

進化するスマート工場：ドリームサイト オークマの事例からなにを学ぶかー

慶應義塾大学 管理工学科 教授 松川弘明

((一財) エンジニアリング協会

次世代スマート工場のエンジニアリング研究会 主査)

スマート工場を定義することは難しい。少なくとも筆者には定義できない。なぜならスマート工場は相対的概念であるからである。そもそもスマートというキーワードを正確に定義することすらできない。

調べてみるとスマートという言葉が製品や設備に使われ始めたのは第 1 次大戦終了時であった。軍艦の動きに合わせて魚雷の向きを変えられる技術開発に取り組んだ人がいた。長いコイルを巻いた魚雷を発射し、魚雷はコイルを解きながら目標に向かって進む。軍艦が方向を変えるとコイルでつながっている魚雷に電気信号を送って魚雷の方向を変えるという制御方式の開発であった。特に革新的な技術ではなかったが、命中率が飛躍的に向上したためにスマートという言葉で普通の魚雷と区別していた。ENIAC が最初砲弾の弾道計算に使われたことを考えると、いずれも砲弾の命中率を上げ、砲弾を節約すること、あるいは攻撃というオペレーションの効率を上げることが目的であったことは言うまでもない。つまり、スマートの意味は、従来の方法に比べて効率が著しく向上させることであり、いまでもスマートの本質は効率であろう？

さて、スマート工場に話を戻すと、工場がスマートであるということは、つまり過去の自分に比べて効率が著しく向上することが必要条件である。また、競合他社に比べても生産効率が著しく向上していることが求められる。さらに、科学技術の発展が無限であるように、生産システムの発展も無限であることを考えると、スマート工場の発展も無限であることは容易に想像できる。つまり、スマート工場がバズワードではないとするのならば、少なくとも時代とともに進化していく工場である必要がある。この進化の条件を満たさなければスマート工場は賞味期限のある食品と同じものになってしまう。

オークマではドリームサイト (DS) というスマート工場を構築し、それを進化させているというところが一番重要なポイントである。DS 1、DS 2、DS 3 という三段階構造のスマート工場を構築しているコンセプトの裏には、オークマの意思決定者たちが進化という新しい競争戦略を意識していると思われる。

1 はじめに

オークマ株式会社は 2023 年現在、125 年の歴史を誇る老舗企業である。1898 年当時の名前は「大隈麵機商会」、製麵機の製造・販売から始まっている（図 1 参照）。その後、1904 年には工作機械の製造を開始、1918 年には株式会社大隈鐵工所を設立して OS 形普通旋盤の製造・販売を始め、1937 年には国内で生産額第 1 位となっている。そして 1963 年には NC 工作機械を開発し、1968 年には MCD 門形マシニングセンタの製造を始めている。その後北米を含めてグローバルビジネスを開始し、様々な新製品を開発しながら、組織変革を経て、2013 年に複合加工機と NC 旋盤の一貫生産工場 DS1（ドリームサイトワン、図 3 参照）を竣工させている。その後、2017 年に DS2、2019 年に DS3 を竣工して現在に至っている。



図 1 製麵機

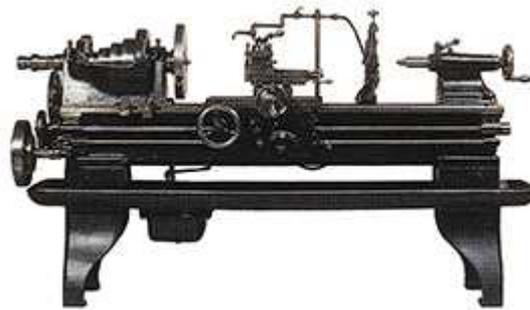


図 2 OS 形普通旋盤



図 3 ドリームサイトワン (DS1)

オークマの商品は大きく 9 つの種類に分類される。超複合加工機、旋盤、研削盤、5 軸制御マシニングセンタ、複合加工機、マシニングセンタ、門型マシニングセンタ、IT/CNC、および自動化設備である。製品種類の名称からわかるように、オークマの製品は工作機械というよりはマシニングセンタであり、中でも素材から部品までの加工プロセスを一気通貫全自動で完成する超複合加工機は、加工精度、効率、環境などあらゆる面で高い性能を実現した世界トップレベルの製品である。



図 4 5 軸制御立形マシニングセンタ

さて、このような高性能のマシニングセンタをオークマはどのように製造しているのか？製品の製造においても高い精度、高い生産性、そして環境配慮がされているのだろうか？

2 オークマのスマート工場

オークマのスマート工場には多くの特徴がある。その一つが 3 階層で構成されていることである。3 階層は物理的に異なる拠点 DS1, DS2, および DS3 で構成されているために、異なるスマート工場であるとも言えるが、コンセプトは同じであり、構築と運営も体系化されているので、1 つのスマート工場システムであるとも言える。さらに、客観的に見て、このような物理的に異なる工場で構成され、技術と管理両方で階層化されている工場は、進化の仕組みを持つと言える。つまり、現在の新しい技術は将来の新しい技術によってとってかわるので、スマート工場の構築を新工場の建設に置き換えるのは間違いであり（新工場の建設を否定するわけではない）、スマート工場について議論するには新しい技術をどのように現在のシステムに組み込むかが問われる。その意味で、階層化されているスマート工場は新しい技術を取り入れる選択肢を増やし、時間短縮の条件を与え、進化の競争に優位である。

2.1 DS1

ドリームサイトワン (DS1) は 2013 年に導入されたスマート工場の取り組みである。ドイツの Industry4.0 の戦略が 2013 年に公表されたことを考えると、オークマは世界の技術進歩に敏感であり、常にポールポジションを維持していると言える。

建物の長さは 350 メートル、工作機械製造、部品加工から製品組み立てまで行っているが、中型金属加工設備の製造がメインである。工場の屋根には太陽光発電パネルを設置して発電し、現在は中部電力に販売している (1 メガワット)。



図5 オークマのスマート工場の構築プロセス

DS1の目的は主に設備の稼働率の向上で、(1) デジタルデータを活用した新製品開発（フロントローディング）、(2) 知能化技術を搭載したスマートマシンの開発、および(3) IoTを活用した全体俯瞰による全体最適を含む3つの取り組みが行われた。

フロントローディングは新製品開発における手戻り作業を減らし、新製品開発のコスト削減と開発期間の短縮が主な目的である。概念的には製品開発の後工程、例えば調達、加工、組み立て、および販売部門の関係者が開発初期から参加するために、多様な観点から問題点を見つけ、建設的なディスカッションによってクリエイティブな発想の誕生を刺激するメリットがある。特に、製造段階における作れない、組み立てられない、不具合が発生する、コストが嵩むと言った問題を発見し、設計段階で解決するので、製品の性能と品質が向上するだけでなく、コスト削減にも貢献できる。実際、製品の製造コストの7割以上は、その製品の設計段階で決められ、製造段階の改善活動に資源を投入してもコスト削減には限界があると言われている。

日本を代表する研究者である野中郁次郎先生が提唱する「BA」の理論も本質的にはフロントローディングをサポートするものである。「BA」に集まる人を一定基準で選び、その活動も組織化することは同じであり、クリエイティブな発想を生み出す「知」の形成への貢献も同じである。

オークマではデジタルデータを活用する点ではフロントローディング活動における先進的な取り組みであり、PLMにおける製造シミュレーションに類似している。コンピュータの中で製造シミュレーションを行わなくても、デジタル技術を用いて新製品のプロトタイプをモニターに示し、各部門の意見に基づいてプロトタイプを修正するなど、設計段階で問題を発見し、それを解決するアイデアを生み出すのであれば、それも本質的には製造シミュレーションであると言える。

稼働率を向上させるプロセスにおいて一番重要なことは、異なる部品の加工における段取り時間の短縮である。全自動の設備を用いるとしても加工対象が変われば、加工プログラムの生成と切り替え、調整などに時間がかかる。ここに無駄が発生する。無駄にはいろんな種類があるが、手待ちや調整が典型的である。このような無駄をなくすためには ECRS の原理原則を用いればよい。つまり、まずはなくす (Eliminate) ことを考え、次に組み合わせ (Combine)、そして順序交換 (Rearrange)、

単純化 (Simplify) を考えればよい。ECSRS は数学モデルから生まれたものではないが、先人達の長年の経験を帰納的にまとめたものであり、実務においては非常に役に立つ管理の原理原則である。スマートマシンとスマート製造プロセスでスマート工場を実現するという概念の中には、このような管理の原理原則や社内で蓄積された知識と知恵が用いられており、無駄をなくす工夫が、加工設備、ロボット、物流、進捗管理など、生産プロセスにおけるすべての要素に対して適用されており、技術と管理の両方における改善であることに特徴がある (図 6)。

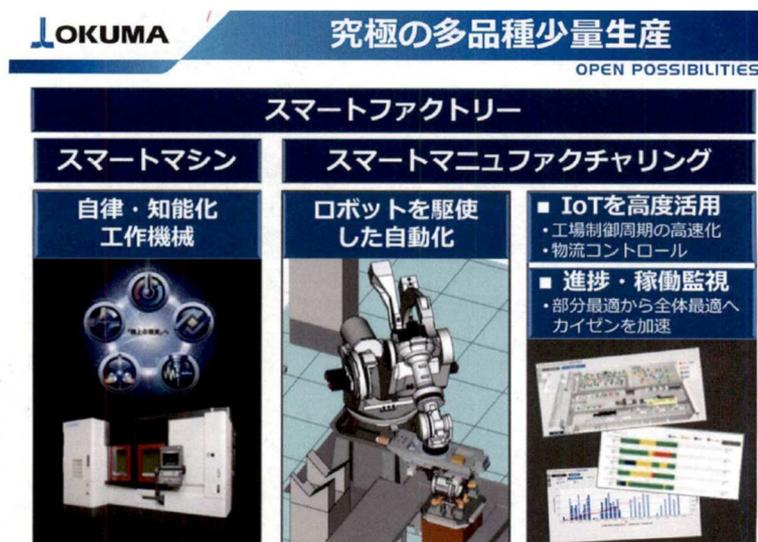


図 6 無駄をなくすためには技術とマネジメントの両方の改善が必要である

全体最適を実現するのが DS 1 の三番目の取り組みである。全体最適とは部分最適に対しての相対的概念であり、絶対的な全体最適は存在しない。そもそも最適化を議論する際には、目的関数を定義し、制約関数を用いて最適性を保証するバウンダリーを決める必要がある。勿論関数を用いなくてもよいが、目的を決め、条件設定を行う必要がある。その意味で、全体最適を議論する際に、部分最適を否定することはできない。全体最適を否定する人は少ないが、どこまでが全体最適化が分からないまま全体最適を目指す人は決して少なくない。

重要なことは、仕事が入ってきたときに、それを分解して各部門に丸投げしないことである。受注したものを高品質、低コスト、短納期で製造するためには、工場全体を一つのシステムとして捉え、自律分散的に動ける部分最適化をモジュールとしながらも、全体が最適になるようにモニターし、制御する必要がある。管理工学という学問の中にはシステムエンジニアリングという分野があるが (例えば慶應大学管理工学科の SHE (System and Human Engineering) 分野)、固有技術における制御工学と同じようにフィードバックを重要視する。生産管理では進捗管理と呼ぶ場合もあるが、いずれにしても各工程などシステムを構成する各部分から実績データを吸い上げ (フィードバック)、当初の目標を達成できるように制御指令を出さなければならない。加工対象が多くなるとこの制御指令を最適化することが至難の業となり、いまだにいいツールがないのが現状である。ただ、多くの場合、フィードバックが正確であり、タイムリーであるのならば、経験豊富な管理者が限られた時間内にいくつかのツールを組み合わせ、素早く最善策 (最適ではないが) を出すことはできる。オークマの「IoT を駆使し PDCA サイクルをサポートする見える化システム」はこのような全体最適化をサポートするために作られた工場管理のツールである。

PDCA サイクルをサポートする見える化システムはすべての工程におけるデータを吸い上げるように設計されており、これが工場全体システムにおけるフィードバック機能を担う。スマート工場の構築が会社経営の議題になる場合、ほとんどの企業では「見える化」が最初に議論される。工場における設備の稼働率のデータを吸い上げて、それを担当の取締役が見えるようにした、という先進事例もあるが、それが単なる取締役に見せるための見える化であったのであれば、それは大きな間違いであると思われる。なぜなら、「見える化」の本質はフィードバックと制御であるからである。フィードバックされたデータを見て、誰がどのような指示を出すかを定める必要があり、その意味で、「PDCA サイクルをサポートする見える化システム」は一步進んだ見える化の取り組みであるとも言える。特に、見える化においては何を見えるようにするかが重要であり、稼働率だけ見るのではなく、付加価値を生まない稼働までも「見える化」している点では、オークマの「見える化システム」が高く評価できる。付加価値を生む時間のデータを正確にとれば、そのデータを分析して、設備の制御方式を変えたり、工場全体のオペレーションの仕組みを変えたりして、設備の運用の最適化、工場全体の運営の最適化を実現することができよう。筆者はここに技術を生かす技術としての管理技術の役割を強く感じた。

2.2 DS2

DS2 は 2017 に導入したスマート工場である。当初の目的は、工場全体の最適化を中心とした、自動化と物流改革であった。工場コントローラと連携した IoT の高度な活用、そしてロボットを活用した 3 日間（金曜日一日曜日）の無人操業が具体的施策となった。

DS2 の建屋の大きさは長さ 125 メートル、奥行 88 メートルである。製造する製品は、2 軸旋盤の構成部品であり大中小の 3 種類に区分されるが、大物部品の重量は 1 トンを超える。図 7 にオークマ DS2 の加工対象部品例を示す。

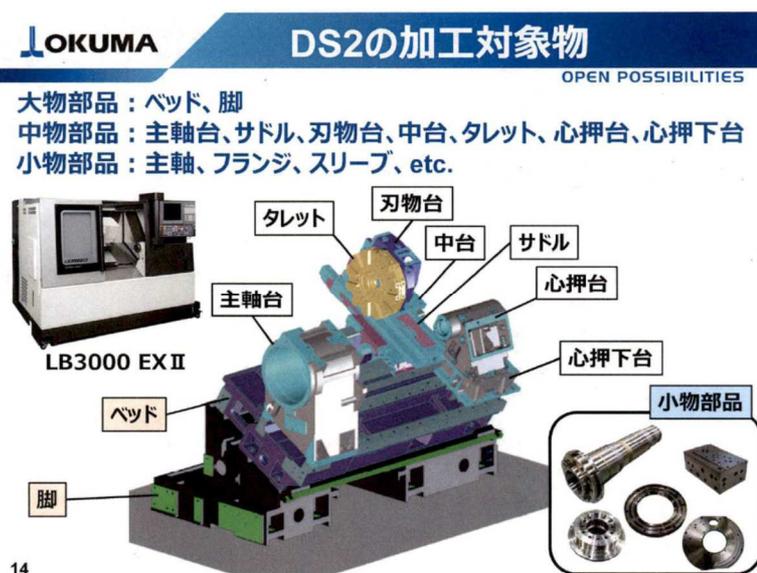


図 7 オークマ DS2 の加工対象部品例

工場内の温度は自動調整し、夏場は 26 度、冬場は 18 度、誤差はプラスマイナス 2 度になっている。冷たい空気は下に溜まるので冷風を上から下に向けて噴射させ、働く空間の温度を一定に保ってい

る。工場の設計では、匂わないこと、きれいであること、整理整頓されていることをコンセプトとしており、働く人たちの健康や快適さを重要視している。そのために、すべての加工設備の切削空間をカバーで覆うなど、働く人のためにコストをかけていることは特に印象的であった。これは、筆者が主査を務めている「次世代スマート工場研究会」の主張と一致しており、働く人にやさしくない工場をスマート工場と呼ぶべきではないことを改めて確認できた。

見える化モニターが設置されていたが、工場制御システムの一つの機能である。フィードバックデータを分類・加工してモニターに表示している。モニターには工場のレイアウトが表示され、その上に設備のアイコンが配置されているが、稼働時は緑色、停止時には黄色、稼働しているが工具の交換やトラブル発生を示すときはオレンジ色、アラーム停止時は赤色になる。設備の詳細を確認したい場合にはアイコンをクリックすればよい。例えば、設備が稼働しており、緑である場合でも、アイコンをクリックして詳細を調べると、切削時間とアイドリング時間が表示され、付加価値時間を集計分析できる。稼働していても付加価値を生まないアイドリング時間が長ければ設備の使用方法に問題があることを意味する。この問題を解決する方法の一つに管理技術がある。この見える化システムはコネクトプランとして設備と一緒に販売しているが、データ取得のインターフェースを工夫すれば汎用システムとしても販売できると思った。

生産システムに使われる設備のほとんどはMC（Machining Center）であり、ロボットがツールマガジンから工具を選択してMC内の加工設備にセットする。工具の摩耗は加工数量、難易度、時間などのパラメータで計算され、残り寿命もこれらのデータを用いて設備管理のモデルを用いて科学的に計算される。残り寿命は工具寿命管理システム上に色で表示される。例えば残り寿命が31%以上は緑、30%までは黄色、20%まではオレンジ、そして0%以下は赤で表示する（データは線形変換したもの）。このように色で見合分けるようにすることで、余裕をもって工具のメンテナンスができるので、加工品質を保証するだけでなく、設備の稼働時間を確保することができる。図8に工具寿命管理システム画面の一例を示す。



図8 工具寿命管理システム画面の一例

工具はホルダーとの相性関係があるので、紐づけを行っておく。どのホルダーにどの工具が使えるかをコンピュータが区別できるようにすれば、ロボットが最適な工具を選ぶことができるので、これはスマートであると言える。

オークマの加工設備の多くは自作であることも特徴的である。これは先進的な取り組みを行っている日本のメーカーにみられる特徴であるかも知れない。オークマでは 8 割の設備を社内で作っている。工作機械メーカーであるから当たり前であると言う人がいるかも知れないが、工作機械を作る設備の中には大型設備を必要とするなど、一般部品加工用の工作機械とは異なる。実際、35 年前のドイツ製大型設備がいまも活躍しているが、当然ながらプロトコルもコマンドも異なる。故障した場合には部品を自作しなければならないので、多大な努力が必要になる。電気系統も複雑であり、ベテランが技能伝承をする仕組みを作り、効率的にメンテナンスを行いながら大型部品を製造している。

工作機械のベッドや主軸は非常に重い。これらの大物部品の加工には大きいホルダーなどジグが必要になるが、段取りに時間かかる。手動ジグを使う場合 20 分以上かかるが、それを油圧ジグに変えて 5 分で段取りを完成できるように業務改善を行い、さらに金曜日午前に 3 日分の段取りをやり終えることにし、土日は無人加工を行っている。当然ながらトラブルが起きた場合には関係者に連絡がいくような管理体制を構築しているので、無人加工であるからすべてを機械に任せるという丸投げではない。夜間の無人加工の仕組みも同じである。図 9 に夜間と休日の無人運転を実現する仕組みの例を示す。加工対象部品の脱着とチャック爪交換などはロボットによって自動的に行われている。



図 9 夜間と休日の無人運転を実現する仕組みの例

自動段取りは大物部品加工だけでなく、ほかの加工工程でも行われており、工場全体が無人で操業できるようになっている。図 10 に自動段取りの仕組みのイメージを示す。

自動段取ステーション

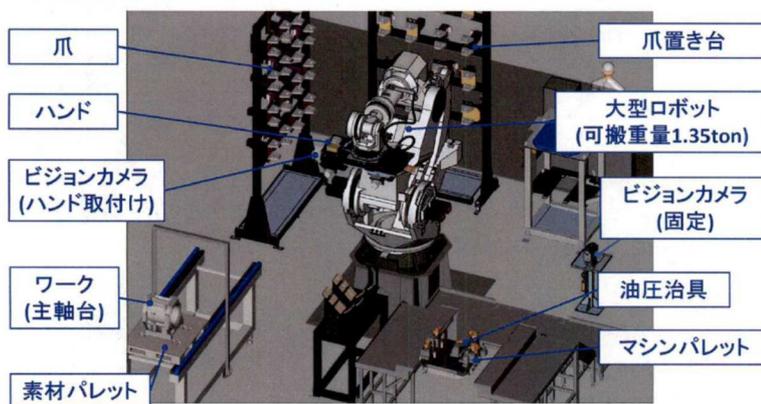


図 10 自動段取りの仕組みのイメージ

切削加工においてはスピードと刃物の送りが重要なパラメータになっており、この送りの力が粗加工と仕上加工では異なる。粗加工と仕上加工では工具を変える必要があり、加工するときの工具に伝達する力や部品の回転速度とトルクなども変える必要がある。この部分を自動化することは加工効率や稼働率に大きく影響する。筆者が務めた経験のある工場では、射出成型機のパラメータ設定を行う段取り時間に数日かかるときもあった。経験があるベテランでも部品が変わると最適条件が変わるために、一発でパラメータ最適組み合わせを選択することができない。パラメータ設定の組み合わせによって品質が決まるので、カケ、ヒケ、ヤケなどの典型的な不良をなくすだけでも1日はかかっていた。金属加工においても同じように部品の品質は加工プログラムに食わせるパラメータに依存するので、最適なパラメータの組み合わせを選ぶことは簡単ではない。

切削加工においてはもう一つ大きな問題がある。つまり切削によって多くの切粉が出る問題である。加工時には切削面に冷却用油を流すが、この油は切り子を流してくれる役割もある。切粉は油と一緒に切粉箱に流れ、油は回収されてフィルタリングなどの処理を経て再度切削用油として利用される。一方、切粉も資源として再利用したいが、粗加工と仕上加工で出てくる切粉の大きさが異なる。この大きさを揃えて回収再利用するのがリバースロジスティクスの効率に影響を与えるので、オークマでは大きい切粉を砕いて小さくし、小さい切粉と一緒に風力で吸い取って外部に運ぶ。

工作機械の部品製造には多くの工具が使われる。例えばある部品を加工するときには7工程で70種類の工具（刃物など）を使用して加工が行われるが、工具を取り替える度に機械をとめなければならなかった。機械を止めるということはつまり稼働率が落ちることを意味する。そこでオークマでは、工具を取りづけるヘッドの形状を力学的分析して改良し、7工程を4工程に減らすと同時に、MCの中に5軸マシンを取り入れることでMCの稼働率を上げている。5軸マシンと多品種対応ヘッドはそう簡単に組み合わせることができるものではないが、改良を重ねて工具の取り換え回数を減らし、効率よく加工できるようにしている。特筆すべき点は、加工精度も100分の1ミリにアップし、品質が向上したことである。

複合旋盤において、丸物素材を把握するために油圧チャックが使用されるが、素材径に応じてチャックのツメを交換する必要があり、このツメの交換は力覚センサを備えたロボットで自動化されている。大きいロボットと小さいロボットが協同して段取りを行うことで、多品種の部品を加工できる

ようになる。

MC用の治具に加工物をボルトで固定する場合においても、ボルトの締め・緩め作業をロボットで自動化されている。

旋盤用スピンドルを加工する複合加工機のロボットセルにおいてもロボットによるチャックツメ交換が活用されており、多種類のスピンドルの連続加工を実現している。つまり、大きい部品も小さい部品も加工できるようにし、加工工程順番通りにスピンドルを並べ、加工設備の横まで運んでくる。スピンドルの運搬には無人フォークリフトが活用されている。複合加工機・MCを用いた4つの加工セルで無人フォークリフトが活躍しており、運搬すべき部品の選択から段取り替えの順番、加工物の投入順番と無人搬送まで含めてすべてを「工場コントローラ」で管理している。

オークマのスマート工場は決して自動化のための自動化ではない。特に精密加工では1ミクロンの精度が求められているので、そこには10年以上のベテランが力を発揮している。研究レベルではポテトチップを持ち上げるようなアームが開発されている（例えば慶応義塾大学理工学部SD工学科）が、実務ではまだミクロン単位の精度で工具を取り付けることができない。部品の取り換えも同じである。現在精密加工では数十人（コンフィデンシャルのため人数は公表しない）働いているが、そのうち約半数はベテランであり、全員国家検定資格を持っている。

生産リードタイムは2, 3か月であるが、これを短縮するためにはどうしても部品を見込み生産しなければならない。管理工学では、このような部品の見込み生産と製品の受注生産を製造延期（Production Postponement）と呼ぶ。つまり、最終製品の仕様は異なるが、製品の中に使われる部品が同じである場合、数種類の製品の売れ行きを予測して共通部品をあらかじめ製造しておくことがリードタイムを削減に大きく貢献するという原理原則である。製造リードタイムなど生産プロセスにおける必要なデータを蓄積できれば、最適化モデルを用いて見込み生産と受注生産の境目（デカップリングポイント）、および見込み生産量を最適に決めることができる。

工作機械のベッドや脚などの大物部品加工には大物ジグが必要になる。オークマではこのジグの交換に台車型自動設備が使用されていたが、故障やメンテナンスも考慮して設備を2台設置されていた。コストだけ考えると一台で十分であるという見方になるが、リスクマネジメントではシステムに冗長性を持たせることを推奨している。リスクの発生確率が低くてもそのインパクトが大きい場合に取りられる方法で、これについてもどのような冗長性を選択し、設備の数量が対象になる場合には最適な数量を計算することもできる。

加工時の工具やジグの取り付けにはビジョンカメラが活躍している。例えば、鋳物を加工するとき、ビジョンカメラを利用して3次元の位置決めを行い、それに基づいて鋳物を取り付ける。加工対象部品、工具やジグなどの重量を知ることが工具やジグの取り換えに必要なになっているので、荷重センサも活用されている。図11にビジョンカメラによる位置検出、爪交換とワーク取付けの例を示す。

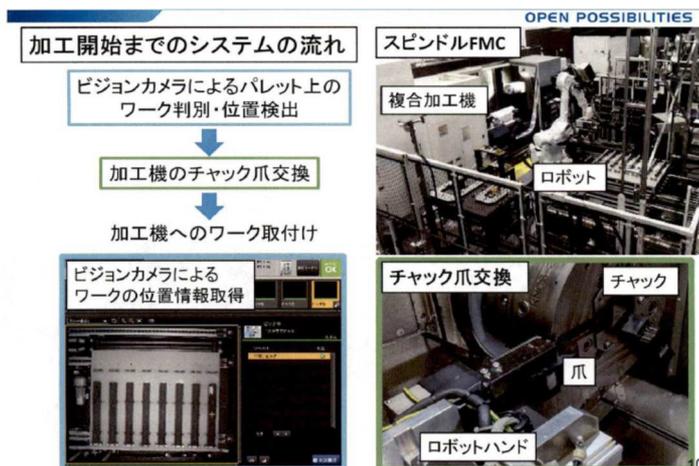


図 11 ビジョンカメラによる位置検出、爪交換とワーク取付けの例

また、生産計画に合わせて部品を各ステーションまたは MC に投入する必要があるが、常に加工設備の隣に WIP (work in process) 部品を置くと、生産ラインにおける物流効率や在庫管理の精度に悪影響を与える。この問題を解決するためには在庫をどのように管理し、生産ラインの物流をどう設計するかが重要になる。オークマでは長い立体自動倉庫を生産ラインの横に設置し、加工が終わった WIP は一旦自動倉庫に入庫して管理する。図 12 に立体自動倉庫とインサイド物流の例を示す。

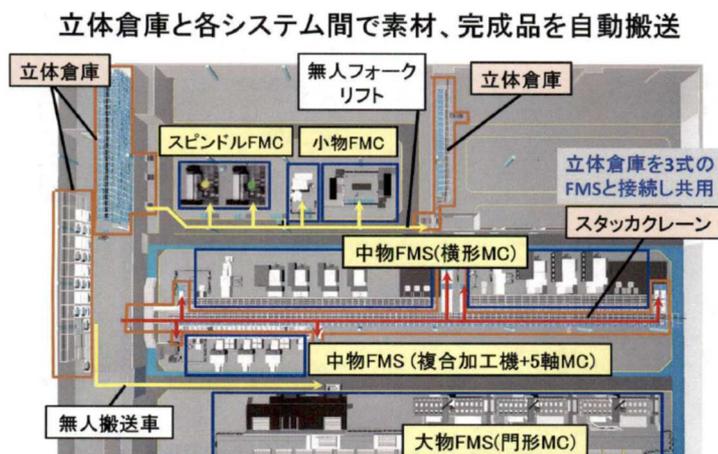


図 12 立体自動倉庫とインサイド物流の例

物流には包装、荷役、保管、輸送、配送の 5 つの基本機能があるが、これは調達におけるインバウンド物流や製品販売におけるアウトバウンド物流に限ったことではない。スマート工場において重要なのはインサイド (社内) 物流も含めて工場を設計し、運営する必要がある。筆者は経済産業省の調査事業でドイツのミュンヘン工科大学のロジスティクス工学研究室を見学し、主任と意見交換したことがあるが、その研究室では専らインサイド物流効率に関する研究を行っていた。IT を組み込んだ新しいマテハン設備の研究開発がメインだったが、やはり運営最適化に関する問題についても研究すべきであるとのことで意気投合した思い出がある。オークマの DS2 は、インサイド物流、つ

まり生産ラインにおける在庫管理とマテリアルハンドリングを含めてスマート化を目指しており、インサイド物流の重要性について改めて認識し、大変勉強になった。当然ながら自動倉庫だけがオークマのインサイド物流であるわけではない。オークマのインサイド物流には、AGF や AGV を含まれており、生産工程と同期化するようにコントロールされ、工場全体としての生産効率を上げることを目標に工場を設計し、運営し、改善しているところが面白い。

DS2 の運営における先進的な取り組みは多くあり、ツールプリセッター、工具の一元管理もその一つである。昼間は作業員が設備を見ているので、必要な段取りなどを作業員が行う。作業員は就業時間内に、夜の作業量の段取りもするので、夜は加工設備とロボットが昼間用意したツールと加工スケジュールに基づいて加工する。このような仕組みの下で、DS2 は 24 時間操業可能な工場になっている。勿論 24 時間操業するかを決めるのは工場マネージャである。

どの加工にどのツールを使うかについては様々な選択肢があり、選択肢を間違えるとツールの損傷や製品不良が発生する。複数の工程で複数のツールを選択するときの組み合わせを正しく選択すること、ツールのメンテナンスをしっかりと行うことなどの取り組みを行うことで、オークマはツールの寿命を延ばすことに成功している。

2.3 DS3

DS3 は本社工場から 20 キロ離れた場所（岐阜県）にある最新工場である。ここではスマートマシンによる高精度の部品生産が行われているが、ツールの交換だけでなく、ワーク脱着もロボットによって自動的に行われている。見える化においては加工設備だけでなく、搬送設備や自動倉庫の状態も見える化されている。図 13 に工場のすべての設備の状態を表示する例を示す。

加工機だけでなく、ロボット・搬送機器の稼働状況を表示

ロボットの停止を的確なタイミングで認識することでシステム全体の停止を防ぐ



図 13 工場のすべての設備の状態を表示する例

工具についてもデータベースを構築し、ツールの寿命を 1 個単位で管理するようにしている。ツールの寿命は使用時間、特に切削時間（付加価値を生む時間）と関係があるので、見える化で必要とするデータのニーズが一致する。このデータを用いると、工具の寿命を予測することもできる。管理工学では設備管理の研究を行っており、平均故障間隔などのデータを採集して設備や工具のメンテナンス時期を最適に計算方法が知られている。オークマではこのような科学的な管理手法に基づいて工

具管理システムを構築し、工具を設備と同じようにPM（予防保全）管理を行っている。図 14 に工具管理システムのイメージを示す。

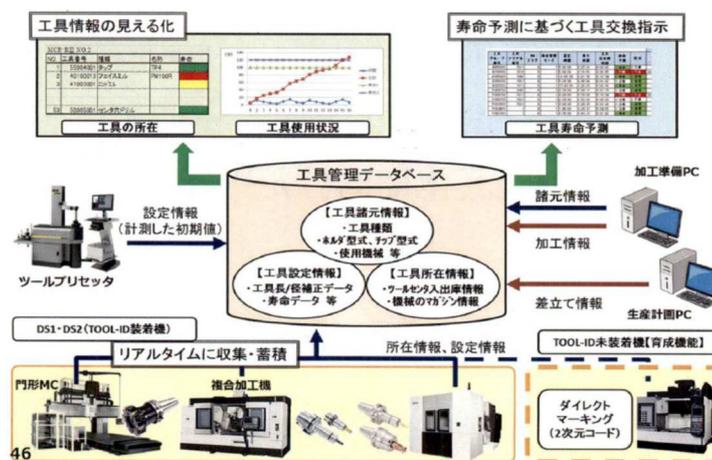


図 14 工具管理システムのイメージ

工具のメンテナンスや廃棄の時期についてもさらなる研究を行い、摩耗の度合いが切削の時間だけではなく、対象物の硬度や使用環境（温度など）に影響されることから、工具ごと寿命管理を行うことにしている。つまり、同時に使用を始めた工具でも、切削時間と対象物の高度などによって寿命が異なる。何時寿命が終わるのかを判断することが重要である。

また、工具は突然故障する場合があるので、故障の予兆をとらえることが重要である。オークマでは加工物の品質データを AI モデルで学習させることによって故障予兆のパターンを見つけ、そのパターンが現れたら設備を止めて工具を取り替えるようにしている。図 15 に AI によるドリル故障予兆発見のイメージを示す。

ドリル加工時の状態を監視し、異常発生時に機械を退避

【目的】

ワーク・機械の保護と、寿命使い切りによる工具費削減

【機能概要】

- ・加工の異常度合いをAIで数値化し、しきい値超過で自動退避
- ・工具摩耗の進行をグラフで可視化し、設定寿命最適化を支援

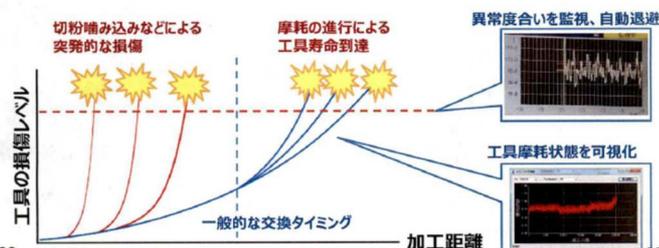


図 15 AI によるドリル故障予兆発見のイメージ

DS3 では世界最先端の MC を製造している。生産プロセスにおける高性能の NC 旋盤の加工室内にビルドインした多関節ロボットシステム ARMROID は世界最先端の技術の 1 つであり（図 16 参照）、横形 MC 用パレットコーンの ARMROID は連続稼働できるように設計され、多品種少量生産に大きく貢献している（図 17 参照）。

次世代ロボットシステム **ARMROID**

高性能NC旋盤の加工室内に多関節ロボットをビルトイン

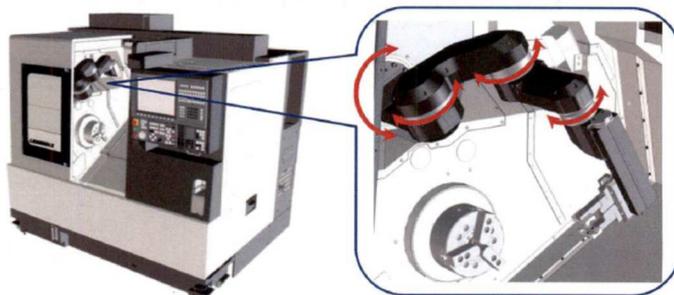


図 16 ARMROID のイメージ

横形MC用パレットコーンのARMROIDによる連続稼働
オペレータによる昼間の多品種少ロット生産にも活用



図 17 横形 MC 用パレットコーンの ARMROID

DS3 では MC ユニバーサルインデックスヘッドの生産において、B 軸カップリング、C 軸カップリングなどの生産技術を開発し、レーザー焼き入れを含む工程集約を行っている。図 18 にカップリング技術による工程集約の例を示す。



図 18 カップリング技術による工程集約の例

また、熱処理では従来浸炭焼き入れ方式を用いていたが、部品 1 個当たり 72 キロワットの電力を消費していた。しかし、新しいレーザー焼き入れ技術を導入したことで、電力消費が 1.1 キロワットまで節約でき、省エネに大きく貢献している。また、補助機械では 17.3 キロワット/h を 10.2 キロワット/h まで削減し、全体の割合を 81.2% から 78.1% まで削減、補助機器だけで電力消費を 41% 以上削減している。

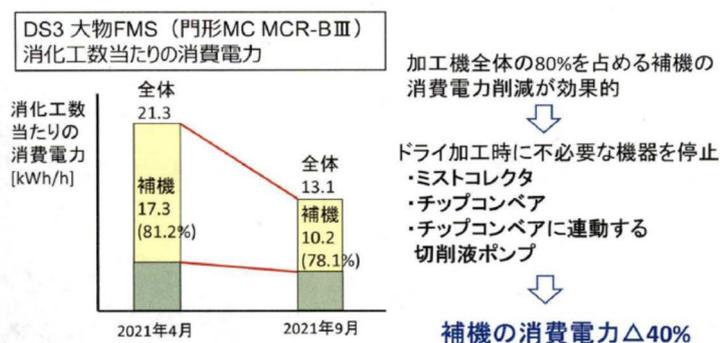


図 19 環境にやさしい生産技術の開発例

鋳物加工では切削液ポンプの故障が多かった。原因はいろいろあるが、問題解決ではタンクを工夫することにし、スラッジレスタンクを開発している。切削液タンク内のスラッジ堆積を解消することによって、切削液ポンプの故障はほとんどなくなり、スラッジの堆積に起因する切削液の腐敗を防止でき、従来は半年に一度の交換が必要であった切削液の寿命を 3 年まで延長することができている。

スラッジレスタンクの採用により、切削液交換周期を延長 (0.5年→1.5-2年)

環境負荷の低減だけでなく、切削液ポンプの故障回数も削減

■スラッジレスタンク



図 20 スラッジレスタンクの効用

3 スマート工場からものづくり DX へ

冒頭スマート工場を定義することは難しいと述べたが、主な理由はスマートという言葉が相対的

な概念であるためである。スマートという言葉は本来人間の賢さを著す言葉であったが、製品や設備に使われるようになったのは、第1次世界大戦の終わりごろであると言われている。海上の目標に対してはほぼ百発百中する無駄のない魚雷をスマート魚雷と呼んだと言われている。その後爆撃機から落とす爆弾の命中率を高めるスマート爆弾も開発された。

近年、スマートが付く大衆製品や設備が多く開発されているが、共通するキーワードは効率である。従って、スマート工場の本質の1つに「効率」があることは間違いなさそうである。しかし、効率は技術の発展とともに向上し続けているので、今現在効率が高いと認められても来年になれば認められない可能性がある。その意味で、スマート工場を議論するときのもう一つのキーワードに「進化」が出てくる。つまり、新しい技術をタイムリーに生産システムに取り入れることがスマート工場の必要条件であると言ってもよい。

オークマのドリームサイトはDS1からDS3まで3階層になっていることが面白い。今現在DS3の生産効率が一番高いのは間違いがないが、次の投資を行うときの判断においては新しい技術と工場の相性を考える必要があり、設備更新も考えなければならない。オークマのスマート工場の構築において、経営者が意図的に3段階にしているかは別に、客観的に見てオークマのスマート工場には進化の機能が組み込まれている。設備の寿命を考え、設備投資の意思決定に経済性工学の理論を用いる場合でも、3段階の工場における意思決定の選択肢が増えることは間違いがない。

3.1 オークマにおけるスマート工場のビジョン

オークマではスマート工場の構築と運営を目的ではなく手段であると位置づけている。目的は経営改革による稼ぐ力の向上である。学術的に言えばグローバル競争力の向上になる。長期ビジョンの構成には、最上位に経営改革を据え置き、それを実現する方法として「グローバル・リアルタイム管理会計」を置いている。そして具体的な施策として現状のルーチンワークをしっかりと守るという「守りのDX」、および創造的な発想で新しい製品技術や製造技術を生み出す「攻めのDX」を取り入れている。

稼ぐ力を国内市場に限定せず、グローバル市場にしていることも重要である。スマートマシンの製造からスマート工場の構築をサポートするソリューションをベースにおき、ターゲットを成長産業と強みのある産業に絞り、グローバル市場における稼ぐ力を向上させることが中長期ビジョンである。つまり、自社の生産プロセスの効率を上げるだけでなく、お客様の工場における生産プロセスの効率を向上させるための製品を製造販売することで、社会に貢献しながら自社の稼ぐ力を強化し、グローバル市場で成長していく。

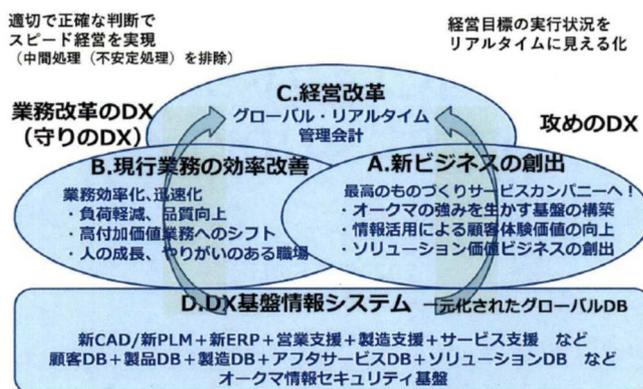


図 21 オクマの長期ビジョンの一部

3.2 総合ものづくりサービス

オクマは総合ものづくりサービスを提供することを今後の目的としており、生産計画、エンジニアリング、生産立ち上げ、および生産最適化の4つで総合ものづくりサービスを構成し、お客様の価値創造に貢献しようとしている。ここで重要なことは、調達、製造、販売を含むサプライチェーンにおけるモノの流れ(マテリアルフロー)の最適化と、製品設計から加工プログラムの生成と設備への作業命令を含めたエンジニアリングチェーンにおける制御の最適化であり、特にサプライチェーンとエンジニアリングチェーンが独立したものではないことを意識していることである。製品設計をするエンジニアが設計した通りに製品を製造しろというような一方通行的なやり方はもはや失敗の代名詞である。サプライチェーン(インバウンド、インサイド、アウトバウンドのマテリアルフロー)の最適化抜きのものづくりDXは成立しない。その意味で、オクマの総合ものづくりサービスの4つの構成要素は時代の流れに乗ったものであり、筆者が取り組んでいる「次世代スマート工場」の概念にマッチしている。



図 22 総合ものづくりサービスの概念図

3.3 スマート工場のレベルとオクマの製品

スマート工場のレベルを6段階に分けたことも面白い。筆者はIoT、自動化、管理の3つの要素を具体的な技術で幾つかのレベルに分けることを考えていた。各要素で3段階を設定した場合、その組

み合わせは 27 通りになるので、点数をつけて 1 次元にまとめるというアプローチが考えられる。

オークマでは実務の立場で、技術をキーワードに各工程のスマートマシンから工場全体の稼ぐ力までを 6 階層に分けているので、現場に受け入れやすいと感じる。各階層に対し自社が貢献できることも考えて自社商品をマッピングしているので、MC マシンを買いやすいユーザーに分かりやすい。ユーザーがスマート工場の構築のためにロードマップを作ったとすれば、自分の現状に合わせてどのような設備を購入するかが一目瞭然であるからである。

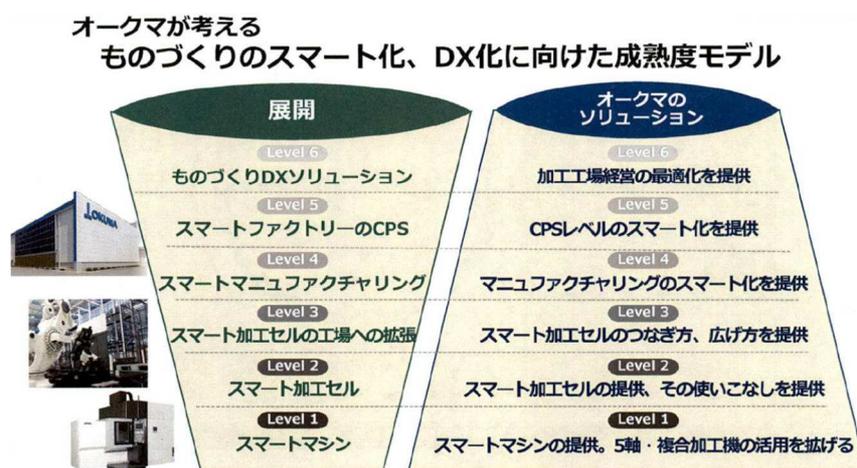


図 23 スマート化のレベルとオークマ製品のマッピング

3.4 環境配慮型製品

環境配慮の製品製造を行っていることも面白い。これはかなり先進的な取り組みである。例えば、金属は熱膨張の性質を持っている。金属の種類にもよるが、1度変化した時に 10 ミクロンの誤差が生じる場合がある。この問題の解決には 2 種類の対策が考えられる。一つはエアコンを使って加工室内の温度を恒温にすること、もう一つは熱膨張に合わせて加工プログラムのパラメータを変えることである。前者はエアコンを入れることで簡単に問題解決できるが、温室ガスを排出する。後者は加工プログラムの仕組みを変えるなど技術的に難しいが、温室ガスを排出しない。オークマでは技術的に難しい後者を選んだ。暑い夏や、加工プロセスにおける温度上昇に対応できる高度な加工プログラムを開発し、温室ガスを減らす道を選んだのである。この製品はすでに 5 万台出荷されており、従来の恒温の設備に比べて年間 28 万トンの温室ガス排出を削減している。設備の使用環境によって作業者が精度維持の努力をしなければならなかったが、新しい設備では加工室内の温度が変化しても加工精度が維持できるので、作業員の負担も減るユーザーフレンドリ製品でもある。

3.5 ものづくり DX

スマート工場の構築と運営は手段であり目的ではないと主張したが、それではスマート工場の目的は一体何であろうか？人によってその解釈が違うかも知れないが、少なくとも企業経営の究極の目的は存続であることを考えると、厳しい競争を勝ち抜くのがスマート工場の目的であるかも知れない。そのためには、従来の評価基準、すなわち鉄の三角形といわれている QCD 抜きにスマート工場の目的を論じることはできない。

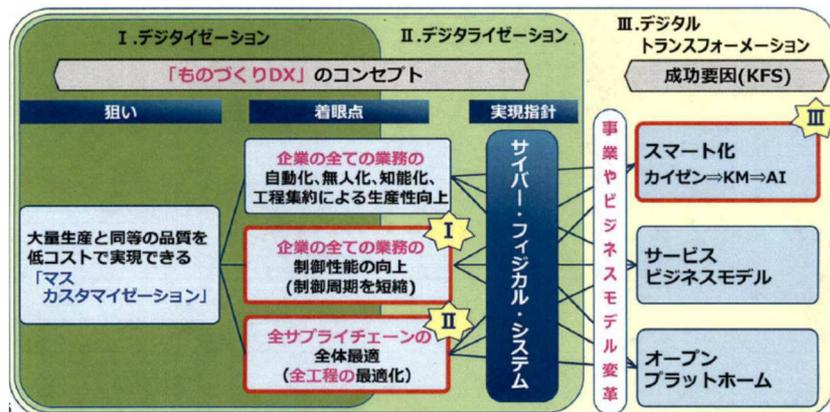


図 24 スマート工場とものづくり DX

それでは QCD の競争力向上になにが必要であるのか？なぜ自動化や情報化は QCD に貢献できるのか？なぜ我々はお金をかけて見える化をしなければならないのか？多くの人はすべて大事であることは知っているが、その本質を知らず、お互いの関係についても知らないのが現状ではなかろうか？

例えば、ものづくりにおいてはランダムエラーとシステムエラーがあり、手作業にはランダムエラーが大きい問題がある。このランダムエラーを減らす方法の 1 つに自動化がある。つまり、機械のオペレーションをプログラムできるのならば、機械は高い精度でそのオペレーションを繰り返してくれるので、ランダムエラーによる不良品をゼロに近づけることができるわけである。一方、機械にはシステムエラーが発生するという問題がある。例えば、刃物の摩耗によって加工対象部品の品質（例えば長さ）が徐々に落ちていき、最後に許容限界を超えてしまう。このようなシステムエラーを防ぐためには時々品質をチェックし、システムエラーが発生しているのかを判断し対処しなければならない。判断基準をどのように設定するかを長年研究し、原理原則としてまとめたのが工程管理図である。

センサで部品の品質データを収集し、そのデータを管理図の分析モデルにインプットすれば、機械をどのように制御するかを教えてくれる。このような原理原則は刃物の摩耗が原因である場合も、温度の変化が原因である場合も同じように活用できる。なぜなら、原因は異なっても結果は同じであるからである。

情報化投資にはその効果は目に見えない問題がある。それが見えるようにするためには様々な工夫が必要になる。少なくとも情報化のための情報化では効果を目に見えるようにできない。目に見える効果を先に考えないからである。その一例に、新しい情報技術を古い業務フローに活用するケースがある。業務の内容にもよるが、投資対効果を目に見えるように示すことが難しい場合が多い。

オークマではスマート工場の構築と運営を一つのツールと位置付けており、「事業やビジネスモデルの変革」を通じて、QCD を改善する「知の創出と活用」を目指している。これがスマート工場とものづくり DX の関係であり、進化するスマート工場を支える思想である。特に、設備を使う人のためのものづくり、システムづくりをすることをものづくり DX の本質としていることは、単にお客様至上主義ではなく、オークマの製品でユーザー企業の QCD を向上させ、ともに進化していく好循環構造であり、社会エコシステムであると言えよう。

DX では知の創出と活用を行うことを目指しており、筆者が専門とする管理工学の理論も使われていた。管理技術は物理学と同じように、多くの研究者や実務家が経験と実験結果を帰納的にまとめた技術、および既存の原理原則から新しい仮説を立ててさらに実験を行うことで演繹的にまとめた技術により構成されており、先人たちが 1 世紀に渡る研究と実践で積み上げた知恵の塊である。それを無視して自分の経験だけを主張するのは効率悪いと言わざるを得ない。筆者は野中郁次郎先生の「BA」の理論や SECI (Socialization Externalization Combination Internalization) モデルなどを紙面上で学んだことがあるが、それが現場で生きていることを見たことは今回が初めてである。詳しい説明は省略するが、オークマの製造システムには至る所に管理技術が応用されており、それを体系化してさらなる躍進を成し遂げることを確信したのが今回訪問の一番大きな成果であるかもしれない。

以 上

この記事は、松川弘明と（一財）エンジニアリング協会事務局員（川村武也）とが 2023 年 7 月に行ったオークマ(株)本社工場見学をもとに、同社の了解を頂いて 2023 年 11 月にまとめたものである。見学を許可して頂いた同社にこの場を借りて厚く御礼を申し上げます。