

“モノづくり”における生産システムの進化 —自動化を支える技術開発の歴史と今後の展望—

土屋総二郎^{*1}

Evolution of Production Systems in Monozukuri History of Technical Developments that Support Automation, and Future Prospects

Sojiro Tsuchiya^{*1}

1. はじめに

モノづくりの進化の歴史は、有益で品質の良い品物をいかに効率良く作るかといった基本的な課題の進化に他ならない。人間のモノづくりの知恵と技能を機械に置き換えて、人手に頼ることなく機械にて行うことが生産の自動化である。ここであえて自動化の文字を「自動化」、つまり自律的に働くとしているのは、特にモノづくりにおいて自動化は勝手に動くということではなく、人間に代わって作業をしているという意味をあらわしている。決められた性能・品質のものを常に作り続けなければならない生産現場では、問題があれば直ちにそれを検出して自分で修正する、それがかなわぬ時には機械を止めるなどが必要である。自動化の「動」の字に、ニンベンをつけて「自動化」とするのはTPS改善では普通であるが、筆者にとってもしっくりとするからである。

モノづくりの自動化は、そこに使われる機械の進化により実現されてきた。生産技術の仕事にはいろいろとあるが、少し長期的に見れば自動化を着実に進めることが、大切な役割の一つである。通常、自動化には多額の費用、設備投資が必要である。一方、自動化による効果も大きい。どんな事業においても費用対効果は重要なことであるが、自動化においても、常に少ない費用で大きな効果を生み出すような努力が生産技術者には重要である。効果的な自動化システムの立案とともに、自動化のためのマシンやコンポーネントへの最新技術の導入や、新規開発も必要である。現場の改善や最適化と、技術開発による革新的な変革は、常に車の両輪である。両者が連携しながら進んで行くことが、自動化の推進とその結果としての競争力の向上において極めて重要なことである。

日本のモノづくりにおいて、現在、そして今後

も生産現場における人手不足は深刻な課題である。人手不足やそれに伴う労務費高騰からの安易な生産の海外移転は、製造業の持つ本質的な付加価値を失うとともに、開発、設計、生産、販売、サービスといった一連の流れを壊してしまう危険性ははらんでいる。今後とも日本が繁栄し発展していくためには、「日本のモノづくり」は決意を新たにしてさらに磨きをかけていかなければならない。人が足りなければ、その分生産性を上げれば良いのである。生産性向上にはIEなどによる改善も大変重要であるが、それに加えて自動化は決定的な解決策になりえる唯一の方策である。現在はIoTなど情報技術を活用したモノづくり変革が一つの大きな流れとなっているが、情報だけではモノは作れない。情報を受け取りそれによりモノを作り出す自動化された機械がどうしても必要である。モノづくりにおける自動化機械には長い歴史があるが、IoTの時代においてはコンピュータや制御機器の進化と相まって、今まで以上に大いに発展していくものと思われる。今後とも自動化を実現するための技術、機械やユニット、部品等において、日本が世界をリードし続けることは大変重要なことである。

2. 自動化の歴史

モノを作る道具や機械は人の歴史とともに進化してきており、その方向はいかに効率的に品質の良いものを作るかということであった。人の能力には限界があり、それを乗り越えていくためには、人間に代わって仕事をこなせる機械、すなわち自動化が必要となってくる。このような観点は、自動化が始まった古代から現在まで、また今後も変わらぬものである。

自動化の最初の代表的なものは、古代エジプト

*1 社外取締役

などで使われ始めた水車ではなかろうか。人が生きていくために飲み水を確保し、そして作物を育てるためには水は不可欠なものである。水は高いところから低いところへは勝手に流れるが、逆の場合は水くみという大変な作業が必要となる。これらの作業を水車で行うことは、昔の日本でも一般的に行われてきた。さらに水車の回転軸から動力を取り出して、石臼を回して製粉するなどの自動化へと進化していった（図-1）。



図-1 水車

これらの水車や風車の動力は、馬や牛といった家畜による動力とともに、蒸気機関や電機モーターが出現するまで、人間の代わりに仕事をこなす自動化のための動力の主役であった。その後、18世紀になり蒸気機関の発明、実用化がなされて強力で安定した動力が得られるようになり、機械化や自動化の本格的な展開が始まった。そしてそれが産業革命へと進展していった。

蒸気機関などの動力は、一般的に負荷がかかると回転数が低下するという特性を持っている。逆に無負荷の場合は回転数が上がりすぎて破壊する危険もある。自動化機械の動力として使うには、負荷の変動にかかわらず安定して回転しなければならない。このような目的のために、遠心调速機（ガバナー）が開発された（図-2）。これは蒸気機関の回転速度に比例して蒸気バルブを開閉す

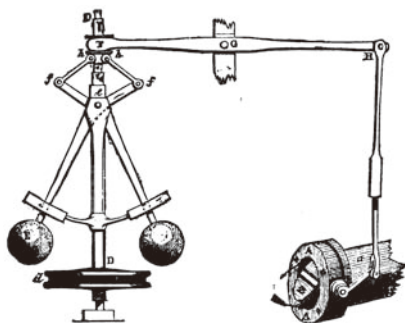


図-2 调速機（ガバナー）

るものである。今で言うフィードバック制御、自動機械のどこでも使われているPID制御の原点であり、制御工学の源流となったものである。

人間の生活に必要とされるものは、衣・食・住と言われるが、衣類で必要となる織物を作ることは大変手間と時間のかかる作業であった。この分野の自動化はいち早く進められた。日本では豊田佐吉により1890年に従来の両手を使うボタン織機を改良し、箆框（おさかまち）を片手で前後に動かすことにより杼（ひ）を飛ばすことと、緯糸をうちこむことを同時に行うことのできる豊田式木製人力織機が発明された（図-3）。その後は、1896年に豊田式動力織機、1906年には環状織機、そして1924年には有名なG型織機（無停止杼式豊田自動織機）が開発され、ほぼ全自動で織物が作れるようになった。

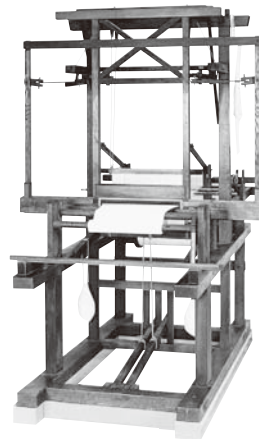


図-3 豊田式木製人力織機

第2次世界大戦後は、自動車産業や家電製品などの産業を中心に大量の部品や製品を効率よく、安定した品質で作るために自動化は急速に進化した。当初はフォードなどの欧米の工場で積極的に進められたが、日本においても1960年代～1980年代の高度成長期における生産増大要求と人材不足から急速に自動化は進んだ。当初の自動化は、同一のものを大量に生産できるというものであったが、その後は市場の変化から自動化設備は、多くの種類のことを柔軟に生産できるというフレキシブル化の方向に進化した。

1990年代に入ると、バブルが崩壊してモノづくりの成長も鈍った。多くのモノづくり産業が海外に市場を求めて展開し、沢山の工場が海外に作られた。ここでは豊富で安価な労働力が容易に入手できたため、国内での自動化を以前の手動に切り替えて展開することも多くあった。しかし現在では新興国の経済発展は著しく、その結果として労務費も大幅に高騰してきており、自動化への期待は世界的に高まっている。

3. 加工分野の自動化を支える NC 工作機械

モノづくりの工程において大きくは、部品を作る工程と、それらを組み立てて製品にする工程とに分けることができる。その中でも部品加工の代表とも言える機械加工の自動化は比較的早くから進められてきた。当初はカムなどによる機械的なものや油圧機器を用いて自動化された工作機械が活躍する時期もあったが、現在はコンピュータにより指示されたとおりに複雑な加工も全自動で行うことのできる数値制御工作機械 (NC 工作機械) に置き換わっている。

前述した産業革命では、動力となる蒸気機関やそれにより動かされる各種機械類に、複雑で精度の高い機械部品が大量に必要とされた。これらを製作するために丸物を加工する旋盤や角物を加工するフライス盤、穴をあけるボール盤など、今でもおなじみの工作機械が作られるようになった (図-4)。しかしこれらの工作機械はすべて人が操作して形状や精度を作り出すものであった。機械には人が、しかも熟達した技能を持つ人が、つきっきりで操作しなければならない。これらの作業を人に代わって加工できるようにしたのが NC 工作機械である。NC 工作機械の概念・原型は、1952 年にアメリカで開発された。日本では 1959 年に富士通信機製造 (現ファナック) により、NC 工作機械の心臓部となる電気・油圧パルスモータが開発され実用的な NC 機械が実現された。1972 年には、世界初のコンピュータを内蔵した NC 装置 (CNC 装置) が出現し、多軸で複雑な加工を可能とした現在のような NC 工作機械へと発展してきた。NC 旋盤は丸物の外面、内面、端面などの通常の旋削加工に加えて、付随する平面加工や溝加工、穴加工等の従来は別の機械で加工していた各種の加工まで全自動で行うターニングセンタへと進化してきた。NC フライス盤も工具の自動交換 (ATC) やワークパレットの自動交換 (APC) を装備するようになり多くの工程、そして加工物の交換までも自動で行えるようになり、複雑な形状の加工物を長時間、全自動で加工することが可能なマシニングセンタへと進



図-4 旋盤の原型¹⁾

化した。さらに近年では制御装置とソフトウェア技術の進歩は目覚ましく、従来の X, Y, Z 3 軸を制御する機械から、回転方向の 2 軸を加えた 5 軸同時制御の機械も一般化し、型などの自由曲面を持つ複雑な形状の加工も全自動にて加工できるようになっている (図-5)。



図-5 マシニングセンタ²⁾

しかしこれらいくら高度化した機械も確かに加工中は全自動ではあるが、そこに加工物を正しくセットし、また刃物・工具類を適切に選び、その動作を指令するのは人間であり、現場技能者の役割の重要性は以前にも増している。ただ技能の内容が変わってきているだけである。

4. 組み立て、搬送の自動化を支えるロボット

でき上がった部品は、組み立てを行い、調整・検査を経て製品となる。組み立ては多くの場合人手によることが多いが、生産数量の多い量産では大きな負担となる。たばこや清涼飲料水など 1 秒間に何個も作るような圧倒的に数量の多い生産においては、古くから専用の自動化機械が作られてきた。問題なのは月産 1 万個から 10 万個程度の生産である。加えて種類も多く、また製品の変化も大きい場合は専用の組み立て自動機では対応が難しい。生産形態として製造工程を整理・標準化して一列に並べる生産ライン化は行っても、組立そのものは人間に頼る場合が多く効率化は作業改善など IE 手法により行われてきた。ところが近年産業用のロボットの機能向上や低価格化が進み、急速に活用が進んできている。ロボットと言うと人造人間や機械人間という概念で鉄腕アトムのイメージも強いが、モノづくりにおいては人間に代わって組み立てなどの作業をプログラムに従って行う自動機械のことである。これが産業用ロボットと呼ばれるものである。産業用ロボットの起源は、1950 年代のアメリカに遡る。誕生のきっかけは指示通りに繰り返し動くロボット、つまりティーチング・プレイバック方式で動くロ

ロボットの概念が、1954年にアメリカの技術者ジョージ・デボルにより特許出願されたことである。その後、このアイデアは1959年に「ユニメート」ロボットとして実現された。ユニメートが極座標系に対して、円筒座標系の「バーサトラン」ロボットもほぼ同時期に開発されて、GMなどの自動車工場に導入された。1960～1970年代、日本においても人手不足などが深刻となり、産業用ロボットに注目が集まった。米国ユニメーション社と川崎重工の技術提携による「川崎ユニメート」は自動車製造においてボデー溶接・組み立てなどに広く使われた(図-6)。この時代に、川崎重工以外にも各社がロボット開発を精力的に始め、現在あるロボットメーカーへと成長していった。



図-6 ユニメートロボット³⁾

ロボットの初期には、投資採算が比較的有利な作業、いわゆる3K作業中心に展開されていった。溶接工程やダイカスト、塗装などである。その後は重量物や、取り扱いが困難な分野の物の移動や組み立てに使われるようになった。1978年には、山梨大学の牧野教授らにより水平多関節ロボットが開発された。これはシンプルで制御軸数も少なく小型化も容易であったことから、従来はなかなか使いにくかった小物の部品組み立て工程でのロボットによる自動化への道を開いた。現在ではこ



図-7 4軸水平多関節ロボット⁴⁾



図-8 6軸垂直多関節ロボット⁴⁾

の水平4軸水平多関節ロボットとともに、より自由度の高い6軸垂直多関節ロボットも多く使われている(図-7, 図-8)。

従来からロボットはその安全性の面から、ロボットを安全柵の中に入れて人とは隔離して使われてきた。しかし使い勝手が悪く、人の作業と連携することもできないのが大きな欠点の一つであった。近年のロボット開発の方向は、より人にフレンドリーで使いやすいものへと進化を続けている。各種センサーなどを用いて安全性を高め、柵から出して人と共存できるロボット、人協調ロボットが開発されている。さらにマシンビジョン(カメラ)により目を持つことや、AI技術を活用して自律的に状況を判断するなどできるようになってきている。ロボットを動かすためには煩雑なプログラミングやティーチングが必要であるが、この面でも開発が進んでいる。ロボットのハンドを、人の手で実際に作業通りに動かしてやり、それをロボットが自動で記憶する方式など、人に優しく使い易いものへと進化を続けている。ここでも人が不要になったと言う訳ではなく、ロボットに作業を教えるのはやはり人であり、ロボットが効率よく仕事ができているか否かは現場の力によって大きく影響を受ける。またIEなどの作業改善も、従来の人の作業からロボットの作業に代わっただけで重要なことは変わらない。

5. 生産システム、生産ラインの進化

自動化は、当初は1台の機械での作業の1サイクルを自動で行うところからスタートした。その後、ワークの着脱や搬送も自動化され、作業者がそこに居なくてもある程度の時間、自動運転できるようになった。こういった自動化(点の自動化)が工場の各所にできると、その次にはいくつかの工程をライン状に連結し部品などを製造するようになった。(線の自動化)高度化された専用

自動設備をライン状に並べて、部品などを素形材から完成品まで一貫して製造することができた。ここでは焼き入れや洗浄など各種の処理工程や、検査など品質保証にかかわる工程も取り込まれ、まとまった一連の工程が搬送も含めて自動化されたものである。これらのライン自動化は1970年代から1980年代に大きく発展し、当初は単一部品や製品が生産対象であったが、市場の成長に伴い種類の増加や製品寿命の短命化などから変更に強い自動化ライン、いわゆるフレキシブル化が大きな課題となった。このようなことから柔軟性の高い自動化システムFMS（フレキシブル・マニュファクチャリング・システム）へ向かって開発が進められた。各部品やその後の組み立てがライン化、自動化されてくると、それらを連結して更なる効率化が進められた。工場全体にわたって自動化、連結、同期化された生産システムである。（面の自動化）こうなってくると自動化も単にモノの加工や組み立て、搬送等に留まらず、生産管理や品質管理、設備管理（保全など）も含んだ工場全体のシステムとして構築・運用する必要が出てきた。1980年代後半には、工場全体を統合的に管理運営するシステム、工場管理システムとも呼ばれるものが、CIM/FAといった概念とともに研究開発された。このような流れは、1990年代に入ってのバブル崩壊によりいったん下火になったが、その流れは現在注目されているIoTやインダストリ4.0などで、さらにスケールが大きくなって再び大きく注目されるようになった。今後の自動化は工場内の物理的な自動化に留まらず、モノづくりのグローバル化で世界各地に分散した工場を一つに繋ぎ生産管理や品質管理を一元化し、材料や部品の仕入れ先から販売・サービスまでを含めたモノづくりを一気通貫で運用するなど、情報技術も取り込んで大きく発展していくものと思われる。こういったことが可能になるのも前述したNC工作機械や産業用ロボットに代表されるような、プログラムで自由に動く自動化の基盤が整ってきたことによるものである。

6. グローバルに広がる自動化の波

自動化は、今まではアメリカや欧州、日本などのモノづくり先進国において生まれ、発展してきた。しかし近年は中国やアセアン各国のような新興国においても、経済発展、そしてモノづくりの成熟化に伴って、自動化の要求は高まっている。加えて情報技術の進展により大量のデータが安価に蓄積できること、そしてそれらのデータをAIなど活用して有益な情報に変換する技術や、それらの情報を世界中同時に展開できる高速ネット

ワークなども整備されてきた。これらの情報技術と自動化の合体が、世界的に自動化の進展を促進させる要因ともなっている。また新興国などでは、先進国に比べて高度に熟練した技能者も少なく、従来の技能や経験に頼ることが難しい。一方、若い技能者も育ちつつあるが、彼らは従来からの手動操作の汎用旋盤やフライス盤加工の技能ではなく、NCプログラムをCAD/CAMといった道具を使いコンピュータ上で作成する技能を取得しようとしている。新興国でも普及したスマートフォンやパソコンを使い慣れた世代には、やはりコンピュータで動くNCマシンやロボットのほうが馴染みやすいようである。このようにいろいろな要因や背景から、モノづくりにおける自動化は今後も世界的な規模で展開が進んで行くものと思われる。

7. 自動化の課題と今後の展望

近年IoTであるとかインダストリ4.0が話題となっているが、これらは情報技術の目覚ましい進化と自動化技術が合体して、新しい時代のモノづくりを目指すものである。これらによりNC工作機械やロボットなどは、単に人間に置き換わるだけの道具から、それらを工場内に多数配置し24時間必要な時に、多彩な顧客要求に対応する新しい生産システムとして発展していくであろう。市場や顧客が要望するモノを、フレキシブルに高い品質・きわめて短い納期で、しかもリーズナブルな価格で提供することが求められていく。これらを実現していく工場、そこでは24時間、人に代わってそれこそ「必要なモノを、必要な時に、必要なだけ」生産する自動化されたシステムが必要となる。まさに工場全体が、プログラムに従って動く巨大な全自動設備のようになる。しかし課題もある。こういった巨大な工場システムの設備投資は、ますます膨らみ投資判断が難しくなることである。ちょうど現代の半導体ウエハ工場や液晶パネル工場における投資と同様である。また自動化が世界的に広まってくると、日本などの先進国の今までの優位性が損なわれていくことも考えられる。巨大な市場と大きな投資資金が容易に調達できる中国などのほうが有利となり、日本の競争力が問題となるであろう。また大型化・複雑化した工場システムを、いかに運用・保守するかということも重要な課題となる。特に保守は重要で、情報システムがいかに高度化しても、その指令通りに自動化された機械が常に安定して動かなければ何の意味もない。保守まで自動化することは技術的にも採算的にも極めて難しい。やはりそこには優秀な保全マンが必須である。また自動機を動かすのにプログラムも必要であるが、そのプログ

ラム作成の元になるのは、人の経験であり知恵である。このようなことからいかに自動化された工場でも、高い能力と使命感をもつ現場人材、すなわち「強い現場力」は不可欠である。日本のモノづくりは、現在まで強い現場力を武器に世界と戦ってきたが、今後もそれは変わらない。ただ現場スタッフや技能者に期待される能力が、伝統的な「巧み」に加えて、自働機械のプログラムや保守にかかわる技術・技能へと変わっていくことである。このような技術・技能にたけた「巧み」を従来通りの「現場技能者」という枠組みで捉えるべきではない。開発や設計、生産技術者と同格の現場技術者である。会社内での位置づけ、尊敬や処遇なども新しく作り変えないといけない。今後の自動化の進展にあたっては、単なる生産技術の問題のみならず、このように工場で活躍する人々にかかわる課題に対しても並行して進めることが、自動化を成功に導く鍵の一つである。

参考文献

- 1) シチズンマシナリー株式会社
- 2) DMG 森精機株式会社
- 3) 川崎重工業株式会社「カワサキロボットの半世紀 THE STORY OF KAWASAKI ROBOT」(2018年6月)
- 4) 株式会社デンソーウェーブ

著 者



土屋総二郎