

[スマートファクトリーは工場の何を変えるのか?]

# ① 工場のスマート化を実現する 最新の FA 技術と取り組み



楠 和浩 三菱電機（株）情報技術総合研究所



## スマートファクトリーとは何か

スマートかどうかは別にして、ファクトリー（工場）と聞いて、皆さんは何を想像するだろうか？

ある人は、たくさんの作業者が、流れてくる自動車にドアや内装を装着しているような自動車工場（最終組み立て工程）を思い浮かべるかもしれない。あるいは、同じ自動車でも、塗装ロボットが自動車のボディを囲んで塗料を吹きかけているような場面を想像するかもしれない。また、人によっては、真っ赤な鉄が流れていく工場（鉄鋼の圧延ライン）を思い浮かべるかもしれないし、いわゆる家族経営で営まれているような金属加工工場を想像する人もいるかもしれない。

このように、製造する製品によって、製造設備も違えば製造の仕方も異なる。また、最終製品は同じでも、その途中工程で使われる機器や装置などがまったく違うのは当然である。

2011年にドイツで提唱されたインダストリー 4.0 を契機として、また、最近では製造業 DX と絡めた話題として、「スマートファクトリー」という言葉は、さまざまな場面で取り上げられている。しかしながら、先に示した通り、ファクトリー（工場）はさまざまであり、結果、スマートファクトリーの定義は難しく、実は公式な定義は存在していない。

さまざまな論文や記事で議論がなされているが、ここでは、デロイトトーマツ合同会社の Deloitte

University Press 「The smart factory」において定義された下記を「スマートファクトリー」の定義とする。

「スマートファクトリーとは、広範なネットワークで自らパフォーマンスを最適化し、リアルタイムまたは、ほぼリアルタイムで新たな状況に自ら適応して学習をし、自律的に生産プロセス全体を動かすことができる柔軟なシステムである」

しかしながら、この定義は一般的な概念としてスマートファクトリーを定義しており、したがって、この定義を基に関係する技術、あるいは標準化などに関する議論をしようとするると混乱が生じる可能性がある。つまり、全体概念としてはスマートファクトリーに関係していても、実は、話し手によって想定しているシステムや適用対象が異なっている状況が発生し、その結果、議論そのものがかみ合わない場合が存在する。

そこで、まず技術的な「アーキテクチャ定義」が必要になる。

たとえば、インダストリー 4.0 においては、2015年に発行された「インダストリー 4.0 実現戦略」において「インダストリー 4.0 リファレンスアーキテクチャモデル (RAMI4.0)」(図-1) が発表されている。まず、この RAMI4.0 について、簡単に解説する。

見た目の通り、RAMI4.0 は、3次元の構造になっている。それぞれの軸の定義と概要は以下の通りである。

## 特集 Special Feature

### (1) 垂直方向－Layers

生産システムの構成要素を情報通信工学的視点から分類したものである。具体的には、事業層 (Business)、機能層 (Functional)、情報層 (Information)、通信層 (Communication)、統合層 (Integration)、物体層 (Asset) の6層に分かれている。

### (2) 左横軸方向－Life Cycle & Value Stream

製品のライフサイクル管理を示す軸であり、国際標準 IEC 62890 に基づいている。

この軸では、「タイプ」と「インスタンス」という概念を導入している。「タイプ」とは、製品になる前の段階、つまり設計図・試作品であり、「インスタンス」が製品と考えてよい。

### (3) 右横軸方向－Hierarchy Levels

ネットワークでつながった生産システムの階層レベルを示している。ビジネス・製造システム統合の国際標準 IEC 62264 で規定されている階層レベルを拡張した定義となっている。

具体的には、つながる世界 (Connected World)、企業 (Enterprise)、ワークセンタ (Work Centers)、作業ステーション (Station)、制御装置 (Control Device)、フィールド機器 (Field Device)、製品 (Product) という7つの階層が定義されている。

この参照アーキテクチャを使うことで、研究開発ターゲットのインダストリー 4.0 における位置づけ

を明確にすることができる。

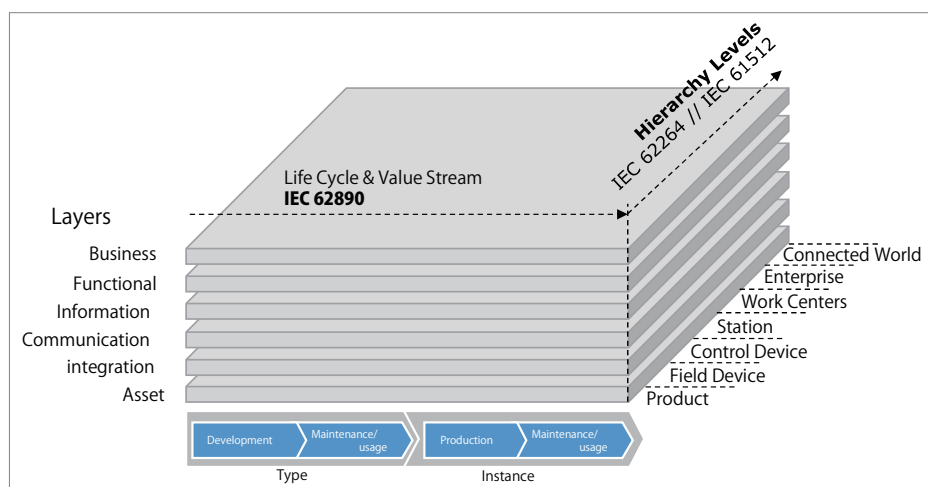
一方、すでにある製造現場をスマート化、もう少し正確に言うと IoT 化するために、経営層と現場管理者との間で投資効果判断をするための指標を作る動きもある。

スマート工場の実現には、スマート工場化の現状や、将来進むべき方向性を、経営層と現場とで共有することが重要である。共有することで、スマート工場実現のための適切な投資計画を継続的に立案・実行することが可能となるからである。

共有のための手段として、日本から提案し、現在 ISO/TC 184 で国際規格として審議中の SMKL (Smart Manufacturing Kaizen Level) (図-2) がある。

SMKL は、「工場をどう IoT 化していけばよいか分からない」という悩みを持つ製造現場の IoT 化推進を支援する目的のために作られたものであり、図-2 のように IoT 導入レベルを、4 つの「見える化」段階と、4 つの管理対象レベルで分けられた 16 マスで表すことで、対象とする製造現場がどの段階まで IoT 化が進んでいるかを判断できるようにするものである。

縦軸の見える化レベルは、レベル a「データ収集」、レベル b「見える化(可視化)」、レベル c「観える化(分析)」、レベル d「診える化(改善)」とし、いずれも電子化かつ自動化されていることを到達条件としている。



■ 図-1 インダストリー 4.0 リファレンスアーキテクチャモデル (RAMI4.0)

特集  
Special Feature

また、横軸の管理対象レベルは、いわゆるディスクリート系の工場を対象とした場合、レベル1「設備・作業員」、レベル2「ライン全体」、レベル3「工場全体」、レベル4「サプライチェーン全体」とするが、工場の種類に応じた定義を行う必要がある。

SMKLに基づいて、現状のレベル把握と次に進むべきレベルの決定を行い、そのための投資計画を立案することで、経営層と現場との間で理解を共有しながら継続的にスマート工場化を前進させることができる。

### 工場スマート化のキー技術

では、次に、工場のスマート化におけるキー技

レベル d 診える化 (改善) Optimizing				
レベル c 観える化 (分析) Analyzing				
レベル b 見える化 (可視化) Visualizing				
レベル a データ収集 Collecting				
見える化 レベル 管理対象 レベル	設備・作業員 Installation & Worker レベル 1	ライン Workshop レベル 2	工場全体 Factory レベル 3	サプライチェーン 全体 Supply Chain レベル 4

製造現場の「みえる化」/IoT化を  
16個のマスで表した評価指標

■ 図-2 Smart Manufacturing Kaizen Level (SMKL)

レベル d 診える化 (改善) Optimizing		AI (人工知能)		
レベル c 観える化 (分析) Analyzing		エッジコンピューティング		
レベル b 見える化 (可視化) Visualizing		制御機器・表示器・ ソリューション・ エンジニアリングツール ... etc.		クラウド サービス
レベル a データ収集 Collecting		センサ・ネットワーク		セキュリティ
見える化 レベル 管理対象 レベル	設備・作業員 Installation & Worker レベル 1	ライン Workshop レベル 2	工場全体 Factory レベル 3	サプライチェーン 全体 Supply Chain レベル 4

■ 図-3 工場スマート化のキー技術

術について考えてみたい。図-3は、先に述べたSMKLのそれぞれのステージにおいて、重要と考えられる技術名を示したものである。以降、この中で、ネットワーク、エッジコンピューティング、AIについて簡単に解説する。

### ネットワーク

工場の製造現場で利用されるネットワークは、製品製造にかかわる機械や装置あるいは設備の制御を行うために利用される。具体的には、複数の機械や装置の間の作業を連携させたり、同期をとるなどの目的で利用される。

製造現場における制御は、周期的かつ高速に実施されるため、たとえば制御用コントローラ（製造現場内のセンサやアクチュエータを制御するPLC（Programmable Logic Controller）や、工作機械の制御を司るNC（Numeric Control）等がある）間を接続するネットワークでは、数ミリ秒から数十ミリ秒での応答性能が必要になるとともに、応答性能の揺れ（ジッタ）も数マイクロ秒単位で要求される場合がある。

また、最近では、同一ネットワーク上に複数の制御周期を持つ制御用コントローラを接続できるようにしたい、という要求もでてきている。

一方、先ほど述べたSMKLの「みえる化レベル」の「レベルa（データ収集）」では、製造現場あるいは工場全体の稼働効率を高めるために、製造現場内ネットワークを利用して、機械、装置、設備などから製造状態に関するデータを収集する場合がある。この場合には、先に述べた制御の実行とは異なり、応答性能は比較的遅い代わりに転送できるデータ量が多いネットワークが必要である。

工場の製造現場内のネットワークは、この両方の要求を満足するような仕様になってい

特集  
Special Feature

るものが多い。

代表的な工場内ネットワークとしては、CC-Link IE TSN (CC-Link 協会), PROFINet (PROFIBUS & PROFINET International), EtherNet/IP (Open DeviceNet Vendor Association), EtherCAT (EtherCAT Technology Group) などがある。

代表的なネットワークである CC-Link IE TSN におけるデータ転送制御方法は以下の通りである。

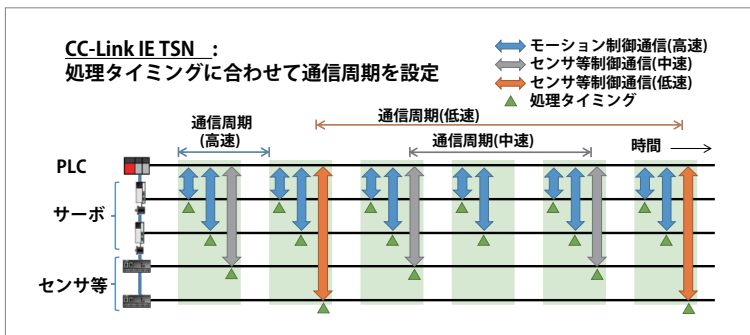
まず、応答時間の違いや応答性能の揺れ(ジッタ)の違いを同一のネットワーク上で実現するための基本方式としては、IEEE (米国電気電子学会) のイーサネットデータリンク層である TSN (Time Sensitive Network) を活用する。具体的には、IEEE802.1AS (時刻同期) および IEEE802.1Qbv (スケジュールされたトラフィックの拡張) 技術を利用し、**図-4**にあるように、制御コントローラ(図で

は PLC) から、処理タイミングの異なるサーボやセンサなどに対するデータ転送を実施する。

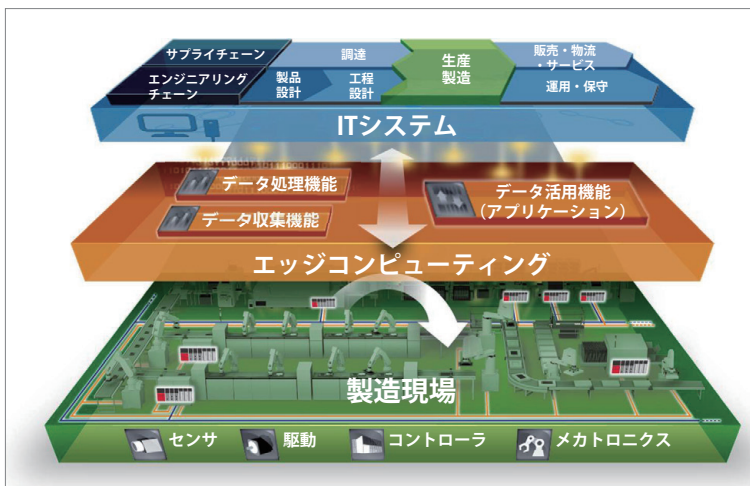
一方、最近では、製造現場における無線通信の活用も活発に議論されている。変種変量生産に対応するために、製造現場も製造する製品に対応する必要が生じており、装置の変更、あるいは生産ラインの組み換えや製造中の製品の流れを柔軟に変更するなどの必要性が生じている。その結果、これまで、ほぼ固定であった装置や機械などもレイアウトフリーで稼働できるようにする必要があり、あるいは無人搬送車 (AGV) を含む可動ロボットの活用なども考える必要がでてきている。その結果、まず、通信を行う対象物の位置が変化するために無線通信を利用する必要が生じてきている。

また、スマートファクトリー実現のためには、装置・機械の間、装置・機械と人、装置・機械と製造物(ワーク)などインタラクションする関係が増えてくることも無線化が必要な一因と考えられる。

特に、最近では、ローカル 5G の活用が盛んに議論され始めている。5G 仕様の高度化・環境構築の容易化(低価格化)のトレンドに合わせて、作業効率化→協調作業→自律制御への適用範囲が広がると期待されている。



■ 図-4 工場の製造現場で利用されるネットワークにおける転送制御 (ex. CC-Link IE TSN)



■ 図-5 3階層システムアーキテクチャ (ex. 三菱電機 e-F@ctory)

### エッジコンピューティング

スマートファクトリーを実現するためのシステムアーキテクチャは、当初は、クラウド+製造現場の2階層システムアーキテクチャである場合が多かったが、最近では、これにエッジコンピューティングを加えた3階層システムアーキテクチャ(**図-5**)を前提とした議論が多くなってきている。

これには、次のような理由がある。

まず、製造現場内には、機械、装置が

## 特集 Special Feature

数多くあり、また、さまざまな状態を検知するセンサ類も数多く存在する。制御周期が短くなる（きめ細かい制御を実施する）ことに比例して、収集すべきデータ量も膨大になる傾向がある。この大量のデータをクラウドに直接あげて処理するのは、ネットワーク負荷の観点から得策ではない。また、特に、分析結果を制御そのものに反映させようとすれば、データ解析を含めた全体性能にリアルタイム性が求められ、結果、クラウドに接続するためのネットワーク遅延が問題になる。

したがって、データの発生源および活用に近いところで情報処理を行う「エッジコンピューティング」が重要になってきている。

エッジコンピューティング層は、以下に示す機能から構成される。

### (1) データ収集機能

製造現場には、製造メーカや接続プロトコルが異なる数多くのセンサ・アクチュエータ・装置・設備が存在する。製造現場からのデータ収集においては、通信プロトコルの差異を吸収し機器メーカやネットワークを問わずにデータを収集できる機能が必要である。

### (2) データ処理機能

製造現場から集めたデータの処理（データの収集・加工・診断）を行うための機能群。特に製造現場の機械・装置・ラインを抽象化し、かつ、それらの役割を階層的に管理できる仕組みが必要である。

### (3) データ活用機能（アプリケーション）

データ処理機能を使って処理された製造現場データを基に、現場の稼働監視や予防保全を行う、あるいはAIを活用した最適制御を行う等のアプリケーションが配置される。

なお、このエッジコンピュータは、サイバーフィジカルシステム（CPS）と関連付けて言及されることが多い。

つまり、現実空間（ここでは製造現場）からリアルタイムに得られる情報（データ）を、サイバー空

間（ここではエッジコンピューティング層）で処理し、現実空間での生産システムの最適化を実現することがサイバーファクトリーである、と考えられていることによる。

## AI

工場の製造現場に対するAIの適用には、2つのパターンがある。

1つは、加工精度の向上、予防保全による稼働率の向上、あるいは、最近では匠の技を自動化して継承するなどの目的のために、製造する機械や装置の制御にAIを適用する場合である。

また、もう1つのパターンは、工場全体の歩留まり向上や、生産性向上を目的とし、人を含めた製造工程に適用する場合である。

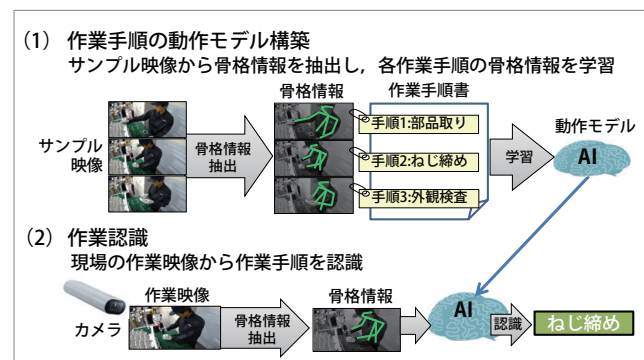
ここでは、後者の場合について解説する。

すでに多くの工場で、設備や機械のデータを活用したデータ分析の取り組みは多く行われている。しかしながら、さらに生産性を向上するためには「人」や「作られるモノ」の動きを解析できるようになる必要がある。

ここでは、カメラ画像を基に作業分析を実現する技術を例について述べる。

この技術は、AIを用いて、カメラ映像から人の骨格情報を抽出・分析し、特定の動作を自動検出するものである。

図-6に示すように、この技術は、サンプル映像



■図-6 カメラ映像を用いた作業認識の仕組み

**特集**  
Special Feature

から抽出した作業者の骨格情報を、部品取り、ねじ締め、外観検査といった作業手順単位で AI に学習させる。その後、現場の作業映像から同様に骨格情報を抽出し、作業者がどの作業手順を実施中であるかを AI が自動的に認識する。

実際に工場で実施した検証によると、作業認識率は、目視と同程度の 90% であり、人間による目視作業の代替が可能なレベルにある。認識結果は、作業バランスの確認や作業手順誤りの自動検出など、さまざまな用途で活用できる。

また、動作研究の先駆者である Frank Gilbreth 氏が提唱した「動作経済の原則」(疲労を最も少なくして有効な仕事量を増やす、人間のエネルギーを効率的に活用するための約 30 項目からなる経験的な法則) に基づき、骨格の動きを分析することで、作業者の無理・無駄な体の動きの課題が見える化(可視化)することもできる。

これにより、異なる監督者であっても同じ課題を見つけることができるため、属人性を排除した標準的な作業改善が可能となる。

このような技術を利用することにより、生産現場の作業者の動きをカメラで撮影するだけで作業内容を認識・特定し、作業時間や作業ミス、無駄を自動検出することで作業分析を効率化でき、生産現場の生産性向上が期待できる。

## 今後の展望

本稿では、スマートファクトリーを実現するためのキー技術について述べた。

最初に述べたように、スマート工場の厳密な定義はない。したがって、当然、何をやればスマート工場になるかはさまざまである。また、同時に「スマート」は、実現するための技術の事を指すわけではなく、各人が目指すファクトリー、さらには製造業の姿そのものを表す言葉である。

変種変量生産への対応、つながる工場などスマート工場を表す言葉は数多くあり、それらを実現するためには、必ずしも最新の技術を活用する必要がないことも事実である。

ただし、製造現場で発生するさまざまな事象をデータとして取得し、それを分析・解析し、製造現場だけでなく、サプライチェーンも含めた製造業全体システムをある目的に向かって改革していくために、これまで以上に、「情報処理技術」が重要になってきていることは確かである。

(2021 年 10 月 27 日受付)

■楠 和浩 (正会員)

Kusunoki.Kazuhiro@ea.MitsubishiElectric.co.jp

三菱電機(株)情報技術総合研究所長、静岡大学情報学部客員教授、博士(工学)。