

# 未来のイノベーションを牽引する システムズエンジニアリング

## German Industrie 4.0の事例から

Fraunhofer IESE **Dr. Jens Heidrich**<sup>※1</sup>Fraunhofer IESE **Dr. Martin Becker**<sup>※2</sup>Fraunhofer IESE **Dr. Thomas Kuhn**<sup>※3</sup>Fraunhofer IESE **Dr. Thomas Kleinberger**<sup>※4</sup>Fraunhofer IESE **Dr. Markus Damm**<sup>※5</sup>Bosch Rexroth **Anne Duell**<sup>※6</sup>

### 1 要約

デジタル化に向けた一般的な傾向により、システム開発に関する様々な課題に取り組む必要が生じている。自動運転、Industrie 4.0（ドイツが推進している製造業の高度化）、IoT（Internet of Things:モノのインターネット）、ビッグデータでは、ソフトウェアがイノベーションを牽引している。そのことから、ハードウェア及びソフトウェア開発プロセスを一体として理解することが効率的なシステムズエンジニアリングの基本的な前提となっている。このようなソフトウェア・エンジニアリングからシステムズエンジニアリングへの移行というトレンドが、従来の領域を超えて統合されている。本稿では、今後の製品トレンドに対応するためにはなぜ、システムズエンジニアリングが重要なのかを説明する。そしてFraunhofer IESEによるシステムズエンジニアリングについての調査結果を詳細に検討し、システムズエンジニアリングの実践において企業が直面している課題、及びそれに対処するために使用している技法、手段、ツールなどに関するベストプラクティスを明らかにする。最後に、Industrie 4.0のための共通プラットフォーム開発を目指すドイツの実施プロジェクトの具体的な例を紹介し、いかにシステムズエンジニアリングの持つ機能性がイノベータティブなシステムソリューションの実現に役立つかを示す。

### 2 はじめに

すべての適用業務領域においてデジタル化が進んでい

る。製造分野では、IoS（Internet of Services：サービスのインターネット）と、「スマート」オブジェクト（マシンや製品）を含むIoTを組み合わせることでパラダイムシフトが起き、Industrie 4.0として知られている第4次産業革命と認識されている。ネットワーク接続され、サイバー環境で相互に連携する物理的な製品の統合によって、イノベーションが期待できるため、今後は製品の製造方法だけでなく、製品そのものや関連するビジネス・モデルも変化することになるだろう。

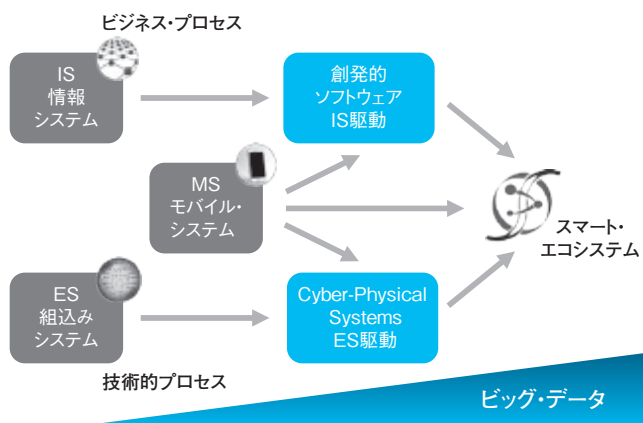


図1 スマート・エコシステムに向けたトレンド

スマート製品のライフサイクル全体を通してこの種のアプローチや技術の導入が増えているため、ハードウェア中心の開発や製造プロセスを適用している企業は、拡大するデジタル市場で生き残るために、ビジネス戦略の再考と、組織能力強化が必要になっている。一方、ソフトウェア開発やソフトウェアプロビジョニング分野に強い企業にとっては、これは大きな可能性を意味している。従来

- ※1 ドイツ フラウンホーファー研究機構 実験的ソフトウェア工学研究所 (IESE)にて、プロセスマネジメント領域の部門長を務めている。システムとソフトウェア・プロセスの改善についての研究・教育を行っている。
- ※2 同研究所組込みシステム・エンジニアリング部門責任者。組込みシステムアーキテクチャ、モデルベースのアプローチ、バリエーション管理についての研究を行っている。
- ※3 同研究所組込みソフトウェア部門責任者。組込みソフトウェア・アーキテクチャと仮想エンジニアリングについての研究を行っている。
- ※4 同研究所組込みシステム部門のプロジェクト・マネージャ。システム要求エンジニアリングについて研究している。
- ※5 同研究所組込みソフトウェア部門のプロジェクト・マネージャ。組込みソフトウェア・アーキテクチャと仮想エンジニアリングについて研究している。
- ※6 ボッシュ・レックスロス社において、コンピューター技術者としてテクニカル・ソリューション アーキテクト兼システムエンジニアの任にあり、製造IoTでのコンセプト開発とユースケース実装を担当している。

からあるITやソフトウェア企業は、製品ポートフォリオを拡大して市場に参入し、従来のソフトウェアとサービス製品を物理的な製品と組み合わせるようになるだろう。

## 2.1 スマート・エコシステムに向けたトレンド

最終的には、Industrie 4.0によって、現在ほとんどが閉ざされた環境にある製品やシステムは、高度に統合されたSoS (systems of systems)に移行することが予想されている。これはスマート・エコシステムと呼ばれ、組込みシステム、情報システム、モバイルシステムが融合し、ランタイム時に新しいサービスを生成するようになる(図1参照)。この市場への新規参入も増えるだろう。提供する製品やサービスの互換性と柔軟性が、主なビジネス推進要因となる。

スマート・エコシステムに主要な情報システムを統合し、組込みシステムによって異なる組織の技術目標を達成することで、ビジネス目標を達成する。このようなシステム統合を推進するトレンドは、自動車業界(Car-2-X通信やSmart Mobilityなど)、エネルギー業界(スマート・グリッドやSmart Energyなど)、医療技術(Smart Health)、農業技術(Smart Farming)、その他多くの分野で見ることができる。

## 2.2 システムズエンジニアリングの必要性増加

相互接続とネットワークキングの増加は、イノベーションの主要な要因で、成功持続のためにも重要である。潜在的なイノベーションを推進するためには、組織の境界を超えて、ハードウェア(機械、電気、電子)とソフトウェアのエンジニアが統合したチームとなり、緊密に連携していくことである。

ただし現実的には大きな課題もある。エンジニアリング領域ごとに異なるエンジニアリングアプローチを適用しており、それぞれがばらばらに機能するからである。更に、将来的なシステムには典型的な特性があり、適切なシステムズエンジニアリングの実践によってこれに対処しなければならない。(a)今後、システムの複雑性は引き続き高まるにつれ、たとえば、テキストによる記述ではなく、モデルベースのエンジニアリングアプローチの適用、適切なシステム要求のエンジニアリング、柔軟性の高いスケーラブルなアーキテクチャ、成熟したシステム開発プロセスなどが必要になる。(b)将来的なシステムは多種多様なシステムと、異なる企業や様々な領域のステークホルダから構成され、これらを統合する必要がある。これには、例えば、統合を簡単にする相互に運用可能なアーキテクチャ、インターフェースの標準化、QoS (Quality of Service: サービスの品質)保証が必要になる。(c)将来的なシステムは、環境の変化や新しいステークホルダに対応できなければならない。そして彼らとの付き合い方も、時間の経過と共に変化する可能性がある。そのため、例えば、順応性の高いシステム、運用時に所定の品質(システムパフォーマンス、機能上の安全性、セキュリティ、プライバシーなど)を認定する機能、シミュレーションと仮想開発アプローチによって、開発時間とラン

タイムの連携を密にする必要がある。(d)非常に重要な組込みシステムを機密情報システムに統合する場合、結果的に構成されたシステムは、機能安全とセキュリティ上の問題に同時に対応しなければならない。このような対応が行われていない場合は、セキュリティ障害によって安全上の問題が発生する。そのため、例えば、セキュリティと機能安全に同時に対応する統合モデルが必要になる。(e)複雑性が急激に高まる中、システムの可用性を維持する必要がある。明確なユーザエクスペリエンスを保証するためには、システムとユーザインタラクションの統合戦略が必要になる。(f)スマートデータを使用することで、将来的なシステムは自動または半自動で機能するようになる。これには、例えば、高度な人工知能と、各システムの順応性が必要になる。(g)将来的なシステムのインテリジェンスは、異なる情報源から正しいデータに接続し、適切に分析して、モデルを構築することによって得られる。例えばそのためには、一方で確かなレベルの品質のデータを収集しながら、他方では個人のプライバシーを保護するための強力なメカニズムを導入する必要がある。

専門的なアプリケーション領域内のシステムズエンジニアリングコミュニティは、各分野で総合的なアプローチを推進する有望なアプローチ、技法、ツールを提供している。この種のアプローチを導入することで、開発する製品やサービスだけでなく、対応する開発プロジェクトや組織全体にも対応できる。従ってシステムズエンジニアリングは、将来的な製品開発のイネーブラとみなすことができる。

## 3 システムズエンジニアリングのベストプラクティスに関する研究

システムズエンジニアリングに関する様々なトピックについて、各種文献が提供されている。例えば、参考文献[1](以下[1]と表記)はモデルベース・システムズエンジニアリング(MBSE)技法を中心に書かれたもので、企業が使用している主なアプローチに関する調査結果も示している。[2]では、プログラムマネジメントとシステムズエンジニアリングの統合について調査している。3,000人のシステムエンジニアと5,000人のプログラム・マネージャを対象に、組織内におけるこの2分野の統合状況について調査した。[3]では、33人のエキスパートヘインタビューを行い、システムズエンジニアリング産業界での実践について調査している。システムズエンジニアリングの持つ能力と活用度合について確認することが、この調査の目的としている。[4]では、企業のシステムズエンジニアリング能力とプロジェクトパフォーマンスの関連性を示す証拠を得るため、システムズエンジニアリングによる効果を調査している。

ここで参考文献について言及する。本調査はFraunhofer IESEに対しIPA/SECから委託研究として実施したものである。

2016年6月から8月にかけて実施された[5]の調査は、ドイツ・欧州企業におけるシステムズエンジニアリングの実施状況について調査したものである。これに基づき、ベスト・プラクティスの観点から課題とソリューションアプローチについて分析している。最終的には18の企業に属する20人へインタビューを実施できた。このうち6つの組織／部門は中小企業、14は大規模な組織と分類された。この調査では複数のドメイン(業種や分野)を対象としており、単一のドメインに特化したものではなく、また大企業だけでなく中小企業も対象としている。この調査はベストプラクティスに関する情報を収集する目的で行ったため、過去のコラボレーション経験から、システムズエンジニアリング分野に積極的な企業に参加を募った。ドイツ・欧州すべての企業の状況を総合的に把握するための調査ではないが、調査結果から、システムズエンジニアリングに積極的な企業が直面している課題や、ベストプラクティスとして確立した分野を知ることができる。

### 3.1 今後の製品とシステムズエンジニアリング

- (1) 企業はシステム要件の複雑化(60%が指摘)と、顧客の要望に応えるために、製品バリエーション(多様性)がかつてないほど増加していること(50%が指摘)に直面しており、更に商品化のスピードアップ(55%)も加わることで、現在のシステムズエンジニアリングに大きな負荷がかかっている。
- (2) 全体の85%以上の企業が、ソフトウェアが自社製品において大きな役割を担っていると回答している。回答者の約70%は、もともとはハードウェア開発出身である。更に、85%の企業が開発予算の30%以上(最も多い回答は90%)をソフトウェア開発に費やしていると回答した。
- (3) システムズエンジニアリングの重要度合を1(重要ではない)から10(企業存続に不可欠)で評価した結果、平均は7.6だった。そして今後5年の間に8.7に増加する見込みという回答であった。ほとんどの企業は、重要性が高まった理由として、顧客が更なる高品質な製品を求めるようになったことと、製品の複雑性が上がっていることを同時に挙げている。

### 3.2 エンジニアリングにおける課題

- (4) 80%の回答者が、変化に対応できる組織改革が最大の課題だと答えており、その次に複雑な要件とインターフェースの管理を挙げている(SoS: system of systemsの場合は特に)。
- (5) 適用しているプロセスモデルに関しては、中小企業と大規模組織合わせて45%以上が、アジャイル・モデルを採用していると回答している。一方、大規模組織の50%以上では、ウォーターフォール・モデル、または反復型のウォーターフォール・モデルが採用されている。
- (6) 企業規模に関係なく、あらゆる組織でシステムズエンジニアリングプロセスには多くの部門や該当する

ステークホルダーが多数関わっていると回答している。「システムエンジニア」の明確な役割は、大規模組織でのみ定義されている。また、60%~70%の企業が合同チームを確立し、ワークショップやミーティングを一緒に開催して調整を行っている。

- (7) 60%近くの組織は、製品部品を社外から調達している割合が25%未満である。それでもなお、3分の1の組織では社外調達率が最大50%に上っている。しかしながら社外で調達したコンポーネントの知的財産の重要度合は、平均的にかなり低い。

### 3.3 エンジニアリング・ソリューションのアプローチ

- (8) 既に確立されているプラクティスの中で(図2参照)、50%以上の企業が挙げた方法、技法、アプローチは、モデル駆動開発、要求開発、テスト駆動開発、システム検証と妥当性確認に関連していた。1つ以上の組織が言及したその他のプラクティスには、統合ツールチェーン、仮想開発、そして全体論的システムアーキテクチャが含まれている。大規模組織はモデル駆動開発(60%が選択)と検証と妥当性確認(80%が選択)が中心だが、中小企業の約80%が最も確立された実践としてテスト駆動開発を選択した。
- (9) 回答者の大半が、システムズエンジニアリングの実施で影響を最も受けているのが、技術及びソフトウェアの実装エンジニアリング・プロセス分野(ISO/IEC 15288及び12207)だと回答した。
- (10) 80%以上の回答者が、UMLを主な仕様言語として挙げた。大規模組織は、SysMLをシステム・モデリング用の言語として使用する傾向がある。更に、ドメインに特化した言語についても広く言及している。挙げられたシステムズエンジニアリングツールの50%以上は、システム全体、またはソフトウェアの異なる部分をモデリングするためのものだった。40%近くは、近い将来、非形式的なテキストによる仕様の代わりに、形式手法とモデルベースのシステム開発アプローチを導入する予定だと回答した。

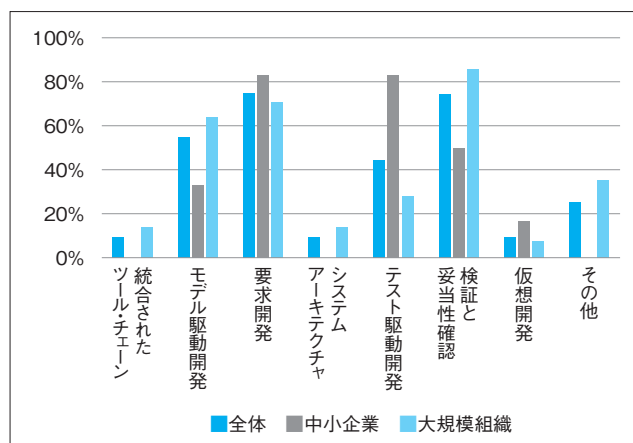


図2 確立されたシステムズエンジニアリングの実践

### 3.4 将来的な方向性と能力構築

- (11) システムズエンジニアリングにおいて最も改善が期待されるものは、仮想開発と、使用するツールチェーンの統合強化で、回答者の50%がこの2つを挙げた。中小企業のほうがこれらに対するニーズが高いようである。大規模組織の40%近くは、プログラムマネジメント(プロジェクトポートフォリオマネジメント)の改善も挙げていた。
- (12) 大半の企業が社内外のトレーニングプログラム(社内は100%近く、社外も60%以上)を活用して、システムズエンジニアリング能力を高めていることが分かっている。更に、回答者の50%以上が、国際的なシステムズエンジニアリングカンファレンスへの参加を挙げた。

### 3.5 企業向けのアドバイス

以上12項目の主な調査結果に基づき、システムズエンジニアリングに取り組んでいる組織に対して、いくつかのアドバイスを行うことができる。(A)組織改革については、企業は適切な組織改革戦略を確立して、システムズエンジニアリングの実践方法を導入する必要がある。この戦略は、企業のビジネス及び組織目標と、それら目標達成のためにシステムズエンジニアリングがどのような機会とメリットをもたらすことができるのかによって決定し、推進する必要がある。不足している能力に関しては、システムズエンジニアリング全般と、とくにソフトウェア・エンジニアリング能力が挙げられ、これらの向上が必要なが分かった。とくに大規模組織は、異なるシステムズエンジニアリングプロジェクトのポートフォリオ管理方法についても検討しておく必要がある。(B)技術的な開発に関して、企業はシステムズエンジニアリングのアプローチとプロセスを開発し、すべてのステークホルダも含めて統合する必要がある。とくに要求開発、モデル駆動開発、そしてシステム検証と妥当性確認の分野において、プラクティスの確立を検討する必要がある。より高度な企業は、正しいモデルに基づき仮想開発の分野で実践を確立し、統合されたシステムズ開発のツールチェーンを提供する必要がある。

## 4

### アプリケーション領域としての Industrie 4.0

Industrie 4.0は第4次産業革命である。第3次産業革命では、製造の機械化、大量生産と組み立てライン、そしてコンピュータ化とオートメーションが始まった。第4次産業革命のポイントは、製造システムと製造ラインのネットワーク化である。そうして誕生したスマート製造システムは、システムリソースのオーバーヘッドを抑えて変更することができる。そのため、Industrie 4.0の主な推進要因の1つになっているのが、個別化した製品の大量生産だ。

これにより、カスタマイズされた大量生産品を、カスタマイズしていない製品と同じ価格で製造できるようになる。

これを達成するためのIndustrie 4.0環境の主要機能の1つとして、製造変更機能が挙げられる。つまり、事前に予定された変更だけでなく、製造環境における予定外の変更にも確実に対応することができる機能である。Industrie 4.0では、ネットワークに接続されたデバイスによってこのようなニーズに対応している。この種のデバイスは、提供されたサービスを、標準化されたエンティティやオブジェクト・モデルで記述し、インスタンスのプランニングによって、最適な製造ラインに関する決定をすぐに下すことを可能にする。選択した製造ラインは必ずしも物理的に同一の場所になくてもよく、同じ工場や企業にすら属している必要がない。従って、物流業者、工場、企業を網羅したデータの相互のやり取りが必要になる。

これはIndustrie 4.0に関連する次の3つの大きな課題につながる。第1に、データとサービスを標準化された方法で記述する、共通のインターフェースの定義が必要である。Industrie 4.0コミュニティでは、管理シェル(Administration Shell)とデジタル・ツインズ(Digital twins)という用語が登場するが、いずれも製造に必要と判断したエンティティをデジタル化して定義したものである。管理シェル/デジタル・ツインズでは、その名が示す通りで、リアルタイムデータを持つ現実のデバイスと、複数の工場にまたがる製造ジョブのプランニングに必要な仮想モデルの両方にアクセスできなければならない。これは、分散化された製造にはデータ・セキュリティが必要だという、Industrie 4.0の2番目の課題につながる。本番プランニングシステムのプランニング対象が複数の企業の場合、サプライヤや、場合によっては競合他社のデータが必要になる場合がある。このデータの所有権とアクセス権は明確に定義しておき、Industrie 4.0プラットフォームでは、データ所有者が自身のデータを常に制御していることを保証する必要がある。更に、プラットフォームは強力なセキュリティメカニズムを実装し、データの盗難や許可なく変更されることがないようにする必要がある。そして、製造ラインを移動するための技術的な機能が、Industrie 4.0の第3の課題となっている。製造制御コードは現在、特定の製造ラインに合わせて詳細にカスタマイズされている。このラインを変更するには手間と時間がかかり、物理的に同一ではない別なラインへの移動はほぼ不可能だ。理由の1つは、製造制御コードが非常に低いレベルで実行しており、実際のハードウェアをほとんど理解していないという点にある。効率良く製造環境を変更するために、Industrie 4.0プラットフォームは、リアルタイムパフォーマンスと柔軟性は提供しているものの、ハードウェアへの依存度が低い製造制御コードをサポートする必要は残っている。

上記のようなIndustrie 4.0における3つの課題を解決するには、業界内の多くのステークホルダ、研究機関、大学が関与する手間のかかる作業が必要になる。これは難しい課題だが、取り組む価値がある。アナリストは、

2013年から2025年の間に、第4次産業革命によってドイツにおける生産性が23%高まると予測している<sup>[6]</sup>。

Industrie 4.0におけるドイツのフラグシップ・プロジェクトの1つが、BaSys 4.0プロジェクト<sup>[6]</sup>である。これは、Fraunhofer IESEがコーディネーションを行い、Industrie 4.0プラットフォーム戦略の一環として、ドイツ連邦教育研究省(German Federal Ministry of Education and Research: BMBF)が出資したプロジェクトである<sup>[7]</sup>。12の著名な産業及び科学パートナーから構成され、Industrie 4.0の基本システム開発を目指している。そのコンセプトは自動車業界のAUTOSARプラットフォームに似ているが、Industrie 4.0デバイスの基本サービスを提供する。BaSys 4.0の目的は標準と、オープン・ソースのリファレンス・ソフトウェア実装の両方を開発することにある。これによって、中小企業だけでなく大規模組織によるIndustrie 4.0の使用を促すことができる。

## 5 Industrie 4.0の実践的ユースケース

ボッシュ社(Robert-Bosch GmbH)は、BaSys 4.0開発において重要な産業界パートナーの一社である。提供されたユースケースセットに、多目的製造ラインの一つの可能性として、多品種製造ラインへの改良に焦点を当てたものがある。

大量生産ラインが、相反する少量ロットの製造に対応するためには、多品種製造ラインへの改良に向けた基本的アイデアである「製造での柔軟性をより高めること」が必要である。ボッシュ・レックスロス社(Bosch Rexroth)では、ハンブルグの工場に合計200品種以上になる6つの異なる製品群を組み立てるラインを構築した。そこでは、たとえロットサイズが1個であったとしても対応できる。個々の製造部品はRFID技術を使って、部品自体が通るべき複数の組み立て工程を正しく通るようガイドしながら製造される。それぞれの組み立て工程では、製品タイプ、組み立ての進捗状況、品質情報を問いながら、固有の要件に沿うよう製造していく。もし、とある工程の品質ゲートをパスできなかった場合、その工程は自動的に停止され、パスできるまで改修が要求される。この“ペーパーレス工場”は、MESシステムとERPインターフェースを用いた縦統合によって実現するコンセプトである。

この実装は、最先端の製造の姿を示すと同時に、常に要求が変わるといふ選択されたアーキテクチャの不都合さを示す。例えば、新しい製品やツール、もしくは製造機器が加わることで、すべてのソフトウェアに対応しなければならない労力、最悪の場合ダウンタイムが発生する。製造工程のオートメーション部分、ツールのインターフェース、MESの作業計画、その他あらゆる更新が必要になる。それらを解消するための大きな要求として、製造にかかわる機器類の“Plug-&Produce”機能による多目的製造機器の優れた柔軟性の確立が挙げられる。

一つの方向性として、直接の機器間通信がある。それにより製造工程での部分的変更が可能になり、製造上の集中管理の必要もなく、より柔軟な生産量を製造できるようになる。しかしながら、機器間通信に関するデータモデルの標準化の不足と、合意されているPeer-to-peer通信標準の不足により今日に至るまで実現はされていない。

BaSys 4.0において、多品種製造ラインに関するこのユースケースは、製造工程内のすべての機器へのAdministration Shell (BaSys 4.0で仕様化されている実機と仮想空間をつなげるCPS)の実装を示している。このAdministration Shellは、Digital twins技術として知られているIndustrie4.0の主要コンセプトであり、機器間通信を可能にするイネーブラーである。このAdministration Shellは、通信にかかわる機器、オーダー、作業員、製造される製品など、それぞれのエンティティ(実体)の仮想化された代理人である。ある製造部品が、Industrie4.0多品種製造ラインを通過する場合、その部品の仮想化されたDigital twin(双子の片割れ)が、その部品に関するすべての情報を一緒に運んでいく。この情報には、組み立て完了までに必要な製造工程、設計図、CADデータ、その他製造に必要なデータが、この部品の品質データと共に含まれている。このDigital twinは、実部品(物理的)とリンクしており、もしこの部品が新しい製造機器に投入された際、この部品のDigital twinはすぐさま存在し、例えば、その製造機器から直接この部品の品質情報の問い合わせが可能になる。Digital twins技術では、自身で書き込みができ、実体の属性、提供するサービスなどの情報を、機器が判読できる様式で提供される。機器が以前使用された機器と同型かどうか、製造者が同じかどうかなどは、Digital twinsにとっては一切関係なく生成される。

Administration Shellは、何度でも即座に生成される。多品種製造ラインの場合、ある部品を使って製造する予定の作業台は、まだ実製品が他の製造工程で使用されていたとしても、即座にその部品のAdministration Shellにアクセスできるようになっている。Administration Shellのインスタンスはネットワーク化されており、ひとつのインスタンスの属性が変更されても、すべての他のインスタンスに伝達される。よって実製品の流れに沿うように直接機器間通信を可能にしている。

Digital twins技術の実現には、製造ラインの高度なネットワーク化が要求される。機器間の通信には標準化が必要であり、物理的ネットワークのインフラ支援が必要である。Administration Shellを実現するIndustrie4.0の通信プロトコルは、既存通信技術の上に実装される必要がある。かつ合意されたサービス品質の定義に従ったリアルタイム性のある通信をサポートしている必要がある。更に、同時にベンダー非依存のデータモデルでなくてはならない。

Industrie4.0のもう一つの方向性は、製造工程での迅速な変更をサポートすることである。今日の多品種製造ラインでの更新作業は、すべての機器の更新作業とテスト

## 6 結論

が完了するまで、製造を一旦止めなければならない。更新後ソフトウェアの不具合が発見された場合、不具合が修正されるまで、以前の状態に戻す必要がある。テスト作業についても、しばしば多品種製造ラインの実作業台で実施されるため、更新作業期間を極端に長くしている。Industrie4.0では製造工程及び対象となる機器の仮想化によって、この問題に取り組んでいる。Digital twins技術は、単に機器や部品の現状を問い合わせるためだけに使われるのではなく、シミュレーション・モデルともリンクしている。使われているシミュレーション・モデルに従って、Digital twinsは、振る舞いやインターフェースを確認する機能シミュレーション、あるいは物理シミュレーションとして、ロボットの不適切な動きのような物理的欠陥を見つけることを可能にする。このことから、製造工程でのソフトウェア更新のテストに際し、実製造ラインや製造工程に適用する前に、仮想製造ラインで検証できることになる。また製造工程の最適化を仮想化で行えるようになる。

このシステムズエンジニアリングのユースケースでは、次のような異なる要求にも取り組んでいる：

- 製造における機器の仮想化は、製造工場の複雑さを管理する最適化アルゴリズムを持つ自己拡張型工場モデルの策定や、工場スタッフの判断を支援するシミュレーション・モデルを提供するのに役立つ。企業内での仮想化では、データ・セキュリティや機密保全の考慮の必要性が挙げられている。
- 多品種製造のスケラビリティや割り振りを、複雑な製造エコシステム内での容易な実装を可能にするアプリケーション。理想的には、実装の労力をとって代わるソフトウェア・コンポーネントの自動構成である。

この記事では、デジタル化やシステム統合の増加といった将来的なトレンドに対応するための、システムズエンジニアリングの重要性に着目した。システム・エンジニアリングは、将来的なシステムで一般的になるだろうシステムの複雑性、多様性、ランタイムにおける不確実性、安全性とセキュリティ脅威の合致、優れたユーザエクスペリエンス、自律機能の強化、そしてデータ駆動性といった特性に対応することができる。システムズエンジニアリングに関する12の主な調査結果に基づき、企業は2つの基本的なアクションが必要であることが分かった。1つ目は、組織改革戦略の確立や、一般的なシステムズエンジニアリング適用能力の強化など、組織変更の必要性だ。2つ目は、統合システムズエンジニアリングプロセスの確立、手法、技法、ツール専用分野の実装など、技術的な変更の必要性だ。具体的には、システム要求開発、モデル駆動開発、システムの検証と妥当性確認などが挙げられる。Industrie 4.0により、デジタル化とシステム統合の増加トレンドが明確になった。これは開発時に設計されるスタティックなソリューションから、ランタイムに自動的に調整及び最適化されるダイナミックなソリューションへの移行を意味している。工場における製造ラインの可変性を示した具体的な使用事例からも分かるように、将来的な製品イノベーションを成功、実現させるためには、システムズエンジニアリングの適用能力とその進化が不可欠だ。

### 参考文献

- [1] J. A. Estefan著、『Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies (モデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE) 技法の調査)』、INCOSE MBSE Focus Group, 2007年。
- [2] E. Conforto, M. Rossi, E. Rebertisch, J. Oehmen, M. Pacenza共著、『Survey Report : Improving Integration of Program Management and Systems Engineering (調査報告書：プログラム管理とシステムズエンジニアリングの統合強化)』、PMI及びINCOSE, Philadelphia, 2013年。
- [3] P. D.-I. J. Gausemeier, R. Dumitrescu, D. Steffen, A. Czaja, O. Wiederkehr, C. Tschirmer共著、『Systems Engineering in industrial Practice (インダストリアル・プラクティスにおけるシステムズエンジニアリング)』、Heinz Nixdorf Institute, Fraunhofer Institute for Production Technology, Unity AG, 2015年。
- [4] J. P. Elm, D. R. Goldenson共著、『The Business Case for Systems Engineering Study : Results of the Systems Engineering Effectiveness Study (システムズエンジニアリングのビジネスケース調査：システムズエンジニアリングの効果に関する調査結果)』、Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, AESS, NDIA, 2012年。
- [5] J. Heidrich, B. Tanveer, R. van Lengen, T. Kleinberger, L. Gorodilova, T. Kuhn, M. Becker, T. Bauer, A. Morgenstern共著、『Systems Engineering Booklet 2016 : Challenges and Best Practices (システムズエンジニアリングブックレット2016：課題とベストプラクティス)』、Fraunhofer IESE, Kaiserslautern, 2016年。
- [6] S. S. D. M. Wilhelm Bauer著、『Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland』、BITKOM, Fraunhofer IAO, Germany, Berlin, Stuttgart, 2014年。
- [7] 『Base System for Industrie 4.0 : Project Page (Industrie 4.0の基本システム：プロジェクト・ページ)』、Fraunhofer IESE, Fraunhofer-Gesellschaft, Germany, [オンライン]。以下に掲載：<http://www.basys40.de/>。[2016年12月2日にアクセス]。
- [8] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWiE) 及びFederal Ministry of Education and Research (BMBF)、『Plattform Industrie 4.0』、2016年9月23日。[オンライン]。以下に掲載：<http://www.plattform-i40.de>。
- [9] 『Functional Mock-up Interface (FMI) (機能モックアップインターフェース)』、Modelica Association, Sweden, [オンライン]。以下に掲載：<https://www.fmi-standard.org/> [2016年12月2日にアクセス]。