

工作機械メーカーのスマート・ ファクトリー

——第4次産業革命に対応した工作機械ビジネスの
新たな展開——

榎 本 俊 一

目 次

1. はじめに
2. 2000年代までの高付加価値化戦略と工作機械ビジネス
3. 第4次産業革命：21世紀における工作機械のパラダイム・シフト
4. 工作機械メーカーのスマート・ファクトリー
5. ま と め

1. はじめに

2000年以降、工作機械メーカーは円高と国際競争の熾烈化に対応して自動車・航空機等関連の高付加価値機に主力事業をシフトし、大口顧客からの受注確保のためソリューション・ビジネスを補完的に展開した。製造システムは工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置から成る物的部分と計画層・実行層・制御層の三層構造を取る企業情報システムのIT部分から構成されるところ、物的部分とIT部分のインテグレーションは相互に独立した事業領域を形成し、工作機械メーカーは工作機械メーカーを競合相手として顧客ニーズに最適化したマシンを製造開発し顧客を確保すればよかった。

ドイツが“Industrie4.0”において、変動する市場動向に即応した変種変量生産に製造業の未来があるとし、次世代製造システムとしてスマート・ファクトリーを提唱すると、工作機械メーカーを巡るビジネス環境は一変する。スマート・ファクトリーは、企業情報システムがIoTとAIの活用で生産ラインの自動最適制御を行い、CPSが設備・機器からリアルタイム収集された生産関連データに基づき工場を「カイゼン」していく自律的工場である。そこでは物的システムとITシステムは融合して、生産システムのインテグレーションにおける付加価値は機械よりもITにシフトする可能性が高い。さらに、ドイツはスマート・ファクトリーを工場単体に止めず、工場群・製造企業群をネットワーク化することを提言している。

これは工作機械を含む生産システム関連ビジネス（工作機械メーカー、産業機械メーカー、ソリューション・プロバイダ、機械・FA商社、ライン・ビルダー等）にとり巨大なパラダイム・シフトである。1970年代、我が国工作メーカーは工作機械のNC化というパラダイム・シフトに先行することで米国メーカーに代わり世界市場を制覇したが、次世代製造システムを巡るパラダイム・シフトへの対応如何では米国メーカーと同じ運命に陥ることもあり得る。さらに、今回のパラダイム・シフトでは、ライバルは工作機械メーカーだけではなく、「物的システム対ITシステム」の観点からソリューション・プロバイダ等IT企業が潜在的ライバルとして登場している。

こうした中、我が国工作機械メーカーは2010年代半以降自社工場のスマート・ファクトリー化に取り組み、それにより得られた経験・ノウハウを活かして、次世代製造システムに対応した工作機械の開発に取り組むとともに、工作機械単体でなくスマート化された工作機械システムのビジネス化に取り組み始めた。スマート・ファクトリーは先進国・新興国を問わず次世代製造システムとして期待され、工作機械メーカーのみならず、内外メーカーが業種・業態・企業規模を問わず具体化に邁進しているが、現状

ではスマート・ファクトリーは完成形どころかトルソーの域にも達していない。工作機械メーカーも自社工場での実験と顧客製造企業のスマート化に試行錯誤しつつ、「走りながら」スマート化の意義・効用やスマート化された工作機械システムを探索している。

第4次産業革命に伴う工作機械ビジネスの変化について、榎本（2017）ではソリューション・ビジネスの観点から分析を行った。工作機械メーカーは、工作機械単体ではなく工作機械システムに事業の重心を移しつつあり、顧客とのコンサルテーションにより、顧客のスマート化ニーズを明らかにした上で、自社のスマート化された工作機械を中核とした製造システムを顧客の製造現場でインテグレーションするビジネスを拡大している。榎本（2017）は、ソリューション・ビジネスが2000年以降の自動車・航空機等の一部大口顧客を相手とした補完的なものから中核的ビジネスに移行しつつあることを分析したが、調査時点の2016年から3年余が経過し、この間に工作機械メーカーは自社工場のスマート化を大幅に推し進め、次世代製造システムに対応した工作機械ビジネスも相当程度具体化してきており、新たな分析が必要となっている。

そこで、本稿では、2. で2000年代までの高付加価値化戦略と工作機械ビジネスを概観した上で、3. で、まずは2000年代の工作機械ビジネスでの対比により、第4次産業革命が次世代製造システムに求めるスマート・ファクトリー化が工作機械ビジネスに如何なるパラダイム・シフトをもたらすかを分析し、次に工作機械メーカーが2010年代半にパラダイム・シフトに対応して如何なるビジネス革新に取り組んだかを（榎本（2017）を批判的に検討しつつ）再考察する。その再考察を踏まえて、4. では、2016年以降の3年余で工作機械メーカーが自社工場のスマート化の取組から如何にスマート・ファクトリー像を具体化したか、顧客の製造現場のスマート化ニーズに応えるべく工作機械ビジネスを変革しているかを企業ヒアリン

グ・文献調査に基づき分析する。

次世代製造システムのスマート・ファクトリーはいまだ真の姿を現していないが、工作機械メーカーを含む生産システム関連産業の真剣な努力により5年にも満たない短期間で基本コンセプトは出揃いつつある。先進国製造業の競争力を大きく左右するであろう次世代製造システムが如何なる姿を取り、如何なる場所で、如何なる者により推進されるのかについて、日進月歩の動きに気圧されることなく注視と研究に取り組むことが必要ではないだろうか。

2. 2000年代までの高付加価値化戦略と工作機械ビジネス

(1) 持続的円高に対応した高付加価値化戦略

1970年代、工作機械のコンピュータ数値制御（NC）化というパラダイム・シフトを主導することにより、日本メーカーは1980年代には世界市場（先進国が主要市場）で標準機を中心に幅広い価格・機能の市場帯で競争優位を確立し、1990年代に韓国等後発国メーカーが日本企業の円高による競争力低下を好機として低～中価格帯に本格参入しても、複合加工機・5軸制御機の開発など高付加価値化戦略により挑戦を退けてきた。

しかしながら、2000年代、中国の爆発的な経済成長により、工作機械のグローバル競争の舞台が先進国市場に加えて新興国市場に拡がると、高度成長期と同様に国内集約生産・輸出戦略を採用する我が国工作機械メーカーは高付加価値化戦略の限界に直面する。すなわち、1985年プラザ合意以降の持続的円高は2000年代以降も終息せずコスト競争力を継続的に低下させたため、日本メーカーはこれに対応して製品の高付加価値化を追求せざるを得なかったが、この先進国市場に適した高付加価値化戦略は、将来的には高付加価値機の巨大市場となることが期待されるものの、現時点での工作機械需要は低価格・低機能品に止まる中国市場では「ミスマッチ」に

陥る。高価格の高付加価値品にシフトを進める日本メーカーの製品ラインアップでは、中国市場に参入し将来のための「橋頭堡」を築くのに必要な低コスト標準機の品揃えが競合相手よりも不足する結果を招いた。

一方、欧州メーカーは、中国の工作機械需要の将来的な高度化を見越し、現地生産により標準機の上・中級帯を安価な生産・供給することで本格的参入を進め、韓国メーカー等も技術力向上により中国等新興国市場の標準機市場への参入を図った。この動きに対して、1960年代から「生産・販売・サービスの三位一体の現地化」を基本方針としてきたヤマザキマザックは中国地場企業との合弁により欧米市場と同様に現地生産に踏み切ったが、現地化が軌道に乗るのに2010年代初までを要した。そして、海外でゼロ・ベースから現地工場を立ち上げ自前の販売・サービス網を構築する経験・ノウハウを蓄積していなかったオークマ、森精機（現DMG森精機。以下DMG森精機）は2008年リーマン危機以降の超円高局面の到来まで国内集約生産からグローバル生産に体制シフトできなかった。

円高に対応した高付加価値化戦略と中国市場攻略の矛盾に苦しむヤマザキマザック、オークマ、DMG森精機は、長期的にはグローバル生産体制へのシフトを模索しつつ、2000年代、世界経済の高成長とともに好況を続けた自動車・航空機・資源関連の工作機械需要に着眼し、高付加価値技術の開発により、これらの成長分野の高付加価値需要の取込みに注力した。ただし、自動車・航空機・資源分野の高付加価値需要を巡る競争は熾烈であり、工作機械メーカーは競争優位を維持するために工作機械の販売に加えてソリューション・ビジネスにも取り組むようになる。

(2) 萌芽段階のソリューション・ビジネス

2000年代以降、工作機械メーカーが取組をスタートしたソリューション・ビジネスとは「工作機械の販売に加えて、顧客の製造に関する課題を

探求し、解決方法を提案するサービスを提供する」ことで顧客の困込みと収益増を図るものであるが（山田（2005）、鈴木他（2009））、2000年代～2010年代前半に工作機械のソリューション・ビジネスは先行研究が指摘するほどの確立を見たわけではない。工作機械メーカーが自動車メーカー等重要顧客の依頼を受けて新製品開発に不可欠な加工方法を開発、当該加工に必要な工作機械・搬送装置・周辺装置等を調達して、顧客工場でセル生産ユニットなり生産ラインの一部を組み立てる事例はある程度の蓄積を見たものの、工作機械メーカーが製造分野・企業規模を問わずエンジニアリング・サービスを提供して顧客困込みを図ったというものではなかった。自動車・航空機等の大口顧客との取引において、他社との差別化を図る一助としてソリューション提供がなされた。

先行研究中、山田（2005）は工作機械メーカーのソリューション・ビジネスの将来的方向を考察し、ソリューションを総合エンジニアリングの提供、遠隔監視・メンテナンスの二つに類型化している。山田（2005）は、工作機械メーカーの活路を工作機械の製造・販売ではなく、工作機械を中心とした「開発・設計・生産のフル・システム」の提供に求め、顧客のニーズに基づき加工方法等を開発、設計支援のCAD、強度計算や流量計算など解析支援を行うCAE、加工データを作成する製造支援のCAM、製造工程間を自動化する工場自動化のFA、設計・製造・販売を統合するCIM等を組み合わせたシステムを設計し、システム構築に必要な工作機械・搬送装置・周辺装置等を一式調達し、顧客にフルターンキー納入する「総合エンジニアリング」を提案した。さらに、山田（2005）は「開発・設計・生産のフル・システム」の提供に付随するサービスとして、「工作機械の制御部分であるNC装置に通信設備を内蔵し、インターネットにて工作機械メーカーのサポートセンターに接続し、同センターにて機械の稼働状況の監視を行」い、顧客の機械が故障した場合にも工作機械メーカーがサポ

ートセンターから機械の状態を把握し、的確な対応を取る「遠隔監視とメンテナンス」もソリューション・ビジネスとして提言した。

山田（2005）の分類は顧客企業の生産ラインのライフ・サイクルに即して企画・設計・建設・保守管理にソリューションを分けたものであるが、鈴木他（2009）は当該分類を踏まえヤマザキマザックのソリューション・ビジネス（“Done in One”）に関する事例研究を行った。同研究によれば、ヤマザキマザックは①顧客との「綿密な打ち合わせ」により、顧客の現行生産方式とその改善目標を確認し、顧客の提供する図面・素材を使用して顧客の要求をクリアする加工方法を開発、続いて②当該加工に必要な工作機械だけでなく省人化・無人化のための搬送装置・周辺装置を含む生産ラインを具体的に設計し、生産ラインを運営管理するシステム、ヤマザキマザックが機械の作動状況を遠隔監視するためのシステムも含む総合的なシステムを組み上げ、③顧客との調整を経て最終的な生産方式を確定、工作機械・ソフトウェア等を納入し、生産システム立上げをサポートするとともに、④アフター・サービスとしてシステムの遠隔監視・メンテナンスを行っているとして、ヤマザキマザックは“Done in One”によりソリューション・ビジネスを本格展開していると結論する。

しかしながら、榎本（2017）で工作機械メーカー10社に対するヒアリングに基づき分析したように、第一に、鈴木他（2009）の研究実施時点（2008年）では、ヤマザキマザックが顧客の生産ライン構築に必要な工作機械・搬送装置・周辺装置・生産管理システムを調達する能力は限定的であり、多岐多様に涉る顧客ニーズに対応して「総合エンジニアリング」をビジネスとして完全に確立していたとは考えられない¹⁾。

1) 榎本（2017）によれば、ヤマザキマザックを含む工作機械大手メーカー10社は、多岐多様に涉る顧客ニーズに対応して生産ライン構築を柔軟かつ機動的に行っていくには、生産ライン構築に必要となる工作機械・搬送装置・周

第二に、鈴木他（2009）はヤマザキマザックが顧客の生産ライン全体の構築を請け負うライン・ビルダーであるのか、あるいは生産ラインの一部ないしセル生産ユニットを請け負うに止まるのかを「生産システム」構築の語を用いることで曖昧化している。ヤマザキマザックは汎用複合加工機をコアとするセル生産ユニットを用いた工程集約のノウハウを提供することで、日野自動車が少品種大量生産に特化した生産ラインを多品種少量生産・多品種変量生産に適合したラインに作り替えるのに貢献したが、2008年段階のヤマザキマザックのシステム構築はセル生産ユニットを基本提供単位とするもので、生産ライン全体の構築にはまだ対応できなかった。

第三に、ヤマザキマザックは生産ライン全体ではなくセル生産ユニットの構築を「総合エンジニアリング」として提供しているところ、同社が生産システムの生産実行管理に関して提供するソフトウェアは個別セル生産ユニットの統合制御に限定され、MES（製造実行システム）のような生産ライン全体の機械・装置を統合制御するものではない²⁾。

辺装置を可能な限り自社生産ないし自社調達できる「総合メーカー」化が必要であると考えているが、2016年11月現在時点でさえ総合メーカー化は未達の目標であり、各社は引き続きプレス機・射出成形機・ロボットなど他社との連携・協業に取り組む必要を認識している。

- 2) 製造システムは、工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置等が組み合わされた物的部分と企業情報システムと連動して生産ラインの実行・管理を行うIT部分から成り、顧客から製造システムの構築を引き受けた者は物的部分の構築（個別機械・装置に装着されたPLCにより個別機械等をプログラム通り駆動させることも含む）のみに限らず、個別機械・装置を連携して生産ライン全体の実行・管理を行う製造実行システム（MES）の構築にも対処する必要がある。そのためには、工作機械メーカーもSAP、GE、富士通等に劣らないビジネス・アプリケーション・ソフトの開発能力が必要となるが、通常、工作機械メーカーは（自社工場専用ソフトウェアは別として）個別顧客の求めに応じてビジネス・アプリケーション・ソフト開発を行ってお

第四に、2016年11月時点でもヤマザキマザック等工作機械メーカーは「通信回線の容量が限られ通信コストも高いため、常時接続によるリアルタイム監視は困難」であり、顧客は悪意あるハッカー、コンピュータ・ウイルスの侵襲を懸念するだけでなく、そもそも工作機械の稼働状況は企業の加工能力を端的に示す営業秘密であると考え、「工作機械メーカーがトラブルによる稼働率低下を防ぐために顧客の工作機械と自社ネットワークの接続を提案しても、顧客はネットワーク接続を忌避する」と回答しており、ましてや2008年時点でヤマザキマザックが顧客の生産ラインを常時遠隔監視し、稼働状況に応じてメンテナンスを行っていたとは考え難い³⁾。

現在、工作機械メーカーは第4次産業革命に対応してソリューション・ビジネスを独立サービスとして本格的に作り直しつつあるが、従来、工作機械メーカーが自動車メーカーなど一部の重要顧客の依頼を受けて、その新製品開発に不可欠な加工方法を開発し、当該加工に必要な工作機械・搬送装置・周辺装置等を調達、顧客工場で生産ラインの一部を組み立てることがなされたものの、工作機械メーカーが製造分野・企業規模を問わずエ

らず、対応力には限界が存在する。

- 3) 鈴木他（2009）は、ヤマザキマザックが顧客の生産ラインを常時遠隔監視し、稼働状況に応じてメンテナンスを行っていると報告するが、2016年11月時点のヒアリングでは、本文指摘以外にも、「特定工作機械メーカーが生産ラインを構成する機械の挙動を一括して把握し遠隔監視・メンテナンスしてくれれば便利であるが、生産ラインにはメーカーの異なる工作機械等が多数導入されており、現実的にはメーカー毎に遠隔監視・メンテナンス・サービスを受けざるを得ない。」「遠隔監視・メンテナンスのサービスは、工作機械メーカー各社がそれぞれの納入した単一の工作機械等を対象として、トラブル対応などユーザーが求める問題解決に要する範囲で、断片的に稼働状況に関するデータ等を携帯電話網やインターネットを通じて入手し、顧客にサービス提供しているに過ぎない。」との回答があり、ヤマザキマザックと顧客のITシステムがインターネットにより常時接続され、ヤマザキマザックが顧客の生産ラインを遠隔監視・メンテナンスしていたとは考えられない。

ン지니어リング・サービスを提供して顧客囲込みや収益増を図ろうとするまでソリューション・ビジネスは本格化していたわけではなかった。

2010年代半までの工作機械メーカーのグローバル競争は内外を問わず工作機械メーカー間の争いであり、世界工作機械市場の成熟化に伴う自動車・航空機・資源関連分野での高付加価値品を巡る競争にしても、2000年代の中国の爆発的成長により世界工作機械市場が先進国市場（高付加価値機が需要の中心）と低価格標準機を需要する新興国市場（低価格・標準機が中核的な需要）に分化する過程での両市場を巡る競争においても、工作機械メーカー同士が世界経済の成長とともに拡大する工作機械需要を巡り優勝劣敗を競うものだった。ソリューション・ビジネスは「製造業のサービス化」の一環であり、工作機械メーカーが自動車・航空機産業等に属する大口顧客との取引において、他社との差別化を図る一助として展開された、あくまでも「補完的」ビジネスだった。

3. 第4次産業革命：21世紀における工作機械のパラダイム・シフト

工作機械では1970年代に伝統的な汎用機からNC（数値制御）機のパラダイム・シフトが発生し、伝統的汎用機に拘泥した米国メーカーを後目にいち早くNC化に取り組んだ日本メーカーが世界工作機械市場で競争優位に立つこととなった。2010年代半にドイツがIoT（Internet of Things）とAIの技術革新を活用した次世代製造モデルとしてスマート・ファクトリー（Smart Factory）と生産デジタル化を提唱すると、世界的にスマート・ファクトリーは次世代製造の競争優位を左右するものとして認識されるようになり、現在、工作機械・産業機械等においても、この次世代製造モデルへの対応が課題となっている。工作機械のNC化というパラダイム・シフトの波に乗り世界市場を制覇した日本メーカーは第4次産業革命を新たなパ

ラダイム・シフトとして捉え、主力事業を工作機械単体の製造・販売から工作機械を組み込んだ次世代製造システムの製造・供給にシフトしようとしており、ソリューション・ビジネスも一部の重要顧客に対する工作機械の販売促進のための補完的なものから、次世代製造システム・ビジネスにおいて中心的役割を果たすものに転換しようとしている。

(1) 第4次産業革命とスマート・ファクトリー

現在、低賃金労働を武器に製造サプライ・チェーンの川下最終工程を担ってきた中国が技術力、イノベーション力を獲得しつつあり、米国IT企業がグーグルの自動運転車事業などIT技術との融合により製造部門参入を試みる中、国際競争力を「ものづくり」に求めてきたドイツ、日本等は「ものづくり」の競争優位を維持するためのイノベーションが必要となっている。この点、2010年代半以降ドイツは製造業の競争優位を維持する策として第4次産業革命の語源となった“Industrie4.0”を提唱している⁴⁾。

① 市場動向に即応する変種変量生産の実現

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ており、“Industrie4.0”では、変動する市場ニーズに迅速・的確に対応するために生産ラインを企業情報システムにより徹底的にコントロールする「スマート・ファクトリー」をIoTとFA (Factory Automation) の融合により実現することを提言している。製造業のITシステムについては次項②で説明するが、ドイツはERP、MES、PLCの三層から成るITシステムを垂直統合して、市場ニーズの変動に応じて企業全体の生産計画を機動的に見直し、生産ラインをコ

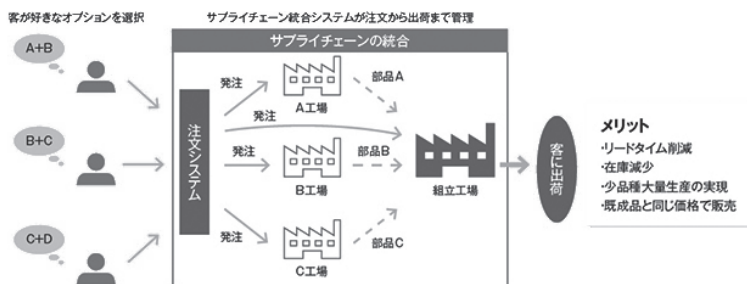
4) Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016).

ンピュータにより最適制御，柔軟な生産・出荷を行うことを次世代製造システムの課題としている。

また，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しているように，現実世界では製品は多数企業の分業・協業により製造されており，如何なる企業も自社単独で必要な部品・材料をすべて生産し最終製品まで生産することはできない。このため，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実現するには，スマート・マニュファクチュアを個別工場・企業単位で完結させずに，スマート・ファクトリー同士をITシステムにより結合して（トヨタ等の親企業・協力企業の協業関係のように）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・購買調達管理・プロジェクト管理等を行うシステムを共有し，あたかも一つのスマート・ファクトリーであるかのように協働作業を行うことが必要となる。

各工場がスマート・ファクトリー化するだけではなく，個々のスマー

図1 スマート・ファクトリーの結合によるマス・カスタマイゼーション



マスカスタマイゼーションの一例
プレハブハウスメーカー STREIF
(www.streif.de)

12,000点の部材から選択して建築家によるデザイナーハウスのような家を低コストで実現。

(出所) 西村健介 (2015) 「西ドイツから学ぶインダストリー 4.0の地方中小企業への影響」

ト・ファクトリー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し、さらには国全体を一つのスマート・ファクトリー化することは（従来の）個別工場の枠を超えた企業・社会単位での（究極の）FA化といえようが、ドイツは“Industrie4.0”において国全体（さらには国境を超えた）スマート・ファクトリーを提言している（図1参照）。

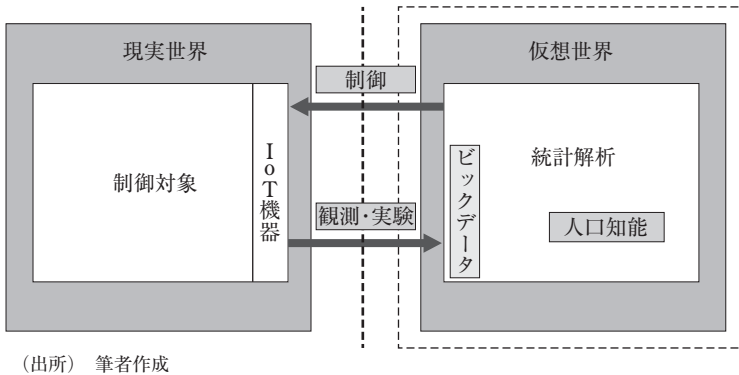
② 生産のデジタル化と CPS

ドイツは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機動的に実行するスマート・ファクトリーを提言。さらにドイツはスマート・ファクトリー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る。具体的には、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でと実現しようとしている。

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みである⁵⁾。このため工作機械等の機能を徹

5) JEITA（電子情報技術産業協会）は「CPSとは、実世界（フィジカル空間）にある多様なデータをセンサーネットワーク等で収集し、サイバー空間で大規模データ処理技術等を駆使して分析／知識化を行い、そこで創出した情

図2 CPSにおける現実界と仮想界の対応関係



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、最適の生産ラインの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(図2参照)⁶⁾。

報／価値によって、産業の活性化や社会問題の解決を図っていくものです」とする(<http://www.jeita.or.jp/cps/about/>)。

- 6) 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

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，従来の製造システムを代表するトヨタ生産方式（TPS）では，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することを目指してきた。これに対して，“Industrie4.0”のデジタル化された生産システムでは，CPS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絶えず割り出して，物的生産システムに実行指示することを期待しており，生産管理者の「カイゼン」よりも「人口知能」によるCPSが付加価値の大きな部分を生み出すようになって考えられている。

（2）従来の製造システムと工作機械ビジネス

製造システムは，工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置から成る物的システム⁷⁾と生産ラインを制御するITシステムより成る。従来，両システムは工作機械・産業機械メーカーとソリューション・プロバイダがそれぞれ基本的には独立して供給してきたが，“Industrie4.0”の次世代製造システムでは両者の一体設計・構築が必要であり，それに伴い，物的システムの領域で完結してきた工作機械ビジネスは大きな変更を受けると予想される。

① 製造業のITシステム

ITシステムは生産現場のフィールド機器の制御を司るPLC（Programmable Logic Control），各工場での生産実行管理を行うMES（製造実行システ

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。

- 7) 生産ラインは工作機械・ロボットだけで構成されるわけではなく，①ワークを移動させて複数の工程をつなぐ搬送装置，②計測・洗浄・組立て・バリ取りなど切削以外の工程を担う装置や素材・完成品をストックする装置等の周辺装置も一体となって生産ラインを形成する。

図3 製造業のITシステム

<p>ERP (Enterprise Resource Planning)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・生産管理・在庫管理・会計管理・販売管理を統合管理するシステム
<p>MES (Manufacturing Execution System)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基幹システムの指示する生産計画を受けて、最適化された形で個別機器を連携し生産ラインの実行・管理を実施、活動結果はフィードバック ・経営者は最新の生産状況と市場需要動向を踏まえ生産・販売計画を最適化、改めて生産現場に指示 ・生産現場は計画修正に対応してMESにより生産活動を改めて最適化
<p>PLC 制御システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PLC (Programmable Logic Control) により個別機器のリレーやタイマー等を制御、機器をコントロール ・PLC 制御される機器を情報システムに接続、集中的にコントロールし生産ラインの全工程を自動化
<p>個別設備・機器 (導入年代・製造会社が異なり通信規格・管理機器は非統一)</p>

(出所) 筆者作成

ム: Manufacturing Execution System), 企業の全工場を対象として生産管理・在庫管理・購買調達管理・プロジェクト管理等を行うERP (Enterprise Resource Planning) の3層構造を採る(図3参照)。

従来、製造企業は生産ラインを構成する機械・装置にPLC⁸⁾を装着し、個別機器のリレーやタイマー等をプログラムに従ってコントロールできるようにした上で、PLC制御される機械・装置を通信ネットワークで相互接続するか情報システムに接続して集中的に制御することにより、資材運搬・加工・組立など生産ラインの全工程を自動化してきた。製造企業は生産・販売計画に基づき生産ラインを稼働させ、受注・在庫状況に応じて生

8) シーケンス制御(予め定められた順序又は手続に従って機械が段階的に作動するよう制御すること)専用のマイクロ・コンピュータを利用した制御装置。パソコンや専用の入力機器により制御内容をプログラム化、機器にプログラムを逐次実行させる。

産・販売計画を修正し、それに応じて生産ラインの稼働状況を修正することで市場動向に対応した生産活動を実現しようとするが、そこではITシステムが中核的な役割を果たすことが期待され、生産・販売の計画策定・修正を行う基幹システム（ERP）が生産指示を下し、それに基づきMESが工作機械・ロボット・搬送装置・周辺装置等の個別機器を連携させて生産ラインの実行と管理を行うこととなる⁹⁾。

すなわちMSEが管理対象とする生産活動は製造企業の中核的活動であるが、企業活動は受注・販売管理、在庫管理、生産管理、財務会計等の基幹業務から、人事給与、経費精算、固定資産、プロジェクト管理、管理会

- 9) MESは下表に列記した機能を実行することにより基幹システムの指示する生産・販売計画に応じて最適化された生産活動（素材・部品の受発注、生産ラインの選択・段取り替え及び機器制御、製造後のロジスティクス）を実行し、その結果を基幹システムにフィードバックする。フィードバックを受けて、製造企業の経営者は生産現場の状況をリアルタイムに把握、最新の市場需要動向と生産現場の状況を踏まえ改めて生産・販売計画を最適化し生産現場に指示、生産現場はその生産・販売の計画修正に対応してMESにより生産活動を最適化し直すプロセスが繰り返される。

基本情報管理	製品・工程・加工・設備機器・在庫・作業等基本情報の管理
製造計画	基幹システムより送信された製造指示（大日程計画）を管理
ロットサイジング（まとめ）	生産計画で指示された生産数を納期に合わせ最適な生産数で生産できるようにロット分割・集約を実施
工程管理	ワークの工程内の流れをテーブルによりロケーション管理 ロットの動きとデータをトラッキング、進捗状況をフォロー
品質管理	工程・検査・装置等の情報を収集、情報分析・統計管理し、生産管理にフィードバック（生産品質向上に）
倉庫管理	最適な入出庫のスケジュールを決定・実施

計、顧客管理、予算管理など多岐にわたり、これらの活動を統合して効率的に行うことが競争力につながり、ERP 以下垂直統合された企業情報システムが企業活動全体の全体最適化を達成することが求められる。

ERP は企業の経営資源（ヒト、モノ、カネ、情報）を一元管理し、業務組織横断で資源を有効活用することで利益最大化を図るもので、欧米企業は生産活動を含む全企業活動を ERP により一元管理し、財務会計の観点から業務・資源のロスをカットし、企業活動の効率化を目指してきた。元々の ERP の目的は財務会計の全体最適にあり生産活動の効率化（部分最適）ではないが、企業の全工場を対象として生産管理・在庫管理・購買調達管理・プロジェクト管理等を行う ERP、各工場での生産実行管理を行う MES、生産現場のフィールド機器の制御を司る PLC をシステムとして垂直統合すると、結果的に市場の多種多様なニーズに応じて生産計画を見直し、機器を適切に制御して柔軟な生産・出荷を行うことが可能となる。

次世代製造システムと期待されるスマート・ファクトリーでは、製造業の IT システムを垂直統合し、時々刻々変動する市場ニーズや経営環境に対応して生産ラインを自動制御することを目指している。しかしながら、これまでの IT 技術では、IT システムの 3 層垂直統合は困難であり、ERP による MES・PLC の自動制御は実現できなかったため、完全垂直統合は取り敢えず棚上げされ、生産現場のフィールド機器を制御する PLC、各工場での生産実行管理を行う MES により、「工場単位」での生産ラインの自動化と制御が追求されてきた。

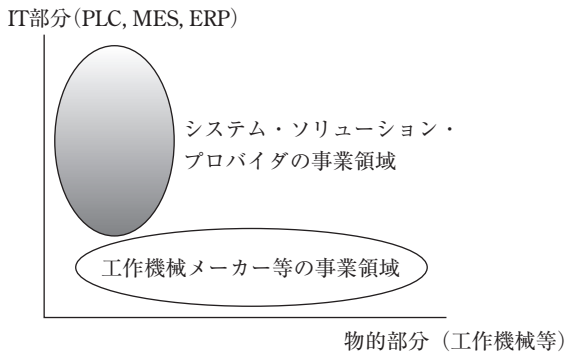
計画層の ERP と実行層の MES 以下の間にはシステムの「裂け目」が存在し、製造企業本社が ERP の補助により決定した生産計画を各工場が指示として受け取り、MES 以下のシステムに制御要件としてインプットし生産に当たり、本社は各工場の生産実績と新たな市場での需要動向等を踏まえて生産計画を修正し、改めて各工場に生産計画を指示すると各工

場が MES 以下のシステムに制御要件を改めて入力し生産に当たることを繰り返した¹⁰⁾。

② 従来の物的システムに重点を置いた工作機械ビジネス

次世代製造システムとは異なり、従来の製造システムにおいては物的部分と IT 部分は独立した関係にあり、2000年代の日本製造企業の多くでは、工場生産ラインを構築する場合、ERP・MSE・PLCを垂直統合して生産管理・在庫管理・会計管理・販売管理をシームレスに統合運用することまでを要求しなかった。このため、製造システムの IT 部分はソリューション・プロバイダがシステム・インテグレーションを行い、それとは別途に物的部分は顧客製造企業自身か、機械商社なり、ライン・ビルダーなりが工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置等を組み合わせてシステム・インテグレーションを行うのが一般であって、両者の事業領域は独立した関係にあった（図4参照）。

図4 従来の製造システム構築における事業関係



(出所) 筆者作成

10) 欧米製造業も必ずしも IT システムの統合運用ができていないわけではないが、我が国製造企業は IT システムの統合運用で遅れを取っている。FA 化が

工作機械メーカーは「マシン屋」であり、顧客ユーザーの求める工作機械を開発設計し製造供給することが基本ビジネスである。工作機械販売には直販制・代理店制の二形態があるが、通常、工作機械メーカーは専門代理店制をベースとして、専門代理店を介して把握した顧客ニーズに応じて工作機械をカスタマイズ生産して供給する。2000年代以降、工作機械メーカーは持続的円高によるコスト競争力低下や後発国メーカーとの競争の熾烈化に対応して、ソリューション・ビジネスへの取組をスタートさせ、自動車メーカー等重要顧客のために新製品開発に不可欠な加工方法を開発、当該加工にカスタマイズした工作機械を製作、その専用機に併せて生産ラインのインテグレーションに必要な搬送装置・周辺装置等を調達、顧客工場で生産ラインの一部を組み立てるようになる。これにより工作機械メーカーはインテグレーション・ビジネスにも進出することとなったが、「マシン屋」がより精確に自動車・航空機・資源関連の顧客の「マシン」ニーズを理解し良いマシンを開発製造する手段であった。

また、2010年代半までの工作機械メーカーのグローバル競争は内外工作機械メーカー間の闘いであり、世界市場の成熟に伴う自動車・航空機関連分野など高付加価値品を巡る競争にしても、2000年代に先進国市場（高付加価値機が需要の中心）に並び急成長した新興国市場（低価格・標準機が中核的な需要）を巡る競争にしても、工作機械メーカー同士が優勝劣敗を競う

生産拠点・ライン毎に計画され、管理システムも生産拠点・ライン毎に導入されるケースが珍しくないように、日本メーカーはシステム統一に十分な注意を払っているとはいえない。また、日本企業のERPは生産管理・在庫管理・会計管理・販売管理をシームレスに統合できていないため、例えば製品完成時に作業担当者が完成数量をコンピュータ入力して生産管理・在庫管理に反映させ、製品販売時にも販売担当者が販売金額・数量を入力して販売管理・在庫管理に反映させなくてはならない状況にあり、ITシステムがかえって生産性向上に役立っていない事例も見られる。

ものであり、スマート・ファクトリーにおいて製造システムの物的部分とIT部分の一体化に伴い想定されるソリューション・プロバイダとの競合は念頭になかった。ソリューション・ビジネスは工作機械メーカーにおける「製造業のサービス化」の一環であり、自動車・航空機産業等の大口顧客との取引において差別化を図る一助としてなされたものであり、インダストリアル・エンジニアリング・サービスを工作機械の開発製造に並ぶ収益部門としたり、ましてや製造システムのIT部分のインテグレータへの対抗を意図したものではなかった。

(3) 工作機械メーカーによる第4次産業革命への草創期対応

ドイツが“Industrie4.0”で提言したスマート・ファクトリーが次世代製造モデルとなるかは絶対確実ではないものの¹¹⁾、1970年代のNC化に対応できなかった米国メーカーの没落を目撃した日本工作機械メーカーは第4次産業革命への対応の遅れが自らの没落と覇権交代を惹起しないかと警戒し、2010年代半以降スマート・ファクトリー化に関する研究と工作機械ビジネス変革をスタートさせた。

① 工作機械メーカーの草創期対応に関する調査研究

工作機械メーカーの草創期の取組に関して、榎本（2017）は、第4次産業革命が工作機械を含む生産システム関連産業（物的部分・IT部分を問わず

11) 少なからぬ工作機械・産業機械メーカーが、①市場動向に即応した変種変量生産が製造業の未来像であるかを疑問視し、個別工場・企業を超えた企業グループ単位でのスマート・ファクトリー化が達成可能なのは自動車産業に限られるのではないかと、②垂直統合された企業情報システムにより製造ラインを最適制御する製造部門もあるだろうが、多くは制御層（PLC）においてIoT技術によりリアルタイムで収集された大量のデータを、実行層（MES）でAI解析することで製造ラインを最適制御するに止まるのではないかとドイツの見直しに疑問を呈する。

工作機械メーカー、産業機械メーカー、ソリューション・プロバイダ、ライン・ビルダー、機械・FA 商社等生産システム構築に関連する産業) にとりパラダイム・シフトに近い変革をもたらす可能性があるとの認識の下に、2016年の企業ヒアリング等に基づき調査結果をまとめた。ただし、工作機械メーカーが次世代製造システムのスマート・ファクトリーに関して本格的検討を始めたのは2015年以降であり、その第4次産業革命への対応は今以上に「手探り」状態にあったことから、榎本(2017)は工作機械メーカーの取組の方向性を「抽出」するに止まらざるを得なかった。本稿では、工作機械メーカーが次世代製造システムに本格的対応をスタートして3年間経過した現時点で如何なる進展を示しているかを分析報告する(4. 以下)。

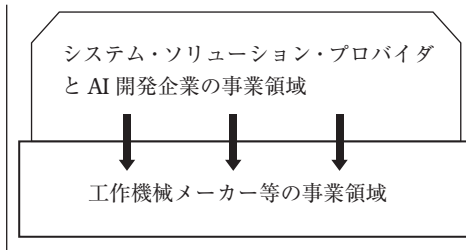
また、榎本(2017)は、次世代製造システムで物的部分とIT部分が一体不可分化することに着眼し¹²⁾、工作機械メーカーを広く生産システム関連産業(工作機械メーカー、産業機械メーカー、ソリューション・プロバイダ、機械・FA 商社、ライン・ビルダー等)の枠組で捉えることを提案。工作機械メーカーが生産システム関連産業の中で如何なるポジションを占めビジネスを展開していくのかを考え、従来競争関係になかった工作機械メーカーとソリューション・プロバイダとの競争あるいは提携について分析を試みている。詳細は次項②で見えるが、同研究の問題意識は以下のとおりであり、工作機械メーカーの第4次産業革命への対応を考える上で引き続き有効な観点であると思われる。

12) 日刊工業新聞2015年11月12日付(「ヤマザキマザック、スマート・ファクトリー提案—工作機械ソフト刷新 IoT対応を強化」)、MONOist 2015年7月15日配信(「DMG 森精機 社長が語る：世界1位の工作機械メーカーが目指すインダストリー4.0」)(<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1507/15/news043.html>)等。

(a) 従来、製造システムの物的部分と IT 部分は相互に独立したシステムであったが、市場動向に即応して変種変量生産を機動的に展開するスマート・ファクトリーにおいては、物的部分と IT 部分は一体不可分であり、企業情報システム（ERP・MES・PLC）を垂直統合した IT システムが工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置から成る物的部分を統合制御することとなる。特に CPS が運転管理者による「カイゼン」に取って代わり、生産ラインの最適制御をも行うようになると、製造システムの付加価値は工作機械メーカーの事業領域である物的部分よりもソリューション・プロバイダの事業領域である IT 部分にシフトする可能性がある¹³⁾。

13) 従来、生産システムの物的部分と IT 部分は本文図 4 のとおり事業領域として棲分けされており、工作機械メーカー、ロボット・メーカー等は工作機械・ロボット等の高度化・多様化に専心できた。第 4 次産業革命後の次世代製造システムにおいて物的部分と IT 部分が「融合化」すると、「生産システム産業分野」での付加価値分配は、システム・ソリューション・プロバイダと工作機械メーカー等の「闘い」になる可能性がある。極論すれば、下図のように工作機械メーカーは物的システムを納入するシーメンス、SAP 等の下請になってしまう事態も一つの未来としてあり得る。

IT 部分（PLC, MES, ERP+CPS）



物的部分（工作機械等）

一方、デジタル化した次世代製造システムでも、物的システムの優劣が生産システムの効率性を左右する以上、優れた物的システムを考案し、所要の工作機械等を一式調達しシステム納入できる工作機械メーカーはソリューション・プロバイダの不可欠のパートナーである。総合工作機械メーカー化し、顧客の如何なる求めに対しても、最適組合せの生産関連設備・機器を一式調達し、生産システムとして一括納入できるほど魅力が高まる。また、プ

- (b) 従来、製造システムの物的部分と IT 部分のシステム・インテグレーションは独立した事業領域を成しており、付加価値も事業領域毎に関係者間で配分されており、工作機械メーカーは超剛性削り等の特殊機能に特化した専用機械メーカーであっても十分な付加価値配分を確保できた。しかしながら、次世代製造システムのインテグレーションが物的部分・IT 部分一体でなされるようになり、付加価値配分も IT 部分にウェイトが存するようになると、生産ラインに不可欠ながら特定社しか開発製造できない専用機械のメーカー以外は十分な付加価値を得るのが難しくなる可能性がある。
- (c) この付加価値配分の問題はヤマザキマザック、オークマ、DMG 森精機等の工作機械メーカー大手も同様であり、彼等も工作機械ビジネスで収益確保するには (i) 生産ラインの構築に必要な機械・装置を“one stop”で提供する総合メーカー化で魅力を高めつつ、(ii) 自動車・航空機分野等の一部大口顧客の受注確保の観点から行ってきたソリューション・ビジネスを本格化し、顧客企業のニーズに応じて生産ラインを企画・設計し、生産ライン構築に必要な工作機械・産業機械・搬送装置・周辺装置等を調達、顧客工場で生産ラインを組み立ててターン・キー納入するライン・ビルド事業に取り組む必要があると考えられる。
- (d) ただし、大手メーカーといえども、顧客の生産ライン構築に必要な機械・装置をすべて自前で生産することは難しく、「総合メーカー」化を目指す工作機械メーカーは工作機械・周辺装置・搬送装置・治具メーカー等と提携する必要がある。また、次世代製造システムのインテグレーションにおいてソリューション・プロバイダは工作機械メーカーにとり競合相手であると同時に提携相手でもあり得ることから、ソリューション・ビジネスにおいて工作機械メーカーとソリューション・プロバイダが相互に技術・ノウハウを補完し合うことも一つの有力な事業展開ではないか。

ロバイダは IT システムの統合について工作機械メーカーの及ばない技術・ノウハウ・経験を有するが、生産現場で工作機械等を連携させて生産ラインを最適な形で実行・管理させる技術とノウハウを有するのは工作機械メーカーであることから、工作機械メーカーは次世代製造システムの構築において、物的システムと IT システムのベスト・ミックスに優れたパフォーマンスを発揮する余地がある。このため次世代製造システムの製造開発及びインテグレーションに関して、工作機械メーカーとソリューション・プロバイダが提携・協業する余地も大いにあり得ると考えられる。

② 榎本（2017）の調査結果

2016年末時点での企業ヒアリング及び公開資料等に基づく調査を整理すると以下(a)～(c)の3点にまとめることができる。

(a) 生産デジタル化に対応した工作機械等のIoT化

工作機械メーカーが工作機械の製造事業者である以上、同業他社との競争に打ち勝ち顧客を獲得する上で、「優れたマシン」「良いマシン」を企画開発し製造供給し続けることが絶対の前提である。ただし、次世代製造システムであるスマート・ファクトリーでは、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）が目指されており、工作機械メーカーも「マシン」の性能向上のみに注力するだけでなく、自社製品を次世代製造システムに組み込めるように工作機械のIoT化に取り組む必要がある。

このため、2015年以降、工作機械メーカーは米国IT企業との提携により、工作機械・搬送機・周辺機器等にICタグ等を装着し、カメラ・センサで読み取った情報をクラウド上にリアルタイムで送信できるシステムを共同開発しようとしている。ヤマザキマザックはシスコシステムズと、製造元・製造時期を問わず工場内の設備機器全てを安全にネットワーク接続する装置の開発に加えて、ビック・データ解析及び生産性向上のためのクラウド・サービスの共同開発に着手している。DMG森精機はマイクロソフトとの提携により、工作機械に取り付けたセンサから稼働状況データを収集し故障予測や稼働状況を遠隔監視する技術、製造時にインターネット接続を想定していなかった中古機械のスマート化のための技術の共同開発に着手している。

表1 工作機械メーカーと米国 IT 企業との提携

ヤマザキマザック	オークマ	DMG 森精機
○2015年11月、シスコシステムズと工場内設備機器を安全にネットワーク接続するための装置(メーカー、新旧を問わず接続可能)を共同開発(MAZAK SMARTBOX TM)	2016年11月、オークマはGEのソフトウェア子会社 GE デジタルと協業を決定、産業用 IoT プラットフォームの PREDIX をオークマ製品に組み込むことを決定 (PREDIX は産業用機器においてデータを取得する一種の OS であり、リアルタイムな情報・データの収集・分析を実施)	2016年9月、DMG 森精機はマイクロソフトと提携合意、① 工作機械に取り付けたセンサから稼働状況データを収集し、故障予測や稼働状況を遠隔監視する技術、②1990年代販売されたインターネット接続を想定してない中古機械のスマート化のための技術の共同開発に着手
○2016年11月、シスコシステムズと工場内設備機器を安全にネットワーク接続するための製品、ビック・データ解析及び生産性向上のためのクラウド・サービスの共同開発を決定		

(出所) 各社プレス発表資料等に基づき筆者作成

一方、オークマは工作機械等に装着して稼働状況データ等を収集し、クラウドにリアルタイムで送信してビック・データ解析する装置の自主開発は行わず、米国 GE のソフトウェア子会社である GE デジタルとの協業により、同社の産業用 IoT プラットフォームである PREDIX をオークマ製品に組み込むことを決定している。

(b) 総合工作機械メーカーに向けた努力

工作機械メーカーは、シーメンスとは異なりソリューション・プロバイダを兼ねておらず、基本的に物的装置である工作機械の生産者である。生産デジタル化の過程で製造システムの重心が物的システムから IT システムにシフトしても、依然、製造システムの生産性・効率性は物的システムにより大きく左右されることに変わりはない。したがって、工作機械メーカーは工作機械等の開発・製造・供給における競争優位を強化し、スマー

ト・ファクトリーにおける物的システムの供給者として余人の真似できない地位を獲得することが一つの競争戦略となる。

そしてJIMTOF（日本国際工作機械見本市）2016参加企業（ヤマザキマザック、オークマ、DMG森精機、牧野フライス製作所、ジェイテクト、三菱重工工作機械、新日本工機、アマダ、ファナック、三菱電機）へのヒアリングでは「第4次産業革命のスマート・ファクトリーでも、生産ラインの生産性向上には、工作機械の操作の巧拙、段取り、保守点検等を含めたノウハウが成果を左右する。生産のデジタル化により生産・在庫・購買調達・プロジェクト管理等を統合管理することで全体最適を追求することは意義があるが、同時に工作機械単体及び生産ラインの最適制御に関するノウハウにも大きな付加価値がある（ノウハウのソフトウェア化と顧客提供は工作機械メーカーにとり商機となる）」¹⁴⁾との見解が示されたが、工作機械メーカーは工作機械単体だけでなく生産ライン全体の最適化に関するノウハウ・知見を活かす必要がある。

すなわち次世代製造システムのうち物的部分の生産性を最大化するには、単に「優れたマシン」「良いマシン」が提供されれば足りるわけではなく、「マシン」の能力を最大限発揮できる生産ラインが構築され「マシン」が据え付けられる必要がある。スマート・ファクトリーのインテグレーションで付加価値をより高めるには、工作機械メーカーは単に「マシ

14) JIMTOF 2016参加企業10社に対するヒアリングでは、「製造業の高度化は生産プロセスの機械化により実現されてきており、スマート・マニュファクチャーにおいても工作機械を核とする加工プロセスは生産において重要性を減じない」「加工プロセスは工作機械の操縦の巧拙により大きな差が生じ、段取り・保守点検等も含む総合的なノウハウが生産性を左右する」との回答が10社よりあり、「工作機械メーカーは工作機械・搬送装置・周辺装置等の最適化された組合せを提案し、生産ラインを効果的に実行・管理するノウハウを提供することを競争の武器とし得る」と7社が回答。

ン」を顧客製造企業に販売するだけでなく、顧客の製造現場に合わせて「マシン」の性能を最大限発揮する生産ラインについても提案することが求められる。この場合、顧客の製造現場に合わせて柔軟に生産ラインが構築できるよう工作機械・搬送装置・周辺装置等についても可能な限り広いラインアップを用意できるほど工作機械メーカーの競争力は高くなると考えられる（総合工作機械メーカー化）。

この点、企業ヒアリングでは、ヤマザキマザック、オークマ、DMG 森精機は、総合的に工作機械・搬送装置・周辺装置・生産管理システムを取り扱う総合工作機械メーカーたらんとしており、生産ラインを構成する工作機械等がスマート・ファクトリーにおいて全体システムと接続・協同可能となるように技術・製品開発に取り組んでいることが分かった。

(c) ソリューション・ビジネスの本格展開——ライン・ビルダー化

「マシン」の性能を最大限引き出す生産ラインを組み立てる技術・ノウハウを有しているのは「マシン」の企画・開発・製造に当たった工作機械メーカー自身である。前項(b)の総合メーカー化は、顧客メーカーが「マシン」の性能を最大限発揮させる手助けとして、顧客の製造現場の状況に応じて「理想的な生産ラインを構築するのに必要な工作機械・搬送装置・周辺装置等を提供するためのものである。総合メーカー化するならば、工作機械メーカーは更に進んでライン・ビルダー化し、顧客メーカーから生産ラインの企画・設計、「マシン」を含む生産ラインの構築に必要な機械・装置の調達、顧客製造現場での生産ラインの構築を一貫して引き受ける道も開け、このライン・ビルダー化が次世代製造システムのインテグレーションにおける工作機械メーカーのポジションを強化することにつながらないだろうか。

例えば、DMG 森精機は「第4次産業革命の構成要素のうち生産工程の自動化が最も不可欠なものである」として、「切削加工を行う工作機械、

ワーク（加工対象物）を移動させて複数工程をつなぐ搬送装置、計測・洗浄・バリ取りなど切削以外の工程や素材・完成品をストックする装置などの周辺装置、工作機械・周辺装置を集中制御する生産管理システムを顧客の要件に合わせて柔軟に組み合わせて、自動化システムを構築する」システム・インテグレーションに本格的に取り組むとしている。同社はシステム・インテグレーションの規格化に向けて、自動化システムを「Standard Automation」「Cells」「Systems」に類型化し（表2参照）、それぞれの製品

表2 DMG 森精機の自動化システムの3類型

	Standard Automation	Cells	Systems
概要	機械に統合された自動化システム1台で複数のワークを連続加工可	モジュール化された搬送装置の接続だけで稼動可能な自動化システム	ターン・キーの自動生産システム
			
使用可能機器	工作機械、モジュール化された搬送装置（機械に統合）	工作機械、モジュール化された搬送装置及び周辺機器	工作機械、搬送装置、周辺機器
機械台数	1台	8台まで	無制限
生産体制	セル生産	セル生産	セル生産、ライン生産
メリット	組込型のため短期間での納品・導入可能。機械導入後すぐに生産開始可。最も安価で省スペース。	標準仕様機のため短期・低価格で自動化可。モジュールの組合せでニーズに柔軟対応。周辺機器のモジュール化も進めており、構築できる自動化システムも多様。	顧客ニーズに応じ、あらゆる工作機械・搬送装置・周辺機器を組み合わせて自動化システムを構築可。モジュール化されていない機器や顧客専用の周辺装置も使用可。

（出所） DMG 森精機資料に基づき筆者作成

ラインアップを拡充していくことにより「機械・搬送装置・周辺装置・生産管理システム、さらには加工技術・治具・工具・測定まで一体となったシステムをワンストップ」提供するとした。

③ 榎本（2017）の草創期研究に伴う限界と新たな課題

榎本（2017）は工作機械メーカーの第4次産業革命への草創期対応を調査し記録した点で価値があるが、2016年調査時点で工作機械メーカーが「手探り」状態に止まったことは事実であり、その後3年近くが経過して工作機械メーカーのスマート・ファクトリーへの対応が具体化し、顧客製造企業に提供される製品・サービスも飛躍的に拡充されていることから、改めて実態調査が必要である。

その場合、(3)①に示された問題意識は工作機械メーカーの次世代製造システムへの対応を研究する上で引き続き有効であり、(i)次世代製造システムにおける物的システムとITシステムの融合化が工作機械ビジネスを工作機械メーカー間の競争だけでなく、広く生産システム関連産業の範疇においてソリューション・プロバイダ等との競争も発生させる、(ii)スマート・ファクトリーでは、生産システム関連産業内での付加価値配分がIT関連にシフトする可能性があり、工作機械メーカーは「優れたマシン」「良いマシン」の開発・製造だけでなく、顧客に「マシン」の性能が最大限発揮できる最適化された生産ラインを提案できるか否かも競争上重要化する、(iii)顧客に最適化された生産ラインを提案することが工作機械メーカーに対して総合メーカー化と一部重要顧客に限定されてきたソリューション・ビジネス（ライン・ビルダー事業）の本格化を求めることになることは特に注意を要するポイントであると考える。

ただし、調査時点で工作機械メーカーの第4次産業革命への対応は暗中模索がスタートしたばかりであったこともあり（工作機械・搬送機・周辺機器等にICタグ等を装着し、カメラ・センサで読み取った情報をクラウド上にリア

リアルタイムで送信できるようにする IoT 化だけに関心が集中し「製造システムを何のために IoT 化するのか」が等閑視されていた感が JIMTOF 2016 には存在した), 榎本 (2017) は IoT と AI が製造プロセスに適用されることで製造業に如何なるインパクトがもたらされるのか, 工作機械メーカーはそのインパクトに如何に 대응しようとしているのかを調べきれていない。

第 4 次産業革命の製造業に与えるインパクトは, (i) 製造システムのオープン・ネットワーク化, (ii) リアルタイムで収集した生産関連ビッグ・データの AI 解析による生産ラインの最適制御の実現, (iii) 製造ノウハウのソフトウェア化と外販化, (iv) 企業情報システムと生産ラインのシステム連携による柔軟かつ機動的なマス・カスタマイゼーションの実現とされる。4. で示すように, ヤマザキマザック, オークマ, DMG 森精機は自社工場のスマート・ファクトリー化の取組で得られた経験・ノウハウを活かして (i) ~ (iv) に関する製品・サービスを具体化している。

特に, 製造システムのオープン・ネットワーク化, 製造ノウハウのソフトウェア化と外販化に関しては, 工作機械メーカーではなく産業機械メーカーのファナック等が IoT プラットフォームを構築して, 製造関連ソフトウェア開発事業者と製造業ユーザーをつなぐプラットフォームを立ち上げつつあり, 工作機械メーカーもプラットフォーム・ビジネスへの関与を検討せざるを得なくなっている。このような第 4 次産業革命が製造業に与えるインパクトを踏まえて, 榎本 (2017) に引き続き工作機械メーカーの第 4 次産業革命への対応に関する調査を行うことが必要となっている。

4. では, 2017年11月~2018年6月の時点における工作機械メーカーの第 4 次産業革命への対応に関する調査に基づき, 工作機械メーカーが次世代製造システムに対応した工作機械ビジネスを如何に推し進めたかをお示しすることとしたい。

4. 工作機械メーカーのスマート・ファクトリー

(1) 工作機械メーカーの次世代製造システム観

① 次世代製造システムの占める地位

繰り返しとなるが工作機械メーカーは工作機械の開発・製造事業者であり、その基本は顧客の製造ニーズに最適化された「優れたマシン」「良いマシン」を供給することにある。工作機械メーカーが「マシン」メーカーの枠を越えて、総合メーカー化なりライン・ビルダー化なりに取り組み、どこまで次世代製造システムに合わせて自社事業を変革するかは、次世代顧客の製造現場においてスマート・ファクトリーがどこまで主流となるか次第である。

ドイツは市場動向に機動的に対応できる変種変量生産に製造業の未来を求めるが、“Industrie4.0”に対置される米国の“Industrial Internet”はIoT、AI技術のもたらすインパクトを製造システム革新に求めず、モノをインターネットにつなげることで、様々なデータを収集し、このデータを解析して新たな社会・経済上の価値を創造することに重きを置く。ドイツの唱える製造システム革新が第4次産業革命の根幹であるかには異論があり、工作機械メーカーも、多くの他部門の製造事業者と同様に、市場動向に即応する変種変量生産の極限化が製造業の未来像であるかには確信を持っていない。仮に、独シーメンス・SAPの構想するように、垂直統合された企業情報システムが製造ラインを最適制御する製造部門が出現するとしても、それは必ずしも一般化せず、製造部門の多くでは、制御層においてIoT技術によりリアルタイムで収集された大量のデータを、実行層でAI解析することで製造ラインを最適制御するのではないかと工作機械メーカーは考えている¹⁵⁾。

また、“Industrie4.0”で提案されたスマート・ファクトリーは「製造シ

システムのオープン・ネットワーク化」の点で画期的であるものの、これまでも工作機械メーカーを含む製造産業では、「IT技術による製造ラインの自動化」¹⁶⁾「工作機械等の情報端末化により得られたデータを活用した生産ラインの最適制御」「実行層・制御層（MES・PLC）での生産活動支援システムの拡充」など工場の「スマート化」に取り組んできており、工作機械メーカーは次世代製造システムとされるスマート・ファクトリーをその取組の延長上にあるものとして認識している¹⁷⁾。

15) 2017年11月15日ヤマザキマザック訪問、2017年11月15日DMG森精機訪問、2017年11月21日オークマ訪問等では、「市場動向に即応する変種変量生産の徹底が製造業の未来像となるかは疑問」「（スマート化に先行する）自動車産業等はスマート・ファクトリーに馴染むが他産業分野はそれほどでもない」との指摘がなされた一方で、「社会全体がスマート化してしまい政府・企業・家庭・個人がインターネットで結びつく時代が到来すれば、社会のサブシステムである製造部門もインターネットで結びつくのが当然になり、自動車・非自動車を問わずスマート化せざるを得ないのではないか」との見解もあった。

16) 生産管理システムが、生産ラインの稼働スケジュールを自動的に立案し生産ラインに稼働指示、その後、工作機械の加工進捗状況等に対応して稼働スケジュールを再調整して生産ラインを最適制御する（工具・治具の準備・着脱、材料準備等も含めて）。

17) 例えば、ヤマザキマザックはこれまでに「無人化工場」「サイバー・ファクトリー」等を提案してきたが、「IT技術による製造ラインの自動化」「工作機械等を情報端末化することで得られたデータを活用した生産ラインの最適制御」「実行層・制御層（MES・PLC）での生産活動支援システムの拡充」が一貫したテーマであり、自動化等の内容を集中処理型LAN、分散型LAN、インターネット等のIT技術の発達に対応して高度化させてきたが、スマート・ファクトリーも無人化工場等の延長線上にあるとする。

1980年代取り組んだCIM工場（サイバー・ファクトリーの前身）では、CIM導入により受注に基づき生産ラインを制御するシステムを構想したが、川上（受注）から川下（生産）に一方方向的に情報管理するものであり、生産現場における生産設備稼働状況、加工進捗状況等に対応して工場生産を柔軟かつ機動的に管理したり、販売計画を柔軟かつ機動的に変更したりするこ

スマート・ファクトリーは工場レベルに限らず企業レベル、社会レベルでのオープン・ネットワーク・システムを目指す。現時点で実現可能性のある工場レベルのネットワーク化はヤマザキマザック、オークマ、DMG 森精機等の考えるとおり従来の工場スマート化と連続したものである。スマート化のエッセンスである「AI を活用したリアルタイム収集したデータに基づく生産ラインの最適制御」は、マス・カスタマイゼーションに限らず見込大量量産 (mass production)、製番生産 (full customization)、半見込半受注生産 (mass customization)、セル生産等のあらゆる生産形態に共通する課題であり¹⁸⁾、工作機械メーカーはドイツとは異なり工場スマート化とその先にあるスマート・ファクトリーが必ずしも変種変量生産に取

とは集中処理型 LAN では難しかった。

そこで、1998年に自社工場で実現したサイバー・ファクトリーでは、生産ライン不具合発生、加工進捗の遅速、生産優先順位変更等に対応するべく、ヤマザキマザックは製造に関連する全部門をクライアント方式の分散型 LAN でネットワーク結合し、工作機械の NC 装置を情報処理端末化して、工作機械の稼働状況、自動運転中 / 段取り中 / アラーム停止中等の運転履歴、加工ワーク個数、主軸負荷等の情報をクライアント・サーバーに転送、事務所から工作機械単体だけでなく生産ライン全体を最適制御することを実現している。

ただし、サイバー・ファクトリーでは、第一に工作機械を情報端末化することで生産ラインを「見える化」したものの、IoT 技術の未発達により取得可能データには制限があり、第二に、生産支援システムが生産ラインの稼働スケジュールを自動的に立案し生産ラインに稼働指示、その後、工作機械の加工進捗状況等に対応して稼働スケジュールを再調整して生産ラインを最適制御する (工具・治具の準備・着脱、材料準備等も含めて) にはソフト開発が追いつかず (引き続き熟練者のスケジュール作成技能に依存)、第三に、市場動向に即応した変種変量生産を生産ラインに実施させるには、生産ラインの制御と ERP はシステムとして連動させる必要があるところ、この点は未達だった。

18) 2017年11月15日ヤマザキマザック訪問、2017年11月15日 DMG 森精機訪問、2017年11月21日オークマ訪問等。

斂するとは限らないと見ている。

そもそも見込大量生産においても（自動車生産において、消費者ニーズをきめ細かく拾うために、同一量産ラインで複数車種の生産をする等）多品種少量化に向かう傾向が内在している。ドイツでは、スマート化は変種変量生産に絞る議論が展開されているものの、IoT時代では生産のデジタル化とCPSによる生産の最適制御はマス・カスタマイゼーションに限定されないと考えるべきであろう。また“Industrie4.0”は「垂直統合された企業情報システムによる工場最適制御」と「工場に限らず企業・社会全体のオープン・ネットワーク化」を唯一の次世代製造システムとするが、工作機械メーカーは柔軟な姿勢を取り、一方でスマート・ファクトリーの新機軸である「製造システムのオープン・ネットワーク化」に工作機械を対応させ、将来、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業情報システムが製造ラインを最適制御する日が到来した場合に備えつつも、当座は工場レベルのオープン・ネットワーク化と、実行層・制御層の二層における（エッジ・ヘビーの）「リアルタイムで収集した生産関連ビッグ・データのAI解析による生産ラインの最適制御の実現」に取り組み、工場最適制御に資する「製造ノウハウのソフトウェア化と外販化」に現在取りかかっている。

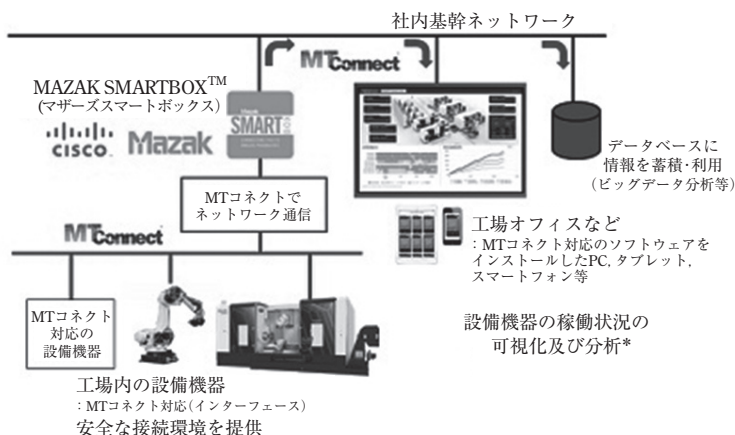
② ヤマザキマザックのスマート・ファクトリー：“Mazak iSMART Factory”

ヤマザキマザックは「次世代顧客は制御層においてIoT技術によりリアルタイムで収集された大量のデータを、実行層でAI解析することで製造ラインを最適制御する」との予想の下、(i)IoT技術を活用して工場内のすべての工作機械・装置をネットワークにつなぎ、情報を共有化しリアルタイムにどこからでも見られるよう「製造システムのオープン・ネットワーク化」する、(ii)先進国に共通する熟練工不足とマス・カスタマイゼーションによる作業の複雑化に伴い、経験の浅い作業者でも使える設備、ボタ

ンを押すだけで生産できる自動化機械及び自動化システムへのニーズに対応すべく、加工ノウハウ・生産ノウハウ等をソフトウェア化し「工場実装」することをスマート・ファクトリーの要件として考え、2017年に“Mazak iSMART Factory”としてコンセプト化。将来的には、顧客には工作機械単品ではなく、IoTにより生産工程がデジタル化され、ビッグ・データとAIによりカイゼンを行う工作機械システムを提供するとした。

まず「製造システムのオープン・ネットワーク化」に関しては、ヤマザキマザックは2015年にシスコシステムズと共同でNC工作機械とIoT対応の設備機器との通信環境を提供するネットワーク・スイッチ（Mazak SMARTBOX）を開発。Mazak SMARTBOXでは、工作機械用オープン通信規格のMT Connectを採用し、同規格に対応した設備機器であればメーカー、モデルの新旧を問わず稼働状況等のデータを収集して工場全体での一元管理を可能とした。また、工場オフィスで作成した加工プログラムを工作機械に送信したり、工作機械のバックアップ・データをオフィスのPC

図5 ヤマザキマザックの工場オープン・ネットワーク化



(出所) ヤマザキマザック・ホームページ

に保存するためにデータ・ファイルを転送したりする機能も実装，工場内ネットワークだけでなくインターネット，クラウドへのアクセスも前提にサイバー攻撃等不正アクセス対策を講じている。この Mazak SMARTBOX により，工作機械メーカーに限らず，ユーザーは遠隔地からのリモート・アクセス，世界中の工場のデータの一元管理が可能となっている。

ただし，製造システムのオープン・ネットワーク化は，ヤマザキマザックの「IoTにより生産工程がデジタル化され，ビッグ・データとAIによりカイゼンを行う工場」に向けた第一歩に過ぎず，ヤマザキマザックは自社の大口製作所（愛知県大口町）を実験台として表3（次頁）のロードマップに従いスマート・ファクトリーを具体化し，その過程で得られた知見を顧客工場のスマート化にフィードバックしようとしている。

現在，ヤマザキマザックの大口製作所は第2段階を了し，第3段階と第4段階の課題に並行して取り組んでいる（同社によれば「第3.5段階」）。第3段階では，企業情報システムの連携によりシステム間で高度な分析を行い，各工程・工場全体の最適化を図ることが目標とされ，第4段階では熟練工のノウハウのAI化がテーマとされる。大口製作所では約200機種の製品を年間1200台受注生産しており，フロアは3工程（部品加工，モジュール組立，製品組立）に分かれ，従来，生産管理部門の熟練者が工程毎に生産スケジュールを作成・管理していたが（月産100台程度だと人手で辛うじて対処できる），ヤマザキマザックは熟練者に代替して生産スケジュールを作成できるスケジューラ（upper MES）を開発，3工程のスケジューラを連携させることにより，生産優先順位変更，山積み・山崩しによる在庫最適化などに対応して生産ライン全体を最適化するシステムを構築した。

これによりヤマザキマザックは，市場からの「引き」に即応して柔軟なマス・カスタマイゼーションを実現したとすることが（間接工数50%減，仕掛り在庫30%減，生産リードタイム30%減に成功），今後，加工・生産ノウハウの

表3 “Mazak iSMART Factory” のロードマップ

第1段階	製造システムのオープン・ネットワーク化	<ul style="list-style-type: none"> • 機械・装置をネットワーク接続しデータ収集 • 通信規格として MT コネクト (MTConnect 協会が定めた最も有力な工作機械用通信プロトコル) を採用 • ネットワーク接続時のサイバー・セキュリティ確保のため MAZAK SMART BOX™ を開発 (クラウドにデータ収集する前に必要情報だけを集め、外部の不正アクセスを防止) • 同 SMART BOX 導入によりメーカーやモデルの新旧を問わず工場全体の設備機器の情報を一元的に取得可能
第2段階	製造ビッグ・データの分析と生産改善	<ul style="list-style-type: none"> • 第1段階で収集したデータを分析、生産性や品質を向上させる取組を実施 • MAZAK SMART BOX™ と MT コネクトで収集したデータをビッグ・データ化し一元管理、生産設備毎に各工程の問題点を可視化 • 工作物の精度結果及び品質に関するデータと、MAZAK SMART BOX™ と MT コネクトで収集した機械・装置の保全データ等を凸合して分析 • 製造システムの各部門に分析結果を生産性改善、製品の品質向上のヒントとしてフィードバックし、生産性向上と製品品質向上に活用 • 移動監視、分析ソフト (SMOOTH MONITOR Ax) 開発
第3段階	システム連携による分析・最適化	<ul style="list-style-type: none"> • ドイツのスマート・ファクトリーは ERP・MES・PLC を垂直統合した企業情報システムで生産ラインを制御し「カイゼン」を行うことを企図 • 将来のその実現に向けた準備として、基幹システム、製造実行システム等を連携させてシステム間で高度な分析を行い、各工程や工場全体を最適化 • 大口製作所では ERP 基幹システムを導入、生産実行システムや自動化物流システムと接続・連携 (計画層と実行層・制御層を垂直統合した企業情報システムによる機動的な変種変量生産の実現に向けた一歩)
第4段階	熟練工ノウハウの AI 化、システム連携の高度化	<ul style="list-style-type: none"> • 先進国共通の熟練工不足と変種変量生産による作業複雑化に対応、経験の乏しい作業者でも使える設備、ボタンを押すだけで生産可能な自動化機械・自動化システムへのニーズに応えるべく、加工ノウハウ・生産ノウハウをソフトウェア化し「工場実装」 • 大口製作所では、機械加工の切削条件を AI 技術とビッグ・データで最適化するソフトウェア開発に取組中 • 機械・装置より収集したデータをクラウド上でリアルタイムに収集・分析、解析結果に基づき生産ラインを最適制御する CPS を実現 (CPS 技術の開発待ち)
第5段階	AI・適応制御で自律的に進化し続ける工場	

(出所) ヤマザキマザック資料等より筆者作成

ソフトウェア化を推し進め工場実装し、(CPS 関連技術の進歩具合にもよるが) CPS による工場制御も大口製作所で実現することを考えている。実はスマート・ファクトリーは提唱国のドイツでも未だ実現していないが、ヤマザキマザックもスマート・ファクトリーに向けた道程の途中にあり、現在「制御層において IoT 技術によりリアルタイムで収集された大量のデータを、実行層で AI 解析することで製造ラインを最適制御する」ことを目指している。

③ オークマのスマート・ファクトリー

(a) スマート・ファクトリーに向けた道程

オークマもヤマザキマザックと同様に自社工場をスマート・ファクトリー化し、それにより得られた知見・ノウハウを顧客工場のスマート化に活かそうとしている。自社工場のスマート化から導き出される両者の考えは基本的に共通しており、ヤマザキマザックのロードマップはオークマにもおおむね妥当する（ただし、オークマの自社工場での経験を踏まえて、スマート化の段階分けなどは若干異なる）。

オークマもスマート化の第1段階は「製造現場のオープン・ネットワーク」であるとし、ヤマザキマザックの Mazak SMART BOX に相当するものとして Suite Box を開発、工作機械に実装し情報端末化できるようにした。オークマの新鋭工場の DS (Dream Site) 1 では、Suite Box を通じてリアルタイムで収集した生産関連情報に基づき加工・組立工程を「見える化」し、生産ラインにおける生産進捗状況を把握、「遅れ」「不具合」等の発生している箇所があれば原因を解明し手当するだけでなく（生産ライン全体の稼働状況等を見ると生産ラインのカイゼン案も発見できる）、機械・工具の消耗状況を見て故障時期を予想して（要すれば）部品交換や点検を行うなどの予防保全を行っている。

スマート化の第2段階は工作機械で収集した生産関連データに基づく生

産ラインの最適制御システムの構築である。先進国に共通する熟練工不足とマス・カスタマイゼーションによる作業の複雑化に伴い、経験の浅い作業でも使える設備、ボタンを押すだけで生産できる自動化機械、自動化システムへのニーズに対応すべく、加工ノウハウ・生産ノウハウ等をソフトウェア化して工場に実装する必要がある。オークマは、生産ラインの最適制御方法をソフトウェア化し生産支援システムとして実装、生産支援システムが生産ラインの稼働方法・計画、各工作機械の加工プログラム、工具・治具等の準備計画を自動的に割り出し、工場オペレータはこれを素案として生産ラインの最適制御プランを決定できるようにした（ヤマザキマザックが第4段階で加工・生産ノウハウをソフトウェア化し工場実装するとした取組をオークマは生産ラインの最適制御システム構築と同時並行で行おうとしている）。

第3段階はドイツの第4次産業革命の目指す市場動向に即応した柔軟かつ機動的な生産の実現であり、そのためには企業情報システムと生産ライン制御システムを統合する必要がある、オークマも日立製作所の協力を得てDS1に続く新鋭工場のDS2において製品組立工程とERPの連携を実現しようとしている。オークマは企業情報システムと生産ライン制御システムの統合の先に、AIによる生産ラインの最適制御の自動化（生産支援システムが生産進捗状況等に対応して自動的に生産ラインの稼働スケジュールを再調整し、工具・治具の準備・着脱、材料準備等も含めて生産ラインに対して再指示を行う等）を考えており、ヤマザキマザックがロードマップの第4段階で想定するデジタル・ツインによる最適化（CPS）等に取り組むことを考えている。

(b) レイアウト見直し・工程集約等の生産ライン改革との一体化の必要

ヤマザキマザックはドイツのスマート・ファクトリーが次世代製造システムの絶対標準になると考えているわけではなく、製造分野・形態・規模に応じては第4段階のCPSどころか第3段階の企業情報システムによる

生産ライン制御も必要ではないケースすらあると見て、顧客工場で異なる生産性向上のためのスマート化ニーズにきめ細かく対応するべく IoT ソリューション・コンサルテーション企業のエイムス、ネットワンシステムズ等と提携している。同様にオークマも2000年代以降の自社グループの工場再編とゼロ・ベースからの本社工場（大口工場）再建の経験を踏まえて、スマート・ファクトリーは2000年代以降の工場の自動化・省人化（無人化）と連続したものであり、目的は顧客の個別製造現場において市場動向に機動的に対応できる生産性の高い生産ラインを構築することで“Industry 4.0”そのものではないと考えている。

オークマは2000年代後半に内需低迷と円高に対して生産効率向上に取り組み、本社工場・可児工場の重複生産を排して複合加工機・大型旋盤と門形 MC とで製造分担した上で各工場のレイアウトを見直し部品加工・製品組立工程を一貫化、顧客の短納期発注への対応、需要変動への迅速・柔軟な対応のために、無人自動化設備の導入、設備・人員の最適配置、加工組立標準改革、工程リードタイム見直し、物流改革等を行った。ただし、旧大口工場は工場設計思想が一時代前のもので工程集約やレイアウト見直しに制約のある「昭和の工場」であり、既存工場を前提とする改革には限界が存在、2010年代の超円高には如何に IT 技術を活用しても対応できなかった。

第一に、工作機械の製造工程は製品モジュール化に伴い「部品加工・製品組立」の2段階から「部品加工・モジュール組立・製品組立」の3段階に転換しているが、2段階工程を前提とした旧工場では、3段階工程をストリームラインにつなげる上で工場のレイアウトが変更しにくい、第二に、旧工場では部品・工具・治具等が倉庫や中間ストック・エリアで集中保管・管理されて必要分のみを適時供給する体制となっておらず、加工の各工程で作業員が必要に応じて部品・工具・治具等を調達して持ち場に搬

送してくるため生産効率が低下する、第三に、旧工場での部品・工具・治具等の集中保管・管理の欠如は製品組立工程全体の見直しによる生産効率化を阻害し、各組立ユニットは個別に部品・工具・治具を調達してユニット近傍に部品等を床積みしており、受注動向に即応した柔軟かつ機動的な生産を行おうにもフロア管理が難しい等の事情があった。

そこで、オークマは旧生産ラインを一度壊して（更地化）、① 部品加工・モジュール組立・製品組立が川上から川下にストリームラインに並ぶよう工程配置を行い（部品・工具・治具・材料の輸送に適した幅の広い回廊も含む）、② 製造方法を見直して工程集約を行い、従来複数台の工作機械を要した加工を1台の工作機械により処理することでライン短縮化を図り、③ 加工・組立工程の老朽化した工作機械等を新鋭マシニングセンタに交換するとともに、④ 工具・治具・材料の集中保管・搬送システムを作り各加工工程・組立ユニットの必要に応じてデリバリーし、使用する工具・治具・材料等を補完するラックを各作業場に輸送回廊に沿った場に用意した。

その上で、オークマは2000年代後半も生産設備を無線LANでネットワーク化し、工場内設置モニターやタブレットで設備稼働や品目生産の状況を確認できるよう「見える化」を行っていたが、DS1の新設に伴い、① LANではなくインターネットをIT基盤に切り換え、② 工作機械等にSuite Boxを実装して情報端末化、生産関連情報をリアルタイムで収集、③ 収集データは工場の管理コンピュータに蓄積、加工・組立工程の稼働状況を「見える化」（要所に置かれた表示用コンピュータ及び運行管理責任者のタブレットで確認可能）、④ それにより生産ラインにおける生産進捗状況を把握、遅延・不具合等の発生している箇所があれば原因を解明し手当、⑤ 機械・工具の消耗状況を見て故障時期を予想して部品交換や点検を行うなどの予防保全を行う「スマート化」を行った。

さらに、オークマはDS1のスマート化を推し進め、生産ラインの「つ

なぐ」「見える化」による工作機械の稼働状況，工具・治具等の状況，ワークの加工進捗状況等を把握だけに止まらず，加工ノウハウ・生産ノウハウをプログラム化し生産支援システムに実装し，加工部品の設計図が与えられればAIが生産ラインの稼働方法，各工作機械の加工プログラム，工具・治具等の準備計画などを割り出し，工場オペレータはそれを素案として生産ラインの最適制御プランを決定できるようにしている¹⁹⁾。

以上のDS1での新工場建設の経験から，オークマは，生産ラインの「つなぐ」「見える化」など工場スマート化の前に，個別製造現場の千差万別な状況に即し工場（生産ライン）レイアウトの見直しと工程集約等など生産ラインのコンパクト化・効率化を行う必要があり，その上で，生産ラインのAIによる最適制御を組み込んだ，スマート・マシンから構成される工作機械システムを導入するのであれば，真の生産効率向上は実現できず，ましてや企業情報システムと生産ラインの制御システムを統合しても，市場動向に即応した柔軟かつ機動的な生産などできないと考えている。

(c) 部品加工専業メーカーと「部品加工+組立」の一貫メーカーのスマート化の差異

オークマは大口工場の旧生産ラインを更地化した敷地でDS1に引き続きDS2の建設にも着手したが，将来的に，DS1が複合加工機，大・中型旋盤，立型旋盤の一貫生産，DS2は中・小型旋盤，研削盤の一貫生産を生産分担する予定にある。

DS1における部品加工は多品種少量とはいえ約1000品目であるのに対

19) DS1は生産ラインの最適制御の自動化は未実現であるが，工場オペレータは，生産支援システムを活用して，生産進捗状況に即応して稼働スケジュールを再調整し，工具・治具の準備・着脱，材料準備等も含めて生産ラインに対して再指示を迅速に行うことが可能となっており，DS1は生産量が倍増したが人員数は3分の1に減らせたという。

し、2017年5月に部品加工工場が稼働開始したDS2は、多品種少量生産の点ではDS1を遥かに上回る約4000品目の部品加工を行うため、ワークの移動、治具の段取り、加工工程等が複雑であり、かつ、多様な中・小型旋盤、研削盤の生産を担当する関係で、「必要なものを、必要なときに、必要な量だけ」作り、急な短納期品の割込み受注や、納期・仕様の変更による生産計画変更に対応することが求められるため、ワークの移動、治具の段取り、加工工程等は更に複雑なものとなっている。

その結果、オークマは、DS1では生産設備の自動化・無人化と稼働状況の「見える化」により、工場の生産性や稼働率を大幅に引き上げることに成功したが（ヤマザキマザックのロードマップを当てはめればスマート化を第2段階に進めただけで大きな成果）、DS2では、DS1と同一の生産管理では生産の進捗を迅速に把握できないことが判明した。このためオークマは、DS2においてマス・カスタマイゼーションを徹底した「究極の高効率生産モデル」の実現を目指し、製造企業であると同時にソリューション・プロバイダである日立製作所と提携して、「生産の見える化の進化」と「工場制御周期の高速化」をテーマとする共同実証を2017年に開始した。

DS2でオークマは、企業情報システムと生産ライン制御システムを連携させて「受注一部品加工一組立」の同期化を図り、生産優先変更指示等が急に入っても、生産状況を即座に把握して作業指示の周期を速める仕組を構築しようとしている（旧工場比で生産性2倍・生産リードタイム半減を目標）。具体的には、日立製作所のIoTプラットフォーム「Lumada」の生産計画最適化ソリューションを「進捗・稼働状況監視システム」として採用、IoT生産進捗と設備稼働に関する両データを同時に収集し連携させ、生産進捗と設備稼働を一元的に監視できるシステムを構築した。

DS1、DS2はともに工作機械の部品加工・組立の一貫生産工場であるが、DS1とDS2を対比すると、DS1が最終製品の受注状況の変動に応

じて加工状況を一時的に変動するまでの必要はない部品加工専門メーカーに似ているのに対し、DS2は最終製品の受注状況の変動に応じて自動的に加工状況を変動する必要がある「部品加工+組立」の一貫メーカーに近親性がある。数万点の部品を組み立てる「部品加工+組立」の一貫メーカーでは、スペース的な意味でも余剰な部品在庫を抱えられないため、部品加工工程と組立工程の同期化が不可欠であり、“Industrie4.0”でいう企業情報システムと生産ラインの融合が必要である。一方、部品加工専門メーカーの場合、最終製品の受注状況の変動は在庫のバッファ調整で対応できるため、生産ライン制御システムと企業情報システムとの統合は必ずしも不可欠というわけではない。

DS1、DS2の取組を経たオークマは、次世代製造システムが“Industrie4.0”の描き出すスマート・ファクトリーに必ずしも収斂せず、CPSなり企業情報システムによる生産ライン制御を必要としないケースも併存すると見る。むしろ「次世代顧客は制御層においてIoT技術によりリアルタイムで収集された大量のデータを、実行層でAI解析することで製造ラインを最適制御する」と考えている。そして、DS1、DS2における工場スマート化の取組を通じて、部品加工専門メーカーと「部品組立+組立」の一貫メーカーではスマート化ニーズが異なることを認識したオークマは、部品加工専門メーカー向けと「部品加工+組立」の一貫メーカー向けで差別化したスマート化プランを提供しようとしている（4(2)参照）。

④ DMG 森精機のスマート・ファクトリー

DMG 森精機も、ヤマザキマザック、オークマと同様に自社工場をスマート・ファクトリー化し、それにより得られた知見・ノウハウを顧客工場のスマート化に活かそうとしており、スマート化には段階的アプローチを採っている。

すなわち、①IoT技術により、工場内のすべての工作機械・装置をネッ

トワークにつなぎ、リアルタイムで情報を共有化する（製造システムのオープン・ネットワーク化）、② 過去も工作機械の NC 装置を情報端末化することで生産関連データを取得し生産ラインの最適制御を試みてきたが、取得データの制限とソフトウェア開発の限界から未達だった「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」を実現する、③（工作機械はマス・カスタマイゼーションが基本であるが）市場動向に即応した変種変量生産を生産ラインに実施させるため、生産ラインの制御システムと計画層の ERP をシステム統合して連動させる、その上で、④ CPS を導入し、エッジでリアルタイムに収集したビッグ・データを AI 解析、生産ラインを最適制御するだけでなくカイゼンし、自律的に進化していくシステムを構築する段階的アプローチであり、現在、DMG 森精機が③の段階にあることはヤマザキマザック、オークマと同様である。

製造システムのオープン・ネットワーク化に関しては、DMG との提携に伴い日独共通のオペレーティング・システムとして2013年に開発した CELOS を工作機械に搭載することで、工作機械より収集した生産関連情報（ジョブ、加工工程、機械データ）の一元管理を可能化としていたが、CELOS は DMG と森精機の企業統合に主眼があり他社製品等との接続性担保を目的としていなかった。このため DMG 森精機は2016年9月以降日本マイクロソフト社との提携によりサイバー・セキュリティ対策を施した CELOS NETbox を開発、自社機だけでなくメーカーやモデルの新旧を問わず CELOS NETbox 搭載した機械の生産関連データを収集し工場全体の一元管理ができるよう手当した。

生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御に関しては²⁰⁾、DMG

20) DMG 森精機は、既に2002年にワークや工作機械等にバーコードをつけて工場の「見える化」を試みており、工作機械の稼働状況、「自動運転中 / 段取り中 / アラーム停止中」等の運転履歴、加工ワーク個数、主軸負荷等の

森精機も、伊賀工場等の生産ラインを CELOS 搭載機で構成し、工作機械より収集したデータを CELOS 経由でオフィスのサーバーに送信、生産ラインの最適制御を行おうとしている。例えば、主軸に付けた加速度センサで望ましくない振動（びびり）を捉えて、びびりを発生させない条件を見つけたり、電力センサにより省エネに配慮した運転ができるよう「見える化」したり、また、収集したデータを解析し予防保全や故障検知につなげるプロジェクトを進めている。また、生産ラインの自動最適制御には、加工・生産ノウハウをソフトウェア化して工場実装する必要があるが、DMG 森精機も熟練工不足とマス・カスタマイゼーションによる作業複雑化に対応し、経験の浅い作業員でも使える設備、ボタンを押すだけで生産できる自動化機械・システムの開発に取り組んでいる。

生産ラインの制御システムと計画層の ERP のシステム統合については、DMG 森精機では、2009年以降、日独間で部品表、PLM (CAD)、ERP データと順次データ共通化を進めてきたものの ERP 等の完全共通化には時間を至っておらず、本社が ERP 等を介して伊賀工場、奈良工場の生産活動をコントロールする体制にはなっていない（引き続き本社が市場受注動向に応じて伊賀工場・奈良工場に生産指示を行い、各工場が生産対応）。ただし、伊賀工場、奈良工場では、SAP の HANA シリーズの ERP をベースとして、生産計画と生産状況に応じて自動的に生産スケジュールを作成するスケジ

情報を収集し、工作機械単体だけでなく生産ライン全体の最適制御に関する研究を行い、生産効率性の改善、受注状況に対応した柔軟かつ機動的な生産に役立ててきたという。現在の RFID、センサ等を用いた IoT 技術は2000年代前半と比べて飛躍的に大量なデータを収集することを可能としており、生産管理システムが、生産ラインの稼働スケジュールを自動的に立案し生産ラインに稼働指示、その後、工作機械の加工進捗状況等に対応して稼働スケジュールを再調整し生産ラインを最適制御する（工具・治具の準備・着脱、材料準備等も含めて）こともソフトウェア開発能力向上で夢物語ではなくなっているという。

ユーラ (upper MES) を開発、企業情報システムによる生産ライン最適制御の実現に向けた環境整備に取り組んでいる。

⑤ ま と め

ドイツの“Industrei4.0”は、変動する市場動向に機動的に即応する変種変量生産に製造業の未来を求め、IoT技術とAIの活用により、企業情報システムと生産ライン制御システムを統合し、企業情報生産システムが市場動向に即応して生産ラインを自動に最適制御し、CPSが仮想空間において解析した生産ラインの最適化プランに従い絶えずカイゼンを続けるスマート・ファクトリーを次世代製造システムとする。ドイツは、スマート・ファクトリー化を工場単体に止めず、工場群・製造企業群をネットワーク化し、国全体を一つのスマート・ファクトリー化することまで提言する。

IoT、AIに支えられる第4次産業革命は製造システムの在り方を一変させる。製造システムの物的部分の中核製品を開発供給する工作機械メーカーは、ドイツの提唱する変種変量生産とスマート・ファクトリーがはたして次世代製造システムの標準となるかについて疑念を持ちつつも、スマート・ファクトリー化は工場単体に限れば2000年代以降先進製造業が推進してきた無人化・自動化の延長にある点に接点を見出し、自社工場のスマート・ファクトリー化により知見を蓄積しつつ次世代製造システムに対応した工作機械及び工作機械ビジネスを模索している。

工作機械メーカーに共通する考えでは、第4次産業革命の製造業に与えるインパクトは(i)製造システムのオープン・ネットワーク化、(ii)リアルタイムで収集した生産関連ビッグ・データのAI解析による生産ラインの最適制御の実現、(iii)製造ノウハウのソフトウェア化と外販化、(iv)企業情報システムと生産ラインのシステム連携による柔軟かつ機動的なマス・カスタマイゼーションの実現の4点にある。ただし、これら4点に等しく重点が置かれるわけではなく、例えばオークマは部品加工専門メーカーと部

品加工・組立一貫メーカーではスマート化ニーズが異なり、前者では必ずしも企業情報システムによる生産ラインの自動最適制御は必要ではないとする。現時点では、工作機械メーカーはスマート・ファクトリーの新機軸である「製造システムのオープン・ネットワーク化」に工作機械を対応させ、将来、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業情報システムが製造ラインを最適制御する日が到来した場合に備えつつ、工場単位で「リアルタイムで収集した生産関連データのAI解析による生産ラインの最適制御の実現」「製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装」に重点的に取り組もうとしている。

ヤマザキマザックは自社の取組に基づきスマート・ファクトリー・ロードマップをまとめたが（前掲表3）、①IoT技術により、工場内のすべての機械・装置をネットワークにつなぎ、リアルタイムで情報を共有化する（製造システムのオープン・ネットワーク化）、②過去にも工作機械のNC装置を情報端末化することで生産関連データを取得し生産ラインの最適制御を試みてきたものの、取得データの制限とソフトウェア開発の限界から未達だった「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」を実現する、③（工作機械はマス・カスタマイゼーションが基本であるが）市場動向に即応した変種変量生産を生産ラインに実施させるため、生産ラインの制御システムと計画層のERPをシステム統合して連動させる、その上で、④CPSを導入し、エッジでリアルタイムに収集したビッグ・データをAI解析、生産ラインを最適制御するだけでなくカイゼンし、自律的に進化していくシステムを構築するとの段階的アプローチは工作機械メーカー共通であり、今後、製造事業者一般のスマート化も同じ道程を辿ると予想される。

ドイツの“Industrie4.0”では、スマート・ファクトリーは工場単位ではなく企業集団・社会全体でのスマート化を構想しており、今後、個別スマ

ート・ファクトリーを如何に結合させるかが具体的課題として浮上してくると予想されるが、現時点では工作機械メーカーとして構想するスマート・ファクトリーは工場単体が基本であり、工場において受注動向に即応した柔軟かつ機動的な生産を行うために必要な工作機械と工作機械システムは何であるかに関心が集中している。現在、PLCを製造供給するファナックと三菱電機が工場の枠を越えて生産・加工ノウハウのソフトウェア開発供給事業者と顧客製造業者を結びつけるプラットフォーム・ビジネスを立ち上げようとしているが、工場単体でもスマート・ファクトリーが現実化していない（海のモノとも山のモノともしれない）現状では、工作機械メーカーは取り敢えず工場における製造システムのスマート化ニーズに的を絞って自社工場ですmart・ファクトリーとは何かを模索しつつ工作機械ビジネスを再構築しようとしている。

(2) 工作機械メーカーのスマート・ファクトリー・ビジネス

工作機械メーカーは工作機械の開発・製造事業者であり、基本は顧客の製造ニーズに最適化した「優れたマシン」「良いマシン」を供給することにある。次世代製造システムにおいて、ERP・MES・PLCを垂直統合した企業情報システムが生産ラインを自動最適制御しCPSによりカイゼン等も行い、仮に製造システムのシステム・インテグレーションに係る付加価値配分が工作機械・産業機械メーカーからソリューション・プロバイダにシフトしたとしても、工作機械メーカーは引き続き顧客の製造ニーズに最適化した「優れたマシン」「良きマシン」を供給することに“raison d'être”が存する。

ただし、ここで注意すべきは「顧客の製造ニーズに最適化」されたマシンの供給が求められる点である。スマート・ファクトリーでは、工作機械は工作機械単品ではなく工作機械システムとして提供されて初めて真価を

発揮できる以上、工作機械メーカーも工作機械を工作機械システムとして提供して顧客製造企業から真価を理解し評価してもらうことができる。他社が真似できない専用機械の独占的供給者でもなければ、工作機械単品を製造するだけの工作機械メーカーは、顧客の製造現場をスマート・ファクトリー化するシステム・インテグレータの下請企業となりかねない。

2000年代以降工作機械メーカーが取り組んできたソリューション・ビジネスでは、自動車メーカーなど一部の重要顧客の依頼を受けて、その新製品開発に不可欠な加工方法を開発し、当該加工に必要な工作機械・搬送装置・周辺装置等を調達、顧客工場で生産ラインの一部を組み立てることがなされた。ただし、2(2)で示したように、このソリューション・ビジネスは萌芽段階に止まり、工作機械メーカーが自動車・航空機産業等に属する大口顧客との高付加価値機の取引を確保するために他社との差別化の一助として取り組んだ補完的ビジネスに過ぎず、工作機械メーカーが製造分野・企業規模を問わずエンジニアリング・サービスを提供して顧客囲込みや収益増を図ろうとするものではなかった。

しかしながら、工作機械メーカーが次世代製造システムのインテグレーションにおいて、ゼネコン・インテグレータの下請の地位に陥らず、少なくとも工作機械ビジネスにおいて主導権を保持し続けるには、4(1)から分かるように、工作機械メーカー自身が自社工場のスマート・ファクトリー化に取り組むことで蓄積したスマート化の経験・ノウハウを活用して、次世代製造システムに最適化された工作機械の開発・製造するだけでなく、顧客の製造現場のスマート・ファクトリー化に積極的に関与する必要がある。すなわち次世代製造システム向けに最適化された工作機械システムを以て顧客工場のシステム・インテグレーションを自ら行うか、システム・インテグレーション上絶対不可欠な工作機械システムを提供することによりゼネコン・インテグレータに一目置かれなくてはならない。

これは自動車・航空機産業関連メーカーの高付加価値機需要を確保するための補完的なサービスだったソリューション・ビジネスの本質的な転換を意味し、工作機械メーカーは「例外的にシステム・インテグレーションも行う」工作機械の開発製造者であることを止め、次世代製造システムに最適化された工作機械システムの開発製造とそのシステムを用いたシステム・インテグレータに事業転換しなければならない。1970年代に工作機械のNC化というパラダイム・シフトの対応に遅れた米国工作機械メーカーは日本メーカーに取って代わられたが、第4次産業革命に伴うスマート・ファクトリー化はNC化以上の大パラダイム・シフトであり、日本メーカーも対応如何では米国メーカー同様の運命に陥りかねない。

また、20世紀のNC化は「工作機械メーカー間」の戦いであったが、21世紀のスマート・ファクトリー化では、次世代製造システム向け工作機械システムを巡る「工作機械メーカー間」の競争だけでなく、次世代製造システムのインテグレーションを巡り工作機械メーカーとソリューション・プロバイダ等生産システム関連事業者が主導権争いをすることも予想され、この関連でもソリューション・ビジネスの成否が工作機械メーカーの将来を左右しかねない。そこで、以下では工作機械メーカー各社が2016年以降ソリューション・ビジネスを如何に推し進めているかを見る。

① ヤマザキマザックのスマート・ファクトリー・ビジネス

(a) “Mazak iSMART Factory”

ヤマザキマザックは、1980年代よりフレキシブル生産システムを応用した無人化工場に取り組み、1998年にはITを活用して工場内をネットワークする「サイバー・ファクトリー」を完成させるなど、いち早く工場の自動化・ネットワーク化を推進してきたが、ソリューション・ビジネスに関しても、2000年代初以降他社に先駆けて取り組み、顧客ニーズをコンサルテーションで把握した上で、ニーズに最適化されたセル生産ユニットなど

生産ライン（物的部分）を考案・設計し、所要の工作機械等を一式調達した上で、システムに組み立てて納入してきた（ライン・ビルド）。

“Industrie4.0”で提案された次世代製造システムに対し、ヤマザキマザックはサイバー・ファクトリーのコンセプトを昇華させた“Mazak iSMART Factory”をまとめ、「最新のIoT技術を活用して工場内の全生産活動をデジタル・データ化し、可視化・分析による改善や基幹システムとのデータ連携、AI技術の応用等によって、生産の自律的な最適化を行う『高度なデジタル製造の実現』²¹⁾を顧客に提供するとして、従来のFAシステムを組み込んだ工作機械システムに代わり、生産ラインにAIによる最適制御を組み込んだ工作機械システムのシステム・インテグレーションをソリューション・ビジネスとして本格化することを構想している。

スマート・ファクトリーは(i)製造システムのオープン・ネットワーク化、(ii)リアルタイムで収集した生産関連ビッグ・データのAI解析による生産ラインの最適制御、(iii)製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装、(iv)企業情報システムと生産ラインのシステム連携による柔軟かつ機動的なマス・カスタマイゼーションを要素とする。スマート・ファクトリーの前提である「製造システムのオープン・ネットワーク化」に関して、ヤマザキマザックは、シスコシステムズと共同開発したMazak SMART BOXを顧客工場の設備・機器に装着し、MTコネクトに対応した設備機器であればメーカー、モデルの新旧を問わず生産関連データを収集して工場全体での一元管理を可能とするとともに、社内作成又は外部調達した加工プログラムを工作機械に送信したり、工作機械のバックアップ・データを企業サーバーやクラウド等に転送したりする機能も持たせ、工場内ネットワークに限らないインターネット、クラウドとの接続もサービス提供し、スマ

21) 山崎智久ヤマザキマザック社長2017年5月8日記者会見。

ート・ファクトリー関連ソリューションの第一歩としようとしている。

(b) 「AI 解析による生産ラインの最適制御」に向けて

もちろんスマート・ファクトリー化はそれ自体が目的ではなく、「生産関連ビッグ・データの AI 解析による生産ラインの最適制御」「製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装」「企業情報システムと生産ラインのシステム連携」を通じて、生産性向上、柔軟なマス・カスタマイゼーション、高度なトレーサビリティを実現することが目標である。スマート化のメリットについては、現在、工作機械メーカーに限らず内外メーカーが暗中模索の努力を重ねており、ヤマザキマザックも「データを可視化・分析・フィードバックによる工場運営の最適化」のコンセプトを顧客の個別製造現場に応じて如何に具体化するかにトライしている。スマート・ファクトリー化のプロセスは以下のように概念化できてはいるが、具体的な実現と具体的な成果は「試行錯誤」中である。

- ① 製品ライフサイクル・マネジメントの考えに立ち、受注から組立、出荷、検収までの全ての企業活動をデジタル・データ化
- ② 工場の設備・機器からリアルタイムで収集された上記データを 3DCAD データや PDM, ERP・MES, CRM のデータと連携させ、製造ビッグ・データを形成
- ③ 従来も、製造ノウハウをソフトウェア化して工場実装してきたが、2000年代前半に比べて飛躍的に向上した情報処理能力とソフトウェア開発力により、製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装を推進
- ④ 上記の取組により企業情報システムが生産ラインを最適制御する能力を高めつつ、各時点で企業情報システムが有するベストのデータ解析力とソリューション提供能力を活用、②で得られたビッグ・データを AI 解析し生産ラインを最適制御
- ⑤ 工場スマート化により、システム連携による最適化、仕掛在庫や管理工数の削減、製造リードタイムの短縮等を達成

(c) ソリューション・プロバイダ等外部資源の活用

このように次世代製造システムに関するソリューション・ビジネスは試行錯誤の過程にあることから、ヤマザキマザックは個別顧客の個別製造現場のスマート化にきめ細かく対応するために、自社単独ではなく外部資源の活用にも取り組んでいる。第一に、ヤマザキマザックは2008年から顧客工場のスマート・ファクトリー化に取り組んできたエイムス（東京都港区）と、2017年に製造業のIoT化を支援する合弁会社（AIZAK）を設立し、自社工場のスマート化で蓄積した経験・ノウハウをソリューション・サービスとして提供することを決定。表4の「機械加工工程の課題」について、AIZAKは顧客工場の生産ラインをIoT技術により「見える化」し、工作機械の稼働データ等を分析して生産性・品質向上の課題を洗い出し、課題解決のために生産ラインの最適制御のための生産管理システム導入を顧客とともに実施するとする²²⁾。

表4 機械加工工程の課題

- | |
|--|
| <p>(a) 正味加工時間と比較して、現場の滞留／在庫が多い</p> <p>(b) 設備の停止時間が多く、稼働時間／稼働率が上がらない</p> <p>(c) 設備の稼働率は高いが、予定した生産量を達成できない</p> <p>(d) 稼働率が高く見えるが、本来の機械の生産能力の半分以下しか能力活用できていない</p> <p>(e) 機械停止／修理が、再発多く発生している</p> <p>(f) 個品ごとの正確なトレーサビリティが追えない</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 使用した材料，加工機，工具，プログラム ・ 加工時の加工機などの設定，状態 ・ 各作業の担当者，加工品の検査結果 <p>(g) 各種の記録が散在していて、収集／集計に時間がかかる</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 機械稼働，機械修理，品質記録など，個別に管理されている |
|--|

(出所) AIZAK ホームページに基づき筆者作成

22) 日刊工業新聞2017年9月12日付（エイムネクストがヤマザキマザックと提

第二に、ヤマザキマザックは2015年に MAZAK SMART BOX を開発・供給開始したが、IT/OTの技術領域では自社単独では顧客の「製造システムのオープン・ネットワーク化」を十分にサポートするのが難しいのを発見。2018年4月に通信系インテグレータのネットワンシステムズ（東京都千代田区）との技術支援を締結し、自社工場への MAZAK SMART BOX 展開に関して技術支援を受けるとともに、ヤマザキマザックが顧客メーカーの個別製造現場の環境に応じた工場 IoT ネットワークを構築する場合にも同社からコンサルティングと技術支援を受けることとした。これにより、ヤマザキは自社内で蓄積が十分でない、工場 IoT 化に必要な IT 及び OT に関する知識・ノウハウを補完できるだけでなく、顧客工場に MAZAK SMART BOX を導入した後の効率的な遠隔監視・運用サービスの設計についてもネットワンシステムズから支援を受ける予定である²³⁾。

(d) ソリューション・ビジネス拡大のボトルネック

工作機械メーカーが自動車・航空機等の大口顧客の依頼だけにソリューション・ビジネスを限定してきたのは、高付加価値機の受注確保が目的だったというだけではなく、ライン・ビルド等の本格実施には相当規模の人的資源を割かなければならず、ビジネス規模の拡大には限度があった事情が背後に存在する。前項(C)のようにヤマザキマザックはスマート・ファクトリー化の第1段階である顧客の「製造システムのオープン・ネットワーク化」でも自社単独処理せず外部資源を活用しているが、次世代製造システムのインテグレーションに工作機械メーカーが投入できる経営資源に

携し機械加工のIoTサービス)、AIZAK社資料 (<http://www.aizak.co.jp/vision/>)。

23) ネットワンシステムズ株式会社2018年4月13日付プレス発表(ネットワンシステムズ、ヤマザキマザックの製造業向けIoTソリューションを技術支援)。

は限界がある。

スマート化では「製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装」が柱の一つであるが、工作機械メーカーは加工技術に強みがあるので、加工ノウハウ・生産ノウハウをソフトウェア化して自社工場の実装するだけでなく外部提供することが期待されている。また、自社工場のスマート化の経験を活かして、生産ラインの最適制御のための生産管理システム、稼働監視システムなどMESソフトの開発・外販することも予想されており、工作機械メーカーは次世代製造システムに関連して（ソリューション・プロバイダの事業領域に属する）ソフトウェア開発にも事業拡大する可能性があるが、その結果、ますます経営資源の配分が難しくなり、経営資源不足がソリューション・ビジネスの制約要因にならないかが懸念される。

なお、顧客製造システムのシステム・インテグレーションにおいて、可能な限り自社マシンで生産ラインを構築できれば、顧客の個別ニーズへの対応力も高まるので（例えば、他社調達しなければライン・ビルドできないというのでは、他社に在庫等がなければジャストインタイムでシステム納品できない）、ヤマザキマザックも工作機械他社と同様に顧客が必要な機械・装置を「ワンストップ」で調達できる総合メーカー化を目指している。経営資源は総合メーカー化にも必要となる。

こうしたことから、今後、ヤマザキマザックがスマート・ファクトリー・ビジネス展開に関して全事案を引き受けることは到底不可能であり（そもそも引き受けることが適切か疑問）、自社引受けと外部インテグレータ委託の線引きなどが必要になるのではないだろうか。

② オークマのスマート・ファクトリー・ビジネス

(a) 顧客ニーズに応じたスマート化提案

オークマもヤマザキマザックと同様に主力工場の大口工場をスマート・ファクトリー化し、それにより得られた知見・ノウハウを顧客工場のスマ

ート化に活かそうとしている。DS1では、スマート化の第1段階である「製造システムのオープン・ネットワーク化」(Mazak SMART BOXに相当するSuite Boxによる)、第2段階である工作機械より収集した生産関連データに基づく「生産ラインの最適制御システム」の構築を了し、また、DS2では、日立製作所との協業により、“Industrie4.0”の目指す市場動向に即応した柔軟かつ機動的な生産の実現に向けて、第3段階の「企業情報システムと生産ライン制御システムの統合」に取り組んでおり、将来的には第4段階の「AIによる生産ラインの自動最適制御」「デジタル・ツインによる最適化(CPS)」等に取り組むとする。

ただし、4(1)③で示したように、オークマはドイツのスマート・ファクトリーを次世代製造システムの絶対標準と見ているわけではなく、製造分野・形態・規模に応じては第4段階のCPSどころか第3段階の企業情報システムによる生産ライン制御も必要ではないと考えている。2000年代以降、オークマは持続的円高とグローバル競争の熾烈化に生産ライン高効率化で対応し、自社グループの工場再編から遂には大口工場の更地化と新規建設に踏み切り、スマート化にも工場改革の一環として取り組んできた。スマート化は、市場動向に機動的に対応できる高効率の生産ライン構築の一手段に過ぎず、オークマは自社工場のスマート化経験から、顧客の製造現場と製造ニーズに応じて必要なスマート化は異なるとして、部品加工専門メーカーと部品加工・組立一貫メーカーに応じたスマート化プランを提供しようとしている。

(b) “Connect Plan”

部品加工専門メーカーのスマート化

オークマの顧客は部品加工専門メーカーと部品加工・製品組立一貫メーカーに大別でき(製造企業の大半は完成品メーカーではなく部品メーカー)、部品加工メーカーの8～9割が中小企業である。部品加工・組立一貫メーカ

ーは受注状況に即応した（“pull”型の）生産ライン制御のため「受注一部品加工—組立」を同期化させる必要があり、工場スマート化も生産ラインの「つなぐ」「見える化」と生産支援システムを活用した最適制御に加えて、企業情報システムと生産ライン制御の連携が必要となる。これに対し、部品加工メーカーの多くは、最終製品の受注状況の変動に在庫のバッファー調整で対応できるため、企業情報システムとの生産ライン制御の統合は不可欠ではない。

企業規模・業種を問わずスマート・ファクトリーは次世代製造システムとして期待が高いが、中小性の高い部品加工メーカーでは、そもそも企業情報システム関連で大規模投資を要するスマート化には「二の足」を踏むところが少なくない。前項(1)①でも指摘したように、現在、工作機械メーカーに限らず内外メーカーがスマート化のメリットについて暗中模索中であり、「データを可視化・分析・フィードバックによる工場運営の最適化」のコンセプトを個別製造企業の個別製造現場に即して如何に具体化するか、実体的意味のあるスマート化ができるかは事前に必ずしも成功の保証のない「出たとこ勝負」となると、中小メーカーはますますスマート化に慎重にならざるを得ない。

ただし、部品加工メーカーも将来の競争激化への備えとしてスマート化に取り組む必要は認識しており、ひとまずは「生産ラインの最適制御システム」導入の前提である「製造現場のオープン・ネットワーク化」には関心が高い。このためオークマはDS1構築の経験を活かし、部品加工メーカー向けスマート工場プランである“Connect Plan”を提供している。DS1自身は「①製造システムのオープン・ネットワーク化、②生産ラインの最適制御システム構築、③企業情報システムと生産ライン制御システムの統合、④AIによる生産ラインの最適制御の自動化」というスマート化のロードマップ上、第3段階まで進んでいるが、“Connect Plan”は部品

加工メーカー向けの「製造現場のオープン・ネットワーク化」と「生産ラインの最適制御システム構築」の中間的なプランであり、生産ラインの最適制御の前段階のスマート化により顧客が生産性向上を体験できるものとなっている。

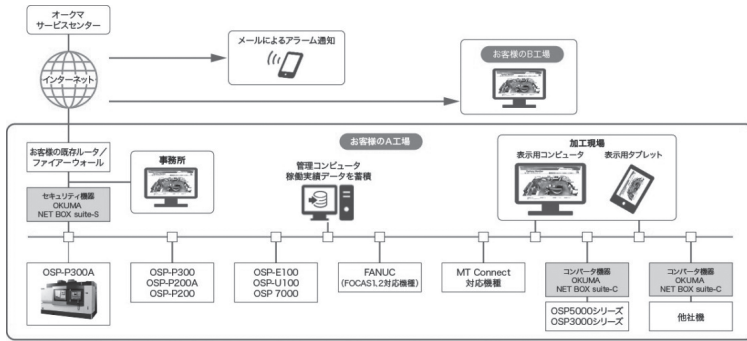
「見える化」と「工程管理・稼働監視・予防保全」ツール

“Connect Plan”とは、第一に、オークマ製工作機械のNC装置（OSP）と工場稼働モニターの“Factory Monitor suite”（PC用ソフトウェア）を接続することで（オークマの旧型機や他社機は“Suite Box”をNC装置に装着）生産ラインをつなぎ（オープン・ネットワーク化）、工作機械の稼働状況、工具・治具等の状況、ワークの加工進捗状況等を「見える化」するものである（図6参照）。

第二に、“Connect Plan”は「製造システムのオープン・ネットワーク化」だけでなく、顧客が「見える化」の成果を活かして生産性向上を図れる仕掛けを用意している。同プランは生産ラインの稼働率だけでなくアラーム履歴、操作履歴も「見える化」しており、“Connect Plan”の顧客はこれらのデータに基づいて生産遅延・機械停止等に関する原因追及・分析を行い、生産ラインのカイゼン（機械停止時間削減、稼働率向上）ができる（図7参照）。また、顧客は、個別機械のリアルタイムに「見える化」された稼働実績に基づき、機械停止に早く気づいて対策が打て（アラーム通知機能を活用すれば一層早く対策を講じ機械停止時間を削減可能）、さらに、保守点検時期もメンテナンス・アイコンにより「見える化」しているため、機械メンテナンスを確実に行えば将来の故障停止を未然に防ぐことも可能となっている。

第三に、工作機械メーカーの考える「スマート化」では、「生産性向上」に加えて「トレーサビリティ」も重要な目的であり、“Connect Plan”では、加工記録管理は加工したワークの固有のIDと、機械毎の加工実績・計測

図6 “Connect Plan”におけるオープン・ネットワーク化



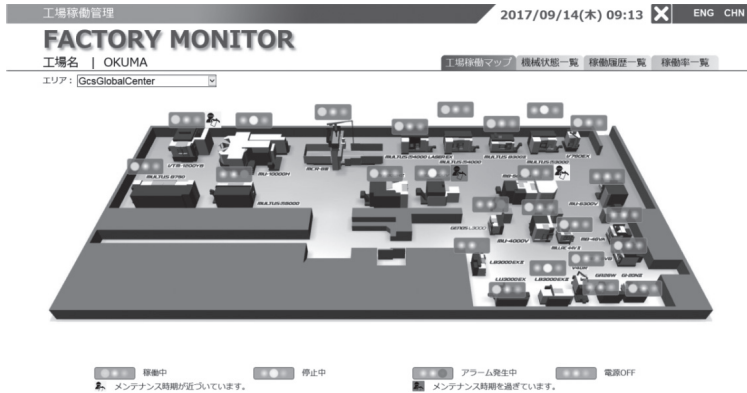
OKUMA NET BOX suite-S (特別仕様) :安全にインターネット接続するためのセキュリティ機器です。
 OKUMA NET BOX suite-C (特別仕様) :不対応機種もネットワークに繋ぐ為のコンピュータ機器です。



OKUMA NET BOX suite

(出所) オークマ・ホームページ

図7 工業稼働状況の「見える化」



(注) 工場の各設備機器毎に「稼働中」「停止中」「アラーム発生中」のいずれかの信号が点灯され、「電源オフ」の場合は全信号が消えることで、工場の稼働状況が一目で把握可能。また、メンテナンス期間の近い設備機器、メンテナンス期間を過ぎた設備機器にはアラーム信号が点灯し、早めのメンテナンスにより生産ラインを止めずに済むよう配慮。

(出所) オークマ・ホームページ

結果を紐付け、「いつ、どこで」「どのように」加工したのか、計測結果は「どうだった」のかを容易に確認できるよう、加工のトレーサビリティを確保しており（オークマ機のNC装置OSPには加工状態監視機能・機械情報ロギング機能を搭載）、仮にワークに異常のあった場合にも顧客が原因を解析して、一層安心できる高品質生産を実現できるサポート機能を持たせている。

“Connect Plan”の先にあるスマート化

“Connect Plan”のスマート化はスマート・ファクトリーのロードマップで第2段階に到達したレベルにある。第2段階では、生産ラインの最適制御方法をソフトウェア化し生産支援システムとして実装、生産支援システムが生産ラインの稼働方法・計画、各工作機械の加工プログラム、工具・治具等の準備計画を自動的に割り出し、工場オペレータはこれに基づき生産ラインの制御プランを決定することが目指されるが、“Connect Plan”は生産ラインの最適制御のソフトウェア化には至っておらず、従来、オークマがNC装置OSPに加工条件検索機能・サーボ制御最適化機能・幾何誤差計測補正機能等を実装し、個別工作機械の最適制御を行ってきた取組を生産ラインの「見える化」「つなげる」により生産性改善への寄与効果を拡張したに止まる。何故だろうか。

オークマでは、2000年代以降の自社工場の生産改革の経験から、工場スマート化は、単に生産ラインを「つなぐ」「見える化」し、AI等を活用して最適制御するだけで達成できるとは考えていない。生産ラインの「つなぐ」「見える化」の前に、工場（生産ライン）レイアウトの見直しと工程集約等の生産ラインのコンパクト化・効率化を行う必要があり、その上で、生産ラインのAIによる最適制御を組み込んだ、スマート・マシンから構成される工作機械システムを導入するのであれば、生産効率向上は実現できず、ましてや企業情報システムと生産ラインの制御システムを統合し

でも、市場動向に即応した柔軟かつ機動的な生産などできないと見る。

しかしながら、顧客は最初から工場ないし生産ラインをゼロ・ベースで見直して、一気に工場ないし生産ラインを壊し（更地化）、旧式機械を廃棄して新鋭機に差し替えることまで考えていないのが普通である。このためオークマは、段階を踏んで顧客に「工場のスマート化は（工場ないし）生産ライン全体の見直しが前提であり、生産レイアウト・工程の見直しを行った上で、次いで生産ラインのAIによる最適制御をシステム導入する必要がある」ことを理解させる必要があると見ている。最初から一気に生産ラインの更新を提案するのではなく、新たに導入する3台程度の工作機械システムにおいて“Connect Plan”を使ってもらい、顧客工場において、工程集約等生産ラインを見直した上で、生産ラインの「オープン・ネットワーク化」で得たデータを工程管理・移動監視・予防保全に活用すると、如何に生産性を改善できるかを理解してもらい、次に、10台規模の全生産ラインを新鋭設備に切り換えて全面的に“Connect Plan”を採用してもらう方針を採っている²⁴⁾。

未だ誰も実現していないスマート・ファクトリーに顧客にコミットメントしてもらうには段階を踏んだ説得が重要であり、“Connect Plan”により製造システムのオープン・ネットワーク化を達成し、生産ラインより収集されるデータにより生産性を向上できた顧客が、さらに生産関連データをAIにより解析し生産ラインの最適制御を自動化することの価値を認識・

24) オークマは“Connect Plan”の費用を100万円にして、中小顧客への普及を優先した低価格設定をしているが、国内だけでなく欧州でも外販を開始してオークマの工作機械システムの販売促進に役立てようとしている。中部経済新聞2017年10月4日付によれば、オークマは同年9月に“Connect Plan”を欧州国際工作機械見本市「EMO ショー」（独ハノーバー開催）で欧州初披露し、生産体制の効率化を目指す中堅・中小企業を中心に現地需要を掘り起こし、欧州売上高を現在の1.5倍の3億ユーロに引き上げようとしている。

理解するのを待って、オークマはスマート化の第2段階（生産システムの最適制御）、第3段階（ソフトウェア化された製造ノウハウを工場実装）を提案するとしている²⁵⁾。

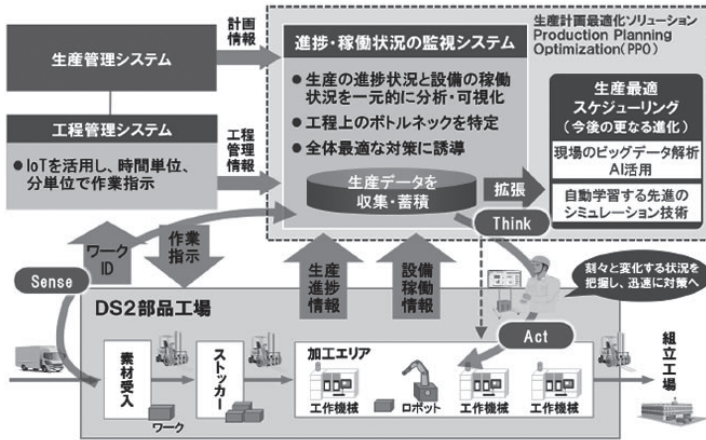
(c) 「部品加工+組立」一貫メーカーへの将来的提案

4(1)③で示したように、オークマの考えでは、スマート・ファクトリー化は部品加工専門メーカーと部品加工・組立一貫メーカーでは異なり、前者が必ずしも企業情報システムによる生産ライン制御を要しないのに対し、数万点の部品を組み立てる后者では、余剰な部品在庫を抱えられず「受注部品一部品加工—組立」の同期化が不可欠であり、企業情報システムと生産ライン制御システムの統合が必要である。このためオークマは部品加工・組立一貫メーカー向けスマート化プランの具体化に向けて、大口工場のDS2においてマス・カスタマイゼーションを徹底した「究極の高効率生産モデル」を実現するべく、日立製作所と提携して「生産の見える化の進化」と「工場制御周期の高速化」をテーマとする共同実証を2017年5月に開始した。

まず「生産の見える化」の進化に関しては、オークマは、日立製作所のIoTプラットフォーム（Lumada）の生産計画最適化ソリューションを「進

25) 現在、オークマは“Connect Plan”に合わせて生産管理支援アプリ開発を進めているが、これは工作機械単体の最適制御ソフトであり、複数の工作機械から成る生産ラインの最適制御ソフトではない。第1段階と第2段階の中間段階におけるスマート工場化を充実させることを意図しており、ユーザーがスマートフォン等のユーザー・インターフェイスから各自必要とする機能をダウンロードして利用することを想定している。ただし、“Connect Plan”が顧客に浸透し、顧客の関心が生産ラインの最適制御に移れば、オークマは「加工部品の設計図が与えられればソフトウェアなりAIなりが生産ラインの稼働方法、各工作機械の加工プログラム、工具・治具等の準備計画などを割り出し、工場オペレータがそれに基づき生産ラインの最適制御プランを決定できる」生産支援システムのソフトウェアの開発・外販を本格化する予定。

図8 進捗・稼働状況の監視システムの概念図



(出所) オークマ資料

「進捗・稼働状況監視システム」として採用。IoTを活用して、生産進捗と設備稼働に関するデータを同時に収集して連携させ、生産進捗と設備稼働を一元的に監視できるシステムを開発・導入した。この一元化により現場データを統合的かつリアルタイムで分析できるようになり、①工場内でトラブルが発生した場合、タブレット端末や製造現場の画面で状況を確認し、機械停止の原因究明、対策優先度の高い機械の特定など問題を早期発見し対処し、②生産に遅れが発生している場合にも、生産計画と実績の乖離と将来の影響度等をシミュレーションし挽回計画の立案が可能できるようになったとする（図8参照）。

また、「工場制御周期の高速化」に関して、オークマは、日立製作所が大みか事業所で導入したワーク ID（認識タグ）を活用した工程管理システムを導入、素材・部品、その保管場所・搬送台車に識別用のワーク ID（RFID タグ）を取り付け、すべての加工部品が工場内のどこに、どの状態で存在するかを正確に把握できるようにした。従来も、どの部品が、どの

工程に存在するかまでは把握できていたが、この工程管理システムの導入により、工程間を移動中のすべての部品に関する情報も時間単位で把握できるようになり、従来は日単位だった生産の作業指示が時間単位で可能となった。

そして「進捗・稼働状況監視システム」「工程管理システム」は相互に独立したシステムではなくスマート・ファクトリーの両輪であり、オークマでは、日立製作所の大みか事業所と同じく両システムを提携させ、生産進捗把握の精度を向上し、工程上のボトルネック（前工程の遅延や設備不具合等）特定から全体最適の対策実施までのプロセスを迅速化することで²⁶⁾、工場のPDCAサイクルを迅速に回し工場全体のスループットを向上させ、DS2のグローバルなコスト競争力を高めたいとする。

今後、オークマは、生産進捗・設備稼働状況の監視システムで収集・蓄積した現場のビッグ・データと、自動学習するAIの先進シミュレーション技術を活用して、従来は困難だった、刻々と変化する現場の状況に応じて精度の高い生産スケジュールをダイナミックに自動生成するシステムを開発し、市場動向に即応して柔軟かつ迅速に生産計画の最適化を図ることを目指している。オークマと日立製作所は、DS2での経験を踏まえ、「部品加工+組立」型の顧客には、AI等で生産ラインの最適制御できる工作機械システムを納品するとともに、生産ライン制御とERP等企業情報シ

26) 例えば、急な生産計画の変更に対して、特定部品の加工が他部品の加工よりも柔軟な対応が難しいと、当該部品の加工が社内で定めた標準作業時間で完了せずボトルネック化してしまうケースがあるが、生産進捗状況、設備稼働状況、加工部品の所在・加工状況を同時に一元的に監視・「見える化」できると、生産ラインの全体最適に配慮しつつ当該部品加工に関して最小限度の追加手当を行ってボトルネック化を回避できる。オークマでは、生産指示が日単位から時間単位にできるようになったことに加えて、ボトルネック工程の特定と全体最適化対策の立案が容易となったことで、工場内におけるワークの滞留時間を短期化しリードタイム削減を実現できたとしている。

システムとの連携サービスも顧客に提供できるよう「オークマ+日立製作所」のチームで「ものづくり支援」することを構想している²⁷⁾。

③ DMG 森精機のスマート・ファクトリー・ビジネス

(a) 顧客のスマート化ニーズの模索的探求

DMG 森精機も、ヤマザキマザック、オークマと同様に自社工場のスマート化により得られた知見・ノウハウを顧客工場のスマート化に活かそうとしており、現時点では、① IoT 技術により、工場内のすべての工作機械・装置をネットワークにつなぎ、リアルタイムで情報を共有化する「製造システムのオープン・ネットワーク化」、② 過去も工作機械の NC 装置を情報端末化することで生産関連データを取得し生産ラインの最適制御を試みてきたが、取得データの制限とソフトウェア開発の限界から未達だった「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」に関して、顧客メーカーのスマート・ファクトリー化をサポートしようとしている（市場動向に即応した変種変量生産のための企業情報システムによる生産ラインの自動最適制御や CPS は将来課題）。

スマート・ファクトリー化はそれ自体が目的ではなく、「AI による生産ラインの自動最適制御」「製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装」「企業情報システムと生産ラインのシステム連携」を通じて、生産性向上、柔軟なマス・カスタマイゼーション等を実現することが目標である。しかしながら、スマート化のメリットについては、現在、工作機械メーカーに限らず内外メーカーが暗中模索中であり、顧客に「海のモノとも山のモノともしれない」スマート化にコミットメントしてもらうため、DMG 森精機もオークマと同様に苦労している。

27) 日立製作所「『熟練の技』と『自動化』が織りなす未来工場の実現へ——最高のモノづくりサービスをめざす日本企業の挑戦に見る製造業の未来の姿とは」(http://social-innovation.hitachi.jp/case_studies/okuma/index.html)

オークマは“Connect Plan”においてスマート化の第1段階の「製造システムのオープン・ネットワーク化」を行うが、第2段階である「生産ラインの最適制御のソフトウェア化と工場実装」「実装システムによる生産ライン制御の自動解析（工場オペレータは解析結果に基づき制御プランを決定）」までは手をつけず、これまでオークマがNC装置OSPに加工条件検索機能・サーボ制御最適化機能・幾何誤差計測補正機能等を実装し、個別工作機械の最適制御を行ってきたサービスを、生産ラインの「見える化」に伴い拡張するに止めた。これはスマート・ファクトリーの実態が見えない中、顧客メーカーの業種・事業形態を問わず一律のスマート化サービスを提供しても意味に乏しいからであり、その代わりに個別製造企業の個別製造現場に応じた生産ラインの最適制御をカスタマイズ・ベースで追求している。そして、DMG 森精機もこのオークマと同様なアプローチを採る。

DMG 森精機は2013年に開発したCELOSを工作機械に搭載することで、工作機械より収集した生産関連情報（ジョブ、加工工程、機械データ）の一元管理を可能化としていたが、2016年9月以降日本マイクロソフト社との提携によりサイバー・セキュリティ対策を施したCELOS NETboxを開発、自社機だけでなくメーカーやモデルの新旧を問わず生産関連データを収集し工場全体の一元管理ができるよう手当してきた。スマート化に意欲のある顧客に対しては、まずDMG 森精機は「製造システムのオープン・ネットワーク化」を提案し、CELOS及びCELOS NETboxにより工作機械のNC装置と工場稼働モニターを接続することで生産ラインをつなぎ、工作機械の稼働状況、工具・治具等の状況、ワークの加工進捗状況等を「見える化」する。

その上で、顧客が「見える化」の成果を活かして生産性向上を図れるよう、DMG 森精機は工作機械のリアルタイム稼働監視アプリケーションであるDMG MORI Messengerを開発・提供している。顧客はMessenger

により、時間や場所に関係なく、常にリアルタイムで機械の状態（実行状態、機械の稼働時間、現時点での生産量、無人時の状態、停止理由等）を把握できるが、いち早く機械停止に気づき対策が打てれば（アラーム通知機能あり）機械停止時間を大幅に抑えて高い生産性を維持できる。また、Messengerは、指定された任意の期間やシフトに関して各機械の生産性と稼働率（機械の生産性のランキング、実稼働時間の比率、非稼働時間の比率、機械停止原因の比率等）を分析する機能が装備されており、顧客は各機械の稼働状態の分析結果に基づき見込み数量を正確に算出でき、それにより生産工程の最適化が可能となっている。

ただし、これらはDMG森精機がNC装置に加工条件検索機能・サーボ制御最適化機能・幾何誤差計測補正機能等を実装し、個別工作機械の最適制御を行ってきたサービスを生産ラインの「見える化」に伴い拡張したに止まる。スマート・ファクトリーの第2段階にあたる「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」には、加工・生産ノウハウをソフトウェア化して工場実装する必要があるが、DMG森精機もオークマと同様に「加工部品の設計図が与えられればソフトウェアなりAIなりが生産ラインの稼働方法、各工作機械の加工プログラム、工具・治具等の準備計画などを割り出し、工場オペレータがそれに基づき生産ラインの最適制御プランを決定できる」ソフトウェアの開発に取り組んでいる。

(b) DMG森精機のライン・ビルド事業

ソリューション・ビジネスの強化

2000年以降のソリューション・ビジネスは、工作機械メーカーが自動車・航空機関連の高付加価値機需要を確保するための補完的なビジネスだったが、第4次産業革命に伴う製造システム変革に対応して、工作機械メーカーが工作機械単体でなく工作機械システムを顧客に購入してもらう上で、ソリューション・ビジネスは必要不可欠のツールとなると考えられ

る。工作機械メーカーは、ライン・ビルダーとして個別製造企業の個別製造現場のスマート化に直接的に取り組み、コンサルテーションを通じて顧客のスマート化ニーズを明確化し、製造システム・インテグレーションにおいてスマート化のメリットを実体化していくことがスマート・ファクトリー・ビジネスで求められる。

DMG 森精機は従来から自動化システムの販売促進のためソリューション・ビジネスに精力的に取り組んできたが、スマート・ファクトリーに関してもソリューション・ビジネスの強化がますます欠かせないと認識している。このため、同社は大手上場企業から従業員数30人程度の中小企業を広く対象として、生産ラインの「つなぐ」「見える化」をサポートし、自社の工作機械システムを製造ラインにシステム・インテグレーションする専門組織を設立した²⁸⁾。工作機械メーカーはスマート・ファクトリーを自動化・省人化の延長上にあるものと捉えているが、DMG 森精機のライン・ビルド組織はスマート化を含む自動化システムのライン・ビルドを担当することで、スマート化された工作機械システムの販売促進に当たることとなった。

自動化システム MATRIS

2(3)②で示したように、DMG 森精機は「自動化システム」を

28) ライン・ビルドは収益の柱とするには利益率が低く（大手の平田機工でも売上高連結純利益比率は良くて5%程度で1～2%が普通）景気変動に伴う浮沈が大きい。DMG 森精機のライン・ビルドは専門ライン・ビルダーと異なり自社の工作機械を中心としたシステム納入の一環として行われるものであり（工作機械の売上で収益をきちんと確保）、また、既存のエンジニア部隊がライン・ビルドも担当するので組織的拡大はあまり伴わず、むしろ自社機械の性能に知悉しているがライン組立に関する技術・ノウハウを持たないエンジニアが自社の工作機械だけでなく他社工作機械・周辺装置を一つのシステムに組み立てる技術・ノウハウを獲得する良い機会であると肯定的に評価している。

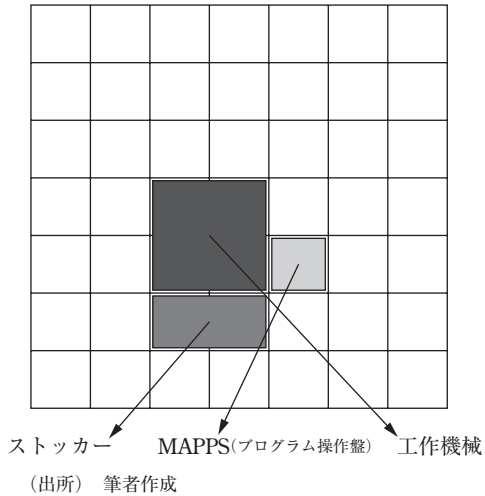
「Standard Automation」「Cells」「Systems」の三類型に分類しライン・ビルド事業を展開してきたが、2016年以降スマート・ファクトリー化への対応も含めソリューション・ビジネスを本格化したことに伴い更なる標準化を追求、システムをモジュール化しモジュールの組合せにより広範な顧客ニーズに柔軟に応える MATRIS を開発し、2018年3月に本格販売に踏み切った。

従来、工作機械・ロボット・搬送装置を組み合わせた自動化システムは顧客の個別ニーズに応じてオーダーメイド設計されており、工場全体のレイアウトの最適化等を考えずに個別システム変更をその都度スペース等現場に合わせてカスタマイズして行うものだった。このためシステムの設置や組替えには巨額のコストがかかるだけでなく、工場での全体最適ではなく部分最適しか実現できなかった。

そこで、DMG 森精機は工作機械、ロボット、搬送装置の寸法（設置単位面積を71cm²）を規格化し、NC 装置等の通信・配線規格やプログラミングも統一することで、顧客がモジュール化された工作機械・ロボット・搬送装置等をお組み合わせることにより、生産量や品目の変更に応じて生産ラインを柔軟に構築し直すことができる工夫を行った。MATRIS はマトリックス（matrix）に由来し、工場を「方眼」で区切りマトリックスの組合せにより生産ラインを構築するアイデアで、顧客は基幹パッケージにモジュール追加することで工場機能を成長させ続けられる（図9参照）。

DMG 森精機は、工作機械単品から工作機械システムの販売にシフトする過程で、生産ラインを可能な限り自社製品で構成できる「総合メーカー」化に取り組んできたが、MATRIS によるシステム・モジュール化は総合メーカー化に拍車をかけ、ワーク・ハンドリング、パレット・ハンドリングは各157機種、40機種の標準自動化システムを商品化、パレット・ブール・システム、ローター・システム（ガントリー・ローター）、ロボット・

図9 MATRISのモジュール組立て



システムについても標準自動化システムのメニューを急速に拡充している。

MATRISとスマート化

自動化システムのモジュール化は、従来型の自動化システムだけでなく、スマート化システムについても顧客メーカー、特に中小メーカーにとり受容しやすいものとした。スマート・ファクトリーでは、市場動向に対応した変種変量生産を眼目とし、迅速な段取替え、部品種・システム変更だけでなく、機動的な生産レイアウトの変更も求められる。MATRISはモジュール化されたシステムであるため、顧客の工場スペースに対応してシステム・レイアウトを柔軟に変更でき、段取替えや部品種・システム変更等についても工作機械等のプログラミングが迅速になされる工夫が施された。

DMG 森精機は、MATRIS 採用により生産ライン構築に要する期間を 8

日から2日に8割も短縮でき（3日目から生産ライン稼働可能）、生産ラインの事後変更も解体・構築・調整に5日間を要していたのが6割の7時間で対応可能となるとする。また、MATRISの「売り」は工作機械等のプログラミングの簡便さにもあり、システム全体を一元管理できるシステム制御盤（MAPPS connected）を使えば、ユーザーは生産ラインの稼働状況監視やスケジュール変更等が可能であるだけでなく、制御装置の画面でアイコンを入れ替えるだけで工作機械・ロボット等の基本動作を設定・変更でき、ネットワークからアプリをダウンロードすることで新機能を追加できるとする。

このように、DMG森精機は、自動化システムとAIによる生産ラインの最適制御システムを組み込んだ工作機械システムを開発し顧客に提供するだけでなく、「生産設備の総合施工業者」として顧客の抱える千差万別な生産課題に「ソリューション」を提供していくとしており、自社機械等のMATRIS対応比率（事実上、スマート・ファクトリー対応比率と同等）を2015年4.2%、2017年9.4%、2018年11.7%、2019年16.2%、2020年20%と引き上げることを予定している。

5. ま と め

ドイツが“Industrie4.0”で描くように、はたして変動する市場動向に即応した変種変量生産が製造業の未来であり、スマート・ファクトリーが次世代製造システムの標準となるかは予断を許さない。ただし“Industrie4.0”が現実のものとなり、スマート・ファクトリーでは製造システムの物的部分とIT部分が統合され、企業情報システムがIoTとAIの活用により生産ラインを自動最適制御してCPSがビック・データ解析により生産活動もカイゼンするようになると、製造システムのインテグレーションにおいて付加価値配分は機械よりもITにシフトしかねない。工作機械メーカーが

ソリューション・プロバイダ等のマネジメントする製造システム・インテグレーション・プロジェクトにマシンを納入する下請にならず、主体的に工作機械ビジネスを展開したいならば、工作機械メーカーは工作機械単体の開発供給ではなく、スマート化された工作機械システムの開発供給に事業シフトし、かつ、顧客製造企業の個別製造現場に最適化された形で工作機械システムをインテグレートするライン・ビルダー事業にもコミットメントしなければならない。

第4次産業革命の製造業に与えるインパクトは、(i) 製造システムのオープン・ネットワーク化、(ii) リアルタイムで収集した生産関連ビッグ・データのAI解析による生産ラインの最適制御の実現、(iii) 製造ノウハウのソフトウェア化と外販化、(iv) 企業情報システムと生産ラインのシステム連携による柔軟かつ機動的なマス・カスタマイゼーションの実現とされる。ドイツの“Industrie4.0”ではセンサ・端末により設備・機器よりリアルタイム収集された生産関連データはクラウド上に集約されデータ解析・最適制御方法算出等がなされるとするが、工作機械メーカーは2010年代半以降続けてきた自社工場のスマート・ファクトリー化の実験を通じて「次世代顧客は、IoT技術により制御層においてリアルタイム収集された大量のデータを、実行層でAI解析することで製造ラインを最適制御する」との予想に傾いている。

その上で工作機械メーカー各社は、現段階での顧客のスマート化ニーズについて、(i) IoT技術を活用して工場内のすべての工作機械・装置をネットワークにつなぎ、情報を共有化しリアルタイムにどこからでも見られるよう「製造システムのオープン・ネットワーク化」する、(ii) 先進国に共通する熟練工不足とマス・カスタマイゼーションによる作業の複雑化に伴い、経験の浅い作業員でも使える設備、ボタンを押すだけで生産できる自動化機械及び自動化システムへのニーズに対応すべく、加工ノウハウ・生

産ノウハウ等をソフトウェア化し「工場実装」することと捉え、(i)に関しては米国 IT 企業（シスコシステムズ、マイクロソフト等）との提携により工場内だけでなくインターネット、クラウドとの接続も可能とする装置・システムを開発し、顧客工場の「つなぐ」「見える化」のためのサービスを提供している。

(ii)については、工場のオープン・ネットワーク化により「見える化」された加工・組立工程において、顧客工場のオペレータが生産ラインの生産進捗状況を把握し、仮に「遅れ」「不具合」等の発生している箇所があれば原因を解明し手当する（生産ライン全体の稼働状況等を見ると生産ラインのカイゼン案も発見できる）のに必要なソフトウェアを提供するだけでなく、同じく製造現場のオペレータが機械・工具の消耗状況を見て故障時期を予想して（要すれば）部品交換や点検を行うなどの予防保全を行う意思決定のサポートとなるプログラムを提供し、顧客の生産性向上に寄与しようとしている。

ただし、これらはスマート・ファクトリーが目指す「AIによる生産ラインの自動最適制御（生産支援システムが生産進捗状況等に対応して自動的に生産ラインのスケジュールを再調整し、工具・治具の準備・着脱、材料準備等も含めて生産ラインに再指示を行う等）」の域には達しておらず、2000年代より工作機械メーカー各社が取り組んできた自動化・省人化の取組をIoT技術により拡張したに止まる。スマート・ファクトリーがいまだ塑像（トルソー）の段階にすら至っていない中、工作機械メーカーだけでなく、業種・業態・企業規模を問わずメーカーはスマート・ファクトリーの実体化に向けた暗中模索を続けているが、「AIによる生産ラインの自動最適制御」が何を対象として、何のために制御するのか、制御内容はソフトウェア化できるのか、自動制御化は顧客の製造ニーズや生産性向上に資するのか等についてはまだまだ探求段階に止まる。

工作機械メーカーはスマート・ファクトリーに向けたロードマップとして「製造システムのオープン・ネットワーク化」「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」「ERP・MES・PLCを垂直統合した企業情報システムと生産ライン制御システムの連携・統合」「CPSによる生産関連ビック・データ解析に基づく生産ラインの最適制御とカイゼンによる自律的に進化する工場」の4段階構想を共有しているが、スマート・ファクトリーの第2段階にあたる「生産支援システムによる生産ラインの自動最適制御」の実現には、加工・生産ノウハウをソフトウェア化して工場実装する必要がある。現在、工作機械各社は加工・生産ノウハウのソフトウェア化に取り組み工場実装しようとしており、リアルタイムで収集した生産関連データのAI解析による「生産ラインの最適制御の自動化」の実現を「製造システムのオープン・ネットワーク化」に続くスマート・ファクトリー・ビジネスの現下の重点課題としている。

工作機械メーカーのスマート・ファクトリー・ビジネスは「製造システムのオープン・ネットワーク化」にせよ「生産ラインの最適制御の自動化」にせよ、顧客企業の製造現場におけるシステム・インテグレーションと不可分の関係にある。2000年以降展開されてきたソリューション・ビジネスは高付加価値機需要を確保するための一部の大口顧客向けの補完的なものだったが、スマート・ファクトリー・ビジネスにおいては工作機械システムを顧客の製造現場にインテグレーションするところまで責任を持つて行うことが必要であり、ソリューション・ビジネスは工作機械ビジネスにおいて大きなウェイトを占めるものとなろうとしている。本稿とは別に第4次産業革命に対応した工作機械ビジネスの革新は「製造業のサービス化」の観点から分析を加える必要がある。

工作機械メーカーの本分は「優れたマシン」「良いマシン」を開発製造し顧客に供給することにある。スマート・ファクトリーに関連したライ

ン・ビルド事業はアフター・サービスも含めて「手間暇のかかる」ものであり、工作機械メーカーは「マシン」の開発・製造に多大な経営資源を要する中で、ライン・ビルドにどこまで経営資源を割けばよいか（割けるか）が問題となる。この点、ヤマザキマザックはソリューション・プロバイダ等との企業提携による経営資源補完を試み、一方、DMG 森精機はライン・ビルド専門組織を設けてソリューション・ビジネスを本格化させようとしている。ただし、DMG 森精機も顧客の製造システムのインテグレーションの効率化の観点から工作機械システムをモジュール化し、モジュールの組合せにより機動的に低コストで自由に生産ラインを構築できる仕掛け（MATRIS）を工夫している。

ソリューションは個別製造企業の個別製造現場に応じて千差万別である。オークマが自社工場のスマート化で発見したように、スマート・ファクトリー化は部品加工メーカーと部品加工・組立メーカーでは異なり、前者が必ずしも企業情報システムによる生産ライン制御を要しないのに対し、数万点の部品を組み立てる后者では「受注部品—部品加工—組立」の同期化のため企業情報システムと生産ライン制御の統合が不可欠である。今後、工作機械メーカーは、企業情報システムと生産ライン制御システムの統合、CPSにより生産ラインの最適制御とカイゼンが自動化された自律的に進化を続ける工場化に対応することも必要となると予想されるが、個別製造企業の個別製造現場に応じて多様な工作機械システムなりスマート化プランを用意できるかも、企業の競争優位に関わろう。

本稿では、榎本（2017）を受けて、工作機械メーカーの第4次産業革命に対応した工作機械ビジネス変革を分析した。2015年以降、スマート・ファクトリーに向けたロードマップが一定程度明確化され工作機械メーカー間で共有されるようになり、工作機械メーカーは自社工場のスマート化の経験・ノウハウを活かして、スマート化された工作機械システムの開発製

造に乗り出しており、顧客に応じたスマート化プランの具体化、ソリューション・ビジネスの本格化などの成果を挙げつつあることを示した。現在、工作機械メーカー各社は生産システムの自動最適制御の実現に向けて加工・製造ノウハウのソフトウェア化と工場実装に取り組んでいるが、今後、中期的には企業情報システムと生産ライン制御システムの統合、CPSによる生産ラインの最適制御とカイゼンの自動化に取り組が及ぶと見込まれるため、それに伴い工作機械ビジネスが如何に変革していくかを研究する必要がある。

榎本(2017)が問題意識を投げかけた、次世代製造システムにおいて機械とITが融合することで、工作機械メーカーとソリューション・プロバイダの関係が如何に変化するかに関しては、工作機械メーカー、ソリューション・プロバイダともに「スマート・ファクトリーとは何か」を暗中模索中であるため、まだ有意な調査結果は得られなかったが、オークマと日立製作所が企業情報システムと生産ライン制御システムの統合や加工・製造ノウハウのソフトウェアの工場実装に関する協業をスタートし、ヤマザキマザックがスマート・ファクトリー・ビジネスでソリューション・プロバイダとの提携・合弁に取り組むなど、生産システム関連産業内で新たな関係が誕生する兆しが生じつつある。我々は新たな産業の誕生の場に際会しているのかもしれない、この点についてもフォローアップと研究が必要である。

なお、加工・生産ノウハウのソフトウェア化と工場実装に関連して、ファナックが2016年IoTプラットフォームとして“FIELD System”を立ち上げ、2017年11月には三菱電機が同じく“Edge cross”を立ち上げたが、これらは製造関連ソフトウェア開発者とユーザー企業をプラットフォームにより結びつけ、前者にはソフトウェア開発・供給基盤を提供し、後者にはソフトウェアの購入・実施・支援基盤を用意することで、スマート・ファ

クトリーにも係わる生産関連ソフトの開発・流通・実施の促進を図ろうとしている。ユーザーはソフトウェアをクラウドからダウンロードして、プラットフォーム上で実施できるだけでなく、ソリューション・プロバイダに生産管理等をアウトソースしてしまうことも可能となる。プラットフォーム・ビジネスにはオークマ、DMG 森精機も関心を示しており、前者は提携先の GE の産業用 IoT プラットフォーム「Predix」をオークマ製品に組み込む形で、顧客製造業の IoT プラットフォーム・ニーズに対応することを2016年11月14日に発表し、後者は2017年10月より独のカルツァイス社（光学機械製造）、デュル社（ラインビルダー）、ソフトウェア社（ソフトウェア開発）、香港 ASM パシフィック・テクノロジー社（半導体製造装置製造）と、産業用 IoT プラットフォームの開発・提供を事業内容とする ADAMOS 社を合併設立した。

スマート・ファクトリーが製造業に与えるインパクトのうち、製造システムのオープン・ネットワーク化、加工・生産ノウハウのソフトウェア化と工場実装は、こうしたプラットフォーム・ビジネスも工作機械メーカーにビジネスの選択肢として登場させる。今後、IoT プラットフォームがファナック及び三菱電機により如何に展開されていくのかをフォローしつつ、工作機械メーカーが如何にソフトウェアのインターネット上での開発・流通・実施に関与していくかを研究することも、工作機械メーカーのスマート・ファクトリー・ビジネスの重要なテーマの一つであると考えられる。第4次産業革命に伴う次世代製造システムの登場は、工作機械メーカーをして工作機械の開発・製造事業者から、工作機械システムあるいはスマート製造システムのインテグレータ、さらには生産関連ソフトウェアのプラットフォーマーに変えてしまうのだろうか。第4次産業革命は世紀のパラダイム・シフトとされるが、確かに巨大な変革である。

参考文献

- 青島実 (2017) 「製造業のデジタル化戦略の潮流」野村総合研究所『知的資産想像』2017年2月号
- 今枝昌宏 (2006) 「製造業のサービス化とサービスマネジメントへの2つのアプローチ」『一橋ビジネスレビュー』54巻2号, 36-50頁
- インテル (2014) 『Internet of Things (IoT) による製造パフォーマンスの向上』
- 榎本俊一 (2017) 「工作機械メーカーのソリューション・ビジネス: 日本メーカーは第4次産業革命に対応できるか」中央大学商学研究会『商学論纂』第59巻第1・2号, 515-553頁
- 太田圭一 (2015) 『工作機械生産システムの解析』(京都大学博士論文甲第18978号)
- 企業活力研究所 (2016) 「IoTがもたらす我が国製造業の変容と今後の対応に関する調査研究報告書」企業活力研究所
- 國光克則 (2016) 「新世代知能化 CNC 『OSP1 suite』」『機械と工具』2016年2月号『月刊生産財マーケティング』2015年2月号 (「自動化で利益を出す 生き残るための国内生産」)
- 鈴木信貴・楢山泰生 (2009) 「工作機械メーカーのソリューション・ビジネス—ヤマザキマザック株式会社—」京都大学大学院経済学研究科 Working PaperJ-72, 1-17頁
- GE (2014) 『新しいインダストリアル・カンパニーのかたち』
- シスコシステムズ (2018) 『工場のデジタル化に向けたネットワークソリューション』
- 高梨千賀子 (2015) 「Industrie4.0時代の競争優位についての一考察 日独 FA システムメーカーを事例に」立命館大学イノベーション・マネジメント研究センター Discussion Paper Series, No. 24
- 『中部経済新聞』2017年10月4日 (オークマ, 「コネクトプラン」欧州で販売)
- 辻直志 (2017) 「製造業のデジタル化と日本の競争力 進む第四次産業革命」野村総合研究所『知的資産想像』2017年2月号
- 津田朋子 (2015) 「次世代製造技術の研究開発」科学技術振興機構研究開発戦略センター
- DMG 森精機『ジャーナル』2014~2017年各号
- DMG 森精機『プレス発表2014年10月20日付』(「新型オペレーティング・システム CELOS JIMTOF2014出展の全機種に搭載」)
- DMG 森精機 (2017) 「DMG MORI Messenger V2 Product Information」
- DMG 森精機『プレス発表2018年1月29日付』(「DMG MORI フロンテンオープンハウス開催のお知らせ」)

- 寺田充宏・五十嵐剛・柳浦健一郎（2018）「デジタル化によって変化する製造業の競争領域」『オペレーションズ・リサーチ』2018年4月号
- 中村実・正田耕一編（2000）『MES入門：ERP、SCMの世界と生産現場を結ぶ情報システム：製造業の情報化と経営改善のキーテクノロジー』工業調査会
- 『日刊工業新聞』2015年8月19日（オークマ、IoT対応 工作機械ネット化推進）
- 『日刊工業新聞』2015年11月12日（「ヤマザキマザック、スマート・ファクトリー提案—工作機械ソフト刷新 IoT対応を強化」）
- 『日刊工業新聞』2017年1月16日（工作機械、ソリューションに活路）
- 『日刊工業新聞』2017年9月12日（エイムネクストがヤマザキマザックと提携し機械加工のIoTサービス）
- 日経コンピュータ・日経ものづくり他（2014）『すべてわかるIoT大全 モノのインターネット活用 of 最新事例と技術』日経BP
- 『日経産業新聞』2013年5月21日（ヤマザキマザック サイバー工場世界展開）
- 『日経産業新聞』2013年5月21日（工作機械、双方向で管理 ヤマザキマザック装置開発 IoT活用し新技術 保守診断やアプリ更新）
- 『日経産業新聞』2013年5月28日（工作機械のオークマ 秘密新工場で効率磨く）
- 『日経産業新聞』2013年12月16日（ヤマザキマザック 無人で長時間部品加工）
- 『日経産業新聞』2015年12月25日（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）
- 『日経産業新聞』2016年2月3日（IoT先駆 自社工場で芽 オークマ、つながる工場 で新事業）
- 『日経産業新聞』2016年4月12日（ヤマザキマザック サイバー工場世界展開）
- 日本機械学会編（2005）『生産システム工学』丸善
- 日本機械学会編（2008）『メカトロニクス・ロボティクス』丸善
- 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～ICTの徹底活用と新しい現場力 TAKUMI4.0を目指して～』
- 日本能率協会編（1983）『FA生産システム設計法』日本能率協会
- ネットワンシステムズ株式会社『プレス発表2018年4月13日付』（ネットワンシステムズ、ヤマザキマザックの製造業向けIoTソリューションを技術支援）
- 日立製作所・日経エレクトロニクス（2014）『稼ぐビック・データ・IoT技術徹底解説』日経BP
- ファナック（2016）『ファナックの新たなIoTへの取り組み Field systemについて』
- 深谷安司（2017）「オークマスマートファクトリーの最新技術」『機械技術』2017年1月号

- 深谷安司 (2016) 「IoT時代のモノづくりを実現する新世代知能化CNC『OSP suite』」『機械技術』2016年1月号
- 藤岡誠 (2017) 『IoT & インダストリー4.0とテクノロジーサイクルのご紹介 DMG MORIが提案するIoT・AI』(DMG 森精機伊賀イノベーション・セミナー資料)
- 藤岡誠 (2017) 『Industrie4.0について』(自動車部品工業会報告)
- 富士通 (2015) 『IoT時代にビジネス・社会のイノベーションを引き出すヒント テクノロジー・ソリューション 活用モデル』
- 法山敬一・斎藤俊之 (2002) 「ネットワーク利用によるリアルタイム工作機械管理システム」『三菱重工技報』Vol. 39 No. 4, 220-223頁
- 堀部和也・村木俊之 (2017) 「デジタル化による工場の統合とIoT」『精密工学会誌』Vol. 83 No. 1, 36-41頁
- マイケルE. ポーター, ジェームズE. ヘブルマン (2015) 「IoT時代の競争戦略」『Harvard Business Review』, ダイヤモンド社
- マイケルE. ポーター, ジェームズE. ヘブルマン (2016) 「IoT時代の製造業」『Harvard Business Review』, ダイヤモンド社
- 水門正良 (2008) 「工作機械におけるグローバル化」『精密工学会誌』Vol. 74 No. 1, 20-24頁
- みずほ銀行産業調査部 (2016) 「日本産業の中期見通し (工作機械)」『みずほ産業調査』56巻3号
- 三菱重工工作機械 (2015) 『トータルメンテナンスサポートのご紹介』
- MONOist 2015年07月15日配信 (「DMG 森精機社長が語る: 世界1位の工作機械メーカーが目指すインダ x ストリ4.0」)(<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1507/15/news043.html>)
- 森田亮一・小原潜 (2011) 「産業機械・工作機械業界におけるM2M技術の活用」『NEC 技報』Vol. 64 No. 4, 53-55頁
- ヤマザキマザック 『Cyber World』2011~2018年各号
- ヤマザキマザック 『プレス発表2017年5月8日付』(「本社 大宮製作所のスマート化完了『Mazak iSMART Factory』として稼働開始」)
- ヤマザキマザック 『プレス発表2017年5月22日付』(「主力工場を大規模スマート・ファクトリー化 岐阜県美濃加茂市の2つの生産拠点をデジタル統合し, 生産性1.5倍へ」)
- ヤマザキマザック 『デジタル化による工場統合とIIoT (Industrial Internet of Things)』
- 山田敏之 (2005) 「工作機械産業とソリューション・ビジネス」『機械情報産業カレ

- ント分析レポート No. 11』機械振興協会経済研究所, 1-2頁
- 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』
- Baines, T. S., H. Lightfoot, J. Peppard, M. Johnson, A. Tiwari, E. Shehab and M. Swink (2009) "Towards an operations strategy for product-centric servitization," *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 29, No. 5, pp. 494-519.
- Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016) *Plattform Industrie4.0 Digitale Transformation "Made in Germany"*.
- Bundschuh, Dominik (2017) *Industrie4.0 in Deutschland Der Digitale Wandel in der Automobilindustrie*, Studylab.
- Evanschitzky, H., F. V. Wangenheim, and D. M. Woisetschlager (2011) "Service & solution innovation : Overview and research agenda," *Industrial Marketing Management*, Vol. 40, No. 5, pp. 657-660.
- Helo P., M. Suorsa, Y. Hao and P. Anussornnitisarn (2014) *Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing*, *Computers in Industry*, Elsevier Ltd.
- Jaekel, Michael (2017) *Die Macht der digitalen Plattformen : Wegweiser im Zeitalter einer expandierenden Digitalisphaere und kuenstlicher Intelligenz*, Springer.
- Kumar, R. and U. Kumar (2004) "A conceptual framework for the development of a service delivery strategy for industrial systems and products," *Journal of Business & Industrial Marketing*, Vol. 19, No. 5, pp. 310-319.
- Lightfoot, H. W. and H. Gebauer (2011) "Exploring the alignment between service strategy and service innovation," *Journal of Service Management*, Vol. 22, No. 5, pp. 664-683.
- Negahban, A. and J.S. Smith (2014) "Simulation for manufacturing system design and operation : Literature review and analysis," *Journal of Manufacturing Systems*, 33 Mellor. Elsevier Ltd., pp. 241-261.
- Oliva, R., and R. Kallenberg (2003) "Managing the transition from products to services," *International Journal of Service Industry Management*, Vol. 14, No. 2, pp. 160-172.
- Park, Patrick H. (2016) *Big Data War : How to Survive Global Big Data Competition*, Business Expert Press.
- Reinheimer, Stephane (2017) *Industrie4.0 Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele*, Springer.

- Shepherd, C. and P. K. Ahmed (2000) "From product innovation to solutions innovation: A new paradigm for competitive advantage," *European Journal of Innovation Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 100-106.
- Wright, P. (2013) "Cyber-physical product manufacturing," *Society of Manufacturing Engineers* (pp. 49-53), Elsevier Ltd.