

“Smart Factory” は 如何なるビジネス・フィールドか？ —工学ではない経営学からのアプローチ—

榎 本 俊 一

要 旨

“Industrie4.0”が次世代製造システムとする“Smart Factory”は、企業ITシステムによる生産ライン最適制御と製造関連データのAI解析によるカイゼン自動化を柱とし、資本財企業のビジネスを一変するとされながら経営学的アプローチは未確立である。本稿では、“Smart Factory”の発展を第1期(2014~2017年)、第2期(2018年以降)に分け、第1期にOT企業、企業システム企業等により“Smart Factory”の基本機能及びシステム構成が如何に具体化され、第2期に彼等が基本機能及びシステム構成に即して、各々、“Smart Factory”インテグレーションに関してコア事業領域を設定し、如何なる競合・提携関係に立つに至ったかを明らかにし、以て“Smart Factory”に係る経営学研究の可能性の一端を示す。

キーワード：第4次産業革命 (Indusrie4.0)、スマート・ファクトリー (Smart Factory)、OT企業 (Operational Technology Integrator)、システム・インテグレーション (System Integration)、エッジ・コンピューティング (Edge Computing)

I はじめに

2011年、ドイツは“Industrie4.0”（第4次産業革命）において、21世紀の先進国製造企業が中国等新興国メーカーとの競争にサバイバルするための次世代製造システムとして“Smart Factory”を提案した¹⁾。

ドイツは、今後の先進国製造企業の競争力の源を、絶えず変動して止まな

い市場動向に即応した変種変量生産に求め、その実現のため、ERP (Enterprise Resource Planning: 企業資源計画)・MES (Manufacturing Execution System: 製造実行システム)・PLC (Programmable Logic Controller: プログラマブル・ロジック・コントローラ)を垂直統合した企業ITシステムにより、生産ラインをリアルタイムで最適制御し、企業ヘッドクォータの経営判断に基づく生産計画変更に対応して、製造現場において段取替え等の生産準備と生産ラインの実稼働、運転管理者の配置・業務内容、ワーク・治具・工具等の定置・移動等を機動的に最適実施することを構想した²⁾。

“Smart Factory”は先進国製造企業のグローバル競争のサバイバル策であるが、製造システムそのものを顧客提供する製造システム関連産業、すなわち工作機械、産業機械、OT、IT、企業システム関連ソフトウェア、クラウド企業等にとり、彼等のビジネスを一変させる可能性を有している。

すなわち、従来の製造システムでは、企業ITシステムによる工場制御は、生産ラインを構成する機械・設備のFA化(MESとPLCを垂直統合しMESにより生産ラインの実施準備・運転を自動化)に止まり、工作機械・ロボット・搬送装置・周辺装置を組み合わせた生産ラインのインテグレーションと、MES・PLC等企业ITシステムによる生産ライン制御システムの構築は独立事業領域を形成してきた。しかしながら、ドイツ構想では、物的システムである生産ラインと企業ITシステムが統合され、製造システムの付加価値は、従来のような物的システムとITシステムの「和」ではなく、両者の「積」に変わる。

- 1) 中国は1999年WTO加盟後に急速な経済的テイクオフを遂げ、続く10年間で「世界の工場」としてGDP規模を3倍としただけでなく、ファーウェイ(華為技術)など次世代情報通信の世界的企業を産み出し、アリババ(Alibaba)、テンセント(Tencent)、バイドゥ(Baidu)など米国GAFAMにも匹敵するインターネット企業がデジタル・エコノミー化を推進した。こうした中、ドイツは、先進国製造業が中国等新興国との競争に勝ち残るには、マス・カスタマイゼーションと変種変量生産を徹底して時々刻々変動する市場ニーズに迅速・的確に対応する必要があると考え、2011年にドイツ工科大学とドイツ連邦教育科学省が“Industrie4.0”を共同発表する。
- 2) Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016); Bundschuh(2017); Andelfinger and Hänisch (2017) etc.

企業 I T システムによる生産ライン制御を柱とする“Smart Factory”では、「積」で表現される価値のウェイトが工作機械メーカーの事業領域とする物的システムから企業 I T システムによる制御にシフトする可能性が生まれ、むしろ企業 I T システムによる制御による貢献の方が大きくなることが期待されている。その結果、これまで同業他社との関係で事業領域や競合を考えてきた工作機械メーカーが、企業 I T システムのインテグレーションを司る O T、I T 企業等異業種・異業態との関係で事業領域・競合を再考する必要が生じており³⁾、今後、製造システム関連産業はこれまで経験したことのないビジネスの地殻変動に遭遇すると考えられる。

しかしながら、2010年代初の提案後も“Smart Factory”はコンセプトのまま長らく留まり、基本機能なり、システム構成なりの具体化がなかなか進まなかったため、製造システム関連企業にとり“Smart Factory”がどのようなビジネス・フィールドになるかは判然としなかった。Kagermann et al. (2013) が代表的な定義とされるものの⁴⁾、100以上の定義が存在する (Moefuf et al. 2017) 状況に象徴されるように、専門家間でも“Smart Factory”に関してコンセンサスが未確立のまま、次世代製造システムである“Smart Factory”において、製造システム関連企業が如何なる事業領域をコア領域とし、如何なる競合・提携関係に立つのかが見えてこなかった。

こうした中、およそ2014～2017年、ドイツ政府の“Industrie4.0”提言ではコンセプトの域を出なかった“Smart Factory”の具体化が、O T、I T、産業機械、工作機械、ソフトウェア、クラウド企業等により、同時多発的に、同時並行で推進された。“Smart Factory”は如何なる機能を果たすのか、“Smart Factory”は如何なるシステム構成を採るかにに関して、O T、I T、

3) 日本機械工業連合会 (2016)

4) “networks of manufacturing resources (manufacturing machinery, robots, conveyor and warehousing systems and production facilities) that are autonomous, capable of controlling themselves in response to different situations, self-configuring, knowledge-based, sensor-equipped and spatially dispersed and that also incorporate the relevant planning and management system” (Kagermann et al. 2013)

工作機械、産業機械各社は、自社工場をモデルとして“Smart Factory”実証に取り組み、各々のコア事業領域を出発点として“Smart Factory”の機能・構成を検討した。

これらの取組は、特段の指導的な存在がない、同時多発的な取組ではあったものの、“Smart Factory”に関連する国際フォーラム、アライアンス等を通じて、基本機能及びシステム構成に関するコンセンサスが徐々に形成されて行く。工場システムは、物的部分（工作機械、ロボット、搬送装置、周辺装置等から構成される生産ライン）とIT部分（ERP、MES、PLC等の企業ITシステム）から成るが、“Smart Factory”は企業ITシステムによる生産ライン制御を眼目とすることから、2014～2017年における機能・システム構成の検討・詰めはIT部分を中心となった。

特に、システム構成については、①ERP・MES・PLCの系列ですべての情報処理を行うのか、あるいは、製造IoTプラットフォームを別途構築して、市場動向に即応する変種変量生産以外の情報処理を分担させるのか、②製造関連ビッグデータの解析・処理はエッジ層とクラウド層のいずれで行うのか、あるいは、エッジ・コンピューティングとクラウド・コンピューティング間で如何に分担・協働させるかを巡り、OT、IT、企業システム、クラウド企業等により議論・検討がなされた。

“Smart Factory”の基本機能・システム構成の具体化を受けて、OT、IT、企業システム企業等はおおむね2018年以降“Smart Factory”ビジネスを本格化した。では、2014～2017年の基本機能・システム構成の具体化に伴い、製造システム関連企業にとり“Smart Factory”は如何なるビジネス・フィールドとして顕現してきたのだろうか。“Smart Factory”の柱である、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御や製造関連ビッグデータのAI解析によるカイゼンの自動化は工学的な研究対象であり、経営学・商学は手出しできない。だが、“Smart Factory”において、製造システム関連企業が如何なる事業領域に陣取り、相互に如何なる競合・提携関係に立つのか、“Smart Factory”を製造システム関連企業間の競争・提携関係の「束」に翻訳でき

れば、“Smart Factory”を経営学、商学の研究対象とする道が開かれる⁵⁾。

本稿は、“Smart Factory”の発展を第1期(2014～2017年)、第2期(2018年以降)に分け、第1期にOT企業、IT企業、企業システム企業等により“Smart Factory”の基本機能及びシステム構成に関するコンセンサスが如何に形成され、第2期には、基本機能及びシステム構成に即して、OT、IT、企業システム企業等が“Smart Factory”のインテグレーションに関して、それぞれコア事業領域を設定し、如何なる競合・提携関係に立つに至ったかを取り扱う。それにより、“Smart Factory”が工学的な問題であるだけではなく、製造システム関連企業に係る経営学・商学的な研究課題であることを示したい。

II “Smart Factory”の機能及びシステム構成の具体化

1. “Industrie4.0”

“Smart Factory”はドイツが2011年、21世紀の先進国製造企業の競争優位の維持強化策として提言した“Industrie4.0”の中核を成すものである。まず、Kagermann et al. (2013) 及び Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016) に基づき“Smart Factory”のオリジナル・コンセプトを概観する。

ドイツは先進国製造企業の競争優位を、絶えず変動して止まない市場ニーズへの迅速・的確な対応力に求め、“Smart Factory”をマス・カスタマイゼーションの極限化のツールとし、第一に、IoT技術、AI技術、クラウド技術により生産システムをデジタル化し⁶⁾、経営層が市場動向に即応して

5) 本稿は筆者の埼玉大学大学院人文社会科学科博士後期課程における学位論文の一部に加筆を加え、“Smart Factory”を経営学・商学の研究対象として取り扱う道を拓く試みとしたものである。

6) ドイツは先進国製造業の差別化の方向として、市場の求める多種多様な商品を1ロットからでも柔軟・迅速に生産・出荷できるマス・カスタマイゼーションを掲げ、生産ラインをITシステムにより制御することで市場動向に即応した変種変量生産を柔軟かつ機動的に実行する“Smart Factory”を提言。さらにドイツは“Smart Factory”化を個別工場で終わらせず工場群・製造企業群をネットワーク化することまで構想しているが、その実現のためには生産システムのデジタル化が不可欠であり、ドイツは、近年飛躍を遂げたIoT技術とクラウド等大容量情報処理技術を活用して、製品・設

修正する生産計画に柔軟かつ機動的に対応できるよう、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業ITシステムにより生産ラインを自動制御するとした。具体的には、生産ラインの機械・装置に装着した情報端末・センサからリアルタイムで収集したデータをAIにより解析、AIの導出した生産ラインの最適制御方法（各ラインの生産割当、生産順序、治具・工具・人員配置、段取替え等）に従い生産ラインを制御。第二に、生産ラインのカイゼンはトヨタ生産方式では人により担われるが、“Smart Factory”では、生産ラインよりリアルタイム収集したデータに基づきAIが生産ラインのカイゼン方法を解析し、その結果に基づいて生産ラインに改良を加えるとした。

また、ドイツの“Industrie4.0”は工場単位で完結せず経済社会全体の最適化を目指した。自動車産業がトヨタ、BMW等の最終組立メーカーだけではなく無数の部品・素材メーカーの分業から成立するように、製品は多数企業に分業・協業により製造されており、如何なる企業も単独で必要な部品・材料を生産し最終製品を生産できない。市場の求める多種多様な商品を1ロットからでも柔軟・迅速に生産・出荷するには、“Smart Factory”を個別工場・企業単位で完結させず、“Smart Factory”同士をITシステムにより結合して（トヨタ等の親企業・協力企業の協業のように）全体最適化を行う中核的企業の指揮の下に、複数の異なる主体が生産管理・在庫管理・購買調達

備にICタグやバーコードを装着し、それらをセンサやカメラで読み取って通信で結び、センサ等から得たデジタル情報をクラウド上でリアルタイムに収集・分析、生産ラインを解析結果に基づき最適制御することCPS（Cyber Physical System）を次世代製造システムとして実現するとした。

CPSとは、物理的な現実世界のデータを収集し、コンピュータ上の仮想空間に大量のデータを蓄積して解析を行い、解析結果を物理的な現実世界にフィードバックするサイクルをリアルタイムで回すことにより、システム全体の最適化を図る仕組である。このため工作機械等の機能を徹底的にモジュール化し、現実の工場内の状況をコンピュータ上で仮想的に再現し、この仮想空間において、顧客注文に対応してモジュールを柔軟に自動的に組み替え、生産ラインの最適段替えプラン等を現実世界にフィードバックすることで、生産ラインを自動的に顧客の注文動向に自動最適化して大量生産にも劣らない納期・価格で提供することを企図する。また、コンピュータ上のシミュレーションにより現実の工場内でのあらゆる動きを把握することで、製品の品質向上、納期短縮、生産性向上、故障検知等を実現することをCPSは目指している。

管理・プロジェクト管理等に係るシステムを共有し、あたかも一つの“Smart Factory”であるかのように協働作業を行うことが必要となる。各工場が“Smart Factory”化するだけでなく、個々の“Smart Factory”をネットワークでつないで工場群・製造企業群をネットワーク化、さらには国全体を一つの“Smart Factory”化することをドイツは提言した⁷⁾。

以上がドイツ提案であるが、工場生産がリアルな問題であるのに対し、“Smart Factory”が如何に抽象的なコンセプトであるかが分かる。例えば、TPSでは、製品の品質向上、納期短縮、生産性向上、故障検知等に関して、生産ラインの担当者が「カイゼン」に取り組み、工作機械・搬送装置・周辺装置の最適組合せ（生産ラインの見直し）や（MESによるか否かを問わず）生産ラインの最適管理を実現してきた。“Smart Factory”では、AIが仮想空間におけるシミュレーションにより最適生産を常時割り出して、自動的にカイゼンを行うとするが、製造現場は千差万別であり、すべての製造関連データを収集できるわけではない。生産ラインの運転管理における問題発見は、生産現場で運転管理する者でなければ、経験・知見を欠き、対応困難であり、AIによるビッグデータ解析には限界がある⁸⁾。AIがシミュレーショ

-
- 7) ロボット革命イニシアティブ協議会（2016）は次世代製造の特徴を（a）工場内の機械の生産技術データを一元的に管理・集約、そこから得られるデータを情報処理し、機械の加工効率の改善、予知保全、現場のカイゼン等のために生産管理側のERP、MES等の上位システムに提供する仕組、（b）情報処理された生産技術データを機械にフィードバックし、人がプロセス毎に部分最適を積み上げる従来の取組を超えて、人を介さずともライン全体が最適化される仕組、（c）生産技術のエンジニアリング・チェーンと生産管理のサプライ・チェーンを可視化しサイバー・フィジカルなシステムとして捉え、人工知能により統合管理しつつ、その全体最適につながるカイゼンを達成する仕組の3点に求める。
- 8) IoT化された生産ラインにおいて、製品・設備に装着されたICタグやバーコードからセンサやカメラで読み取られるデジタル情報とは、現時点における生産技術部門の認識・理解において必要と考えられるデータを選別して取得しているに過ぎない。現在の生産技術では認識されていない、認識されていても重要性が認められていないデータは一切捨象されてしまう。このため、CPSにおいて構築される仮想空間は現実世界と近似していても、現実世界と同一ではあり得ず、データ取得時点での生産技術観に基づいてデータを取捨選別していることから、生産技術観に即した形で現実世界が造り直されており、CPSの仮想空間は到底現実世界と同一ないし鏡像ということとはできない。

を無限に繰り返しても、生産効率性向上に資するカイゼンを考案できるか、疑わしい。

2010年代前半の“Smart Factory”は、市場動向に即応した変種変量生産の実現のためには、企業ITシステムによる生産ラインの自動最適制御と、製造関連ビッグデータのAI解析による生産システムのカイゼンの自動化が必要になるとコンセプトを提示したに止まる。“Smart Factory”化に伴い、製造システムの基本機能及びシステム構成がどのようになるのかは詳らかでなく、それらの点の明確化が製造システムとしての実現において必要となった。

2. “Smart Factory”の基本機能

第1期、Siemens、SAP等ドイツOT、企業システム企業等の主導下に、“Smart Factory”の具体化が進められ、基本機能とシステム構成に関してコンセンサスが形成された。ドイツ連邦政府が指摘するように⁹⁾、“Smart Factory”は過去の製造システム革新と断絶したものではなく、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御が2000年代中～2010年代初の生産ラインFA化の延長上にあるように、実は、1970年以降、IT技術と情報処理技術の進歩に応じて進められてきた工場システム管理の自動化をIoT技術、AI技術、ビッグデータ解析技術等を活用して高度化したものである。企業ITシステムによる生産ラインの最適制御、製造関連ビッグデータのAI分析によるカイゼンなど、2014年以降の具体化作業はITシステムが主戦場となった。

その結果、CPSの仮想空間におけるシミュレーションから漏れ落ちる現実世界の製造課題が発生する。カイゼンとは問題発見と解決の継続反復であるが、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場の運転管理者でなければ無理な面がある。CPSにおける仮想空間の現実世界のシミュレートがどれだけ緻密化しても、CPSでは発見できず対応できない問題が残る。また、TPSは1970年代以降オートメーション化に取り組み、現在、IoT技術とAIを生産現場における問題発見に活用しようとしているが、生産関連ビッグデータとAIの解析結果は「段取替え時間の短縮」であれ「セル生産ユニットの効率的配置」であれ解釈を要する。そもそも生産現場で生産ラインの運転管理を行い、暗黙知も含めた知識・ノウハウを有する者でなければ、何が生産効率向上に寄与するかを判断することは難しい。

9) Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016)

(1) 遅れた基本機能に関するコンセンサス形成

1. のとおり、2010年代初の段階で“Smart Factory”の基本機能案は企業ITシステムによる生産ラインの最適制御、製造関連ビッグデータのAI解析によるカイゼンと出揃っていたが、“Smart Factory”が工場・企業に限らずサプライ・チェーン全体、社会全体のネットワーク化を目指すべきかに関して議論が割れ、基本機能に関するコンセンサス形成が遅れる。

結局、Siemens、Bosch、Volkswagen などグローバル・メガ・メーカーの“Smart Factory”早期実現の意向が通り、第1期（2014～2017年）、“Smart Factory”関連企業等の間で、当座の間、工場・企業を基本単位として、(i) ERP（計画層）・MES（実行層）・PLC（制御層）を垂直統合した企業ITシステムによる生産ラインの自動最適制御、(ii) 生産ラインを構成する設備・機械からリアルタイム収集した製造関連ビッグデータを、デジタル・ツインを活用してAI解析し、生産ライン等製造バリュー・チェーンの最適化を図ることが基本機能として合意された¹⁰⁾。

表1 “Smart Factory”の基本機能

第1機能	ERP（計画層）・MES（実行層）・PLC（制御層）を垂直統合した企業ITシステムによる生産ラインの自動最適制御
第2機能	生産ラインを構成する設備・機械からリアルタイム収集した製造関連ビッグデータを、デジタル・ツインを活用してAI解析し、生産ライン等製造バリュー・チェーンを最適化

(2) 第1機能「企業ITシステムによる生産ラインの最適制御」

第1期にコンセンサス合意された“Smart Factory”の基本機能中、「企業ITシステムによる生産ラインの最適制御」は、2000年以降、製造ニーズが

10) 経済産業省（2018）「製造プラットフォームを中核とした『Connected Industries』のためのオープン&クローズ戦略の実践方法」等は“Smart Factory”についてERP・MES・PLCを垂直統合した企業ITシステムと製造IoTプラットフォームによる2系統の情報処理ループを区別して整理するが、第1期（2014～2017年）の“Smart Factory”の基本機能・システム構成の具体化を受けて、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御、製造関連ビッグデータのAI解析によるカイゼンの自動化の2機能がそれぞれの役割として想定されている。

少品種大量生産から多品種少量生産、さらには変種変量生産にシフトする過程で、生産ラインのIT管理化が追求されるようになった時点から、既に追求されてきた課題である。

従来のFA化はIT技術の制約により個別機械・設備を単位としてきたが、2000年代半以降、生産ライン全体の自動化が目指されるようになり、生産ラインを構成する機械・設備をIT管理し、MESにより生産計画の変更等に応じて生産を機動的に変更する試みが先進的メーカーによりなされてきた。ただし、これはMES・PLCの2層統合によるもので、ERPとも3層統合した企業ITシステムによる生産ラインの自動制御は未決の課題として残っていた。ドイツは“Smart Factory”においてERP（計画層）・MES（実行層）・PLC（制御層）を垂直統合した企業ITシステムによる生産ライン制御の完成を求めた。

現在でも、製造企業のすべてがMESないし生産スケジューラによる工場生産管理を確立しているわけではなく、生産計画の変更に対して、工場の生産管理者が毎回生産ラインの稼働計画を修正し、工場のライン担当者に修正指示する方式を採っている工場も少なくない。しかし、絶えず変動する市場動向への対応ではヒトによる工場稼働計画変更は限界があり、MESないし生産スケジューラによる生産管理システムを確立し、その上で、MESとERPを連携することが必要である。

3層垂直統合のメリットとしては、ERPとMESを連結することにより、市場に変動が発生しても、絶えず生産管理・販売管理・購買管理・在庫管理・会計・人事給与を同時最適化して、きめ細かく対応できるようになり、また、ERPをインターネット接続することで、製造企業は外部の製造関連アプリケーション、開発ツールにアクセスして利活用できることが期待されている（現在、製造関連アプリケーションは外部より購入・調達して、改めて機械・設備に個々にインストール）。

(3) 第2機能「製造関連ビックデータのA I解析によるカイゼンの自動化」

第1機能は2000年以來の製造課題であり、システムの的にもERP、MES、PLCなど既知のITシステムの統合に過ぎず、技術的問題、コスト的問題が解決できれば製造企業にとり特段の異論も問題もない。第1期の“Smart Factory”構想の具体化において問題となったのは、ドイツが“Industrie4.0”で新たに打ち出した「製造関連ビックデータのA I解析によるカイゼンの自動化」であった。

第一に、TPSにおいて、カイゼンは「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」(Liker 2004)により担われ、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある(最後まで残る)ため、まずは生産現場が現場レベルで課題解決を試み、生産現場だけでは解決できない場合には、生産現場と生産技術部門が協働してソリューションを創造すると考えられてきた¹¹⁾。

これに対し、「製造関連ビックデータのA I解析によるカイゼンの自動化」では、A IがCPSを活用して「市場に最適化した生産方法及び生産ライン」を決定、それに対応して自動的に段取替え、部品・部材の準備等を実施して最適生産を行うだけでなく、従来ヒトが担ってきたカイゼンもCPSの仮想現実空間を活用することで自動化できると考える(Kolberg et al. 2017)。カイゼンの自動化がそもそも可能であるのかは未決であるが(「A Iが人にとって代わるのか」と同旨)、カイゼンの完全自動化が困難としても、ヒトによるカイゼンをサポートするシステム(ヒトのカイゼン取組の一部を自動化)が技術的に可能であるのか、具体的ニーズがあるのかが問題となった。

第二に、ITシステムとしてのイングレーションが問題となった。すなわち製造関連ビックデータを一元管理し分析・生産改善を実施するというが、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業ITシステムの情報ループと、生産ラインを構成する機械・設備等から収集した製造関連ビックデータを一

11) 大野(1978)、熊沢(2013)、坂本(2005)、堀切(2018)等

元管理・解析するCPSの情報ループの関係が曖昧であった。結果的には、“Smart Factory”は、生産ラインの制御を行うERP・MES・PLCの企業ITシステムと、リアルタイム収集した製造関連ビックデータに基づき生産ライン最適化を解析する製造IoTプラットフォームの2つのシステムから構成されることとなるが、これは必ずしも唯一解ではなく、両者を統合したITシステムによる処理も可能だった。

仮に、“Smart Factory”が、生産ラインの制御を行うERP・MES・PLCの企業ITシステムがベースとなって、リアルタイム収集した製造関連ビックデータに基づき生産ライン最適化を解析する製造IoTプラットフォームが機能として付加されるシステム構成を採れば、ERP・MES・PLCのインテグレーションを業としてきたOT企業が製造IoTプラットフォームも含めて“Smart Factory”の総合インテグレータとなるのが順当である。

一方、企業ITシステムと製造IoTプラットフォームが“Smart Factory”において2つの独立したシステムとしてシステム構成されるならば、OT企業は企業ITシステムだけでなく製造IoTプラットフォームのインテグレーションにも事業拡張し“Smart Factory”の総合インテグレータとなるかが課題となり、同様に、米Rockwell Automations、仏Dassault Systèmes等の企業システム会社も製造IoTプラットフォームだけでなく企業ITシステムのインテグレーションにも本格進出するかを“Smart Factory”ビジネスで決めなければならなくなる。したがって、“Smart Factory”の基本機能に加えてシステム構成の明確化が、OT、IT、企業システム企業等の“Smart Factory”ビジネス展開にとり重要となった。

3. “Smart Factory”の基本システム構成

第1期、“Smart Factory”は、工場・企業を基本単位として「計画層・実行層・制御層を垂直統合した企業ITシステムによる生産ラインの最適制御」と「製造関連ビックデータのAI解析によるカイゼンの自動化」を基本

機能とすることが合意されると、次に“Smart Factory”のシステム構成が検討課題となる。ITシステムの制御対象である生産ラインを構成する機械・設備を起点として考えるならば、一つは、ERP・MESの企業ITシステムと接続し、変動する市場動向に即応した変種変量生産を実現するシステムが在り、一つは、個別機械・設備からセンサ・端末を介して製造関連データをリアルタイム収集し、AI等によりビックデータ解析した上で、設備稼働監視・予知保全等生産性向上に役立つシステムが並存する形が基本システム構成となった。

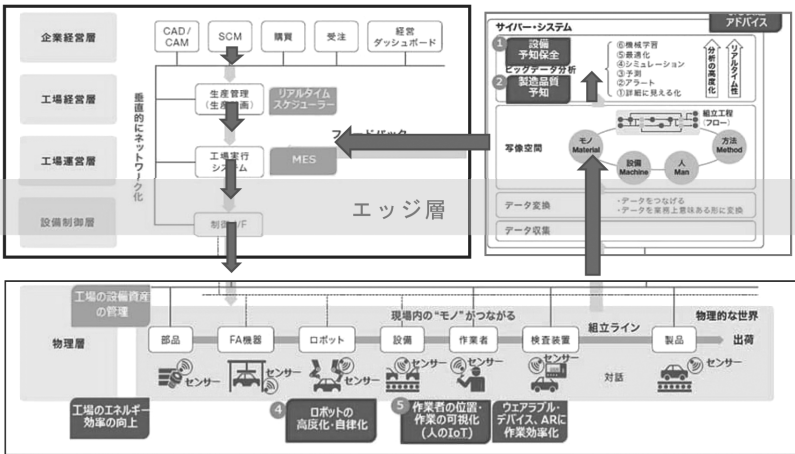
(1) 2つのシステムの独立した取扱い

第1期、Siemensは、ドイツ企業を中心としたコンソーシアムを形成し、ERP・MESプロバイダのSAP、自動車電装品メーカー兼OT企業であるBosch等と連携して、基本機能の検討と並行して、生産ライン、エッジ層、実行層にまたがる広い領域において、“Smart Factory”のシステム具体化を進める。

本来、「計画層・実行層・制御層を垂直統合した企業ITシステムによる生産ラインの最適制御」「製造関連ビックデータのAI解析によるカイゼンの自動化」に係る2つの情報処理は、ERP・MES・PLCの系統による一元処理が必ずしも不可能ではなく、2つの系統の情報処理をERP・MES・PLCの企業ITシステムにより一元管理するアイデアもあったが、結果的には主流とならなかった。

2つのITシステムの構築は投資額が多くなるにもかかわらず、図1のような2系統の情報処理が基本となった理由は、「製造関連ビックデータのAI解析によるカイゼンの自動化」では、生産ラインを構成する機械・設備からリアルタイム収集した製造関連データをAI等によりビックデータ解析するが、ITテック企業ではない製造企業には、AWS等クラウド企業が提供するAI、深層学習等の分析ツールの利用が欠かせない点にある。クラウド活用にはエッジ層とクラウド層の情報処理分担等が必要となるが、システ

図1 Smart Factoryの基本構成



生産ライン（製造現場）

(出所) IBM資料を一部修正

(図注) 青矢印棒線はデータの流れを表現。図で上左囲み部分は「企業ITシステムによる生産ラインの最適制御」、上右囲み部分が「製造関連ビックデータのAI解析によるカイゼンの自動化」に係る情報処理を実施。図下囲み部分が、工作機械メーカーが事業領域とする生産ライン（製造現場）であり、企業ITシステムは生産ラインの個別機械・設備に実装されたPLC等と接続して、市場動向に即応した変種変量生産を展開。エッジ層には、製造IoTプラットフォームが構築され、生産ライン（制御層）の機械・設備からリアルタイム収集された製造関連データの保管・解析、解析結果に基づくカイゼン指示を実行。エッジ層で情報処理をすべてできない場合、クラウド層のAIビックデータ解析システムないし解析サービスと連携し、クラウド層でデータ解析を実行、解析結果に基づくカイゼン指示を制御層に仲介。

ム構成及びシステム投資の簡便の観点からは、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業ITシステムとは別に、「製造IoTプラットフォーム」を構築して機能分担させる方式が適切だった。

(2) 基本システム構成に即した製造システム関連企業のコア事業立上げ

“Smart Factory” ビジネスには、一つは、顧客工場の“Smart Factory”化、すなわち企業ITシステム、製造IoTプラットフォーム)のインテグレーションがあり、一つは、システムとして構築・完成された“Smart Factory”

において、設備稼働監視管理による機械停止時間削減・稼働率向上、予知保全など、変種変量生産の極限化に資するソリューションの提供とがある。“Smart Factory”が製造システム標準として普及してしまいインテグレーション需要が減じてしまえば、後者が“Smart Factory”ビジネスの中心となるが、現時点では顧客工場の“Smart Factory”化が先決課題であり、第2期のOT、IT、企業システム企業等による“Smart Factory”ビジネスの立上げでは、ITシステムのインテグレーションがソリューション開発・拡充よりウェイトが置かれてきた。

① OT・IT企業の制御技術を基盤とするシステム構築アプローチ

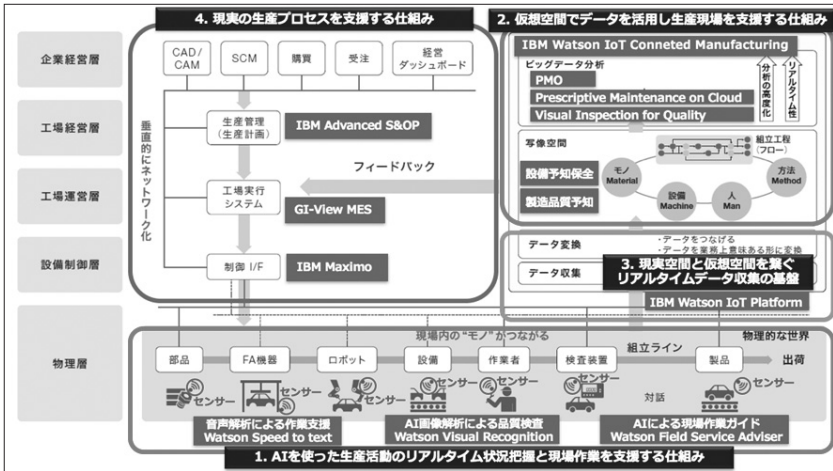
OT企業は、生産ラインを構成する機械・設備向けの制御装置を開発製造するとともに、2000年代の生産ライン単位のFA化に対応して、個別機械・設備に実装した制御装置を連携連動させるITシステムを開発提供してきたが、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御を柱とする“Smart Factory”に関しても、制御装置ビジネスの延長線上からスタートしている。

OT企業は、“Smart Factory”において、まず、生産ラインを構成する機械・設備を制御装置を通じて一体制御可能するインテグレーションをビジネス化しようとしており、生産ラインを構成する機械・設備にPLC等の制御装置を実装すると同時に、IoT端末・センサも装着して製造関連データをリアルタイム収集する仕掛けを構築することをソリューション化しようとしている¹²⁾。

その上で、OT企業は、PLCをERP・MESと垂直統合して、市場動向に対応した変種変量生産を可能とするシステムを構築するとともに（図2.4.部分）、生産ラインを構成する機械・設備からリアルタイム収集した製造関連データを保存し、AIによるビックデータ解析をするコンピューティング・システムを、エッジ層において「製造IoTプラットフォーム」として

12) ASCI-IoT 2017年06月27日付記事

図2 Smart FactoryのITシステムを構成する主要領域



(出所) IBM資料

構築すること(図2の3.部分)をソリューションとしようと考えている。

②企業システム会社の2つのアプローチ

米 Rockwell Automations、仏 Dassault Systèmes 等は産業オートメーション、ITシステムの製造開発会社であり、生産ライン単位のFA化に重要な役割を果たすMES等を開発し、顧客製造企業の求めに応じて、各社のニーズや経営条件に応じて企業ITシステムをカスタマイズしている。両社の強みは、製造企業等の製造活動を含む事業活動への理解を前提とした、顧客の企業ITシステム・ニーズの的確な把握と、ソフトウェア開発能力の高さにある。

Rockwell Automations、Dassault Systèmes 等は、生産ラインを構成する機械・設備の制御装置、PLC自体を開発製造する能力はないが、ITシステム・インテグレーション能力を活かして、PLCとMESを連結して生産ライン制御システムを製造企業に提供してきた。今後、“Smart Factory”のシステム・インテグレーションに関し、更にERPとMESをシステム統合

するソリューションを事業化しようとしている。また、両社はMES專業というわけではなく、製造企業の幅広いITシステム・ニーズに対応してきた企業であり、“Smart Factory”に関しては、生産ラインを構成する機械・設備よりリアルタイム収集した製造関連データを保存し、AIによるビッグデータ解析をするエッジ・コンピューティング・システムである「製造IoTプラットフォーム」の開発製造も本格事業化しようとしている¹³⁾。

図2では、3.部分の中核的領域として、Rockwell Automations、Dassault Systèmes等は“Smart Factory”のシステム・インテグレーションに関与することになるが、これはOT企業と事業領域が重複する。第1期に“Smart Factory”の基本機能・システム構成の具体化をSiemens等OT企業が主導した間は、企業システム会社とOT企業の競合関係はあまり露わにならなかったが、“Smart Factory”の基本機能・システム構成についてコンセンサスが形成されて行くにつれ、両者の競合関係が顕在化している。Rockwell Automations、Dassault Systèmes等は、OT企業のITシステム・インテグレーション分野への本格参入の動きに対抗、独自に製造IoTプラットフォームを開発し、顧客メーカーの製造システムにインテグレートしようとしている。

一方、ERP等の企業システム関連ソフトウェア会社であるSAPは、OT企業等による製造IoTプラットフォーム構築のビジネス化の動きに対し、自社のERP・MESシステムに製造IoTプラットフォームの一部機能を組み込み、取り敢えずの対抗の姿勢を採ったが、むしろOT企業が開発した外部プラットフォームと自社ERP等企業業務システムとのシステム連携・統合が円滑・容易となるよう自社システムを改良、OT企業が開発製造する製造IoTプラットフォームとの連携・一体化を図っている。

SAPにおいては、今後、“Smart Factory”が次世代製造システムとして主流化し、製造企業がOT企業が開発した“Smart Factory”システムを導入

13) Rockwell Automations 2021年2月2日ヒアリング

していく過程で、そのシステムと親和性の高い自社企業システムを製造企業が基幹システムとして採用してくれることを期待しており、OT企業の開発提供する製造IoTプラットフォームと自社の企業システムとの事業領域を明確に切り分け、企業ITシステムにおいて自社が主導できる領域を確保し堅持する道を選んでいる。

③クラウド企業によるクラウド・コンピューティング提供

繰り返しになるが、“Smart Factory”は、制御対象である生産ラインを構成する機械・設備を起点として考えると、一つは、ERP・MESの企業ITシステムと接続し、変動する市場動向に即応した変種変量生産を実現する、一つは、個別機械・設備からセンサ・端末を介して製造関連データをリアルタイム収集、AI等によりビックデータ解析、設備稼働監視・予知保全等生産性向上に役立てる、2つのシステムから成る。

個別機械・設備からセンサ・端末を介して製造関連データをリアルタイム収集し、AI等によりビックデータ解析するシステムについては、Siemens等OT企業は、エッジ層に製造関連データを保存し、AIによるビックデータ解析を行うコンピューティングを想定しているが、製造関連ビックデータという大容量かつ高度のセキュリティを要するデータの保存・処理はエッジ・コンピューティングよりもクラウド活用が適している。また、AWS、Microsoft等のクラウド企業はテック・カンパニーとしてAI、深層学習等の解析ツールを提供しており、自社でAIによる深層学習ツールなどを開発できない製造企業はクラウド会社の提供する解析ツールを利用した方が低コストかつ高品質のコンピューティングを実現できる。

このため、“Smart Factory”では、第1期からエッジ層、クラウド層のいずれにおいて情報処理を行うべきかが一つの論点となっており、クラウド企業はエッジ・コンピューティングとの分担の下で（製造システムは時々刻々発生する事態に対応して稼働修正等を行う必要があり、即応性の観点からはクラウド・コンピューティングよりエッジ・コンピューティングの方が最適

な情報処理も少なくない)、クラウド側での情報処理が主となる形での“Smart Factory”システムを提案。図2の2.部分を主たる事業領域として“Smart Factory”のシステム構築に関与しようとしている。

表2 O T、企業システム、クラウド企業等との「陣取り合戦」

<p>O T企業</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●O T企業は、生産ラインを構成する機械・設備向けの制御装置を開発製造するとともに、2000年代の生産ラインのI T管理化(生産ライン単位のF A化)に対応して、個別機械・設備に実装した制御装置を連携運動させるI Tシステムを開発提供する企業。 ●O T企業は、生産ラインを構成する機械・設備の制御装置による一体制御を基幹ビジネスとして、生産ラインを構成する機械・設備にP L C等の制御装置に加えて、I o T端末・センサを装着して製造関連データをリアルタイム収集する仕掛けを構築。 ●P L CをE R P・M E Sと垂直統合して、市場動向に対応した変種変量生産を可能とするシステムを構築するとともに(図2の4.部分)、生産ラインを構成する機械・設備よりリアルタイム収集した製造関連データを保存し、A Iによるビックデータ解析をするコンピューティング・システムを、エッジ層において「製造I o Tプラットフォーム」として構築(図2の3.部分)。
<p>企業システム関連ソフトウェア会社</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●米Rockwell Automations、仏Dassault Systèmes等は産業オートメーション、I Tシステムの製造開発会社であり、生産ライン単位のF A化に重要な役割を果たすM E S等を開発し、顧客製造企業のために応じて、各社のニーズや経営条件に応じて企業I Tシステムをカスタムズレイングレーションする事業を展開。 ●P L C自体を開発製造する能力はないが、I Tシステム・インテグレーション能力を活かして、P L CとM E Sを連結して生産ライン制御システムを製造企業に提供。“Smart Factory”のシステム・インテグレーションでは、更にE R PとM E Sをシステム統合するソリューションを事業化しようとしている。 ●M E Sに限らず幅広いI Tシステム・ニーズに対応。“Smart Factory”では、生産ラインを構成する機械・設備よりリアルタイム収集した製造関連データを保存し、A Iによるビックデータ解析をするエッジ・コンピューティング・システム(製造I o Tプラットフォーム)の開発製造を主力事業にしようとする取り組み。 ●図2の3.部分を中核的領域として“Smart Factory”のシステム・インテグレーションに関与することになるが、これはO T企業と事業領域が重複。
<p>クラウド企業</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●“Smart Factory”は、制御対象である生産ラインを構成する機械・設備を起点として考えると、一つは、E R P・M E Sの企業I Tシステムと接続し、変動する市場動向に即応した変種変量生産を実現するシステム、一つは、個別機械・設備からセンサ・端末を介して製造関連データをリアルタイム収集、A I等によりビックデータ解析し、設備稼働監視・予知保全等生産性向上に役立てるシステムの2つから成る。 ●後者については、O T企業は、エッジ層に製造関連データを保存し、A Iに

よるビックデータ解析を行うコンピューティングを想定するが、製造関連ビックデータという大容量かつ高度のセキュリティを要するデータの保存・処理はエッジ・コンピューティングよりもクラウド活用が最適。また、AWS、Microsoft等のクラウド企業はテック・カンパニーとしてAI、深層学習等の解析ツールを提供。自社でAIによる深層学習ツールなどを開発できない製造企業はクラウド会社の提供する解析ツールを利用した方が低コストかつ高品質のコンピューティングが可能。

- “Smart Factory”では、エッジ層、クラウド層のいずれで情報処理を行うかが議論中。クラウド企業はエッジ・コンピューティングとの分担の下で（生産ラインは時々刻々変化する状況に応じて稼働修正等を行う必要あり）クラウド・コンピューティングの活用ウェイトを増やすことを提案。図2の2.部分を主たる事業領域として“Smart Factory”のシステム構築に関与。

（出所）日経クロストrend編（2019）、日経コンピュータ・日経ものづくり他（2014）、技術情報協会（2020）、Siemens（2014, 2019, 2020a, 2020b）、Bosch（2020a, 2020b）、Fanuc（2016）、Dassault Systèmes（2016）、ダッソー株式会社（2019）、SAP（2016, 2017a, 2017b, 2019, 2020）、Microsoft（2019）、Monoist 記事、日本IBM2018年5月10日付ヒアリング、シーメンス株式会社2019年7月10日付ヒアリング、富士通2019年7月19日付ヒアリング、三菱電機2020年9月28日付ヒアリング、Rockwell Automations 2021年2月2日付ヒアリング等に基づき筆者作成。

④基本3領域の形成

以上に示したように、OT、IT、企業システム企業等は“Smart Factory”のITシステムの構成に応じて自社のコア事業領域を定め、“Smart Factory”インテグレーションに関してビジネスを本格的に立ち上げようとしている。そして、彼等の“Smart Factory”ビジネスの本格的立上げに向けた取組（表2参照）が“Smart Factory”のシステム構成をより明確化していくことにつながり、SiemensなどのOT企業がシステム構築を主導する領域（制御層、エッジ層）、SAP等ERP・MES企業がシステム構築を専管する領域（実行層）、OT企業・企業業務システム会社等が多数参入してシステム構築する製造IoTプラットフォームの領域（エッジ層）の3領域が徐々に形成されることとなる。

4. 「陣取り合戦」と「企業提携」

(1) “Smart Factory” 関連企業による提携

第1期、“Smart Factory”のシステム構成は、OT、IT、企業業務シス

テム、クラウド企業等の事業領域争いを通じて、アイデアが成長し、明確化した。OT企業等がどのような付加価値を顧客提供できるかは、“Smart Factory”システムのいずれの領域で主導権を握れるかに左右される。このため、OT、IT、ソフトウェア、クラウド企業等は、自社の事業領域をコアとして可能な限りシステム構成ができるよう争ったが、第2期においても、OT、IT、企業業務システム、クラウド企業等は、相互に隣接する事業領域の拡張を巡り、熾烈な「陣取り合戦」を展開した。

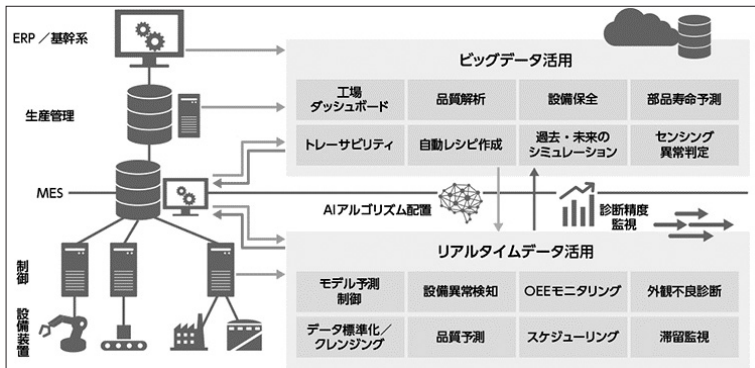
一方、彼等は、「陣取り合戦」の過程で企業提携の必要性を認識するに至る。“Smart Factory”は技術分野としてはIT、OT、メカニクスの技術領域に涉り、ITシステムとしては、製造現場のセンサ（制御層）から、生産ライン管理を行うMES（実行層）、EPR等基幹システム（計画層）、さらにはクラウド層に及ぶ。“Smart Factory”はITシステムとして機能的に3ブロックから構成されるが、各領域では専門性が高いソリューションが提供され、一社単独では複数領域すらカバーすることは難しい。

このため、一社単独での“Smart Factory”構築や、ソリューション提供は不可能に近く、OT、IT、企業システム、ソフトウェア企業等にとり（a）“Smart Factory”ビジネスのどこに「陣取り」するか、（b）隣接領域については、隣接事業者と提携するのか、隣接領域者と争うかが課題となっており、異業種企業の間で、“Smart Factory”インテグレーション・サービスのOne-stop提供を目指して企業提携も加速している。

（2）エッジ・コンピューティング vs. クラウド・コンピューティング

“Smart Factory”巡るOT、IT、企業システム企業等の「陣取り合戦」において、重要論点の一つは、生産ラインを構成する機械・設備からリアルタイム収集した製造関連データのAIによるビックデータ解析・処理をエッジ層又はクラウド層のいずれで行うかである。第1期、AWS、Microsoft等クラウド企業は“Smart Factory”には慎重であったが、第2期以降“Smart Factory”ビジネスへの関与を積極化している。

図3 エッジ・コンピューティングとクラウド・コンピューティングの分担



(出所) S A S Institute 資料

AIによるビックデータ解析がエッジ層、クラウド層のいずれで実行されるかが論じられる理由は、製造関連ビックデータ解析・処理には、高度な情報処理能力に加えて、AI・深層学習等の専門ツールが不可欠であり、クラウドでは、そのツールを提供しているからである。第1期に“Smart Factory”のITシステムを構成する3領域が形成されたが、基本的にエッジ層に設定される製造IoTプラットフォームの機能の一部をクラウド層にどの程度移すかは未決着のままである。

こうした中、第2期、“Smart Factory”ビジネス化がスタートすると、Microsoft等のクラウド企業も、クラウド領域から“Smart Factory”にアプローチを開始し、エッジ・コンピューティングとの協働・棲分けを前提としつつ、クラウド・コンピューティングの関与を拡げようとしており、エッジ・コンピューティングを基本とするSiemens等のOT企業と対立している。

ただし、エッジ層とクラウド層の棲分けは相対的なものであり、4Gから5G、更には6Gへの移行に伴い、情報処理が大容量・高速化することで、前代まではリアルタイム処理のためにエッジ層でしか情報処理できないと考えられていた事項がクラウド層でもリアルタイム処理可能となり、エッジ層

とクラウド層の境界は絶えず書き換えられることが予想される。エッジ層で製造IoTプラットフォームを構築提供するOT企業等と、クラウド・コンピューティングを提供するクラウド企業の競合対立は、情報通信技術の発達によっても絶えず再燃し続けると考えられている。

Ⅲ “Smart Factory” 関連ソリューション・ビジネスの模索

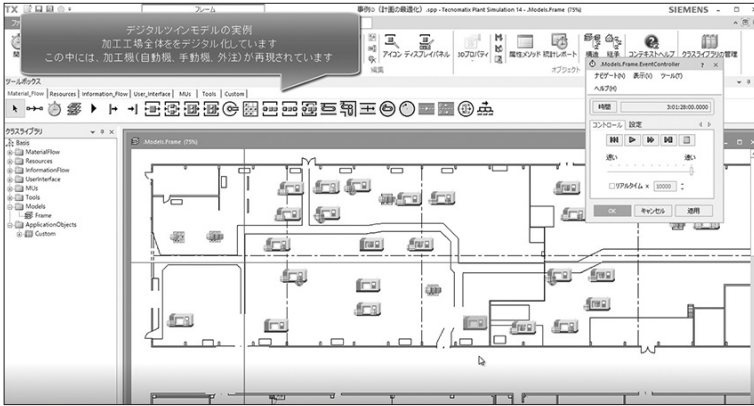
1. 第2期におけるソリューション・ビジネスへの取組

Ⅱ3(2)で指摘したように、“Smart Factory”ビジネスは、顧客工場における企業ITシステム、製造IoTプラットフォーム等のインテグレーションと、完成された“Smart Factory”における変種変量生産の極限化に資するソリューション提供の2つがあり、OT、企業システム企業等は“Smart Factory”が製造システム標準化した暁には後者に“Smart Factory”ビジネスの重点をシフトすることを考えている。

“Smart Factory”関連ソリューションにおける顧客提供価値とは何か？顧客工場の製造現場・課題等に応じて変種変量生産の在り方は変わり、その極限化の意味も同じではないが、自社工場の“Smart Factory”化を考える顧客の求めは一言で言えば工場生産高効率化である。例えば、ドイツが“Industry4.0”で提言した、市場動向にリアルタイムで即応する変種変量生産を実現するには、工場の生産ラインは停止することなく365日24時間稼働し続けることが理想であり、生産ラインを構成する機械・設備に故障なり不具合なりが発生すれば、直ちに異常を検知して故障・不具合に対応するだけでなく、故障・不具合の発生する前に、発生を予知・予見して防止策を講ずることが求められる。

工場の運転管理者が予知保全を行うには、その前提として、生産ラインを構成する機械・設備からリアルタイム収集した製造関連データを活用して、機械・設備の稼働状況や保全状況を可視化する必要があり、“Smart Factory”では、ヒトによる設備稼働管理や予知保全をサポートする可視化システムを製造IoTプラットフォームに実装する方向でソリューションが開発されつ

図4 加工工場をデジタル・ツイン化したモデルの実例



工場全体の設備稼働率をグラフ表示



(出所) IoTNEWS (<https://iotnews.jp/archives/153955/2>)

つある。かかる顧客工場の生産高効率化に係るソリューションの開発提供が“Smart Factory”ビジネスの主戦場となろう。

2. 独自ソリューション開発の難航

ただし、「止まらない工場」や、その実現のための予知保全は、“Smart Fac-

tory” が提言されて初めて取り組まれるに至ったものではなく、2000年以降、生産ラインのF A化が推進される過程で浮上した課題である。例えば、工作機械メーカーは生産ラインF A化に対応して、個別機械・設備に装着するオペレーティング・システムを開発したが、個別機械・設備のオペレーティング・システムを企業LANに接続する形で設備稼働状況監視システムを開発提供し、工場の365日24時間稼働に向けて、顧客の生産ラインの稼働管理と予知保全をサポートしてきている¹⁴⁾。

すなわち、“Smart Factory” が誕生したため従来想定もしなかったソリューションが実現したわけではなく、工作機械メーカー等が先行して生産ライン（製造現場）レベルで実現していた設備稼働状況監視や予知保全のサポートを、“Smart Factory” では、企業ITシステム上、制御層（生産ライン）に代わりに実行層（製造関連IoTプラットフォーム）で処理することとしたに過ぎない¹⁵⁾。これは設備稼働監視と予知保全に限った話ではなく、工作機械メーカーが2000年代半以降生産ラインF A化に対応して展開してきたソリューションと、現在“Smart Factory” で提供されるソリューションは、制御層（生産ライン）と実行層（製造関連IoTプラットフォーム）のいず

14) 日経産業新聞2013年5月21日付記事（工作機械 双方向で管理 ヤマザキマザック 装置開発 IoTを活用し新技術 保守診断やアプリ更新」、同2013年5月28日付記事（工作機械のオークマ 秘密工場で効率磨く）、同2015年12月25日付記事（製造革新 つながる工場 ヤマザキマザック 設備稼働率10%向上 映像で繁閑を分析）、日経ものづくり2013年9月号（日経「強い工場」取材班）

15) もっとも“Smart Factory”にはソリューションとして全く進歩がなかったというわけではない。2000年代半以降の生産ラインのIT管理化では、生産ライン（製造現場）を舞台として設備稼働状況監視システム等を構築せざるを得なかった関係で、設備稼働状況監視なり予知保全なりが不完全な形で終わっていたが、“Smart Factory”では、それらのシステムをIoT技術、AI技術、ビッグデータ解析技術等を活用して高度化しており、設備稼働監視管理による機械停止時間削減・稼働率向上、及び、予知保全はより徹底した形で実行することができるようになった。設備稼働監視管理では、稼働実績に加えてアラーム履歴、操作履歴も「見える化」。同データを用いて生産遅延・機械停止等の原因を追求・分析、機械停止時間削減・稼働率向上等の生産改善を実施。また、一定使用・稼働時間・回数後の機械的な部品交換等による予防保全に代わり、機械・設備等のリアルタイム収集した保全データに基づき、AI等により部品交換・修繕が必要か否かを分析し、必要であれば予防保全よりタイミングが前後しても部品交換・修繕を行う「予知保全」を実施。

れで情報処理するかが違うだけで、目的・内容・効果は同一である。

したがって、現時点では、O T、I T、企業システム企業等が顧客に開発提供するソリューションは、“Smart Factory”以前に生産ラインのI T管理化に関連して既に開発・提供されてきたソリューションにI o T技術、A Iによるビックデータ解析技術を適用したものであり、“Smart Factory”ならではの生産システム革新はまだ具体化されていない。実は、O T企業の三菱電機は2010年代の“Smart Factory”ブームに先駆けて、2000年代末から「e-F@ctory」の商標の下に事実上の“Smart Factory”ソリューションを開発提供してきたが、「稼働監視システム」「省エネ分析診断アプリケーション」「工具摩耗診断システム」「刃こぼれ検知システム」等は、工作機械メーカー等も生産ライン（製造現場）レベルで、個別機械・設備のオペレーティング・システムを企業L A Nに接続する形でソリューション化しており、O T企業ならではの“Smart Factory”ソリューションと評価することは難しい¹⁶⁾。

表 3 三菱電機の e-F@ctory ソリューション事例

稼働監視システム	<p>課題</p> <p>現場作業者が生産実績・設備稼働状況を紙や Excel で集計しており、状況把握できるのが翌日以降となっていたため、データを生産改善に活用できない。</p> <p>ソリューション</p> <p>データの一元的な収集と稼働監視システムを導入。稼働状況をリアルタイムに監視し、チョコ停原因を迅速に特定。ダウンタイムの改善により稼働率が約90%に向上。改善の効果で生産数も増加、生産性が向上。</p> <p>ポイント</p> <p>① 人手を介することなく、現場の状況をリアルタイムに監視することで、チョコ停の原因分析や異常発生時の即時対応が可能。</p> <p>② 加工機からのデータ収集に Edgecross を活用することで、今まで接続できなかった加工ラインの稼働監視を実現。</p>
----------	--

16) D E N S O は、トヨタ・グループ内での活用を前提として、2000年代半以降 O R i N を使って、生産ラインを構成する機械・設備等より収集した製造関連データを一元管理し、機械・設備の稼働状況や保全状況を可視化して分析・生産改善するソリューションを開発実施している。“Smart Factory”は、D E N S O のように I o T 革命の到来前から製造システム改革として取り組まれてきた機能を自らの中核機能として採用している。

<p>省エネ分析・診断アプリケーション EcoAdviser</p>	<p>課題 基板実装の現場でエネルギーや生産数など省エネに活用できるデータを収集する仕組みは構築したが、膨大なデータを定量的に把握して分析し、改善につなげるのに人手では限界が存在。</p> <p>ソリューション 省エネ分析・診断アプリケーション EcoAdviser の導入。AI を搭載した分析ツールにより、エネルギー・ロスを自動抽出・診断し、基板実装工程に潜むロスや発生要因を推定。エネルギー分析工数を月4時間から約20分と92%削減するとともに、省エネ活動を実効化。</p> <p>ポイント ① ダッシュボード画面作成機能により、エネルギー情報と生産情報を複数のグラフで同時に表示し、多角的視点での省エネ分析を実現。大画面での見える化により、現場スタッフの省エネ意識向上。 ③ 三菱電機開発の AI 技術 Maisart により、エネルギー・ロス、設備稼働率とその悪化要因を自動抽出しランキング表示。さらに、省エネ対策前後の効果検証画面にて対策効果の確認や見直しが可能。</p>
<p>工具摩耗診断システム</p>	<p>課題 メーカーは、工作機械の工具の使用回数を決めて加工を行っていることが多い。加工ワーク毎に工具の摩耗度合いは異なるが、ワークの種類に応じて交換頻度を変えることは容易でないため、使用回数を決めて工具交換すると、まだ使用可能な工具も交換したり、逆に、使用回数は少なくとも摩耗が進み交換を要する工具を使用し続けることで加工不良が発生する危険があったりした（製品の全数検査はできず）。</p> <p>ソリューション 予防保全のための「工具摩耗診断システム」導入により、工具の寿命を予測。工具交換回数を最適化し、工具コストを約40%削減するとともに、交換作業に要していた工数も削減。さらに、加工直後に正常時状態との差異から異常を検知し、不良品の流出防止もシステム化。</p> <p>ポイント 加工条件毎の軸負荷の変動から工具の寿命を予測、工具を使用できる残回数を表示。具折損や欠損などにより加工異常が発生した場合、正常時状態との差異から異常を即座に検知。</p>
<p>刃こぼれ検知システム</p>	<p>課題 加工中の刃こぼれは多数の不良品の発生につながるが、例えば1パレットに600個のワークを乗せて自動でバッチ加工している場合、途中で刃こぼれが発生すると、それ以降のパレット内の製品はすべて不良品化。ワーク1個の加工には2分間を要するため加工時間ロスも大。</p> <p>ソリューション 刃こぼれを検知する予知保全システムを導入し、加工中の刃こぼれをリアルタイムに検知。刃こぼれ発生の検知後、直ちに設備を停止させることで、導入企業は刃こぼれによる不良数を月600個から月10個へと約98%削減。同時に加工時間ロスも月約20時間削減、生産性も向上。</p> <p>ポイント ① 加工負荷の微妙な違いをリアルタイムに監視・診断することで、刃こぼれを見逃さない。</p>

	<p>② 刃こぼれが発生したら、警告灯を点灯するなどして作業員へ即通知。即座に設備を停止させることで被害を最小化する。</p>
<p>シリンダ監視システム</p>	<p>課題 生産装置の性能低下により生産スピードが落ち、計画通りの生産ができず、メンテナンスのタイミングについても、従来、明確な基準がなく判断しかね対応に苦勞。</p> <p>ソリューション 生産装置のエアシリンダの動作について、シリンダ監視システム導入により、一本一本の動作を監視し、シリンダのいずれかにでも、他のシリンダから僅かな遅れが発生すれば検知。最適なタイミングで装置をメンテナンスすることで、システム導入企業は生産量を分38個から分42個へと約10%向上（平均サイクルタイムは約1.58秒から約1.43秒へと約10%短縮）。</p> <p>ポイント ① 装置のエアシリンダ動作を1本1本監視して微妙なサイクルタイムの遅れを見逃さない。 ② 遅れが出たら、警告灯や電子メールで保全へ即通知。保全実施で生産性を落とさない。</p>

(出所) 三菱電機資料に基づき筆者作成

3. ソリューション・ビジネスの現状評価

顧客メーカーにとり、“Smart Factory”化が自社工場の生産高効率化にどれだけ寄与するかが関心事である。工作機械メーカー等が2000年代半以降生産ラインFA化を契機として、既に設備稼働監視管理や予知保全等のソリューションを提供しているところ、仮に、OT、IT、企業システム企業等が既存ソリューションと同一目的・内容のものを提供するのであれば、工場生産高効率化等の点で既存ソリューションを大幅に上回るものでなければならない。“Smart Factory”化したいと顧客に思わせるには、従来水準を大きく上回る工場生産高効率化ソリューションを開発提供しなければならない。

II 3 (2) で論じたように、OT、IT、企業システム企業等は“Smart Factory”のITシステムの構成に応じて自社のコア事業領域を定め、“Smart Factory”インテグレーションに関してビジネスを本格的に立ち上げつつあり(表2参照)、それに従って、SiemensなどのOT企業がシステム構築を主導する領域(制御層、エッジ層)、SAP等ERP・MES企業がシステム構築を専管する領域(実行層)、OT企業・企業システム会社等が多数参

入してシステム構築する製造IoTプラットフォームの領域（エッジ層）の3領域が徐々に形成され、“Smart Factory”のシステム構成の明確化が進んだ。

これに対し、“Smart Factory”ソリューション・ビジネスの模索は着手したばかりであり、“Smart Factory”ならではの、OT企業、企業システム会社等ならではの独自ソリューションの開発提供には至っておらず、工作機械メーカー等が2000年代後半以降開発してきた工場生産高効率化ソリューションと基本的に同一内容のものを提供するに止まる。このため、OT企業、企業システム会社等には、“Smart Factory”ならではの独自ソリューションの開発提供が期待されている。

IV まとめ

I. では、“Smart Factory”の柱である、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御や製造関連ビックデータのAI解析によるカイゼンの自動化は元来工学的な研究対象であり、経営学・商学は手出しできないが、“Smart Factory”において、製造システム関連企業が如何なる事業領域に陣取り、相互に如何なる競合・提携関係に立つのか、“Smart Factory”を製造システム関連企業間の競争・提携関係の「束」に翻訳できれば、“Smart Factory”を経営学、商学の研究対象とする道が開かれると述べた。そこで、本稿では、“Smart Factory”において、製造システム関連企業が如何なる事業領域に陣取り、相互に如何なる競合・提携関係に立つのか、“Smart Factory”を製造システム関連企業間の競争・提携関係の「束」への翻訳を試みた。

第1期（2014～2017年）、ドイツ連邦政府の“Industrie4.0”提言ではコンセプトの域を出なかった“Smart Factory”の具体化が、OT、IT、産業機械、工作機械、ソフトウェア、クラウド企業等により進められた。その結果、“Smart Factory”の基本機能は、当座、工場・企業を基本単位として、(i) ERP・MES・PLCを垂直統合した企業ITシステムによる生産ラインの自動最適制御、(ii) 生産ラインを構成する設備・機械からリアルタイム

収集した製造関連ビッグデータを、デジタル・ツインを活用してA I解析し、生産ライン等製造バリュー・チェーンの最適化を図ることが“Smart Factory”の基本機能として合意された。

“Smart Factory”の基本機能を合意を受けて、システム構成については、I Tシステムの制御対象である生産ラインを構成する機械・設備を起点として考えるならば、一つは、ERP・MESの企業I Tシステムと接続し、変動する市場動向に即応した変種変量生産を実現するシステムが在り、一つは、個別機械・設備からセンサ・端末を介して製造関連データをリアルタイム収集し、A I等によりビックデータ解析した上で、設備稼働監視・予知保全等生産性向上に役立てるシステムが並存する形が基本となった。2つの情報処理ループから構成される“Smart Factory”は、単一企業がすべてのシステム・インテグレーションを引き受けるのが困難であり、O T、I T、企業システム、クラウド企業等がそれぞれ強みのある事業領域を基盤としてインテグレーション提案を行っているが、彼等のインテグレーション・ビジネス展開が“Smart Factory”の基本システム構成の明確化に貢献することとなった。

その結果、前掲図2の通り、“Smart Factory”では、企業I Tシステム及び製造I o Tプラットフォームの制御対象である制御層（生産ライン）（1.部分）に加えて、ERP・MESを垂直統合して企業I Tシステムによる生産ライン制御を実現する領域（4.部分）、生産ラインを構成する機械・設備より端末・センサを介してリアルタイム収集した製造関連データを保存しA Iによるビックデータ解析を行う領域（3.部分）が基本システム構成要素として成立。更には、O T企業は製造関連データの保存及びA I解析を製造I o Tプラットフォーム（3.部分）のエッジ・コンピューティングで実施することを提案しているのに対し、Microsoft、I B M等のクラウド企業はエッジ・コンピューティングに代わりクラウド・コンピューティングで処理することを提案しているところ、第3の資本システム構成要素としてクラウド・コンピューティング領域（2.部分）が形成された。

第2期（2018年以降）以降、“Smart Factory”関連ビジネスの本格的立上

げが開始されるが、“Smart Factory”関連企業は、“Smart Factory”を構成する主要3領域のうち自社が技術・事業上強みを有する領域を基盤として取組を展開する。“Smart Factory”の機能・システムの具体化を主導したSiemens等OT企業は、企業ITシステム及び製造IoTプラットフォームによる情報処理を基盤としたシステム構築を提案し、ERP・MESと制御層を接続・統合することで、IoT化された生産ラインの最適制御を行うことを主張。今後、“Smart Factory”関連企業のうちで最も広範なシステム領域をカバーしていることから、総合的なインテグレーション・プランの立案と実施ができる主体となることが期待される。

“Smart Factory”では、企業ITシステムと並んで製造IoTプラットフォームが中核的な役割を担うが、MES等産業オートメーション・システムの開発・インテグレーション会社である米Rockwell Automations、仏Dassault Systèmes等は、OT企業が自社の事業領域である製造IoTプラットフォーム・インテグレーションに参入しようとしていることに対抗すべく、産業オートメーションに係る知見・ノウハウの蓄積を活かした製造IoTプラットフォームを開発・提供しようとしている。なお、ERPの世界的な開発・供給者である独企業システム会社のSAPは、“Smart Factory”のシステム・インテグレーションに参入する考えはなく、自社ERPと各社の企業ITシステム、製造関連IoTプラットフォームとの接続性・機能連携を確保することで自社ERP需要が拡大することを狙っている。

また、Microsoft等クラウド企業は第1期には“Smart Factory”について関心が薄かったが、第2期にクラウド・コンピューティングによる製造関連ビッグデータ処理を提案、エッジ・コンピューティングとの適切な分担の下で、AIによるビッグデータ解析に必要な分析ツールを活用できる自社クラウド・コンピューティングの活用を提案している。

なお、いずれの“Smart Factory”関連企業も自社単独では“Smart Factory”のインテグレーションもソリューション提供も困難であることから、第2期の“Smart Factory”ビジネス立上げの過程において、OT、IT、企業シス

テム、クラウド企業等は、一方で事業領域を争うとともに、一方では企業提携を模索している。特に、生産ラインを構成する機械・設備からリアルタイム収集した製造関連データのAIによる解析・処理をエッジ層、クラウド層のいずれで行うかについては、4 Gから5 G、更には6 Gへの移行に伴う情報処理の大容量・高速化に応じてエッジ層とクラウド層の協業の在り方は絶えず変化するため、企業提携に向けた暗中模索が続いている。

以上のように、“Smart Factory”の柱である、企業ITシステムによる生産ラインの最適制御や製造関連ビッグデータのAI解析によるカイゼンの自動化は元来工学的な研究対象であるが、“Smart Factory”において、製造システム関連企業が如何なる事業領域に陣取り、相互に如何なる競合・提携関係に立つのか、“Smart Factory”を製造システム関連企業間の競争・提携関係の「束」に翻訳することで、OT、IT、企業システム、クラウド企業等が如何なる事業領域をコア領域として、“Smart Factory”インテグレーション・ビジネスを展開し、一社単独では“Smart Factory”の完全なインテグレーションが不可能に近い中で、相互の事業を補完する形で企業提携を模索していることを分析することが可能となった。

“Smart Factory”を工学の研究対象から経営学、商学の研究対象とする道は本稿の試み以外にも存在するであろうが、本稿はその初発の試みの一つであると考えており、今後、“Smart Factory”に係る経営学、商学の研究の出発点を提供することができれば望外の喜びである。

(筆者は関西学院大学商学部准教授)

参考文献

- Andelfinger, V. P. and T. Hänisch (2017), *Industrie4.0 Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*, Springer.
- Bosch (2020a), *IoT solutions for connectivity and field data usage*.
- Bosch (2020b), *Industrial IoT: how companies increase transparency and optimize operational efficiency*.
- Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016), *“Plattform Industrie4.0 Digitale Transformation “Made in Germany”*.

- Bundschuh, D. (2017), *Industrie4.0 in Deutschland Der Digitale Wandel in der Automobilindustrie*, Studylab.
- Dassault Systèmes (2016), *A PRACTICAL GUIDE TO TRANSFORM MANUFACTURING OPERATIONS WITH SMART PULL White Paper*.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hurzig, A. and W. Wahlster (2013), *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry: Final Report of the Industrie4.0 Working Group*, Acatech, Berlin.
- Kolberg, D., Knobloch, J. and D. Zuehlke (2017), “Towards a lean for workstations,” *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 10, pp. 2845-2856.
- Liker, J.K. (2004), *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*, McGraw-Hill, New York.
- Moeuf, A., R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo and R. Barbaray (2017), “The Industrial Management of SMEs in the Era of Industry4.0,” *International Journal of Production Research* 92, pp. 1-19.
- Siemens (2014), *Motion World* Vol. 1.
- Siemens (2019), *MindSphere Enabling the world's industries to drive their digital transformations*.
- Siemens (2020a), *Industrial Edge and AI Bring IT to the machine – Scalable, reliable and easy*.
- Siemens (2020b), *Artificial Intelligence In Manufacturing*.
- ASCI-IoT 2017年06月27日付記事 『「現在は標準が乱立して麻痺状態、業界はもっと落ち着く必要がある」IoT エッジの相互運用性目指す『EdgeX Foundry』設立、デルに聞く』 (<http://ascii.jp/elem/000/001/505/1505203/>)
- 大野耐一 (1978) 『トヨタ生産システム—脱規模の経営をめざして—』ダイヤモンド社
- 技術情報協会編 (2020) 『工場・製造プロセスへのIoT・AI導入と活用の仕方』技術情報協会
- 熊沢光正 (2013) 『トヨタ生産方式大全第2版 大野耐一 of 思想・理論・写真で見る実践』大学教育出版
- 経済産業省 (2018) 「製造プラットフォームを中核とした『Connected Industries』のためのオープン&クローズ戦略の実践方法」
- 坂本清編著 (2005) 『日本企業の生産システム革新』ミネルヴァ書房
- SAP (2016) 『目前に迫る第四次産業革命、今、SAPが描く企業のデジタルビジネス変革とは？』
- SAP (2017a) 『予知保全・調達改善「Factory IoT・SAP連携」製造ラインと基幹業務システムを繋げて工場改革』
- SAP (2017b) 『SAPが提供する予知保全ソリューション「SAP Predictive Maintenance and Service」の中身とは？』
- SAP (2019) 『BIツールを完全解説～ビジネス・インテリジェンスの概要・他システ

ムとの違い・機能・メリット・デメリット・選び方～』

S A P (2020)『SAP Software はインダストリー4.0をどのようにサポートするか?』

ダッソー株式会社 (2019)『世界で進む製造業のデジタル革命 日本のものづくり企業はどう乗り切るか』

日経クロストレンド編 (2019)『A I ・ I o T データ活用総覧2019-2020』日経 B P

日経コンピュータ・日経ものづくり他 (2014)『すべてわかる I o T 大全 モノのインターネット活用の最新事例と技術』日経 B P

日経産業新聞

2013年5月21日付記事 (工作機械 双方向で管理 ヤマザキマザック 装置開発 I o T を活用し新技術 保守診断やアプリ更新)

2013年5月28日付記事 (工作機械のオークマ 秘密工場で効率磨く)

2015年12月25日付記事 (製造革新 つながる工場 ヤマザキマザック 設備稼働率10%向上 映像で繁閑を分析)

日経「強い工場」取材班「コンパクトライン革命」、『日経ものづくり』2013年9月号 (<https://tech/nikkeibp.co.jp/dm/article/HONSHI/20130823/298983/>)

日本機械工業連合会 (2016)『世界の製造業のパラダイム・シフトへの対応調査研究～ I C T の徹底活用と新しい現場力 TAKUMI4.0 を目指して～』

Fanuc (2016)『ファナックの新たな I o T への取り組み Field system について』

堀切俊雄 (2016)「世界最強の工場運営のノウハウ 新しいトヨタ生産方式『トータル T P S 』」日経 B P

Microsoft (2019)『現実世界の I o T 製造企業の場合』

Monoist 記事

2016年3月10日「プラットフォームが勝つ時代、産業の基盤を目指すダッソー」

2016年8月30日「ファナックのスマート工場パートナーに200社以上が参加、デファクト 形成へ加速」

2017年10月4日「現場志向の I o T 基盤『FIELD system』が運用開始、稼働監視などを年間100万円で」(Fanuc 関連)

2018年8月20日「古い工場で実現したデジタルツイン、シーメンスが示す“デジタル”の本当の意味」

2018年11月15日「ファナックが FIELD system で描く、スマートに“動かす”工場の実現」

2019年8月19日「デジタルツインで改善を加速させるシーメンスのインダストリー4.0 モデル工場」

2020年3月17日「変種変量生産で効率50%向上、“世界的先進工場”は何を行っているのか」日立おおみか事業所

2020年7月22日「工場設備の立ち上げ期間を30~40%削減、モノづくり DX の価値を訴えるシーメンス」

2020年12月8日「アマゾンのエッジ侵攻が加速、国内製造業は違いを見せられるのか」

ロボット革命イニシアティブ協議会（2016）『スマートマニュファクチュアリングの実践
ケース：工作機械を核とする加工プロセスの生産性向上』