇宙、スマートシティ、生物学的・ヘルスシステム、大規模建設・インフラプロジェクトなどです。各分野の専門化が進むと、設計作業の細分化が進みます。その結果、エンドツーエンドでシステム全体を統合し、ステークホルダーに価値を提供することが必要となります。企業は、環境、規制、プログラム、社会的に許容される範囲内で、これらのシステムを分析、評価、計画、実装、運用、維持するために、複数の分野にまたがるチームのコンピテンシーを必要とします。このようなシステムスペシャリストへのニーズの高まりは、現在だけでなく将来的にも、多くの企業での深いけれども狭いエンジニアリングの専門化の傾向を補完するものです。

システムがより多くの分野にまたがり、デジタル化され、よりスマートになっていく中で、変化するステークホルダーの要求に応じて、急速に変化するテクノロジーをサポートし適用するために、企業は幅広い多様なスキルを持つ人材を確保し維持させる必要があります。このような人材は、広範かつ専門的な技術やビジネスのコンピテンシーだけでなく、エンジニアリングやリーダーシップの才能も必要とされ、多拠点、多文化のコンテキストのなかで、特定のビジネスにとって関心のあるシステム(SoI)を設計、統合、調整するために活動します。

次の10年で成功するためには、エンジニアリングの分野に関係なく、INCOSE Systems Engineering Vision 2035 第1章に記載されているような必須事項を満たすために人材を育成する必要があります。これらの企業の必須事項は以下の通りです。

- ▶ グローバルで多様な環境下での競争力
- ▶ サステナビリティ倫理観の確立
- ▶ システム思考の育成
- ▶ 技術の予測とイノベーションの文化
- ▶ サプライチェーンの統合と最適化
- ▶ 企業のインテリジェンス、意思決定、学習の高度化
- ▶ デジタルトランスフォーメーションを取り入れる

1.4 SEsは分野特有の知識体系を必要とする

自動化と自律性が進み、デジタルエコシステムがますます洗練されています。急速に変化する技術、そしてサイバーセキュリティと信頼性の高いシステムの必要性といったトレンドが、SEコンピテンシーの必要性をさらに高めています。増加するデータ、AIの普及、自己学習能力、モデリング、シミュレーション、仮想環境は、システム分析、SE、データ分析を多くの社会的・産業的事業の最前線に押し上げています。このようなトレンドは、分野によってはSEsは専門化した補完領域の習得が必要であるという認識にもつながっています。図1.4はいくつかの選択された分野のための補完的なSEコンピテンシーの例を与えており、分野固有の適用に沿った深い技術分野の専門性をもち、十分に教育された従来のSEsの必要性を示しています。

また、システム・オブ・システム(SoS)、ビジネス・インテリジェンス、エンタープライズ・モデリングなどの特別な能力を持つSEsも必要とされています。



データ分析

- ・ IT、AI、機械学習、ソフトウェア、クラウドコンピューティング、システム分析。

複合処理プラント

- ・ 例：化学製造
- ・ 流体力学、熱力学、ロジスティクスに関する確かな知識と、プロセス、制御、設計の能力が求められます。

通信とエネルギーのネットワーク

- ・ 電気工学、高度電子工学、制御工学、オペレーション工学、通信工学に加え、システム解析の専門知識。

自動化もしくは自律システム

- ・ 自動車や港湾・飛行場の物流などでは、IT、ソフトウェア、センサー、通信、サイバーセキュリティ、制御理論、安全設計、セキュリティ、社会科学などのスキルが必要です。

小型医療機器もしくはスマートホームデバイス

- ・ 血圧や体温などの計測機器では、センサー、IT、ソフトウェア、通信などの分野のスキルが必要です。



図1.4 SEsに必要な分野特有の知識の例

1.5 SEは企業の多くの階層で実践されている

自動車、インフラ、航空宇宙などの複雑な製品は、設計、開発、組立、統合といった複数の階層によって特徴付けられています。これらの階層は、個々の分析(構造など)からサブアセンブリ、主要なサブシステム、そして最終製品へと構築されます。これらの各階層は、一般的に限定的ではありますが、それ自体がシステムです。したがって、システムに対するコンピテンシーは、多くの階層そしてプライチェーン全体を通して必要とされます。自動車の例では、サスペンション、電装品、ソフトウェア、パッセンジャーコンフォート(横断的なサブシステム)などです。

これらのほとんどのサブシステムに対する、産業分野のコンピテンシーの要求は異なりますが、すべては、ある程度のシステム能力を必要とします。それは、ソフトウェア能力と相まって、例えば、OEM(Original Equipment Manufacturers)システム要求、検証およびテストプロセス、または他のサブシステムとのインターフェース/相互作用などの専門性を理解するためのものです。そのため、システムの知識と教育は、さまざまな階層で異なっています。SEsの仕事は、アセンブリをするためのSEから、サブシステムを構築するSEに、そしてシステム全体を統合するSEへと発展していきます。

システムズエンジニアは製品の多くの階層で活躍する



オートモーティブシステム

- ・サスペンション
- ・電装品
- ・音響/パッセンジャーコンフォート
- ・テスト、認証
- ・生産 - 品質
- ・スペア/リペア - ロジスティクス
- ・サステナビリティ、RAMS、その他
- ・車両機械設計
- ・カーエレクトロニクス/ソフトウェア
- ・インテグレートッドビークル
- ・自律運転

Ref: H Stoewer, P. Schreinemakers

公共インフラシステム

- ・土木/工事
- ・電気・機械機器
- ・トラフィックコントロール
- ・安全性、RAMS
- ・テストと試運転
- ・生産
- ・車両
- ・地質工学
- ・システムの成果物
- ・建築と地理学分野
- ・インフラネットワーク
- ・品質と認証

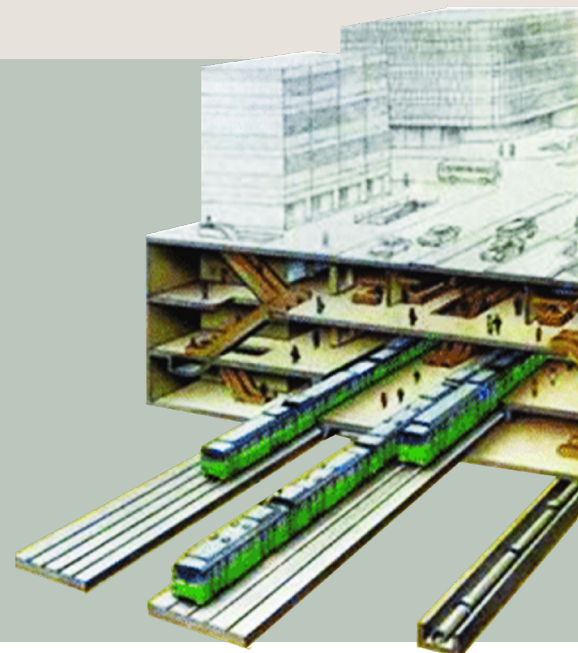


図1.5 SEsが関心を持つ対象となる製品階層の例

1.6 技術の継続的な革新と成熟化

デジタルとサイバーフィジカルの変革とその他のテクノロジーの進歩は、新しい製品とサービスを可能にし、SEの分野に大きな影響を与えます。例えば、MBSE、シミュレーション、デジタルツイン、AI、自動化、ロボティクス、仮想化環境は、SEの実践とソリューションの迅速化と質的向上を可能にします。同時に、これらの環境はSEsの教育やトレーニングの進歩を必要とするので、企業とSEsは、常に最新かつ効果的な状態を維持するために、SEトレーニングにますます多くの労力を費やす必要があります。

しかし、SEは必ずしもクリーンな設計から始めるわけではありません。SEsは多くの場合、先進技術をシステム・オブ・システム(SoS)に統合するという課題に直面します。例えば、既存の道路ネットワークに自律走行車を配備するインフラのように、コンポーネントシステムは、各々個別に発展し管理されるシステム要素を統合しなければなりません。



1.7 SEツールはよりクリティカルで多様化する

企業のデジタルトランスフォーメーションは、これまで以上に強力なデジタルSEツールを要求しています。その適用には、企業のコミットメント、プロセスの適応、そして特にSEsにとって、エンジニアのトレーニングが必要です。MBSE、製品ライフサイクル管理、仮想化、デジタルツインなど、しばしば互換性のないエンタープライズツールの異なる世代を、一貫したエンジニアリングの実践、ひいてはシステムソリューションに統合することは、企業にとって複雑な取り組みです。

SEは、これらの統合されたツールスイートの多くのユースケースの中心にあります。成功する統合ツールスイートは、それ自体がシステムとしてデザインされ、そしてそれを使う広範な教育とトレーニングが必要となります。SEsは、これらのツールの使い方をマスターする必要があります。単なる慣れや表面的な知識だけでは十分ではありません。

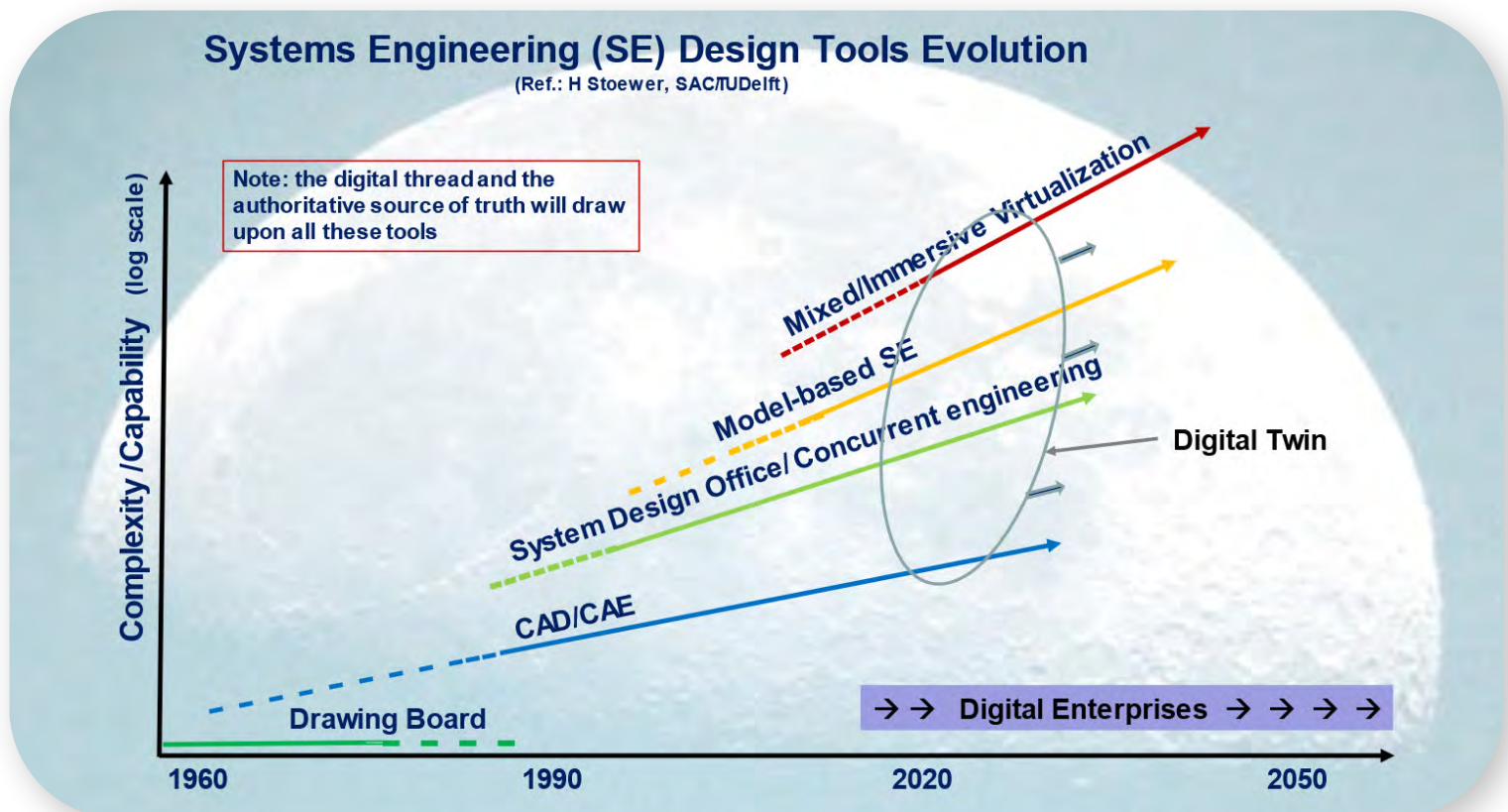


図1.7 SEデザインツールの進化

1.8 SE役割の専門化

システムの複雑化、自動化、適用分野の多様化により、SEsへの要求が高まるでしょう。そのため、SEsの教育とトレーニングは、以下に例示するような主要な機能的専門性に分化していくでしょう。

さらに、ジュニアSEs、ミドルキャリアSEs、シニアSEs、システムアーキテクトの区別が追加されます。SE教育はそれに対応する必要があります。

- アーキテクティング、アイデア抽出
- ビジネスエンジニアリング
- 製造
- オペレーション
- システム分析、最適化

- リスクアセスメント、意思決定分析
- モデリング (モデル作成、キュレーション、利活用)
- 統合、検証、妥当性確認
- バリューエンジニアリング
- メンテナンス、サービス

2.0 高く評価される システムズエンジニアの特徴

2.1 コンピテンシーと振る舞いモデル

SEにおけるコンピテンシーは、いくつかの側面から評価することができます。基本的なエンジニアリングと適用分野のコンピテンシーに加え、4つの有用な視点があります。

- 1) SEの技術と手法に関連する知識の習得。
- 2) システム思考と複雑な問題解決に関連するシステムマインドセットとその熟練度。
- 3) チーム環境で効果的に働き、問題分野と解決分野を横断して調整する対人スキルおよび行動。
- 4) 多様な専門家からなるチームを特定の技術に向けて導く能力に関連する技術的リーダーシップスキルと行動。

これらは、HELIXプロジェクトで作成されたATLAS1.1モデルで詳細に定義されています(参考文献13)。

システムズエンジニアリング国際評議会(INCOSE)のコンピテンシーフレームワークは、SEの有効性に不可欠な知識、スキル、能力、行動を実務家および利害関係者が特定するための指針となるテーラリング可能なフレームワーク内の、SEのための36のコンピテンシーセットを提供しています(参考文献7)。このコンピテンシーフレームワークは、INCOSEが提供するSE認定資格と連動しています。

多くの国で普及している公認プロフェッショナル・エンジニアプログラムも、専門知識の認定資格の一例です。しかし、SEの実践は、単に知識の習得にとどまりません。それは、複雑なチーム構造やダイナミックなプログラム環境を含む実世界の状況で適用されなければなりません。習得度は組織的な支援によって決定されますが、その中でも最も重要なものは、職務経験、メンタリング、そして生涯教育トレーニングです。これらは、個人と組織の取り組み、つまり個々のビジネスおよび企業文化の成熟度を反映した取り組みのコンビネーションによって生み出されます。

このような状況で企業をリードし、企業に価値をもたらす能力は、技術的コンピテンシーだけでなく、SEが示す行動の組み合わせによって決まります。後者については、2005年にNASAで、高い業績を上げているSEsの行動コンピテンシーを特定するための研究が行われました。これらの行動は、トレーニングプログラムの策定や、キャリア・プランニング、サクセッション・プランニングの指針として活用されています。付録Aを参照してください。この研究は、総括として以下のような調査結果が示されました。

システムズエンジニアは、システムまたはサブシステムを、解決すべき、ところどころ切断箇所がある非線形の網と捉えることを学んでいます。

彼らは、全体像を把握し、切断箇所を特定するためにズームインし、再び全体像にズームアウトすると同時に、システムやデザインの相互関係やパターンに目を向ける能力を持っています。

彼らは、好奇心が旺盛で、自信と粘り強さを兼ね備えていて、達成志向の持主です。

彼らは、自分のしていることと周囲の世界との繋がりや相互関係を見抜く、並外れた物理的洞察力を持っていると自分自身を表現するかもしれません。複雑な問題を解決するチャレンジに惹かれ、多くの制約の中で創造性を発揮することができます。

図 2.1 NASA 火星探査機降下用ビークル



2.2 シニアシステムズエンジニアの典型的なトレーニングとキャリアパス

図 2.2の「システムズエンジニアリングのスキルのTモデル」は、特定分野のスペシャリストからSEsへのエンジニアへの成長を表しています。基本的な考え方として、エンジニアはまず、機械、電気、物理、生物、制御などの専門分野で教育を受けます。あるエンジニアは、自分の専門分野の知識とスキルの基盤の中でさらに能力を発展させていきます。また、ある者は隣接する分野についても理解を深め、それによって複数の分野にまたがる問題を分析する能力を身につけたいと考え、彼らはSEsになる道を歩むことになります。他の(エンジニアリング)分野を学べば学ぶほど、そして多くのエンジニアリング分野とプログラム分野(スケジュール、コスト、財務、計画、リーダーシップ、市場など)と関わるようになればなるほど、シニアSEsあるいはシステムアーキテクトへと成長していきます。さらに、第1.7節で説明したSEコンピテンシー特性を習得することで、ジュニアSEs、ミドルキャリアSEs、シニアSEs、システムアーキテクトの差別化要因になります。教育とトレーニングは、これらの専門分野へのアクセスを提供する必要があります。

専門分野のエキスパートとしてのキャリアと管理職のキャリアは、伝統的に並行して発展していきます。通常の企業管理者の昇進やキャリアアップの基準は、予算規模とスタッフの監督責任の程度が中心です。しかし、一部の組織では、エキスパートとしてのキャリアの昇進トラックを並行して構築しています。このモデルでは、重要な技術分野や管理分野のシニアスペシャリストは、少なくとも階層内の一定レベルまでは、管理職と並行して別のキャリアパスや昇給をめざすことができます。通常、チーフエンジニア、チーフアーキテクト、最高技術責任者 (CTO)、またはプロジェクトマネージャー (PM) への昇進は、このパスに沿って行われます。

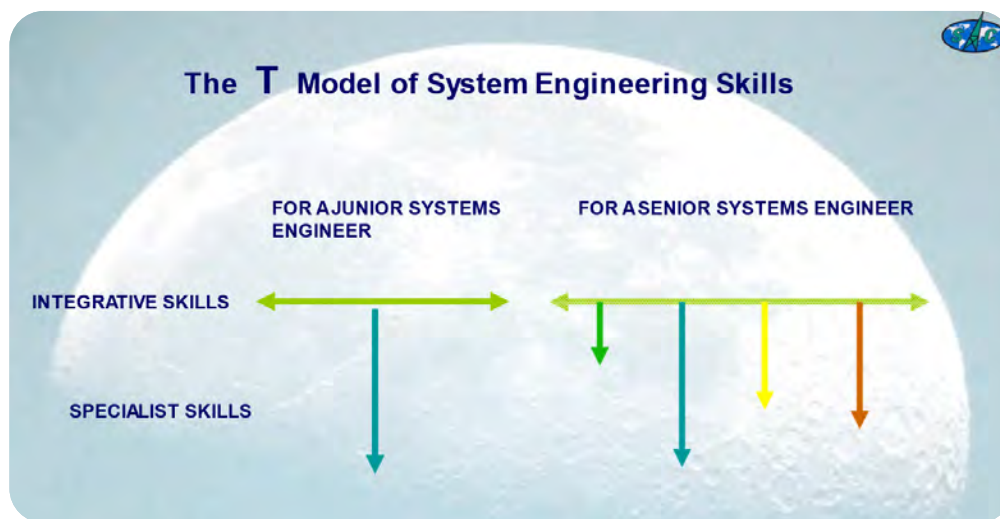


図2.2 システムズエンジニアリング スキルの「T」モデル

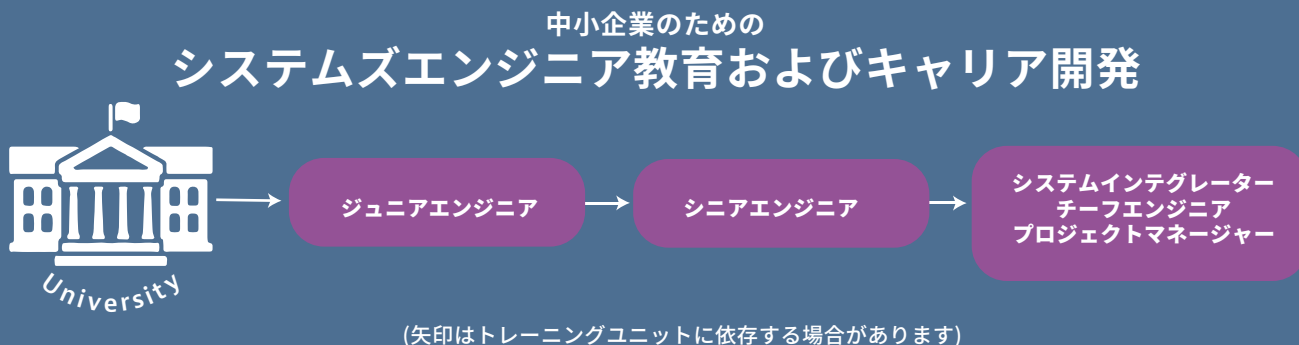


図2.3 中小企業でのシステムズエンジニアの育成

中小企業(SMEs)では、ジュニアエンジニアからシニアエンジニアになり、システムインテグレーター、チーフエンジニア、プロジェクトマネージャーといった役職に就くのが一般的です。図 2.3は、中小企業におけるキャリア開発の基本的なステップを簡略化して示したものです。

図 2.3および図 2.4に示すように、SEsのキャリアトラックは、しばしばプロジェクトマネジメント(PM)の役割を担うことになります。SEとプロジェクトマネジメントの分野は、責任の相互依存と関心範囲の重複が大きいため、大きく絡み合っています(図 2.5)。

これまではSEとPMの分野の教育課程は異なり、それぞれ異なる専門学会と提携しています。しかしSEとPMは、エンジニアリング、ビジネス、製造分野で他の多くの学問分野に依存しているのと同様に、互いに依存しあっています。そのため、SEとPMは、望ましいソリューションと実行可能な製品を作り上げるために、分野横断的なチームで機能する必要があります。SEとPMの継続教育、方法、実施方法は、それらをサポートする企業の戦略的方向性と一致する必要があります。

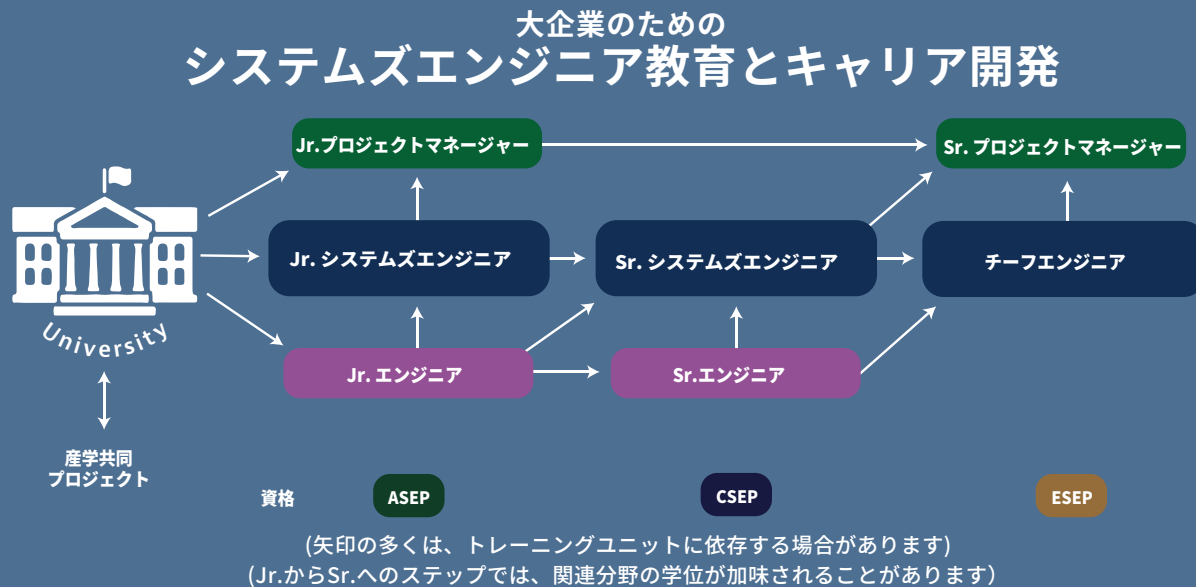


図2.4 大企業におけるエンジニアリング、システムズエンジニアリング、プロジェクトマネジメントのキャリア開発オプション

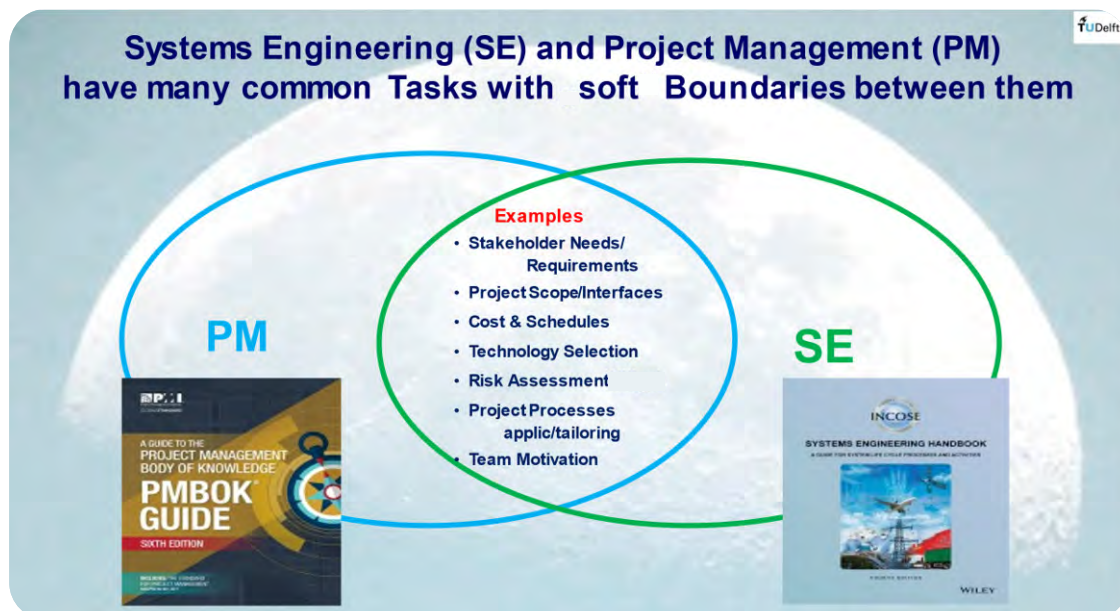


図2.5 プロジェクトマネジメントとシステムズエンジニアリングは関心が大幅に重複する

3.0 教育モデルの概要と役割

SE人材の教育・育成には、学校での正規教育と社会での継続教育の両方が非常に重要です。それぞれ、重要な役割を担っています。

3.1 正規教育

小学校、高校と大学レベルでの正規教育は、システム思考やシステム分析の礎を築くことによって、SE人材の教育で、今まで以上に大きな役割を果たすでしょう。実際、INCOSEは、世界中のあらゆるレベルの教育カリキュラムへのシステム思考とSEのスキルの統合を推進することをミッションとする、SysTEAMの取り組みを設立しました(参考文献14)。



3.1.1 初等教育と中等教育

初等教育と中等教育の重要な使命は、現代社会で大人として必要となる基本的なスキルを教えることです。これを"21世紀型スキル"と呼びます。21世紀型スキルとみなされる具体的なスキルは、人によって、場所によって、あるいは学校によって定義が異なるかもしれませんが、この言葉は、やや緩やかで揺らぎはあるものの、一般的なコンセンサスを反映しています。以下のリストは、21世紀型スキルに一般的に関連する知識、スキル、仕事をする上での習慣、性格特性を簡単に例示したものです(参考文献8)。

2035年までに、システム思考は、科学、技術、工学、数学の学習を補完するために、早期教育に組み込まれるようになります。早期教育では、あらかじめ定義された問題や制約に対応する、複数の分野にまたがる解決策を見出すためのシステム思考とチームスキルを育成します。中等教育では、利害関係者のニーズの収集と理解、要求の策定、解決策やデジタルシステムデザインにたどり着くまでの概念的な選択肢の特定と評価など、システムズエンジニアリングの基本概念を学びます。

- クリティカルシンキング、問題解決、推論、分析、解釈、情報の総合化
- 研究スキルと実践、疑問を持ち質問する
- 創造性、芸術性、好奇心、想像力、革新性、自己表現力
- 忍耐力、自己管理能力、計画性、自己統制力、適応力、主体性
- 口頭および書面によるコミュニケーション、人前で話すこと、発表すること、聞くこと
- リーダーシップ、チームワーク、コラボレーション、協調性、バーチャルワークスペースを利用した施設
- 情報通信技術(ICT)リテラシー、メディアとインターネットリテラシー、データの解釈と分析、コンピュータプログラミング
- 市民的、倫理的、社会正義的なリテラシー
- 経済と金融リテラシー、起業家精神
- グローバル意識、多文化リテラシー、人道主義
- 科学リテラシーと推論、科学的方法
- 環境と保全のリテラシー、生態系の理解
- 栄養、食事、運動、公衆衛生と安全を含む健康とウェルネスのリテラシー

学生には、システム分析や意思決定を支援するのに必要な数学的、科学的、IT関連、そして社会的知識を習得するための動機付けが必要です。この動機付けのために、教育とメンタリングは、可能な限り地域産業と連携しながら、体験型プロジェクトで実体験に基づいた実践的なものとなります。

ジェネレーションZ（1997年～2012年生まれ）は、「人生の大部分をデジタルで過ごす」学生の第一世代です。この世代の人たちは、知識が手軽にそして一般に入手可能であることが前提となっています。教育機関は、専攻分野の基本的なコンピテンシーを超えて、関連する情報を探し出し、批判的に検討し、採用し、その信頼性を評価するよう、学生を指導することが求められています。学生はデジタル技術を学習に活用し、幼少期からプログラミング言語に精通しています。そのためデジタル技術を使うことで、教育者と学生の間のやり取りは豊かなものになります。



図3.2
ジェネレーションZが成長し、いまや高等教育システムの人口が増加し始めている

3.1.2 大学・大学院教育

世界の多くの大学でSEの学位が取得でき(参考文献9)、SE人材のトレーニングと教育に重要な役割を担っています。これらのプログラムは、知識がデジタルで容易入手できるようになる未来や、第1章で説明したような産業や社会の要求の変化に、カリキュラムを継続的に適応させることが課題となっています。その結果、大学は大きな変化を余儀なくされています。経済協力開発機構(OECD)、世界経済フォーラム、グローバル・エンジニアリング・ディーンズ・カウンシル(GECD, <http://www.gedcouncil.org/>)などは、大学レベルの工学教育部門に大きな変革、すなわち製造とプロセスを含む主要な実現技術に関するカリキュラムの強化を、速いペースで取り組むよう呼びかけています。

これらの団体は、高等教育の責任と目的が大きく変化することを予見しています。また、次のような動向も想定しています。

- ▶ 学生の選択肢を広げる、社会的意義のある工学カリキュラム
- ▶ 工学的知識と人文・経済・社会科学を融合させた学際的な学習・教育を行う。

第1.7節で説明したように、SEは様々な利害関係者のそれぞれの専門のニーズに沿って、様々な専門分野に広がっていくでしょう。大学院教育プログラムは、このようにSEが各専門分野に深化することを支援する上で重要であり、今後も重要であり続けます。このような専門分野のさらなる例として、AI、機械学習、ソフトウェア検証手法、自律システム、センサー、エッジコンピューティング、サイバーセキュリティ、通信が挙げられます。

分野に特化した教育と分野横断的な教育の両立は、大学レベルの教育における課題のひとつです。例えばビジネス、コンピュータサイエンス、電気・機械工学、経営学、社会科学などの工学、社会学、科学に関するプログラムは、システム指向のコース、特にシステム思考とエンドツーエンドのシステム分析に焦点を当てたコースをますます含むようになるでしょう。カリキュラムの幅を広げることは、システム思考を駆使して意思決定を行うスキルを向上させることができます。

大学院教育プログラムは、2035年頃にはSEsに対して幅広い分野横断的な学習機会を提供するでしょう。これには、確立された科学技術教育の他に、社会技術的リーダーシップと起業家精神に関するプログラムが加わり、エンジニアが、幅広い適用分野で大規模なチームや大規模な産業サプライチェーンを含む、非決定論的な複雑システムに対処できるようになります。SEカリキュラムは、特に社会政治的スキルとソフトスキルを含むように拡大されるでしょう。また、これらのカリキュラムは、最新のプロセスや手法を取り入れた、幅広いデジタルモデリング、シミュレーション、仮想化、ツールのスキルが特徴となります。

従来の工学分野の特徴的な教育トレーニングに加えて大学もまた、システム分析の基礎を教える上で中心的な役割を担っています。リスク評価、応用確率統計学、オペレーションズ・リサーチ、決定理論、複雑性理論、標準的なソフトウェア検証、信頼性、モデリングとシミュレーション、

代替案分析などの技法は、SEsが創発する振る舞いやシステムの成功確率を理解するための重要なツールです。これらのスキルは、テクニカルスペシャリストやプロジェクト/プログラムマネジメントと協力して、リスクを理解し、回避し、軽減するために必要です。

産学連携をより緊密にすることで、大学から産業界や政府機関へ、あるいはその逆へとスムーズに移行することができます。各分野とシステムのカリキュラムに関して、学术界と産業界の間で早い段階で交流や対話が行われることが当たり前になっていくでしょう。大学での教育や指導に対する産業界の実践的な支援は拡大し、学生に「実際の現場」での洞察をもたらし、産業界への就職を後押しします。

教育のやり方は、問題定義、適切な解決策の発見、チームの生産性向上が主要なものとなっていきます。応用を重視するという教育上の課題に対して、大学は産業界と頻繁に協力して実世界のニーズに対応するようになります。複雑な問題解決にはプロジェクトベースの経験が必要であるため、伝統的な教育とオンライン教育の両方で、この課題/プロジェクトベースでの教育に幅広く移行していくことが一般的となります。

教育者はそのキャリアを通じて、古い知識を手放し、再度学び直すことを絶えず繰り返していき、自分自身を再創造していきます。知識の一部は新しい科学に取って代われ続けるため、その結果、時代遅れの知識を手放すことが必要で、それが継続的な学習プロセスの一部であると認識する能力は、生涯にわたり学習し続ける一つの要素となります。

大学レベルの教育は、学生に新しい方法論を紹介することで、従来の「設計・ビルド・テスト」から「分析・モデル・シミュレーション・ビルド」アプローチへの転換を促す触媒となるでしょう。これには、特に大規模なスマートシステムにおいて、初期の定義や設計段階では特性を明らかにすることが難しい創発的な振る舞いに対して、対処・改善するための「アジャイル」「コンカレント」または「反復」SEなどの新しい業界プロセスがしばしば含まれます。

デジタルツインと組み合わせた高忠実度のモデリングとシミュレーションを使用することで、学生はより効果的に実験を行い、エンジニアリングの意思決定やトレードオフ分析がどのように行われ、実施されるかを理解し、モデルベースのプロジェクトレビューをサポートすることができますようになります。同様のプロセスとテクニックは、オペレーション、メンテナンス、サービスデザインの理解にも適用されます。

3.1.3 キャップストーン・プロジェクト

個人学習や伝統的な書籍ベース(またはオンライン)の学習は今後も不可欠ですが、教育におけるチームでの密な相互作用の価値がなくなるわけでは決してありません。実際、SEの学習と教育は、クラス内での理論的な知識の伝達では達成できません。しばしば

「キャップストーン・プロジェクト」と呼ばれる代表的な実プロジェクトにチームで取り組み、知識を応用することによって、SEsは理論を最もよく理解します。これは、中等教育だけでなく、大学院や専門職のトレーニングにも適用されます。チームプロジェクトの複雑さや方向性は、特定の教育機関が提供するリソースのほか、学生・教師チームの経験によっても異なります。顧客やターゲット層となる従業員が在籍する企業をプロジェクトレビューの役割に迎えることで、市場や顧客志向を開発し、製品価値に関するフィードバックを得ることができます。このような役割は、チーム内によって、あるいは実際の企業の顧客によって模擬することができます。このような教育的な演習では、構造化されたシステムデザイン環境が一般的となるでしょう。

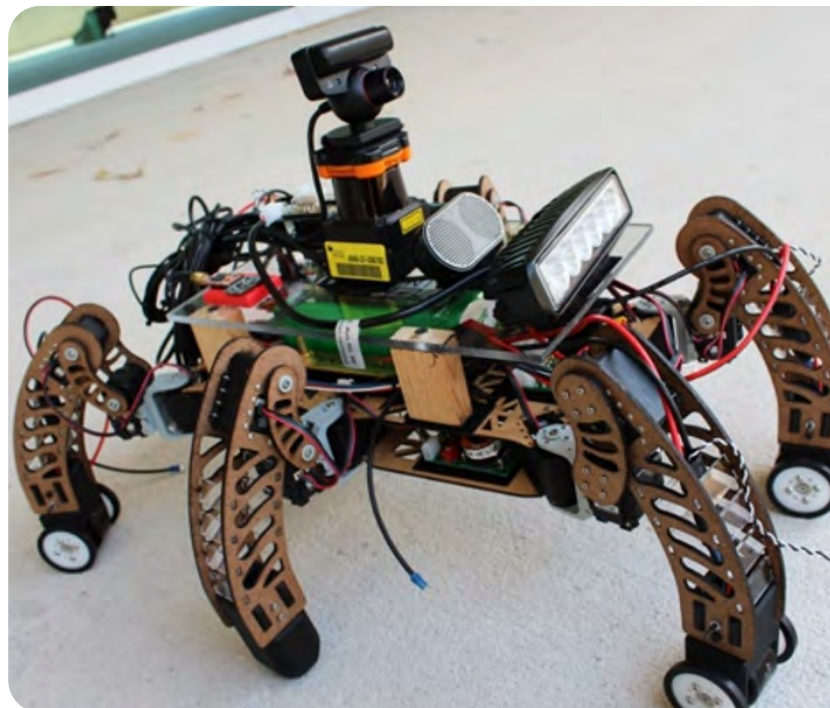


図 3.3 実体験やケースプロジェクトに基づいた指導が行われています。
- セントラルフロリダ大学シニアデザインショーケース

3.2 継続教育

3.2.1 職場トレーニング

企業による実践的な経験を優先させた継続的な学習プログラムは拡大していくでしょう。大学教育はSEを卒業する最初のステップであることを認識した上で、企業は、大学教育から産業界での実践への移行(一般的なものと企業特有のもの両方)を橋渡しする必要があります。継続教育は、デジタルエンジニアリングや非決定論的システムの分野で進化する手法、技術、プロセスなどのSEコンピテンシーに焦点を当てることもできますが、それだけでなく、ソフトウェアエンジニアリング、サイバーセキュリティ、自律性などの分野に特化したコンピテンシーを含めることができます。現実には、SEのキャリア開発には、分野、テクノロジー、システムのコンピテンシーを向上させる必要があります。企業内の大学やアカデミーが提供する、初期から中期のトレーニングと教育は、その組織で使用されているシステム、技術、企業特有の慣行や標準に合わせて、企業での実践に焦点を当てたものになります。さらに、恐らくは別の方法として、企業は、システム思考、デザイン、開発、分析のためのサマースクール、短期コース、認定プログラム、正式な大学院プログラムなどの補足的な正式トレーニングプログラムを利用することになるでしょう。

企業の競争力強化には、技術、製品、製造、サービス、プロセスなどを、より速いサイクルで継続的に適応させる必要があります。そのため、従業員の生涯学習への積極的な参加を促進することは、変化するSE業務の課題とデジタル企業への移行に対応するための前提条件となります。以下のような課題にも対応できるよう、継続的なトレーニングや人材育成が不可欠となります： 1) デジタルトランスフォーメーションへの取り組みとテクノロジーの導入、2) 企業の製品、サプライチェーン、またはミッションの変化。

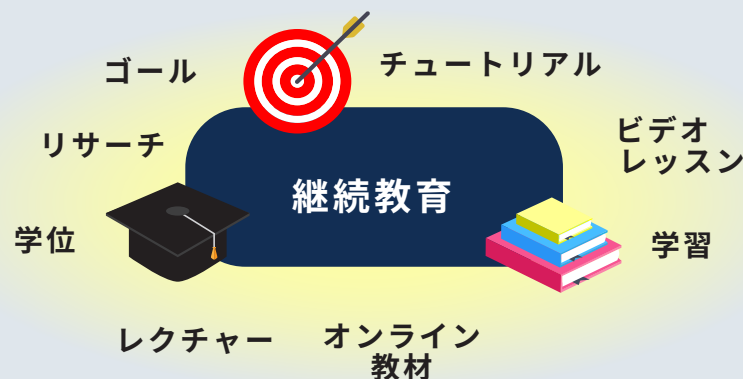
この考え方は、「外部の変化の速度が内部の変化の速度を上回ったとき、ビジネスの終わりが見えてくる」というゼネラル・エレクトリック社のCEO、ジャック・ウェルチの適格な言葉とも一致します。

生涯学習の必要性が高まっていることを考慮すると、商業的なSEトレーニングプロバイダーは、幅広く深いSE関連科目を教えてギャップを補う存在として役割を果たすことになります。トレーニングプロバイダーは、産業界や政府の実際のプロジェクトでSEを適用し、変化する企業のニーズ、新しい技術、新しい方法論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を採用する必要があります。

認定プログラムは、SEコンピテンシーの検証や自己評価を支援する役割を果たすことができ、その結果、従業員のキャリアアップだけでなく、大学院および大学院卒業後の教育の取り組みを支援することができます。認定プログラムは、SEsの成長過程に沿った知識と熟練度評価のベンチマークを提供することができます。例えば、INCOSEでは、SEsの育成段階に応じて3種類の認定資格を設けています(参考文献7)。

エアバス・ディフェンス・アンド・スペース社(ADS)は、継続的な教育トレーニングプログラムを通じて、過去20年間にわたり、SEコンピテンシーと能力を向上させてきました。付録BにあるADS提供の簡単な説明は、SEの継続的な学習進歩のベンチマークとして役立ちます。

さらに、米国国防総省は、キャリア・コンティニウムを通じた将校トレーニングのモデルを作成しました(付録C参照)。このモデルの基本的な考え方は、一般的な技術者、特にSEsの継続的な教育にも容易に拡張できます。



3.2.2 オン・ザ・ジョブ・トレーニング

実務で実践しているSEsは、正式なSE教育を受けたわけではなく仕事の中で学ぶのが殆どです。その理由は、SEsは一般的に、特定の分野で知識を確立し、それからその知識を基に専門知識の幅を広げていくからです。

若手および中堅のSEsにとって、システムライフサイクル内で特定の役割を担うことは、何よりも良いトレーニングの機会となります。システム検証の役割では、設計が意図した目的にどのように合致しているか、また、個々の設計上の決定がどのように顧客満足を支えているか、あるいは損なわれているかについての洞察を得ることができます。

統合とテストの役割により、サブシステムを連携させた結果を直接体験し、サブシステムの独立したビューポイントと実装に関連する不具合の根本原因を特定することができます。運用を経験することで、エンジニアはプロジェクトの初期段階で決定されたアーキテクチャや設計の結果を、自ら見ることができ、後の設計業務への応用に結び付けることができます。

このような統合的な役割は、高いパフォーマンスを発揮するSEsの育成をする上で非常に重要であり、そのため、SEsを育成するキャリアパスの経験を追求しようとする企業は、これらの機会を提供することを優先した方がよいでしょう。

4.0 まとめと結論

システム分析とエンジニアリングのコンピテンシーは、他の多くのコンピテンシーと同様に、技術、ツールや方法、規制、その他多くの進展に対応できるよう、継続的な育成とキャリア開発が必要です。さらに、デジタル企業では、事業のさまざまな価値の流れを統合・相関させ、ビジネスモデルや製品がレジリエントであることを保証するためのシステムアプローチが必要です。

SE開発のニーズの変化は、産業界、教育機関、政府機関、特にハイテクでしばしば複雑な、プログラムまたは取得とサプライチェーンの相互作用に携わる組織に当てはまります。すべての組織が、デジタルエンタープライズの需要に対応し、2035年においても存在し続けるために、従来のアプローチを進化させる必要があります。そのためには、人的資本に大きな投資をする必要があります。

ほとんどの分野で情報がデジタル化され、迅速に入手できるようになるため、SEsの教育は、「知識の正しさ」と、さまざまなエンジニアリングおよびプログラムの分野にわたるコンピテンシーの統合にますます焦点を当てる必要があります。SEは進化し続け、その教育は2030年代の変化する利害関係者とデジタルトランスフォーメーションのニーズに対して適応していくでしょう。

21世紀の企業が成功するためのキーは、人、その教育、知識、そして有効性です。継続的なコンピテンシー開発とモチベーションを確保することは、優秀な従業員を引きつけ、定着させるために不可欠となります。

付録A

NASAで高い成功を収めたシステムズエンジニアの行動

これらの行動は、業界領域を問わず、SEsに広く適用可能です。
本研究で特定された行動を要約すると、以下のようになります：

▶ リーダーシップ

- 他人に影響を与える
- チームでうまく機能する
- 他人を信頼する
- 実装までの必要なビジョンと技術的な手順を伝える
- メンターとコーチ

▶ 姿勢と特質

- 自信に満ち溢れている
- 仕事に対して客観的かつ包括的な視点を持っている
- 知的好奇心が旺盛である
- 変化に対処する

▶ コミュニケーション

- アイデアを進化させる
- ストーリーテリングとアナロジーで伝える
- 効果的に話を聞き、情報を言葉で説明する

▶ 問題解決とシステム思考

- クリティカルシンキングを使用する
- リスクを管理する
- 適切なパラノイアを示す
 - うまくいかない可能性があることに常に焦点を当てている

より詳細は参考文献10を参照のこと

nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/behavioral_competencies_highly_regarded_nasa_systems_engineers.pdf

付録B

産業界での大学院卒業後のSE教育・トレーニングの一例 エアバス・ディフェンス・アンド・スペース

エアバス・ディフェンス・アンド・スペース社(ADS)は、過去20年間にわたり、SEsのための継続的な教育・トレーニングプログラムを開発してきました。この会社のプログラムは、SEsがより幅広いコンピテンシーを習得するためにスキル、幅、深さを向上させる必要性に応じた、様々な育成ステージを直線上に特徴付けています。

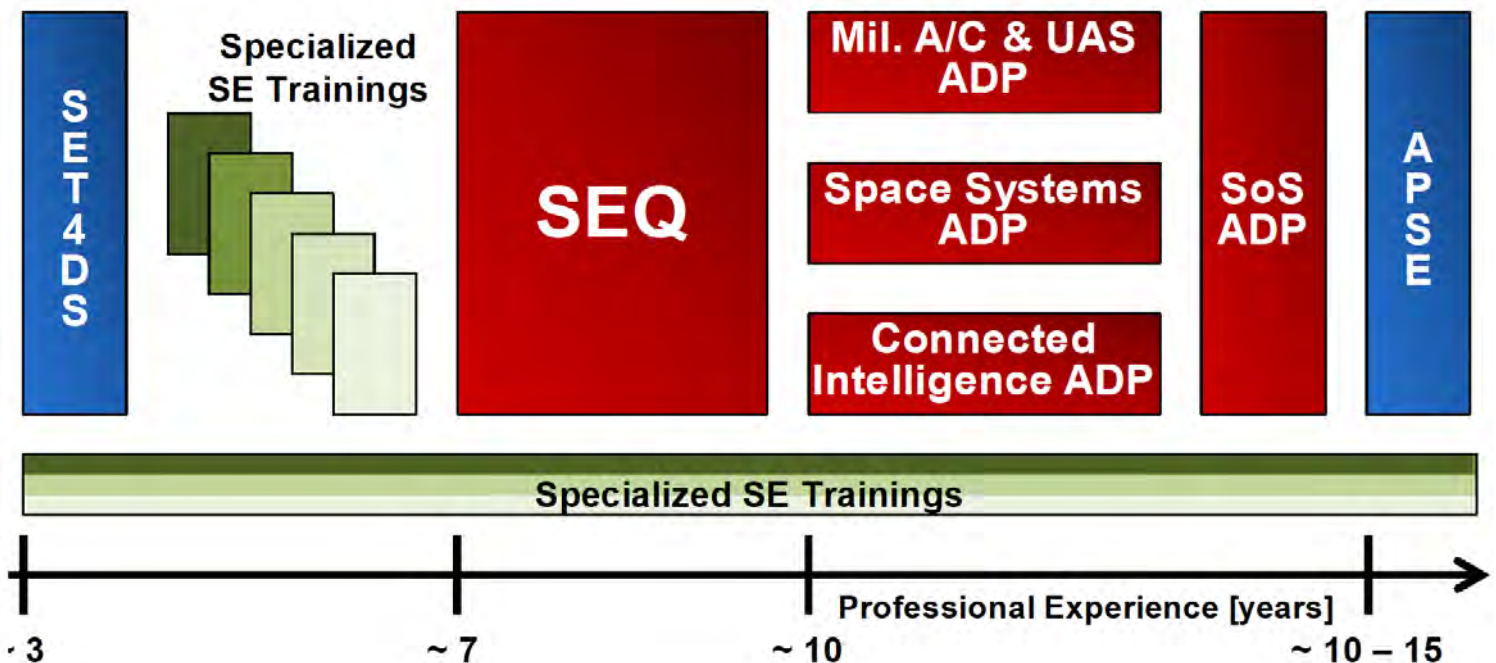
ADSは、このプログラムやその他の取り組みを通じて、過去20年間にわたりSEコンピテンシーと能力を向上させてきました。ADSの提供する簡単な説明は、SEsの継続的な学習進歩のベンチマークとして機能することができます。

エアバス・ディフェンス・アンド・スペース システムズエンジニアリングのラーニングパス

エアバス・ディフェンス・アンド・スペース(ADS)は、将来のSEs、リードエンジニア、チーフエンジニアのための推奨事項として、システムズエンジニアリングのラーニングパスでの一連のトレーニングやプログラムを推進しています。

システムズエンジニアリングの分野を初めて学ぶ方には、システムズエンジニアリングの最初の入門となる多くのeラーニングが用意されています。

3年程度の実務経験を持つ将来のSEsには、ADSは「防衛のためのシステムズエンジニアリング・トレーニング(Systems Engineering Training for Defence and Space, SET4DS)」を推奨しています。これは2週間のトレーニングで、システムズエンジニアリングの基礎に関する講義と、講義の内容を実践するためのショーケース・プロジェクトで構成されています。



エンジニアは随時、プロジェクトのニーズに応じて、プロセス、メソッド、ツール、テクニカルトピックス、スペシャリティエンジニアリングなどの個別のSE専門トレーニングを受講します。

ADSは7年程度の実務経験を持つ将来のシステムズエンジニアに対して、「システムズエンジニアリング・クオリフィケーション(SEQ)」を推奨しています。このプログラムは、エアバス・ディフェンス・アンド・スペース社の横断的なプログラムで、各1週間の6つの技術モジュールとオンライン技術レクチャー、各2日間の3つの社会スキルモジュール、キックオフイベント、最終プレゼンテーション、そしてSEQ受講生が並行して実施しなければならない実務プロジェクトで構成されています。SEQは指名制で、参加者はラインマネージャーとHRビジネスパートナーから指名される必要があります。

約10年の職務経験を経て、エンジニアは、アーキテクト育成パス(ADP)のいずれかに専門化することができます。

- 軍用機(Mil.A/C)&無人航空システム(UAS)アーキテクト育成パス：各1週間での11モジュール
- 宇宙システムアーキテクト育成パス：各3~4日での7モジュール
- システムオブシステムズ(SoS)アーキテクト育成パス：各3日および5日の2モジュール
- 個別に構成されたeラーニングとクラスルームトレーニングのセットであるコネクテッド・インテリジェンス・アーキテクト育成パス

すべてのADPは推薦プログラムとして募集しています。

最後に、経験豊富なSEs、リードエンジニア、チーフエンジニアが一堂に会する「システムズエンジニアリングの応用プラクティス」トレーニングワークショップでは、システムズエンジニアリングの将来のトレンドについて学びそして議論し、システムズエンジニアリングが他の産業でどのように適用されているかを理解し、自身のプロジェクトから取り上げるトピックについて議論する場となります。

付録C

士官専門軍事教育コンティニウム

米国国防総省は、キャリアの連続性を通じた士官トレーニングのモデルを構築しました。このモデルの基本的な考え方は、一般的な技術者、特にSEsの継続的教育にも容易に拡張できます。

教育 ↓	士官候補生(ミッドシップマン、カデット)の事前準備	O-1/O-2/O-3 初級	O-4 中級	O-5/O-6 上級	O-7/O-8/O-9 大將/元帥
教育機関とコース	サービスアカデミー ROTC OCS/OTS	・ ブランチ・ウォーフェア(Branch warfare) またはスタッフ専門学校 ・ 初級レベルのPME(Professional Military Education)コース	・ 航空指揮幕僚大学 ・ 陸軍司令部・参謀大学 ・ 海軍指揮幕僚大学 ・ 海兵隊指揮幕僚大学	・ 空軍大学 ・ 陸軍大学 ・ 海軍大学 ・ 海兵隊大学 ・ アイゼンハワースクール ・ 国立陸軍大学 ・ JFSC 統合および統合戦闘学校(Joint & Combined Warfighting School: JCWS)、AJPME ・ JFSC 統合高度戦闘学校(Joint Advanced Warfighting School: JAWS)	・ キャプストーン ・ 統合機能構成指揮官(Joint Functional Component Commander)養成コース ・ SIIOAC ・ JFOWC ・ PINNACLE
強調する戦いのレベル	すべてのレベルの概念認識	戦術	作戦	戦略	
軍事教育の焦点	・ サービスミッション入門 ・ 米国憲法 ・ 米国政府	・ 担当部門の専門分野 ・ 分野知識 (陸、空、海、宇宙、サイバー)	・ 作戦術の文脈での戦闘 ・ 戦域戦略、計画、NMS、NSS入門 ・ 全ドメインの中でのオペレーション上の戦術	・ サービススクール：戦略的リーダーシップ、NMS、戦域戦略 ・ NWC：NSS ・ アイゼンハワー リソースコンポーネントを重視したNSS ・ 全て：機関間連携; 国家連携オペレーション; 国家戦略レベルでの分野横断作戦	・ 統合事項と国家安全保障 ・ 機関間連携プロセス ・ 国家間連携オペレーション
キャリアを通じた能力開発	生涯学習スキル/自己啓発/高等教育 文化的な教育: 認識からコンピテンスまで				
ジョイントエンファシス (JOINT EMPHASIS)	統合(Joint)の入門 ・ 国家軍事ケイパビリティ(全分野)と組織 ・ 統合戦の基礎	統合(Joint)の意識 ・ 統合戦、分野横断 ・ 統合戦役 ・ 作戦の適応性	JPME Ph I ・ 国家軍事能力指揮体系と戦略的指導 ・ 統合のドクトリンとコンセプト ・ オペレーションレベルの戦争での統合と多国籍軍 ・ 統合の企画・実行プロセス ・ C2-ミッションコマンドを重視した統合 ・ 作戦の適応性	JPME Ph II ・ NDS、NSS、NMS ・ 統合戦、統合での戦域戦略/戦役、IA、政府間および国家連携環境 ・ 国家と統合の計画システムとプロセス ・ 統合、IA、政府間、国家連携のケイパビリティの統合 ・ デザイン ・ 戦略的適応性 JCWS	キャプストーン ・ NSS ・ 統合オペレーション上の戦術 ・ 統合機能構成 部員養成コース & JTOWC ・ NSS ・ 国家計画システムおよび組織 ・ JT、IA、政府間および多国籍環境における戦域戦略、戦役および軍事作戦 ・ IO PINNACLE
望ましいリーダー属性	1. 安全保障環境と国家安全保障手段の理解 2. 奇襲と不確実性を予測し、対応する 3. 変化を予測、認識し、変遷を主導する 4. 信頼、権限付与、理解による意図に沿ってオペレーションを行う 5. 軍人の職業に基づいた倫理的決定を下す 6. 批判的/戦略的に考え、軍事活動のあらゆるレベルで統合戦闘原則を適用する				

謝辞

This “White Paper” was compiled and edited by Prof. Dipl.-Ing. Heinz Stoewer, M.Sc. SAC GmbH, and TU Delft, and co-edited by David Nichols, JPL/Caltech.

Contributions from the Vision 35 Core Team: David Nichols, Paul D. Nielsen, Sky Matthews, Chris Oster, Chris Davey, Sandy Friedenthal, Garry Roedler, Taylor Riethle, Paul Schreinemakers, along with numerous comments from reviewers of the Vision 2035 drafts are much appreciated. Dana Nichols provided valuable editing and proofreading support.

Inspiring comments and suggestions to the first draft of this White Paper of June 2022 were received from many colleagues of the global SE community. These comments were greatly appreciated. Notably:

Prof. Eberhard Gill and Aldert Kamp, TU Delft; Prof. Olivier de Weck, MIT; Prof. Greg Parnell, University of Arkansas; Prof. Alex Levis, George Mason University; Prof. Yoshi Ohkami, Keio University; Prof. Dinesh Verma, Stevens Institute of Technology; Dr. Uwe Kühne, Christine Pohl-Winkelmann, Harald Diegruber, Airbus Defense and Space; Frederic Teston, ESA/ESTEC; Dorothy McKinney; Prof. Robert Kenley and Prof. Kirsten Davis, Purdue Univ.; Prof. Donna Rhodes, MIT; Marilee Wheaton, Aerospace Corp.; Bill Schindel, ICTT Systems Sciences, Prof. Marcello Roma, Univ. of Torino; Prof. Alessandro Golkar, TU Munich; William Miller, Stevens Institute of Technology; Tom Strandberg, Syntell; Kerry Lunney, Thales; et al.

参考文献

1. Y. N. Harari, “21 Lessons for the 21st Century”
2. W. Fruehwald & H. Poeppel, “Knowledge in the 21st Century” ISBN: 978-3-7705-3676-4
3. United Nations Sustainable Goals for 2030 sdgs.un.org/2030agenda
4. en.unesco.org/sites/default/files/2018-12-07_brussels_declaration.pdf
5. Industry 4.0, original Acatech report: bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie40.pdf
6. Society 5.0, e.g. researchgate.net/publication/330500307_Japan%27s_Society_50_Going_Beyond_Industry_40
link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2989-4_7
7. incose.org/products-and-publications/competency-framework
8. edglossary.org/21st-century-skills
9. List of Universities offering a Systems Engineering curriculum. en.wikipedia.org/wiki/List_of_systems_engineering_universities
10. Derro, Mary & Williams, Christine. (2009). Behavioral competencies of highly regarded systems engineers at NASA. 1 - 17. 10.1109/AERO.2009.4839712.
11. US DoD Officer Professional Military Training Policy, CJCSI 1800.01F, May 15, 2020. jcs.mil/Portals/36/Documents/Library/Instructions/CJCSI%201800.01F.pdf
12. SERC (Systems Engineering Research Consortium) Digital Engineering Competency Framework (DECF) sercuarc.org/decf-review/
13. HELIX/ATLAS. Characteristics of Highly Valued Systems Engineers: [urldefense.us/v3/_helix-se.org/_!!PvBDto6Hs4WbVuu7Id4jHk9ZTy0WCKu320ImH5MGZK_nrfuNliQBuxJEw_3UeT2S_1dkNAjc6_HhNWGN4nsd92lnWYQ\\$](https://urldefense.us/v3/_helix-se.org/_!!PvBDto6Hs4WbVuu7Id4jHk9ZTy0WCKu320ImH5MGZK_nrfuNliQBuxJEw_3UeT2S_1dkNAjc6_HhNWGN4nsd92lnWYQ$)
14. INCOSE SysTEAM Initiative incose.org/system-team-initiative

背景理解のための文献

1. NAE Grand Engineering Challenges engineeringchallenges.org/challenges.aspx
2. WEF_Future_of_jobs_2020.pdf and weforum.org/agenda/2021/01/davos-agenda-2021-society-and-the-future-of-work-skills-gap-jobs-of-tomorrow-diversity-inclusion-worker-well-being/jteg.ncms.org/wp-content/uploads/2019/02/JTEG-USAFDigitalEnterprise-Harmer-003.pdf
3. Brynjolfsson and McAfee (2014), For further reading on sharing tasks between humans and machines see also (WEF_Future_of_jobs_2020.pdf) Figure 21 et al
4. MIT System Design and Management Program sdm.mit.edu

5. SpaceTech Masters Programme, Technical University of Graz, Austria, tugraz.at/en/studying-and-teaching/degree-and-certificate-programmes/continuing-education/part-time-masters-programmes-and-university-programmes/space-systems-and-business-engineering-spacetech
6. USC – Boeing Engineering Management and Systems Engineering Program emse.mst.edu/boeing
7. E. Gill, G. Chiocchia, B. Escudier, M. Lisi, H. Stoewer, F. de Bruin – Integrated Postgraduate Space Education and Training, International Conference of Education, Research, and Innovation (ICERI), Madrid, Spain, 17-19 November 2008
8. H. Stoewer, Space Systems Engineering, The Key Discipline for Successful Products from Space – SpaceTech, a new international postgraduate Masters of Space Systems Engineering Programme, Academic Forum of the 6th Annual International Symposium of INCOSE at the MIT, Cambridge, July 18, 1996
9. H. Stoewer, End-to-End Systems Engineering: The Key to Successful Products and Services, INCOSE INSIGHT Magazine, Spring 1999
10. Airbus Defense and Space: Dr. Uwe Kuehne, Dr. Colin Hamilton, Dr. Stefan Brueggemann – Introducing Agile Methodology into advanced Systems Engineering Training – Regular paper for ERTS 2020, published on HAL Archive
11. INCOSE Graduate Reference Curriculum for Systems Engineering (GRCSE) incose.org/products-and-publications/se-graduate-reference-curriculum
12. SE Education and the worldwide Directory to SE education; incose.org/academic-affairs-and-careers/se-education
13. ABET criteria and accreditation of Systems Engineering abet.org/accreditation/accreditation-criteria/criteria-for-accrediting-engineering-programs-2020-2021
14. Aldert Kamp, TU Delft: Navigating the Landscape of Higher Engineering Education – Coping with decades of accelerating change ahead, (ISBN: 978-94-6366-242-0, Delft, April 2020) and aldertkamp.nl
15. The University of the Future (2019), Dan Remenyi, Kenneth A Grant, Shawren Singh (Editors); | ACPII; 2. Edition (6. August 2020), ISBN-10: 1912764652; ISBN-13: 978-1912764655
16. CNN Money survey of 2009 money.cnn.com/magazines/moneymag/bestjobs/2009/snapshots/1.html ranked system engineers from amongst 50 most desirable jobs in America as the number one!
17. Global Employability Skills. www.researchgate.net/profile/Isra-Sarfraz/publication/324579805_An_exploration_of_global_employability_skills_a_systematic_research_review/links/5b9f00de299bf13e6037c57e/An-exploration-of-global-employability-skills-a-systematic-research-review.pdf
18. SE for Public Infrastructure. www.nyas.org/media/24240/nyas-infra-arch-framework-v10-1.pdf
19. ESI is an innovation research center that addresses Systems Engineering Education esi.nl

写真・図版一覧

Page i: Sustainable Goals ©United Nations. Augmented Engine ©Gorodenkoff /Shutterstock. Car- Courtesy of BMW **Page ii:** Engineer Team ©Gorodenkoff/Shutterstock, **Page 1:** Sustainable Goals ©United Nations. **Page 2:** Industry 4.0 ©Taylor Riethle. **Page 4:** Digital Cloud©Blackboard /Shutterstock. Global Communication ©TechSolution /Shutterstock **Page 5:** Car-Courtesy of BMW **Page 8:** Mars Descent-Courtesy of NASA. **Page 11:** Girl Learning ©Metamorworks /Shutterstock. **Page 12:** Computer Baby-AFIS **Page 13:** Capstone Robot- UCF Senior Design Showcase. All other royalty free images courtesy of Pixabay, Unsplash, and Pexels.

未来のシステムズエンジニアリング人材の育成

原文タイトル: BUILDING THE SYSTEMS ENGINEERING WORKFORCE OF THE FUTURE

2024年7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 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。

