

生産システムの変遷、現状そして将来展望

Past Progress, Present State and Future Prospects of Production System

清水 良明

Yoshiaki SHIMIZU

Optimization Engineering Laboratory, y, Emeritus Professor of Toyohashi University of Technology
4-10-90, Fuseya-cho, Izumi-city, Osaka, JAPAN

Abstract

This report overviews the past progress, present state and future prospects of production systems.

Key words : history of production systems, future prospects of production systems.

1. はじめに

21世紀をまたいで我が国の産業は、電子情報技術の発展による生産の自動化や情報通信技術の高度化などの技術革新に加え、生産工場の国内外への展開やネットワークを介した素材や製造部品の調達が増加するなどの生産環境の国際化・電子化への対応に腐心してきた。またエネルギー消費の拡大による地球温暖化や廃棄物に伴う環境問題などへの配慮から、資源のリサイクルや再利用、エネルギー利用の合理化などを通じて、環境の保全と人の健康的な生活を確保し地球や人間との共生を図る持続可能な生産技術やシステムへの転換についても同様であった。しかし最近、こうした非常に困難な問題を解決する前に、一段と進化した情報・通信技術やSDGs (Sustainable Development Goals) さらに不安定な政治情勢を展開軸とする革新によって、生産環境は近未来に向かってこれまでとは比べ物にならないほどボーダレスに多様化した状況に見舞われているように見える。

また同様に生産方式の質の変化も顕著になったといえる。過去の重厚長大な技術やシステムの移転・波及には制約が多く時間もかかったが、主流となる技術が軽薄短小化してきた時にはそうした制約は緩和されていった。さらに今後、情報・データとインターネットが席卷する CALS (Commerce At Light Speed) 時代になると驚くべき容易さと早さで拡散していくことを覚悟しておかなければならない。先進国の Industry 4.0 に対して現状では Industry 3.5 [1] の方が妥当で現実的であるとしているような諸国での状況も一変する可能性があり、競争は一段と激化すると予想される。

そのようなとき、天然資源の乏しい我が国にあって、知的資源が将来に向かって引き続き育っていくことが、ものづくりや技術を基盤としてきた国の将来に関わる主要因になっていく。高度な知的機能の実現を目指すための実務遂行能力とそこで用いられる基礎理論の習熟が不可欠である。情報量に支えられた知識だけを詰め込むのではなく、情報の質を大切にした知恵をはぐくみ、コミュニケーション力とイノベーション力を鍛えることが世界での競争に打ち勝つ秘訣だと確信している。

そして上述のような認識の下で、本小論が、生産システムの今後を語る上での一助となることを願いながら、まず、生産システムの変遷と現状について概観したのち、課題と方向性を描き、最後におわりに代えて将来展望に言及してみたい。

2. 生産システムの変遷と現状

生産システムの変遷と現状について触れる前にまず、生産やシステムとは何かについて簡単に言及しておく。生産とは簡単には、「新しくものを作り出すこと」といえるが、もう少し体系的にいえば、「生産要素を変換過程に投入して生産財として産出すること」と表現される。生産財には有形と無形のものがあり、前者はいわゆる製品と呼ばれるもので生産によって、物理的・化学的性質が変えられる。一方、

後者はサービスが該当し、情報を機能的に変えることで価値の増殖が図られる。英語では、製品の設計、素材の選択、計画、加工、品質保証、管理、および販売を含む一連の関連ある活動を意味する広義の Manufacturing と例えればものの流れ、工程、有効性の評価などといった技術的加工に関わる要素を意味する狭義の Production が充てられる。一方、システムとは、互いに関連をもつ識別可能な複数の要素の集まりで、これらが互いに関係し合って全体としての目的の達成を目指す集合体といえる。これらより、生産システムとは図 1 に示すように、生産の三要素である、対象（材料、製品）、手段（設備、要員）及び条件（生産計画、生産要求）に関わって社会の発展のための問題解決に総合的に取り組むしくみといえる。

そして太古のホモファーベル（工人）時代での、自然を対象として、変換過程を持たない採取や狩猟から農耕・牧畜・漁といった再生産を伴う活動を経て現在では第 1 次産業と呼ばれる生産形態が生まれた。それはやがて市場生産

（Production of the market）の概念のもとで、有形の実体物の製造を目的とする製造業、建設業などの第 2 次産業での活動へと移っていった。そして、効用の概念と結びついて、その生成または増大をもって生産が理解されるようになって、場所や時間に関わる無形財の生成を目的とする輸送、販売、通商などの第 3 三次産業が生まれてきた。また近年では、この概念の下で包括されてきたものの、情報産業、医療産業、教育サービス産業などそれぞれ性格の異なる知識集約産業を概括することは無理であるとの認識から第 4 次産業に分類されるようになってきている。さらに、第 1 次から第 4 次までの産業形態を自由に融合・分化させ、形態を超越した不定形な生産へのパラダイムシフトといえる第 5 次産業への取り組みも始まっている。

こうした歴史の中で、生産システム分野での発展は、フォードシステムに代表される大量生産ラインの構築から始まり、自動化、数値制御といった高能率化・無人化に向けた開発に進み、重化学工業による第二次産業革命を経て、70 年代からは、FMS (Flexible Manufacturing System)、コンピュータ制御、JIT (Just In Time) などのフレキシブル化や平準化を取り込んだシステム化技術が実用化された。また、80 年代の後半には、メカトロニクス、コンピュータ、ネットワークといったコンピュータ・情報技術を統合して工場の自動化をさらに進める FA (Factory Automation)、製造企業の活動全体を情報技術による統合化を目指した CIM (Computer Integrated Manufacturing) といった概念が生れ、先進工場が多く建設された。その後、21 世紀の到来を前に次世代システムの名の下で種々の概念が構想された。そのうち日本の製造業の国際貢献が問われる中で国際共同研究 IMS (Intelligent Manufacturing System) プログラムにおいて、知的生産システム、人間中心生産システム、ホロニック生産システムなどの次世代に向けた研究が行われた [2]。そして自律分散生産システムや変種変量に対応できる生産システムなども実用化されるようになってきている。さらにシミュレーション技術や仮想化などの先端技術と結びついて、工場がスマートファクトリを志向し、製造業のサービス化、グローバル化とボーダレス化、ネットワーク化とオープン化が進んでいる。こうした流れの中で、新しい付加型製造プロセスの活用、エコ技術の取り込み、レジリエンス、セキュリティ、知財やビジネスモデルの検討など、生産システムに関する研究領域は様々な展開をみせてきている。

こうした生産システム変遷の概要は図 2 に示すように描かれるが、その歴史の中には従来の生産システムを画期的に変化させた主役技術の存在があった。すなわち最初の変革、第 1 のパラダイムシフトを牽引した技術は 1760 年にイギリスで起こった第一次産業革命における蒸気機関であるといわれている。また第 2 のパラダイムシフトでは電子計算機（コンピュータ）、第 3 のパラダイムシフトではインターネットがこうした役割を果たしてきた。今後は、AI (Artificial Intelligence) やビッグデータ（Big data）がこうした主役技術になりうるのかについては、その利活用とともに関心がもたれるところである。ところでこうした変遷を人に例えて言えば、これらの主役技術によってそれぞれ、筋肉が与えられて「より多く」のものを、知能を獲得して「より賢く」、そしてコミュニケーション能力を持つことで「より面白い」ものを作ることができるようになって成長してきたといえる。そしてこれらの能力を相互に連携させながら高め合うことで「より自由で個性的」なもの・ことつくりが実現されていくことを期待したい。

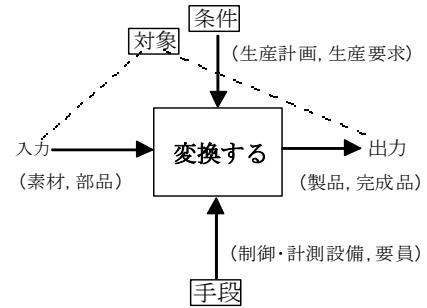


図 1 生産システムとは（IDEF0 基本ア
クティビティモデル）

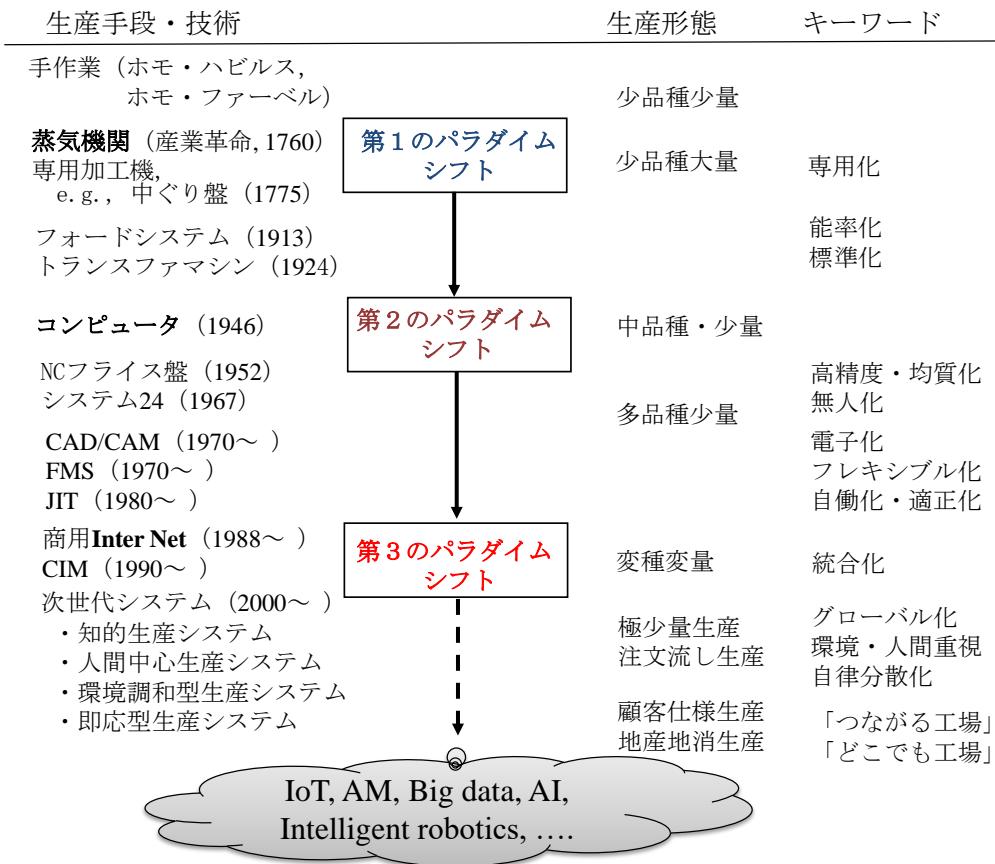


図2 生産システム変遷の概要（一部、展望含む）

ところで次の主役技術を生み出したり、その活用に向けた斬新なシステム展開を図ったりする（イノベーション）ためには、人材の補給・育成は極めて重要である。しかし日本における生産システムについての高等教育は一部の大学の機械工学科や経営工学科などで細々と個別的に行われているありさまで十分な状況とはいえない。これまでの生産において有用とされてきた、根回しや裏議といった経営手法、QCサークルで知られるカイゼンによる生産管理、金型に代表される職人技に勤勉で優秀な労働力といった要因に恵まれて築いてきた「ものづくり」はそれだけではもはや成り立ち難くなっている。こうした生産現場での（伝統的）要素技術は教育機関での主たる守備範囲になかったため特に取り上げられなくてもこれまで問題は少なかった。しかし、「ものづくり」からシステム創成やプロセス（過程）のシステム化に関わる「ことづくり」に生産システムの軸足が移ってきて現状においてはそうとはいえない。むしろ生産現場にこそ、学ぶべき最新の理念や理論に基づいた技術やシステムが多数存在するようになってきている。また、全体最適化のためにオープンなシステム構築が求められる中で、情報セキュリティ上、どこまで開示し何をブラックボックスのままにしておくのかについても迅速な判断が必要となる。したがって基礎的素養として、生産システム工学 [3, 4] はもちろんのこと、最適化工学 [5] や合理的意思決定法に加えて情報・コミュニケーション技術（ICT）を学生時代に学びながら、実務で求められるものへの関心も欠かさないことは極めて重要といえる。

また純粹な科学・技術面だけに留まらず、生産と関わりの深い近代経営にとって必須の MOT (Management Of Technology) の体系的な教育も整備される必要がある。さらに近年複数の主要製造業でデータ改ざんや製品検査などで不正が相次いでいる背景を推し量れば、技術者倫理教育の重要性も指摘しておきたい。このように生産システムの社会・人間との有機的繋がりの深さ（エコシステム的／生物学的性質）を考えれば、産業界と学界が一体化して企画・運営される実務訓練（長期インターンシップ）[6] を通じた実務経験を必ず課すなどしたこの分野の大胆で組織的な教育革新に着手することの必要性に警鐘を鳴らしておきたい。さもないと日本の製造業への信頼性の崩壊が懸念されている中で、次節以降の課題や将来展望で言及するような部分で諸外国との競争に後れを取る恐れが懸念される。

さて、ここで本筋に戻ってもう少し具体的に生産システムの現状について具体的に目を向けて見ることにする。まず、上述からの流れとして学術面での現状について、この分野の情報発信源として組織的に機能してきている日本機械学会での生産システム部門における活動・報告を中心として述べてみたい。まず年度別の研究発表講演会におけるテーマと規模を表1に示した[7]。これに全体大会での発表を加えてみても、本分野の学際性を考慮に入れれば、規模と広がりにおいて決して十分とは言えない現状にあることがわかる。内容的には顕著な傾向として、スケジューリングやモデリングとシミュレーションに関するローカルで伝統的なテーマの比重が減少し、環境配慮への関心を経て、全体最適化やICTの視点からグローバルで先端的な内容を含む複合的な関心を扱うセッションが増えてきており、タイムリーチ性は確保されているといえる。

表1 日本機械学会 生産システム部門の研究発表講演会におけるテーマと規模

年度	セッションテーマ名	テーマ数 講演件数 参加者数
2017	「生産・物流システムのモデリング・シミュレーションと見える化」「生産管理・スケジューリングおよびサプライチェーン」「設計・生産プロセスの情報化(CAD, CAM, CNC など)」「アディティブ・マニュファクチャリングの生産システム」「生産システムにおける設計・運用・評価および国際展開」「新生産システム(IoT 活用, AI 活用, CPPS (Cyber Physical Production System) など)」	6 枠 54 件 149 名
2016	「生産・物流システムのモデリング・シミュレーションと見える化」「生産管理・スケジューリングおよびサプライチェーン」「アディティブ・マニュファクチャリングの生産システム」「設計・生産プロセスの情報化 (CAD, CAM, CNC など)」「生産システムにおける設計・運用・評価および国際展開」	5 枠 52 件 132 名
2015	「生産・物流システムのモデリングとシミュレーション」「生産スケジューリング・生産管理」「生産システムの設計・管理・評価」「アディティブ・マニュファクチャリングの生産システム」「製造オペレーション管理の国際規格 ISA-95 徹底研究」「つながる工場研究分科会」	7 枠 51 件 230 名
2014	「生産スケジューリング・生産管理」,「生産システムの設計・管理・評価」,「アディティブ・マニュファクチャリングの生産システム」,「生産・物流システムのモデリングとシミュレーション」,「ロボティクス応用」,「製造の見える化」,「環境配慮型生産システム/生産システムの国際展開」	7 枠 55 件 101 名
2013	「生産スケジューリング・生産管理 I～III」,「モデリングとシミュレーション I～III」,「デジタル設計・評価・製造システム I, II」,「環境配慮型生産システム I, II」,「ロボティクスの応用」,「リスク対策」,「生産の見える化と制御」,「開発事例」,「アディティブ・マニュファクチャリングの生産システム I, II」	16 枠 53 件 95 名
2012	「スケジューリング I, II」「生産計画・SCM (Supply Chain Management)」「デジタル設計・評価・製造システム I, II」「ロボティクスの応用」「環境配慮型生産システム」「企業事例紹介」「先進・新分野の生産システム」	9 枠 34 件 65 名

次に、毎年の生産システム部門の活動記録として、機関誌に掲載されている年鑑から見えるこの数年の研究動向について言及しておく[8]。まず、スケジューリングおよびサプライチェーンやロジスティクスでのアルゴリズムと関わる研究は継続的かつ活発に?われている。当然のことながら、基本的な問題から時代や適用現場での要請を受けた現実的条件を付加した変形問題に対するものへと変化している。そして実用的最適化手法といえる各種の進化手法が問題特性に応じて工夫して適用されてきており、現実規模の最適化問題も解くことができるようになってきている点は頗もしい。また、高性能なシミュレータが手軽に入手できるようになっていることも要因の一つとして種々のシミュレーションやそれらの統合に向けた標準的なモデル化の方法もよく議論されている。さらに人と関わる作業員の配置や割り当て問題も今日的なセル生産を取り上げたり、より現実的な条件を設定したりして考察されている。生産ライン設計・運用、発注・在庫管理、レイアウト計画、ラインバランシングなど生産システムで古くから研究してきた課題も混流生産やサプライチェーンとの連携を意識して取り扱われている。しかし環境配慮の生産システムに関する研究は必ずしも多いとは言えない。そして次節で述べるような先端

的課題を学術論文としてまとめた成果もまだほとんど発表されておらず, 上述の講演会での様子とは異なりタイムラグがみられ, 今後の取り組みが待たれる. なお, 著者らも, 現実的な問題設定の下で, ライフサイクル工学, 生産スケジューリング, ロジスティクス, 発注・在庫管理, 製品投入計画, 製品設計などに関して, 最適化と関わって種々の研究成果を発表してきている (<http://opteng.main.jp/output.html>).

一方, 産業界の方へ目をやると, 米国のジェネラルエレクトリック社のCEOを務め, 20世紀最高の経営者と呼ばれたジャック・ウェルチの「我が社はもはや製造業でない」との言にみられるように多くの製造業でのサービス事業や産業界でのサービス業の比率が拡大し始めてはや久しい. この背景にはICTの発展が関係していることは言うまでもなく, 当然のことながら表2に示すように先進国でこの傾向は高く, いずれの国でも急速な割合で増加している. またムーアの法則としてよく知られている「CPU能力は18-24ヶ月で倍になる」というハード面でのコンピュータとソフトウェアの飛躍的進歩により, コンピュータ技術を活用して製品の設計, 製造や工程設計の事前検討の支援を行うことや, それを行うツールを意味する CAE (Computer Aided Engineering) をはじめとして, CAM (Computer Aided Manufacturing), CAD (Computer Aided Design), CAP (Computer Aided Planning) などの Computer Aided を接頭語とする技術やシステムが次々と開発されてきている.

表2 世界の産業セクター別就労比率[9]

国名	世界労働人口比率 [%]	農業 [%]	製造業 [%]	S: サービス [%]	Sの25年間の増加率 [%]
中国	21.0	50	15	35	191
インド	17.0	60	17	23	28
米国	4.8	3	27	70	21
ブラジル	3.0	23	24	53	20
ロシア	2.5	12	23	65	38
日本	2.4	5	25	70	40
ドイツ	1.4	3	33	64	44

さらにインターネットの普及によって仮想現実 (Virtual Reality) の活用が生産ライフサイクルの全ての段階 (製品企画, 製品開発, 生産準備 (システム設計・作成), 生産) に拡散してきている. そして, このライフサイクルの各段階において, 従来は前段階の終了が次段階の始まりであったのを, 次段階を前倒しして二つの段階を並列的に実施するコンカレント化や, 今度は Virtual を接頭語とする Virtual product や Virtual factory などが現実化されてきている. ここで前者ではデジタル・モックアップ (Digital mockup) ツールを用いて, コンピュータの中に仮想的な試作品を作成し, 例えは部品間のクリアランスが十分あるか, 製品が無理なく動作するか, 容易に組み立てられるかといったことなどのデザインレビューが行われる. 一方, 後者では工場の主要なサブシステムの統合されたシミュレーションモデルによって工場全体を一括して取り扱えるようになる. そしてこれを用いたシミュレーションを通じて実世界の生産状況を仮想的に再現することによって高度な意思決定支援能力を提供できる. これと類似する近年取り組みの始まった Cyber Physical Production System は現実世界である Physical とコンピュータ上の仮想世界の Cyber を連携させて, 新たな価値を創造するものづくりマネジメントのためのシステム技術とみなせる. これらの技術やツールに共通するアイデアは, 実体をコンピュータの中にモデルとして作り込んで現実には不可能な検証や評価を様々な角度から事前に行うことで時間とコストを大幅に削減させながら価値の増殖を図ろうとするところにある.

3. 課題と方向性

ここでは現在着目されている幾つかの生産システムを取り上げそれらの課題と方向性について触れたい. 1992年の国連地球サミット以来広く知られるようになった「持続可能な発展 (Sustainable development)」という理念は, 今日の地球環境問題に関する世界的な取り組みに大きな影響を与えている. 製造業においても, ライフサイクル評価 (Life cycle assessment) の実施を義務付けた国際認証 ISO14000 を取得することは当たり前となり, 持続可能性やライフサイクルさらには低炭素社会をキーワードとした環境配慮型生産システムの在り方が活発に議論されている. 例えば, 社会的な 3R 活動

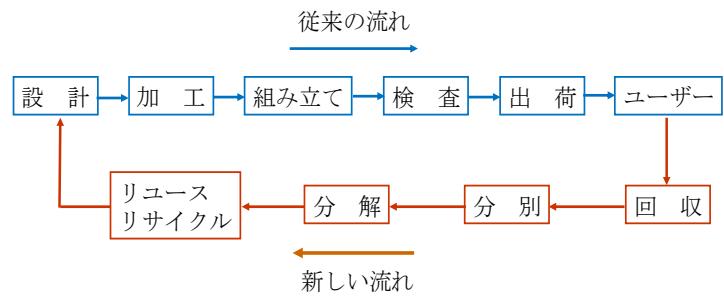
(Reduce, Reuse, Recycle) とも連関してインバースマニュファクチャリングと呼ばれる、従来プロセスの流れとは逆の下流から上流への経路を加えて全体として閉じたシステム形態が着目されている。そこでは経路の閉鎖化によって環境負荷物質をできるだけ工場外に出さないようにする努力だけでなく、「Design for x (x={Environment, Disassembly, Recycle, etc.})」の理念の下で、下流の各プロセスの便宜に向けて、上流プロセスでの設計・加工・組み立てプロセスにおいて、上で例示したような x のための変更も検討されることになる(図3参照)。また、市場のグローバル化や全体最適化の追求のもとで、サプライチェーンやロジステックスも生産システムと同じ枠組みで検討した方が持続可能社会の実現にかなうといえる。そしてグリーン調達やグリーンロジステックスなどの生産側の取り組みだけでなく、環境ラベルから始まったエコ度の「みえる化」の拡充を通じて消費者と生産者を結び付け、「エコ製品を選ぶ生産者の増大がエコ生産を増やす」というシナリオの追求も始められている[10]。

さらに、近年多発しているテロ、自然災害、異常気象さらには政情の不安定化への備えや、こうした事態に陥った後の速やかで効果的な回復は今後ますます重要となる経営上の問題といえる。このため事業継続管理 (BCM: Business Continuity Management) や事業継続計画 (BCP: Business Continuity Planning) を取り入れて、レジリエントな(ダメージに強く回復力の高い)生産システム構築を目指そうとする動きも広く行われるようになってきている。ここで BCM とはリスクマネジメントの一種で、災害などの緊急事態が発生したときに、いかに事業の継続を図り、顧客サービスの欠落を最小限にするかを目的とする経営手段である。そしてこの組織的運用のために作成されるものが BCP である。この概念図を図4に示す。時間軸に沿って倒壊前後の事業レベル変化の様子を2つの曲線で描いている。赤の破線が BCP なしの回復曲線で、青の実線がありのものである。これからみられる要点は2つで、どんな事態に臨んでも維持すべき事業レベルと不幸にも倒壊があった時に回復までに必要な期間 (Required Time Objective) についての目標値を設定しておき、これらの値の妥当な設定とそれが実現できるために必要な対策を日常的に点検することにある。

少子化や高齢化による労働力人口の減少は、働き方や職場環境の革新の必要性を求めており、人間中心の生産システムに関する構想の検証は急務といえる。こうした問題解決の一部として、AI で進化した自律分散型ロボットシステムや人工衛星「みちびき」の運用で飛躍的に精度が向上する GPS 標用の自動化などの導入が見込まれるが、人とのすみ分けには大きな議論の余地がある。

また価値観の多様化によって従来の論理的な価値軸(性能、信頼性、価格)に基づくものづくりの限界を指摘する意見も聞かれる。そして第4の価値軸として人としての「感性」を加えた企画・設計による魅力ある製品開発が、今後の日本産業の競争力向上へのポイントの一つとして取り組みが期待されている[11]。

このようにトピックスだけを並べてみても実に多岐にわたっており、時の流れに棹差して地球環境・社会・人と関わっている生産システムの裾の広さ(学際性)が改めて再認できる。そして、それぞれ毎に抱える課題を解決しながら、社会・政治・経済動向に応じて方向性も修正を加えながらさらに展開を重ねていくものと思われる。そしてこうした途上で、これまでにもコンカレント工学、ライフサイクル工学に感性工学といった新しい学問領域も生まれてきており、そこでの成果は栄養として生産システムの成長を助けていくものと思われる。以下では特に今後の成長と波及効果が期待されている IoT (Internet of Things) と関わりが深く第4次産業革命とも呼ばれる Industry 4.0 と、アディティブ・マニュファクチャリング (AM) に関する取り組みについて簡



Design for x where x={Environment, Disassembly, Recycle, etc.}

図3 インバースマニュファクチャリングの形態

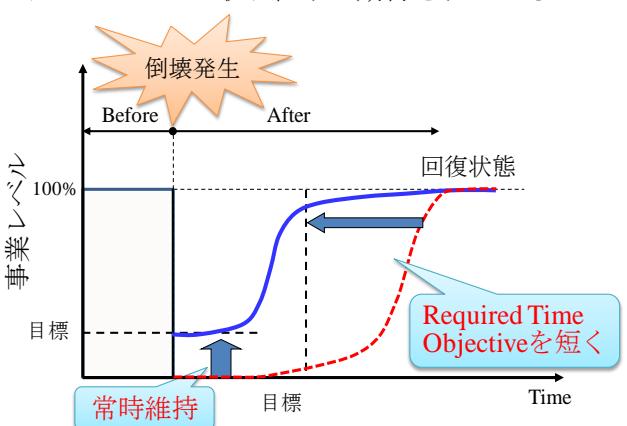


図4 レジリエンスを担保する
事業継続計画 (BCP) の狙い

單に述べてみたい。

ドイツ政府主導の Industry 4.0 が我が国に上陸した時、一時、立ち遅れ感をにじませていた産業界もその内容の精査に及んで今は落ち着きを取り戻したように見える。国民性や文化により違いはあるが、米国民間企業を中心とした Industrial Internet Consortium などでも同様の活動が行われている。これらの動きは、ものに情報を還元して新たな発想でインテリジェンスを組み合わせることによってイノベーションを生み出そうとする取り組みと要約できる。したがって焦燥感の早期解消の所以は、高度な生産システムと情報・通信技術を有する我が国においても準備は充分整っており、類似の取り組みが始まっていたからといえる。こうしたトレンドは共通して Smart Manufacturing というキーワードで包括でき、この主要な部分は、工場モデルのデジタル化（サイバーフィジカルシステム）および工場同士がつながることにある。ここで「つながる」というイメージは IoT を基盤技術とすることから由来しているといってよい。また、IoT の革新性は「もの」が「インターネット」につながることで、ものに結び付けられていたインテリジェンスが、物理的・空間的・時間的な制約から解き放たれて、ものが自律的に機能できるようになる可能性にある。もののための情報であったような状況が、ものと情報が一体化し、これらを同義とみなしえるようになったと言い換えてよい。そして「つながる工場」[12] では、工場間、設計と製造、製造と物流、物流と販売がハードとソフトの両面において容易に接続され、構成も柔軟に変更可能となる。これより相互に競合関係に陥りやすかった生産管理の主要 3 目標である QCD（品質、コスト、納期）のすべてが同時に改善される環境が整うことが期待される。ところで「つながる」ための基本条件は、構成要素間で一元化・共有化された情報やデータに基づいてコミュニケーションがとれることで、この実現のための基礎として国際標準化が重要になることは明らかである。

こうした「つながる工場」がどこまで広く拡散していくかが今後の産業の発展やその構造の適応性や頑強性にとって重要なポイントとなると思われる。さらにこの先に構想されている「どこでも工場」の実現によってこうした特性はますます高度化していくものと思われる [13]。ここで「どこでも工場」とは、世界中に分散された工場が各地域のニーズに柔軟に対応する一方で、生産に関わる知識・ノウハウや情報は高度に共有され、生産設備も高度にモジュール化されることで、世界中に分散された生産設備を柔軟に組み合わせて選択して消費地の近くで生産を行うような生産システムを想定したものである。また顧客と生産者間のすり合わせを通じてカスタマイズされた製品設計・製造も一般化されるようになる。

一方、AM [14] は、いわゆる 3D プリンタを主とした付加製造を一般に指し、米国の標準化組織である American Society for Testing and Materials によって正式に定められた名称である。情報の標準化を進めて IoT 技術と連携することで、先端的製造システムを構築するためのコア技術の一つとしての地位を確立していくものと思われる。また AM と IoT をつないだプラットフォーム上でものを作ることができれば、もはや大規模な工場はいらなくなり、世界各国にある工場にデータを転送して製品を作れるようになるので「どこでも工場」の現実化にとっても必須となる。また AM の国際標準化は、工業的な実用化技術として成長していく上だけでなく、製造物の公正な商取引を担保するうえでも重要であるさらに AM は材料を少しずつ付加していくことで最終的な形状を形成する技術であり、除去加工とは異なり原理的には投入したすべての材料が最終製品になる。また、AM では既存の加工方式において必要となる型、治具、工具等も不要となるため、この導入により資源利用効率を大きく高め、総合的なエネルギー消費量を減少できることで環境負荷削減の効果も期待できる。

ところで「どこでも工場」の究極形といえるパーソナルファブリケーションは「大衆による生産（Production by Mass）」への動きでもあり、そこでは生産者と使用者との境界が消滅していく。このため私的な製品へのアイデアを即座に製造・販売に結び付けるオープンイノベーションのための環境整備が必要となる。そして CAD/CAM/CAE ソフトウェア、データ共有・投稿サイト、AM による造形サービス、資金調達のためのクラウドファンディング、サプライチェーンマネジメントサービスなどの小規模分散型・適量生産を可能とする仕組みも加速して整える必要がある。なお、高等教育面での課題については既に述べたが、ここで言及したことに関連して CAD から一步前に進めた AM ベースの実習教育の必要性について付け加えておきたい。

4. 将来展望（おわりにかえて）

今後の生産システムにまとまる状況を関連の深い、人、技術・システム、社会インフラおよび環境・エネルギーの項目別に俯瞰してみる。まず、現在は若い東南アジア諸国でも今世紀半ば以降には日本が経

験した以上のスピードで高齢化が進行し、労働人口の減少が予想されている。また、鉄鉱石や石油を筆頭に資源エネルギーの枯渇とそれに伴う囲い込みの激化、人種差別、地域紛争、テロなどによる日常性の破壊、温暖化や巨大災害、異常気象の多発化など、どれをとっても生産環境にとって深刻な問題の枚挙にいとまがない状況が起こることが危惧される。

一方、科学技術については、知能ロボット、AM および IoT に AI や Big data が絡むことで自己進化能力を備えた知的な生産設備や生産システムが生まれた後、その進歩も格段の処理能力を持つ量子コンピュータやスーパーコンピュータおよび次世代インターネットによって驚異的に加速されるであろうと推測できる。そして、「もの=情報」の一体化がさらに、「人=情報」にまで進むことで「もの=情報=人」となり、人工物（自律型知能ロボット）の人化と、人（技能）の人工化が進むと予想される。これによって、労働力不足の不安や一時大いに懸念された技能伝承の崩壊の解消につながるような新たなパラダイムシフトが起こることが期待される。これは、量に関わる生産形態や効率化を意味するキーワードによって表現されてきた静的・無機的な変化から、人間そのものや社会・地球環境の変化といった動的・有機的な変化への多様なシフトが間際で起ころうとしていることを意味する。もといえ、技術や産業のオープン・ボーダレス化が一層進む中で、それらのライフサイクルにおける萌芽期と成長期のものが結合したり、生産プロセス業務のコンカレント化の多様化が進行したりして、全体がアマルガム状態になっていく時代が到来するものといえる。最後に、このよう状況で確固たる確証をもって将来を描くことは困難なため、読者諸兄の想像力も頼みに、また批判も覚悟のうえで、表 3 のように区分して予測してみた。

表3 生産システムの将来展望

年度	人	生産技術・システム	社会インフラ	環境・エネルギー
~2020	韓国、中国で高齢化始まる 物理・感性価値の共存 便宜的繋がり志向	「つながる工場」の萌芽期 AM, IoT, AI, Big data 技術・システムの蓄積（次の前半でも）	自動運転対象範囲の検証 DNA 治療・再生医療革命の始動 非エンジン自動車への転換	再生可能エネルギーの増加 化石燃料の低炭素化シフトの加速
~2030	マレーシア、ベトナムで高齢化始まる 感性価値の重視 緩い繋がりで共有志向	「つながる工場」成長期 「どこでも工場」萌芽期 自律型知能ロボットシステムの汎用化 量子コンピュータ実用化 次世代インターネット完備	自動運転対象範囲の拡大 3D（ドローン）流通革命 DNA 治療・再生医療革命の本格化 第一次産業革命の始動（GPS 管理植物工場・養殖場） 非エンジン自動車への転換加速	インバース／ゼロエミッション生産への転換の拡大／3R の徹底化 炭素税導入 脱原発の加速
~2050	日本の人口 1 億人を割る（2053） 不便価値の再評価 強い繋がりで共有志向	「どこでも工場」成長期 高度 IoT, AI 技術・システムの普及 宇宙開拓事業の現実化	自動運転の一般化 第一次産業革命の本格化	水素利用の本格化 深海資源利用の実用化 脱原発の完了

参考文献

- [1] Chien, C-F.: Big data analytics to empower manufacturing intelligence and smart production for Industry 3.5, Proceeding of the 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Vietnam (2015)
- [2] IMS 活動記録編集特別委員会(編) : IMS (Intelligent Manufacturing Systems) 20 年史, 製造科学技術センター, IMS センター (2010)
- [3] 清水良明他 : 生産システム工学—知的生産の基礎と実際, 朝倉書店 (2001)
- [4] 人見勝人 : 入門編 生産システム工学 第 5 版—総合生産学への途, 協立出版 (2011)
- [5] 清水良明 : 最適化工学のすすめ—賢い決め方のワークベンチ, コロナ社 (2010)
- [6] 文部科学省(編) : 社会のダイナミズムに連動する高等技術教育—実務訓練を柱として, 特色ある大学教育事例集, pp.123-127 (2004)
- [7] 機械工学会 生産システム部門 : ニュースレター, No. 44 – 37, (2017) – (2013)
(<https://www.jsme.or.jp/msd/html/NewsLetter/NewsLetterDigest.html>)

- [8] 機械工学会：機械工学年鑑（生産システム部門編），機械学会誌, Vol. 120 – 116, (2017) – (2013)
- [9] Spohrer, J. & P. P. Maglio: The emergence of Service Science: Toward systematic service innovations to accelerate co-creation of value, Production and operations management, Vol.17, No.3, pp.238-246 (2008)
- [10] おかしいものの革命プロジェクト(編著)： おかしいものの革命！, 公人の友社 (2014)
- [11] 経済産業省(編)：感性価値創造イニシアティブ, 経済産業調査会 (2007)
- [12] 日本的な「つがる工場」実現へ向けた製造プロセスイノベーションの提言, 機械学会生産システム部門 (2014)
- [13] 技術ロードマップ：機械学会 生産システム部門 WG, (2016)
- [14] 塩谷他:アディティブ・マニュファクチャリングによる新生産システムの展開, 機会学会学会誌, Vol.120, No. 1180, pp. 26 - 37 (2017)