

DENSO のモノづくり

——“Smart Factory”はTPSに収斂するのか——

榎 本 俊 一

目 次

1. はじめに
2. トヨタ生産方式（TPS）
——変化する製造ニーズに対応してきた「ムダの排除」の
統合システム——
3. “Smart Factory”とDENSOのものづくり
——生産システム改革は自動化できるか——
4. TPSとオートメーション化
——DENSOにおけるIoTへの道——
5. 結 び

1. はじめに

これまで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2000年代以降技術力、イノベーション力を急速に獲得しつつある。例えばファーウェイ（華為技術）が次世代通信規格5Gの国際標準を巡る争いで先行、次世代通信網の中国技術の国際標準化を懼れる米国がファーウェイを国際通信市場から締め出そうとして米中間で深刻な紛争が発生している。一方、米国では、GoogleがIT技術と情報処理能力を活かして自動走行技術を開発し自動走行ビジネスに進出しようとするなど、IoT技術による新たなイノベーションが本格化しつつあり、グローバ

ル IT 企業が20世紀型産業である製造業を IT 技術と融合した21世紀型産業に作り変えようとしている。このように国際経済構造と世界の産業構造が変動しつつある中、ドイツ及び日本は米国が先導する IoT 技術によるイノベーションに自らも挑むとともに、製造業における競争優位を維持するためのイノベーションを模索している。

2010年代以降、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、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し、自国製造業の競争優位の再構築プランとして（「第4次産業革命」の語源となった）“Industrie4.0”を提唱した（Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie（2016））。“Industrie4.0”では、IoT 技術、AI 技術、クラウド技術により生産システムをデジタル化し、企業経営陣が市場動向に即して修正する生産計画に対して生産工場が柔軟かつ機動的に対応できるよう、企業情報システムにより工場の生産ラインを自動制御する“Smart Factory”が次世代製造モデルとして提示。この“Smart Factory”はマス・カスタマイゼーションと変種変量生産への対応だけではなく、生産ラインよりリアルタイム収集したデータに基づき AI が生産ラインのカイゼン方法を解析し、その結果に基づいて生産ラインに改良を加えるカイゼンの「自動システム化」を柱としており、いわばトヨタ生産方式（TPS: Toyota Production System）のデジタル版ともいうべきアイデアとなっている。

TPS は1950年代以降トヨタ自動車「ムダの排除」を追及する過程で創り出した（現在もなお改良・変容し続けている）生産システムであり、1990年代以降、海外では「リーン生産システム（lean production）」と呼ばれ、欧米メーカーが生産性向上と多品種少量生産への転換のために学習・導入に努めてきた。TPS は「ムダの排除」をスタート点として生産効率化を目指す一つの「製造思想」であり、大量生産・多品種少量生産・変種変量

生産など特定の製造ニーズに対応するものではない。「ムダの排除」のため「工程の流れ化」を目指し、そのために「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」「pull型生産」を追求する過程で、これらを一つのシステムとして統合する方法として「カンバン方式」を形成・確立してきた。TPSは、国内製造ニーズが大量生産から多品種少量生産、さらに変種変量生産に転換するのに伴い、市場需要動向に対応する小ロット生産システムに成長。結果的に“Industrie4.0”が掲げる市場動向に即応したマス・カスタマイゼーションと変種変量生産を先取りするものとなった。

では、“Smart Factory”はデジタルTPSとしてTPSを超克しようとするものなのだろうか。あるいは両者は変種変量生産に適合する生産モデルとして並立するものなのだろうか。ドイツで“Industrie4.0”を推進する産学官共同体の一翼を担う「ドイツ人工知能研究センター」(DFKI: Deutsches Forschungszentrum fuer Kuenstliche Inteligenz)は「リーン生産システムは(1990年代以降)現在に至るまでシンプルさと高効率性により、多品種少量生産の基本モデルであり続けている」と認めた上で、リーン生産システムは限界に達しており「高度にカスタマイズされた製品の大量生産に対応できるだけの可変性」を欠くばかりか「現代のICT技術の可能性を利用していない」とし、TPSは克服されるべき過去の生産方式とする(Kolberg et al. (2017))。あるいは「リーン生産方式は元来オートメーション(自動化)を排除していなかった」にも関わらず自動化を怠ってきた(Bilberg and Hadar (2012))として、IoT技術をリーン生産方式に適用し「リーン・オートメーション(Lean Automation)」(Roy et al. (2015); Kolberg et al. (2017))に進化させるべきとして、“Smart Factory”を未来を志向するモデルとしてTPSよりも優位に置く見方が少なくない。

“Industrie4.0”に関する先行文献レビューを行ったBauer et al. (2018)等によれば、“Smart Factory”に優位性を認める論者のTPSに対する認識は、

① TPS は多品種少量生産のための生産システムであり変種変量生産に適さない, ② TPS の「平準化生産」は原理的にマス・カスタマイゼーションと二律背反するものであり, TPS は内在的にマス・カスタマイゼーションに適さない, ③ TPS は熟練工・多能工に段取替え等生産ラインの運転管理を依存しており, TPS の人的要素がマス・カスタマイゼーションへの適応を妨げる等に要約できる。彼等は, TPS の制約を打破するために生産ラインの IoT 化を行い, 「設備・機器から自動的に生産関連データを収集し, (CPS によるビック・データ解析により) 各時点の市場動向に最適化した生産方法及び生産ラインを解析」, それに対応して自動的に段取替え, 部品・部材の準備等を実施し最適生産を行うとともに「インターネットを介して部品・部材供給者及び顧客等とつながることで市場動向に即応する」(Bauer et al. (2018); Liao et al. (2017)) ことを主張する。

これは謂わば「機械仕掛けの神 (deus ex machina)」による生産システムであり (Ruettimann and Stoeckli (2016b)), 18世紀のオペラで「機械仕掛けの神」が大座談で登場して, ストーリーを書いている作者自身も解決不能に陥っていたトラブルを解決して「目出度し, 目出度し」となるように, “Smart Factory” では, 万事が IoT 技術による自動制御により予定調和的に進むだろうか。この点, 私は, ドイツでも「機械仕掛けの神 (deus ex machina)」の生産システム (Ruettimann and Stoeckli (2016b)) との批判もあるように, 物事がすべて IoT 技術による自動制御により予定調和的に進むとは考えない。すなわち生産プロセスを IoT 技術により AI による自動制御化したとしても, 市場動向に即応したマス・カスタマイゼーションと変種変量生産が可能となるわけでもなければ, TPS において, 現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」が推進してきたカイゼンを CPS が代替できるわけでもないと考える。「予定調和論者」には, TPS の本質に関する誤認と, TPS の下で追求実現されてきた生産システム改革

に関する無理解があり、さらには1970年代のFA化以来の「自動化」に向けた取組に対する知識不足が「TPSがIoT革命前の遺物であり“Smart Factory”がTPSを超克する」という見方につながっているのではないだろうか。

第一に、TPSは多品種少量生産に対応した製造システムであるとの見解に対しては、TPSは「ムダの排除」を製造の根幹に置く製造思想であり、「ムダの排除」を追及する過程で「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」「pull型生産」を体系化、これらを一つのシステムとして統合する方法として「カンバン方式」を形成・確立してきたものであり、大量生産、多品種少量等の特定の製造ニーズに応えるべく考案された製造手法ではない。国内製造ニーズが大量生産、多品種少量生産、変種変量生産と転換する中で、TPSはDENSOの量変動生産システムのような生産システムを開発し、段取替えなど生産ラインの運転管理のカイゼンを積み重ねることで製造ニーズに応じてきたのであり、現在、“Industrie4.0”が先進国製造業の競争優位維持策とする、市場動向に即応した変種変量生産の徹底についても、TPSは新たな生産システムを開発し、生産ラインの運転管理のカイゼンを発明しようとしている。TPSを多品種少量生産等の特定の製造ニーズと結びつけたものとして、“Smart Factory”が製造課題とする市場動向に即応した変種変量生産には対応できないとすることは適当ではない。この点、「2. トヨタ生産方式 (TPS)」で、TPSに関する(敢えて欧米ジャーナル等の)先行研究レビューに基づき、TPSは特定製造ニーズに結びつけたものではなく、通常「二律背反」と考えられる構成要素を一つの体系に纏め上げて、各時代の製造ニーズに応じてきたことを明らかにする。

第二に、欧米等海外の経営者・生産技術者にはTPSを生産技術と捉えて人的要素を軽視する傾向が一部に観察されるが、TPSでは、人の潜在

能力の未活用も排除すべき「ムダ」とされ、むしろジャスト・イン・タイム、カンバン方式等のTPSの構成要素を纏め上げ、TPSを一つの統合されたシステムたらしめているのが生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」である(Liker (2004))。カイゼンは問題発見と解決の繰り返しであるが、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある(最後まで残る)ため、TPSでは、まずは生産現場が現場レベルで課題解決を試み、生産現場だけでは解決できない場合には、生産現場と生産技術部門が協働することでソリューションを創造してきた。「予定調和論者」は、CPSが「市場動向に最適化した生産方法及び生産ライン」を決定、それに対応して自動的に段取替え、部品・部材の準備等を実施して最適生産を行うだけでなく、従来ヒトが担ってきたカイゼンもCPSで自動化できるとする(Kolberg et al. (2017))。究極的には「無人化工場」を志向していると推察されるが、生産システム改革は、生産関連ビック・データを収集できれば生産技術部門が単独で実施でき、生産技術部門が自己の知識・ノウハウをプログラム化すればAIに生産システム改革を代替できるとするのは、生産システム改革が生産技術部門と生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」の協働作業として進められる実態を無視しているか、無知であるかに他ならない。ここでは事実を以って反論することが適切であると考え。「3. “Smart Factory”とDENSOのものづくり」では「予定調和論者」が構想する自動化について分析した上で、生産システム改革が生産技術部門とAIの頭脳の中に存在するわけではなく、生産現場と生産技術部門の協働により進められることをケース・スタディし、「機械仕掛けの神」による自動化に論駁する。

第三に、ドイツの一部における、TPSは「現代のICT技術の可能性を利用」しておらず、マス・カスタマイゼーションと変種変量生産の対応に

限界があるとの見解に対しては、TPS は「ムダの排除」の観点から元々「自動化」を一つの柱としており (Sugimori et al. (1977); Ohno (1988)), 改めて「リーン・オートメーション (Lean Automation)」を提唱されなくても、既にトヨタ自動車及びトヨタ系列企業は1970年代のFA化以降一貫して工場システムのIT化に取り組んできている。「4. TPSとオートメーション化」では、DENSOの「リーン・オートメーション (Lean Automation)」の取組をケース・スタディし、“Smart Factory”が「売り」とするIoTによるネットワーク構築についても「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」の観点からTPSに組み込もうとしていることを示したい。ドイツにも、“Smart Factory”はTPSをベースとして具現化すべきとする見解 (Khanchanapong et al. (2015); Kasper and Schneider (2015); Staufen AG (2016)) が存在するが、“Smart Factory”はTPSを代替したり超克したりするものではなく、両者を市場動向に即応した変種変量生産のための並立する生産システムとして捉え、ハイブリッド化の可能性を探求することが妥当であろう。

では、“Smart Factory”はIoT技術とAI技術の徹底した活用により自動化を極限まで推し進めることを原理とする革新性以外に、TPSとの比較では特段の新規性・独自性がないのだろうか。4. でケース・スタディするDENSOでは、「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」の観点からIoT化をTPSに組み込もうとしているが、これはあくまでも個別メーカーの範囲内におけるIoT化に止まる。“Industrie4.0”は“Smart Factory”化を個別メーカーの範疇に止めず、トヨタ自動車は協力企業と構築しているような企業グループ・ネットワークに、さらにはサプライ・チェーン全体に関与する主体すべてに拡げられることを構想しており、それにより経済社会全体での最適化を実現しようとしている。これは基本的に個別工場を単位とするTPSからは脱落してしまう

視点であり、日本メーカーは「リーン・オートメーション」で「部分最適」のみ追求しているうちに、経済社会全体での最適化を失念して「全体最適」を達成できない危険が内在している（そもそも経済社会の全体最適は製造思想であるTPSの枠外であり内在云々を論ずる地合いにない）。私は“Industrie4.0”の革新性は経済社会全体での最適化を提言した点にあると考えるが、これは商学研究としての本稿の守備範囲を逸脱することから問題提起に止めることとしたい。

2. トヨタ生産方式 (TPS)

——変化する製造ニーズに対応してきた「ムダの排除」の統合システム——

TPSは、国内製造ニーズが大量生産から多品種少量生産、さらには変種変量生産に転換するのに伴い、市場需要動向に対応する小ロット生産システムに成長。結果的に“Industrie4.0”が掲げる市場動向に即応したマス・カスタマイゼーションと変種変量生産を先取りするものとなっているが、TPSは多品種少量、変種変量など特定の製造ニーズに対応するために考案されたものではなく、「ムダの排除」の製造思想を追及する過程でTPSを構成する要素を改良したり組み換えたりすることで各時代の製造ニーズに最適化された生産システムを構築してきた。したがって、TPSがその生産システムに内在する要因により多品種少量生産に適格的であるがマス・カスタマイゼーションに向かないとする議論はTPSの本質を誤認している。

また、海外における受容プロセスで欧米メーカー等が自己の生産システムにTPSを導入する便法として、TPSを生産効率改善のための「工具箱」と見立てカンバン方式などを個別採用して行ったことから、TPSを生産効率改善方法の「工具箱」として見る向きもあるが、TPSにおいて、「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」「pull型生産」等はすべて「ムダの排除」の製造思想の下で統合された一体不可分のもの

であり、カンバン方式のみを取り上げてマス・カスタマイゼーションに要求される生産ラインの頻繁な変更に対応する上で限界があるなどを論じても、TPSの変種変量生産との適合性を論ずることにはならない。

さらに、海外におけるTPSの受容プロセスでは人的要素がボトルネックとなっており、TPSは「ムダの排除」の原理の下に「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」等のイノベーションを一つのシステムに統合しているが、かかるイノベーションを実務で一つに纏め上げているのは生産現場の「絶えずカイゼンを続けて止まない組織」である。TPSは単に複数工程の運転管理のできる多能工を雇えば運営できるというわけではなく、生産技術に通じた多能工のチームが生産現場で日々学習し、生産効率向上に向けたカイゼンに取り組み続けることを要求し、生産現場の自主的な学習とカイゼンを続けて止まない意思が、生産システムの「永久改革」と新たな製造ニーズへの対応力を産み出している。かかる労働組織は部分的要素の採用だけでは移植することは難しく、労働慣行等を含めて根底から改革する必要があるが、TPSの新たな製造ニーズへの対応能力を論ずる上で無視できない要素である。

本項では、TPSに関する(敢えて欧米ジャーナル等の)先行研究レビューに基づき、TPSは特定製造ニーズに結びついたものではなく、通常「二律背反」と考えられる構成要素を一つの体系に纏め上げて、各時代の製造ニーズに応じてきたことを明らかにする。

(1) TPSの製造思想——「ムダの排除」

TPSは1970年代にDrucker(1971)により「日本の経営」として見出され、Sugimori et al.(1977)によりカンバン方式とジャスト・イン・タイム(JIT)を柱とする生産システムとして国際的に紹介された後、改めてWomack et al.(1990)により“lean production”(リーン生産)として再提示

されると、1990年代以降、製造業における大量生産から多品種少量・変種変量生産への転換モデル (Womack and Jones (1996)) として国際的に認知されるに至ったものである。TPSは1950年代にトヨタ自動車の大野耐一があまたの試行錯誤を通じて開発した生産管理方式であり (大野 (1978)), 元来は変種変量生産への対応を想定したものではなかったが、1990~2000年代のトヨタ自動車の優れたパフォーマンスに裏打ちされる形で、TPSは多品種少量・変種変量生産の模範モデルとして1990年代後半~2000年代末に各国自動車メーカーが学習・導入に励んだだけでなく (Rother and Shook (1999); Hines and Taylor (2000); Detty and Yingling (2000); Lewis (2000)), 2000年代末以降は自動車産業、製造業の枠を超えて広範な分野で学習・導入が試みられてきた (Carnes and Hedin (2005); Brandenburg and Ellinger (2003))。

最初の紹介者である Sugimori et al. (1977) がカンバン方式とジャスト・イン・タイム (JIT) を柱とする生産システムとして説明したこともあり、欧米諸国において TPS は「カイゼン (継続的改良) とムダ排除」に単純化される傾向があり (Ruettimann and Stoeckli (2016b)), 企業が TPS を生産性向上のためのツール・ボックスと見立てて TPS の方法を摘み食いしてしまう結果、生産性向上等の成果を挙げられないケースが多いとされる (Liker (2004))。かかる表層的な理解とは異なり、TPS は一つの総合的な製造哲学であり、その事実上の創始者である大野耐一が述べるように、過剰生産、休止時間、過剰工程、搬送、在庫、移動、部品・製品の不具合など顧客価値につながらない活動 (ムダ) (人の潜在能力の未活用を含む) をなくすことを製造活動の基本と考える生産体系であり、TPS では、ジャスト・イン・タイム、カンバン等は個別独立の生産性向上のための手法ではなく、ムダ削減の観点から一体不可分の取組として実施されることで生産性向上につながる (Ohno (1988))。

(2) 「ムダの排除」のための統合システムとしてのTPS

では、TPSはどのようにジャスト・イン・タイム、カンバン方式等を統合しているのか。大野によれば、TPSを貫く基本思想であるムダの排除には「工程の流れ化」が大前提となる（Ohno（1988））。実は「工程の流れ化」はTPSに固有のアイデアではなく、フォード自動車におけるモデルT生産でも同じく目標とされた普遍的な考えであり、したがって「工程の流れ化」だけではムダの排除を達成できない。ムダの排除のためには、「部品・ユニット等の生産は、遅からず早からず、適時実施されなければならない」とする「ジャスト・イン・タイム」が「工程の流れ化」と同時に達成されなければならない（Pegels（1984））。そして、TPSでは「ジャスト・イン・タイム」実現のためにカンバン方式が考案された。カンバン方式は「顧客が何を、何時、如何なる数量の製品を必要としているか」を生産ライン全体で情報共有することを可能にし（前掲Liker（2004））、それが市場の引合いに応じて必要数量だけを適時生産するpull型生産を成り立たせる基盤となっている。

そして、カンバン方式はスーパーマーケットの商品・在庫管理に準えられ（Shingo（1989））、商品棚には常に商品がスペースを最も有効に活かした規定数量が並べられ、顧客の購買により空きができれば空いた分だけ直ちに充当されて規定数量の商品が陳列されるように、TPSでは、部品が生産に必要なタイミングより早く供給されても遅れて届けられてもムダであるとみなし、カンバン方式により全工程を一貫してジャスト・イン・タイムでモノが流れていく「工程の流れ化」を実現し、ムダを完全に排除することを狙っている（Ohno（1988））。在庫削減によるコスト・カット、短サイクルでの部品・ユニット生産による生産性向上がカンバン方式の強みであるが、Likerによればカンバン方式は生産現場のカイゼン取組がなければ真に強みを発揮できないとする（Liker（2004））。

(3) 生産技術に通じた多能工の「自己学習組織」に支えられる TPS

というのも、実は「工程の流れ化」は自己矛盾を孕んでおり、「工程の流れ化」は小ロット生産を結果するが、小ロット生産には頻繁な段取替えが必要となるため、却って「工程の流れ」を阻害しかねない (Sekine (1992))。このため「工程の流れ化」では段取替え時間を可能な限りゼロに近づけることが求められる (McIntosh et al. (2000))。また、特定工程の設備・機械の故障・不具合による生産ライン停止は TPS のムダ排除の理念の下では容認できるものではなく (Goto (1989); Thun (2006)), 故障が発生する前に対処する予防保全が不可欠となる。段取替え時間短縮は製造現場の作業能力に左右されるだけでなく、作業チームが日々のものづくりの取組において段取替え作業方法の効率化を発見工夫できるかにも依存する。生産ラインを止めないための予防保全に関しては、個々の作業員が自発的に設備・機械の問題を発見し機敏に対処する必要がある。

TPS は人的要素が導入の最大のボトルネックであると指摘される。Stone (2012) によれば、欧米企業が導入試行を試みた時期 (1997~2000年)、欧米企業経営陣が自社組織に TPS を理解させ組織改革する上での手助けとして、「リーンの思考」(Womack and Jones (1996)) の解明を試みる論文・著作が多数発表・刊行され、TPS の主要原則である TQM, JIT 等に関する分析がなされたが、かかる論文・著作と並んで多数刊行されたのは、TPS が日本型労働組織・慣行に根差したものであり、日本企業とは労働組織・慣行の異なる欧米企業に移植する上で如何なる摩擦を惹起するかを論じたものだった (Cappelli and Rogovsky (1998); Mersha and Merrick (1997); Stewart (1998))。

Sugimori et al. (1977), Ohno (1988) が “Full utilization of worker’s capabilities”, “respect-for-human system” を TPS の「ムダの排除」を達成する上でジャスト・イン・タイムと並ぶ要素としたように、TPS は生産技術

だけの問題ではなく現場の生産組織が成否を左右する。第一に、設備・機械の予防保全により生産ラインの停止を回避したり、不具合品を生産して次工程の停止要因となることのないよう「作り込み」を行うには、生産ラインの運転管理者は単なるオペレータを超えて生産技術に通じている必要があり、第二に、現場が段取替え時間の短縮に向けたカイゼンに取り組む上で、生産ラインの運転管理者には前後工程に関する理解が求められることから、彼は複数工程の運行管理に習熟した多能工である必要がある（Ohno (1988)）。

そして、ジャスト・イン・タイム、カンバン方式などTPSの構成要素を摘み食いするのではなく、自社の生産体制に全面的にTPSを導入しようとした欧米企業が直面した最大の問題は、生産技術を理解して複数工程の運行管理に習熟した多能工の育成もさることながら、かかる多能工がチームとなって日々カイゼンに取り組み「乾いた雑巾から水を搾り出す」(Shingo (1989)) ように「ムダの排除」に自主的に取り組み続ける「自己学習組織」(de Geus (1997)) を如何に構築したらよいかであった (van Eijnatten and Putnik (2004); Yamamoto and Bellgran (2010))。TPSでは、人の潜在能力の未活用も排除すべき「ムダ」とされ、Liker (2004) が指摘するように、トヨタ自動車の長期的成功は絶えずカイゼンを続けて止まない「自己学習組織」の組織化の賜であり、ジャスト・イン・タイム、カンバン方式等のTPSの構成要素を統合して、TPSを「ムダ排除」のための統合システムたらしめているのは、生産技術に通じた多能工の「自己学習組織」である。TPSは「自己学習組織」なくしてはTPSたり得ず、フォード生産方式と並ぶ規範的モデルとしての地位も獲得できなかつただろう。

なお、「工程の流れ化」には生産ラインのレイアウトの見直しも重要である。既存の生産ラインを不変の前提とする場合、「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」がどれだけ作業方法・順序の見直しや部材・治具

の配置等の工夫を重ねても、生産効率向上には天井があり、一定限度を過ぎたならば生産ラインのレイアウトそのものを作り直して、現場が効率的な生産活動ができるようにする必要もある。この場合も、生産ラインのレイアウトが如何なる理由により「ムダの発生」原因となっているかに関して知見を有しているのは現場であり、生産技術部門は「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」と協働することにより適切なレイアウト変更を行うことができる。

(4) 変種変量生産の規範的な生産モデルとなった TPS

以上、先行研究レビューを通じ、TPSは大量生産・多品種少量生産・変種変量生産など特定製造ニーズのために考案された生産方法ではなく、むしろ「ムダの排除」の製造思想の体系ともいべきものであり、(フォード生産システムも目標とした)「工程の流れ化」からスタートして、(フォード生産システムのpush型生産とは正反対のpull型生産に辿り着いた)「ムダの排除」のための統合システムであることを明らかにした。

「工程の流れ化」により「ムダの排除」を実現するには、「工程の流れ化」と同時に「部品・ユニット等の生産は、遅からず早からず、必要とされる時に一瞬のタイミングのずれもなく実施されなければならない」とする「ジャスト・イン・タイム」が必要であり、そして「ジャスト・イン・タイム」を達成するためにTPSでは「カンバン方式」が採用された。「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「カンバン方式」は一つの美しい織物を織りなしている糸のようなものであり、いずれの一つが解けても織物の美は失われてしまう。

そして、「カンバン方式」は生産現場の「カイゼン」により支えられており、ジャスト・イン・タイムのための小ロット生産と小ロット生産のための頻繁な段取替えという矛盾した要求や、設備・機械の故障・不具合に

よる生産ライン停止を防ぐための予防保全などは生産現場におけるカイゼン取組を通じて解決される。「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「カンバン方式」等は生産現場におけるカイゼンにより「ムダの排除」のシステムとして統合されており、カイゼンを続けて止まない「自己学習組織」がTPSをして「ムダの排除」のための統合システムたらしめている。

トヨタ自動車は多品種少量生産・変種変量に最適化された生産システムを意図して創出しようとしたのではなく、「ムダの排除」という製造思想を生産で徹底することにより、「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「カンバン方式」「カイゼン」等を統合、市場の引合いに対応して生産を行う pull 型生産システムである TPS を創り出すに至ったのであり、1990年代以降、TPS は世界の自動車メーカーに限らず、あらゆる製造企業にとり変種変量生産の生産モデルとなった。

(5) 結 論

以上、2. においては、一部にTPSは多品種少量生産に対応した製造システムであるとの見解があるところ、TPSは「ムダの排除」を製造活動の根幹に置く思想であり、「ムダの排除」を追及する過程で「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」「pull型生産」を体系化、これらを一つのシステムとして統合する方法として「カンバン方式」を形成・確立してきたのであり、大量生産、多品種少量等の特定の製造ニーズに応えるべく考案された製造手法ではないことを示した。

むしろ国内製造ニーズが大量生産、多品種少量生産、変種変量生産と遷移する中で、次の3.(2)(3)においてケース・スタディをお示しするが、TPSは例えばDENSOの量変動生産システムのような新たな生産システムを開発し、段取替えなど生産ラインの運転管理においてカイゼンを積み重ねることで、製造ニーズに応えてきた。現在、“Industrie4.0”が先進国

製造業の競争優位維持策とする、市場動向に即応した変種変量生産の徹底についても、TPSは新たな生産システムを開発し、生産ラインの運転管理のカイゼンを発明しようとしている。したがって、TPSを多品種少量生産等の特定の製造ニーズと結びつけたものであり、“Smart Factory”が課題とする市場動向に即応した変種変量生産には対応できないと結論することは適当ではない。

また、TPSにおいて「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」等のイノベーションを一つのシステムに統合しているのは生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを続ける組織」(Liker (2004))であり、生産技術に通じた多能工のチームが生産現場で日々学習し、生産効率向上に向けたカイゼンに取り組み続けることで、生産システムは改革し続け新たな製造ニーズに対応することが可能となっている。“Smart Factory”を次世代製造モデルとする者には、IoT化を貫徹せずヒトに依存し続けるTPSはマス・カスタマイゼーションへの対応に関して内在的制約があるとする向きもあるが、これはTPSにおける生産現場の重要性に対する十分な認識がないためであると考えられる。

3. “Smart Factory”とDENSOのものづくり

——生産システム改革は自動化できるか——

3. では、生産システム改革について取り扱う。生産システム改革は実務の塊である。“Smart Factory”を次世代製造モデルとする者の中には、生産ラインのIoT化により生産関連ビック・データを収集できれば、生産技術部門が自己の知識・ノウハウをプログラム化することによりAIで生産システム改革も自動化できるとする向きもある。しかしながら、AIによる生産システム改革の自動化なりカイゼンの自動化を提案する者は、生産システム改革の実務実態を熟知していないのではないだろうか。

カイゼンとは問題発見と解決の繰り返しであるが、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある（最後まで残る）ため、TPSでは、まずは生産現場が現場レベルで課題解決を試み、製造装置・システムの開発、生産ラインのレイアウトの変更など生産現場だけでは解決できない場合には、生産現場と生産技術部門が協働することでソリューションを創造してきた。生産システム改革の「課題発見→解決方法模索→解決方法試行→問題解決」のサイクルにおける生産技術部門と生産現場との役割分担と協働関係について理解していれば、AIによる生産システム改革の自動化なりカイゼンの自動化が製造実態から乖離していることに気づくはずであろう。

また、4.で示すように、TPSでは1970年代以降オートメーション化にも積極的に取り組み、現在、IoT技術とAIを生産現場における課題発見にも活用しようとしているが、生産関連ビック・データとAIの解析結果の意味については、それが「段取替え時間の短縮」に関するものであれ、「セル生産ユニットの効率的配置」に関するものであれ、解釈を要することは銘記すべきであろう。生産現場で生産ラインの運転管理を行い知識・ノウハウを有する者でなければ、何が生産効率向上に寄与するかを判断することは難しく、生産技術部門が単に自己の知識・ノウハウをプログラム化しても、それで駆動されるAIが生産効率性向上に効果のある生産システム改革を解析考案できるかは疑わしい。

本項では、(1)において“Smart Factory”の生産デジタル化を基盤とした自動化を分析した上で、(2)及び(3)において生産システム改革の実態をケース・スタディし、①生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある（最後まで残る）、このために②生産システム改革は生産現場と生産技術部門の協働により進める必要があることを示す。

(1) 「機械仕掛けの神 (deus ex machina)」?

① 「生産システム」に関する哲学の相違点

“Smart Factory”とTPSは、第一に、市場の引合いに対応して生産対応を行うpull型生産である点、第二に、顧客ニーズの多様化・細分化と国際競争激化に伴う適時生産・適時供給の必要に対応して変種変量生産を目指す点で共通する。しかしながら、“Smart Factory”は①IoT技術、AI技術、クラウド技術による生産システムのデジタル化、②企業情報システムによる生産ラインの自動制御を柱とし、“Smart Factory”のモデルとされるシーメンス・アンベルク工場が「無人化工場」を「売り」とするようになり、「人」が介在しない(介在を極限までゼロ化した)生産システムを目標とするのに対し、TPSは「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」等を「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」により実現しようとするものであり、「人」が介在しない「ものづくり」を想定していない。両者は「生産システム」「ものづくり」に関する基本的哲学を異にしている。

すなわち欧米企業はIoT革命を活用して、「人」によるインプットなしに機械間だけで学習して安定生産を保つ「静的な工場」を目指しているのに対し、TPSの本家であるトヨタ自動車及びDENSO等トヨタ系列企業では、「人」のイニシアティブと知恵を活かしたカイゼンで生産活動が日々進化し続ける「動的な工場」を理想とする。例えば、DENSOは自社のIoT対応状況を公開し、一般人に見学の機会を与えているので外部者も確認できるが、同社のIoT化は、生産システムをデジタル化し、企業情報システムにより工場の生産ラインを自動制御することが目的ではなく、「人」による生産ライン運転・管理を補助し、カイゼンにおいても「人」のイニシアティブと知恵を支えるツールとして受容されており、これまでリーン生産の限界を拡張してきたFA化やIT化と同様にTPSの限界を拡

張するものとして考えられている。

では、“Industrie4.0”では、如何なる生産システムが提案されているのだろうか。「機械仕掛けの神 (deus ex machina)」による全自動化された「無人化工場」を“Smart Factory”で追求しようとしているのだろうか。“Smart Factory”は次世代製造システムと期待されるものの、コンセプト段階から実装段階への移行は未だしであるため、実は100以上の定義が存在するとされるが (Moef et al. (2017)), 以下では“Smart Factory”の代表的な定義を行った Kagermann et al. (2013)¹⁾や、“Industrie4.0”のドイツ政府主導プロジェクトの性格に鑑み Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016) によりつつ、“Smart Factory”のコンセプトを概観しよう。

② 市場動向に即応する変種変量生産の実現

ドイツの“Industrie4.0”は、時々刻々変動する市場ニーズに迅速・的確に対応するマス・カスタマイゼーションを徹底するため、① IoT 技術、AI 技術、クラウド技術により生産システムをデジタル化し、経営層が市場動向に即応して修正する生産計画に柔軟かつ機動的に対応できるよう、企業情報システムにより生産ラインを自動制御することを提案している（企業情報システムの ERP・MES・PLC を垂直統合して生産ラインを制御）。生産システムのデジタル化を前提として、② 生産ラインの機械・装置に装着した情報端末・センサからリアルタイムで収集したデータをクラウド上の置かれた AI により解析、AI の導出した生産ラインの最適制御方法（各ラインの生産割当、生産順序、治具・工具・人員配置、段取替え）に従い生産ラインを

1) “networks of manufacturing resources (manufacturing machinery, robots, conveyors and warehousing systems and production facilities) that are autonomous, capable of controlling themselves in response to different situations, self-configuring, knowledge-based, sensor-equipped and spatially dispersed and that also incorporate the relevant planning and management system” (Kagermann et al. (2013), 20).

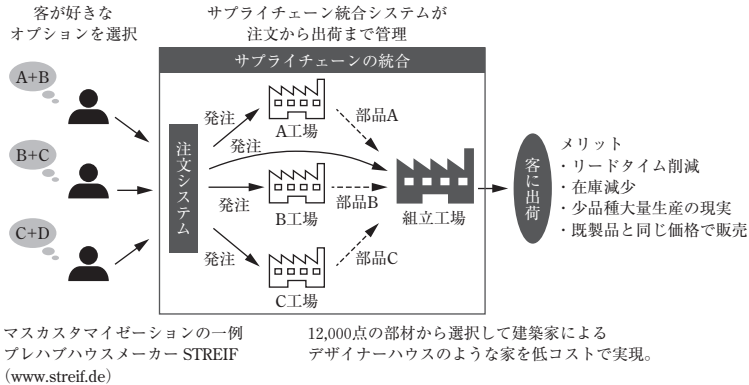
制御する、③生産ラインのカイゼンはトヨタ生産方式では人により担われるが、生産ラインよりリアルタイム収集したデータに基づきAIが生産ラインのカイゼン方法を解析し、その結果に基づいて生産ラインに改良を加える等を“Industrie4.0”では構想する。

また、自動車産業がトヨタ等の最終組立メーカーだけではなく多数の部品・素材メーカーと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に分業・協業により製造されており、如何なる企業も自社単独で部品・材料をすべて生産し最終製品を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、“Smart Factory”を個別工場・企業で完結させずにITシステムにより結合し、(トヨタ・グループの親企業・協力企業の協業のように)全体最適化を行う中核的企業の指揮の下に、複数の異なる主体が生産管理・在庫管理・購買調達管理・プロジェクト管理等を行うシステムを共有、あたかも一つの“Smart Factory”であるかのように協働することが必要となる。このため、“Industrie4.0”においては、各工場が“Smart Factory”化するだけでなく、個々の“Smart Factory”をネットワークでつないで工場群・製造企業群単位でネットワーク化し、さらには国全体を一つの“Smart Factory”化することまで提言している(図1参照)。

③ 生産のデジタル化とCPS

以上のように、ドイツは先進国製造業の差別化の方向として、市場の求める多種多様な商品を1ロットからでも柔軟・迅速に生産・出荷できるマス・カスタマイゼーションを掲げ、生産ラインをITシステムにより制御することで市場動向に即応した変種変量生産を柔軟かつ機動的に実行する“Smart Factory”を提言。さらにドイツは“Smart Factory”化を個別工場ですら終わらせず工場群・製造企業群をネットワーク化することまで構想してい

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



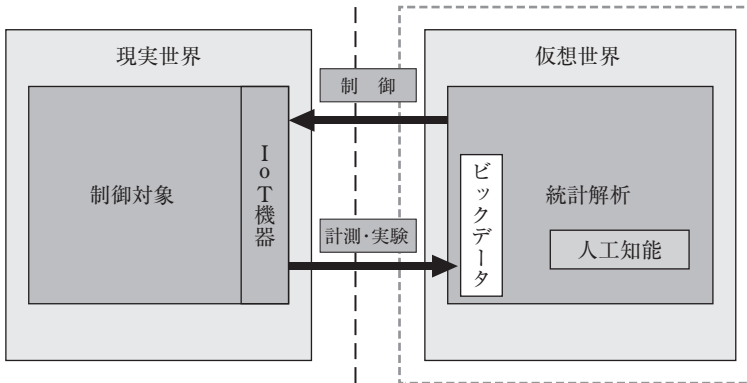
（出所） 西村健介 (2015)「南ドイツから学ぶインダストリー4.0の地方中小企業への影響」。

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、それらをセンサーやカメラで読み取って通信で結び、センサー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²⁾。このため工作機械等の機能を徹底

2) 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」

図2 CPSにおける現実界と仮想界の対応関係



(出所) 筆者作成。

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取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)³⁾。

とする(<http://www.jeita.or.jp/cps/about/>)。

- 3) 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

従来、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、既有的な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。

④ 「機械仕掛けの神」による生産システム

CPSによる生産ラインの運転管理の自動化とカイゼンを含む生産システム改革の無人化は、生産ラインのIoT化により生産関連ビック・データを収集できれば、現実世界と同一の（鏡像ともいうべき）仮想世界を構築でき、生産技術部門が自己の知識・ノウハウをプログラム化し、AIがそのプログラムに基づいて仮想空間においてシミュレーションを無限に繰り返せば、生産システム改革の最適解が得られるはずであるとの確信に立っている。

カイゼンとは問題発見と解決の繰り返しであるが、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある（最後まで残る）ため、TPSでは、まずは生産現場が課題解決を試み、製造装置・システムの開発、生産ラインのレイアウトの変更など生産現場だけでは解決できない場合には、生産現場と生産技術部門が協働することでソリューションを創造してきた。生産システム改革の「課題発見→解決

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。

方法模索→解決方法試行→問題解決」のサイクルにおける生産技術部門と生産現場との役割分担と協働関係は CPS の導入により終わるのだろうか。仮に，“Industrie4.0”を推進する一部が考えるように、生産ラインの IoT 化により現実世界と同一の（鏡像ともいうべき）仮想世界を技術的に構築できるのであれば、生産技術部門は生産現場に依存せずに生産システム改革を実行できるだろう。

しかしながら、IoT 化された生産ラインにおいて、製品・設備に装着された IC タグやバーコードからセンサやカメラで読み取られるデジタル情報とは、現時点における生産技術部門の認識・理解において必要と考えられるデータを選別して取得しているに過ぎず、現在の生産技術では認識されていない、認識されていても重要性が認められていないデータは一切捨象されてしまう。このため、CPS において構築される仮想空間は如何に現実世界と近似していても、現実世界と同一ではあり得ず、データ取得の時点で一定の生産技術観に基づいてデータを取捨選別していることから、生産技術観に即した形で現実世界が造り直されており、CPS の仮想空間は到底現実世界と同一ないし鏡像ということとはできない。

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

ノウハウを有する者でなければ、何が生産効率向上に寄与するかを判断することは難しい。

したがって、CPSによる生産ラインの運転管理の自動化とカイゼンを含む生産システム改革の無人化は、生産技術者の大いなる「夢」であり、技術的可能性を追求する価値があることを認めるとしても、製造実務上は「機械仕掛けの神」による生産システム改革と評価せざるを得ない。生産技術部門が自己の知識・ノウハウをプログラム化しAIが生産関連ビッグ・データに基づきシミュレーションを無限に繰り返しても、生産効率性向上に実効性のある生産システム改革を考案できるかは疑わしく、それは現実界におけるカイゼンを含む生産システムの在り方を無視するものと考ええる。

⑤ 欧米メーカーが「無人化」を目指す事情

生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場で運転管理する者でなければ不可能な面がある(最後まで残る)以上、生産システム改革は生産現場と生産技術部門の協働により進める必要があることは自明の事に思われるが、欧米メーカーは敢えて生産システム改革の自動化(無人化)を目指すのだろうか。2.(3)で、TPSは人的要素が導入の最大のボトルネックであることを指摘した。

Stone (2012)によれば、欧米企業がTPS導入を試みた時期(1997~2000年)、欧米企業経営陣が自社組織にTPSを理解させ組織改革する手助けとして、「リーンの思考」(Womack and Jones (1996))の解明を試みる論文・著作が多数発表・刊行されTQM, JIT等に関する分析がなされたが、これらと並んで多数刊行されたのは、日本型労働組織・慣行に根差すTPSを、日本企業とは労働組織・慣行を異にする欧米企業に移植する場合に如何なる摩擦を惹起するかを論じたものだった(Cappelli and Rogovsky (1998); Mersha and Merrick (1997); Stewart (1998))。

結局、TPSはDrucker(1971)等による認知から半世紀が過ぎたにもかかわらず、日本と欧米等の労働組織・慣行の違いを乗り越えて海外企業への完全移植に成功したケースはいまだ報告されていない。学術的にも、TPSの組織原理化に向けた人的資源管理のあり方について研究が試みられているが(Stone(2012); Mann(2005); Liker(2007); Liker and Hoseus(2008)), 見るべき成果は上がっていない。

このためドイツが市場動向に即応するマス・カスタマイゼーションを先進国製造業のサバイバル策として追求する中、欧米ではTPSは優れた生産モデルとして敬意を集めながらも、変種変量生産に対応するための唯一「解」として認識されなくなっている。「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」を実現できない欧米企業が、IoT技術、AI技術により生産システムをデジタル化し、市場動向に即して修正された計画に対して生産工場が柔軟かつ機動的に対応できるよう、企業情報システムが生産ラインを自動制御する“Smart Factory”に向かうのは自然なことであり、生産システム改革において自動化(無人化)が彼等には一つの解となり得るのであろう⁴⁾。

いずれにしても、CPSによる生産ラインの運転管理の自動化に関して

4) 欧米メーカーでは、生産技術部門の技術者と生産ラインの技能者が直接的に摺合せを行うことはなく、優秀な生産技術者が「こうあるべきだ」という設備や生産ラインを考え、現場の技能者はそれを使うだけであるのが通常で、仮に生産ラインで何か問題があったとしても、それを解決するのは生産ラインの運転管理者ではなく生産技術者の仕事であり、両者の権限・職務は截然と分けられ雇用契約上も相互に侵犯することは禁止される。これに対して、日本メーカーでは、生産技術部門の生産技術者と現場の技能者が協働して、より良い製品を生み出すために議論を重ね、工程改革・生産設備レイアウト改善など具体案を「摺合せ」により取りまとめ、量産準備段階で「作り込」を行い、量産活動に入っても、現場が生産設備をより効率的に使いこなす、さらに良いものを作るためカイゼン提案を行うことが要求される。このため、欧米メーカーは、トヨタ自動車等においてTPSの根幹を成す「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」の組織化に成功していない。

は、「4. TPS とオートメーション化」で後述するように TPS でも1970年代以降「自動化」は大きな柱となっており、IT技術の発展に応じて自動化を進めてきた。さらに、現在は TPS でも IoT 技術と AI の活用により生産ラインの運転管理の「省人化」を進めようとしていることから、TPS と“Smart Factory”で方向性に大きな差異はないかもしれないが、カイゼンを含め生産システム改革の無人化を徹底する、“Smart Factory”が TPS を超克すると考える論者は、生産システム改革における生産技術部門と生産現場との協働の必要性と課題発見・解決における生産現場の重要性を十分理解しておらず、笑劇であるが「機械仕掛けの神」の生産システムを期待しているのではないだろうか。次項(2)(3)では、TPS の代表的メーカーである DENSO において生産システム改革が如何に実施されているかをケース・スタディし、この点を明らかにする。

(2) DENSO における変種変量生産の追求

1985年以降の持続的円高に対応して、日本メーカーは国内工場を大量生産から多品種少量生産にシフトさせ、2000年代も円高と市場ニーズの多様化・細分化に対応して国内工場を多品種少量生産から変種変量生産に対応させてきた。“Industrie4.0”の提言を俟つまでもなく、変種変量生産が日本製造業にとり国内ものづくり基盤の維持の成否を握る鍵となった次第であるが、小島(2004)によれば、DENSO も1990年代以降国内製造ニーズの変化に対応して、生産技術部門と生産現場の協働により生産システムを大量生産から多品種少量生産、さらには変種変量生産に改革してきた(次頁四角囲み参照)。以下、DENSO の生産システム改革に関するケース・スタディを通じて、生産システム改革は生産技術部門による問題発見と課題解決を通じてのみ進むのではなく、むしろ、生産現場の日常のカイゼン努力を通じた問題発見と課題解決がベースとなって、生産技術部門と生産現

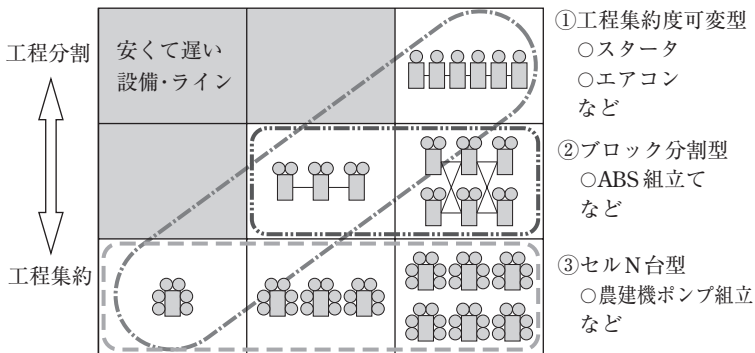
場が協働することで抜本的改革が可能となることを示す

| | |
|--------|------------|
| 1970年代 | 単種多量対応 |
| 1980年代 | 多種対応 |
| 1990年代 | 多世代対応 |
| 2000年代 | 量変動対応、環境対応 |

① DENSO の「量変動生産システム」

2000年代以降、自動車メーカーは国内集約生産・輸出に代わり「地産地消」を原則とするグローバル生産体制を構築したが、自動車電装部品メーカーの、DENSO もそれに対応してグローバル生産するに至ったため、国内生産拠点はかつての安定的な製品需要増を期待できなくなる。加えて、2000年代以降、ニーズの細分化に対応した車種増加と新興国市場の成長に応えるべく、主力製品のカーエアコンやエンジン関連ユニットの種類が急増、かつ、自動車の売行きが車種毎に大きく変動するようになったため、製品の生産量と生産期間の予測は極めて困難化した。

図3 DENSO における量変動対応の生産システム類型



(出所) 小島史夫 (2004) 「デンソーにおける生産システム技術の現状と展望」『デンソーテクニカルレビュー』Vol. 9 No. 1, 9頁。

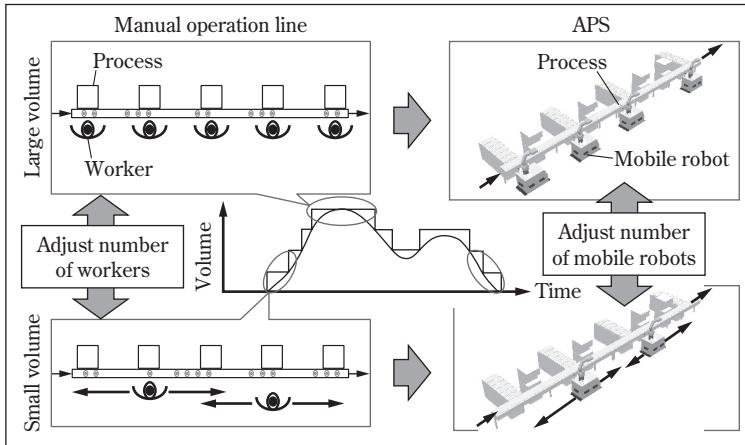
経営環境の変化に対して、DENSO は、特定製品の生産量を一定に保とうとするのではなく TPS の柱である pull 型生産を徹底、生産ラインの稼働率を高水準で維持しつつ多数品目を生産する変種変量生産を採用する（黒川（2007））。ただし、DENSO の主力工場の多くは高度成長期に起源を持ち、1990年代、DENSO は高度成長期の少品種大量生産に適合的な生産ラインを生産現場が工夫して多品種少量生産に転用していたが、変種変量生産にまで転用することは生産現場の工夫・努力の域を超えたため、生産部品の特性に応じて三方式の生産ラインを開発する（小島（2004））。

② 3 種類の量変動生産システム

（工程集約度可変型）

第一に、工程集約度可変型は、生産量変動に応じて工程分割度を変え、最小限の装備で生産システムを構成することを意図しており、DENSO で

図4 移動ロボットを活用した自律分散型生産システム



（出所） 光行恵司（2004）「IT を活用した生産システム開発の効率化・迅速化・生産システムシミュレーションを用いたリスクアセスメントと分散型開発のための新たなシミュレーション環境」『デンソーテクニカルレビュー』Vol. 9 No. 1, 123頁。

は、スタータ組立ライン、エアコン組立ライン等で実用化されている。

例えば、DENSO 安城製作所のスタータ組立ラインでは、移動機能を持つロボットを活用し複数工程を受け持たせ、生産量の増加時には、工程分割度を高めて多数のロボットを投入、各ロボットがより少ない工程に専念することで生産量増に対応。一方、生産量減少時には、工程分割度を低めて投入ロボット台数を削減、各ロボットが多数工程を担当することにより生産数量減に対応している。

さらに、同ラインでは、移動ロボットが、自ら前後の工程の混み具合や他の移動ロボットの状態を検知し、必要に応じて移動する制御方式を導入しており、仮に、前後の工程で作業すべき製品が滞留している場合はロボットがその工程へ移動して協力する「自律分散型生産システム」を実現した。

(セルN台型)

第二に、DENSO もセル生産方式を導入している。1990年代、日本の電機メーカーは円高に対応して東南アジアなど低賃金・ドル連動通貨の海外地域に量産工場を移転し、国内生産拠点には、高付加価値品の多品種少量生産や国内需給変動に対応する補完的な生産の役割を担わせるようになったが、それに伴い、製品ライフサイクルの短い製品の多品種少量・変種変量生産に適合したセル生産方式を国内工場に導入した。1990年代後半以降、セル生産方式は電機以外の製造企業にも普及していくが、自動車部品メーカーの場合、自動車部品の製品ライフサイクルは家電製品ほど短くはないため、電機の人手に依存するセル生産方式は高コストで適格的ではなかった。

そこで、DENSO では、各セルに集約した全生産工程を人手ではなく自動化したセル生産システムを開発、需要動向にはセル・ユニットの数を増減させることで対応し、中少量の農建機ポンプ組立ラインに導入した。セ

ルの数を増減させることにより需要動向に対応することに「セルN台型」の名称は由来する。セルN台型生産ラインは、セル単位での自己完結性が高く、小規模単位での生産量変動にも容易に対応できる反面、各セルにいずれの製品の生産を担当させるかを決めてしまうと、受注状況に応じて製品毎の生産数量を細かく調整することが難しく、場合によってはセルの稼働率が低いままに生産対応しなければならない事態も珍しくはなく、TPSで最大限回避すべきとされる「ムダ」の削減が課題とされている。

(ブロック分割型)

第三に、ブロック分割型は工程集約度可変型とセルN台型の中間を狙うもので、工程フローを複数ブロックに分割、ブロック単位で自己完結性を高め、生産ラインの繁忙に応じてラインの垣根を超えてブロックを任意に組み合わせることで、生産量変動に柔軟に対応することを意図している(前掲図3において生産ラインを構成するブロックがそれぞれ属するラインの垣根を越えて生産融通していることを見られたい)。電子製品、IC製品等の汎用性の高い市販設備を有効活用する場合に適しており、DENSOでは、ABS (Anti-lock Braking System) 組立ラインに導入されている⁵⁾。

5) ABSは、生産数量が月に5~11万台と激しく変動し、新製品が次々に市場に導入される多品種製品。効率的な開発・生産のため部品共通化が進められているが、製品毎に部品使用数が異なるため、高効率な混流生産の実現が課題。1998年、DENSOは大安製作所のABS生産においてブロック分割型ラインを開発導入、①生産ラインの構成ブロックの自動化を徹底するため、手作業区域と自動化区域を完全に分離、中間バッファの存在を容認、②生産ラインの垣根を越えたブロック間の生産融通の的確を期すため、各生産ラインの実力に応じた稼働時間を設定、余剰能力に応じた生産融通を実現しブロックの稼働率を向上、③生産ラインを構成する工作機械等の部分的な刃具交換等による製品種対応能力の向上を図った。なお、大安製作所のABS生産ラインは、生産量・生産種の変動に応じて設備の組替えを行うことにより、一本の専用ラインに変えることも可能な工夫がなされ、ブロック分割に工夫することで生産ラインを止めずに小ライン単位でカイゼン・改造するこ

(3) 変種変量生産を支える「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」

以上の「量変動生産システム」は、DENSOの生産技術部門が単独で企画・開発したものではなく、「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」との協働によるものであった。DENSOは西尾製作所を工場IoT化のモデルとし一般にも公開しているが、西尾製作所において生産技術部門と現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」はどのように協働して生産システム改革を推進しているのだろうか。

① 西尾製作所のカーエアコン生産ライン

西尾製作所は1970年に操業開始したDENSOの主力工場の一つであり、カーエアコン、ラジエータ、電子制御式ディーゼル・ガソリン燃料噴射装置等を製造している。建物面積61.6万 m^2 （敷地128.1万 m^2 ）の広大な敷地の中に、カーエアコン生産ライン、ラジエータ生産ライン等が配置されているが、カーエアコン生産はアルミニウム部品を製造する「ダイカスト鋳造ライン」と内製部品と外部調達部品を組み立てる「部品組立ライン」から構成される。

ダイカスト鋳造ラインは①アルミ合金の溶解炉での溶解、②ダイカストマシン多数台による鋳造、③鋳造部品の5,000個毎での熱処理炉による処理、④切削加工、⑤洗浄、⑥耐久性向上のためのアルマイト処理、⑦検査の工程から成る⁶⁾。西尾製作所が操業を開始した1970年当時、

とを可能とした。これにより、DENSOは、ABS生産において、トランスファーラインと同等の生産性と品質管理の容易性を有し、多様な製品を混流生産し、生産量の変動にも柔軟に対応できるラインを開発。

- 6) ダイカスト鋳造は、離型剤塗布、給湯、射出充填、凝固取り出しのサイクルで行なう部品加工であり、「溶けたアルミを金型へ高速・高圧で充填し、複雑形状を有する部品を造る加工法」。成形のサイクルタイムが短く生産性が良い反面、金型分割面（パーティングライン）に発生する鋳バリ除去を目的としたバリ取り・ショットブラストの工程が必要。一般的な生産工程は、鋳造・トリミング・バリ取り・ショットブラスト・外観検査・出荷から成

DENSO の主要取引先であるトヨタ自動車は国内大量生産・輸出をビジネス・モデルとしていたが、西尾製作所でも少品種大量生産を想定して生産ラインが設計され、ダイカスト鑄造ラインでは「規模の経済」によるコスト・ダウンが追求された。

ダイカスト鑄造ラインの各工程に設置された機械は規模が大きく、特に溶解炉は高さ 8 メートルもあり 1 時間に 2 トンのアルミ合金を溶かす能力があった。それはダイカストマシン数十台をフル稼働させてようやく使い切れる量であり、それに応じてダイカストマシンも油圧式の大型機が導入され、使用する金型は質量 4～5 トンもあり金型交換は手間と時間がかかる高負荷の作業であった。このため金型交換をなるべく避けてアルミニウム製品を造り置かざるを得ず、機械規模の大きさと大量の仕掛品の保管のため、各工程は別の建屋に分散し生産ラインが分断し、工程前後に大量の物が中間在庫として滞留、工程間の製品運搬のためのロス時間が多い難を抱えていた。

また、川下工程にあたるカーエアコンの部品組立ラインでは、生産ラインはベルト・コンベアにより川上から川下に向けて連結され、長大な組立ラインを運行・管理するために多数の作業員を配置し、少品種大量生産に適合的な生産体制を構築していたが、それはダイカスト鑄造ラインにおけるアルミニウム部品の大量生産と平仄の取れたものだった。

② 多品種少量・変種変量生産への転換における問題点

西尾製作所のカーエアコン生産ラインは少品種大量生産には適合的だったが、2000年代以降、自動車メーカーが自動車の車種増大と新興国市場の成長に対応して部品メーカーに多品種少量、変種変量の生産供給を求める

り、大型設備を使用した大ロット生産が基本。さらに、要求品質から硬さ・切削性の向上、寸法の安定化を目的とした T 5 処理、部品強度の増強を目的とした T 6 処理などの熱処理が成形後に必要な部品も多くある。

よくなると、生産ラインを変種変量生産に適合したものに改革することが必要となる。

TPSでは、平準化生産がジャスト・イン・タイムにおいて課題であり、製品を1個ずつ流れて作り、種類の異なる製品を1個単位又は1箱単位で切り替える必要がある。1個の製品が前工程から後工程へと停滞せず、後戻りせず、すいすいと流れる「工程の流れ化」が理想であるが、カーエアコン生産ラインで「工程の流れ化」を実現するには、川上工程のダイカスト鑄造ラインと川下工程の部品組立ラインの双方において「工程の流れ化」を実現し、かつ「同期化」しなければならない。当初、DENSOは部品組立ラインにフォーカスして、ベルト・コンベアにより連結された長大な生産ラインを廃止して複数の生産ラインを設置、各ラインに「工程集約度可変型」システムを導入して「工程の流れ化」を行ったが、部品組立ラインの「工程の流れ化」だけではカーエアコンの変種変量生産は実現できない。

すなわち、川上工程のダイカスト鑄造ラインは機械設備があまりに巨大であり、(a)工程が別々の建屋に分散して生産ラインが分断、(b)品種に応じた金型交換が機動的に行えないため製品を造り置きするため、工程前後に大量の物が中間在庫として滞留、(c)分散した工程間を滞留した部材・製品を運搬するロス時間が多く、カーエアコン生産工場全体としては「製品が売れるスピードで生産」「停滞・淀みのないリーン生産」とはほど遠い状況に陥っていた。

③ 西尾製作所の部品組立ラインの生産改革

同期化の観点からは川上工程・川下工程で同時に「工程の流れ化」に取り組む必要があるものの、ダイカスト鑄造ラインは装置産業であり設備・生産ラインの変更が容易でないことから、DENSOはまずは川下工程の改革に着手する。

従来、部品組立ラインはベルト・コンベアにより川上から川下に向けて連結され、長大なラインを運行・管理するために多数の作業員を要していたが、西尾製作所では、長大な生産ラインに代わり複数の生産ラインを設置して多品種少量生産を可能とするとともに、各生産ラインに「工程集約度可変型」システムを導入、カーエアコンの組立を繁閑に応じて生産ラインの長さを自由に変えて変種変量生産への対応を図った。すなわち、生産ラインの約 8 割を構成する 6 工程をロボット導入により自動化、生産量が少ない時は、1 台のロボットが 6 工程の全作業を担当するが、生産量が多い時には、1 台のロボットが担当する工程数を減らしロボットを連結して流れ作業化することにより、生産量の変動に対応するシステムを導入した。これらは生産技術部門主導の改革であるが、改革に先立ち生産現場が大量生産に適合した既存ラインを工夫して運用し多品種少量生産を試みた結果、生産ラインそのものを短縮し複線化しない限り多品種少量生産に対応できないことが実証されたことを受けてのものだった。

そして、現場が新しいシステムを運転管理していく過程で様々な改善改良がなされる。当初、8 名のオペレータが 6 工程で設備 26 台、ロボット 26 機を管理し、生産する品種に応じて段取替えを行っていたが、第一に、設備の大半は従前の大量生産を目的とする生産ラインからの転用であり、新たな短縮化されたライン向けに設備相互間で規格・仕様が統一調整されていないため、生産品種の変更や工程伸縮に応じて段取替えを行おうにも労働負荷が過長である。第二に、26 の設備は製造元（工作機械メーカー）、製造時期、導入目的等が異なるため（加工物を前工程から受け取り、あるいは後工程に渡そうとしても）接続性が悪く、1 個流しを行おうにも設備間で加工物一つ一つについて接続調整を行わなければならないことが生産現場の日々の TQC 活動から判明する。これらは生産現場で生産ラインを運転管理しなければ得られない発見であり、生産技術部門は、生産現場の発見を

受けて、6工程の自動化に合わせて設備のモジュール化と設備間の接続性向上に取り組み段取替えの負担を軽減、8名を要していたオペレータを4人に減じて運転管理する体制を考案する。

この運転管理改革においても「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」が生産技術部門と協働している。オペレータ4人体制に切り替えて、全長25mの生産ラインを従来の半分の人員で管理することで、生産ラインにおける問題発生の認識が遅れる事態に備えて、予防的にロボットに視覚センサを組み込み部品間違いの発生確率を低下させるだけでなく、万が一、生産ラインで問題が発生した場合でもオペレータが直ちに発生を認識できるようパトライトを各所に設置したが、これには生産現場の日々の不具合対応の経験が活かされている。また、西尾製作所では、現場のインシアティブとして、設備装置の停止、部品供給の停止の場合、4人のオペレータが効率的にチームとして対応できるよう主任オペレータが効率的な作業順位を決定し、アンドンにより作業指示を出せるようシステムを構築、4人のオペレータが常に同期対応できる工夫を実施しているが、これは生産技術部門ではなく生産現場の自主的なカイゼン活動の賜である。

なお、自動化対象となった6工程以外のワイヤー切断工程、電気リレー検査工程、パッキン貼付工程に関しても、DENSOでは、人とロボットが協働するシステムを開発導入し、多品種の変動生産への対応力を高めた。DENSO西尾製作所は、以上の取組を通じて、部品組立ラインにおける作業者の約7割削減に成功するとともに、生産コストの3割削減を達成した。

④ 西尾製作所のダイカスト鑄造ラインのコンパクト・ライン化

しかしながら、西尾製作所においてカーエアコンの変種変量生産を行う上でボトルネットだったのは川上工程のダイカスト鑄造ラインであり、機械設備が巨大過ぎるため(a)工程が別々の建屋に分散して生産ラインが分

断、(b) 金型の機動的な交換の難しさから造り置きするため工程前後に大量の中間在庫が滞留、(c) 分散する工程間の部材・製品運搬のロス時間等は構造的問題であり、現行ラインを前提としたまま、現場のカイゼン取組のみにより多品種少量生産を実現することは無理だった。

このため DENSO は、① 変種変量生産には巨大過ぎる溶解炉、ダイカストマシン、熱処理炉のサイズ適正化、② サイズ適正化に合わせて、別々の建屋に分散している溶解炉、ダイカストマシン、熱処理炉の一体化により工程集約し、生産ラインを多品種少量生産に適合したものに完全に作り変えるコンパクト・ライン化 (1/N 化) に取り組むこととし、変種変量生産に対応して少量ずつの鑄造が可能な「小型低圧ダイカストシステム」を開発 (従前の溶解炉は高さ 8 m であったのに対し小型ダイカストシステムは高さ 1.8 m)、2008 年、西尾製作所にダイカストマシンの手前に小型溶解炉、直後に熱処理炉を直結させた「ワンセル構造」システムを導入した⁷⁾。

DENSO は小型ダイカストシステムの開発と同時並行して後工程の切削機、洗浄機、アルマイト熱処理機も小型化。従来、工程毎に複数の建屋に分散していた鑄造ラインを一つの建屋に収納することに成功。従来の大型

7) ダイカストマシンは高速かつ高圧で金型に溶けたアルミニウムを流し込み成形する設備。従来のラインでは、溶けたアルミニウムをフォークリフトでダイカストマシンまで運ぶ間に温度が 750℃ から 650℃ に降下して粘度が増し、内部に鑄巣 (アルミニウムが液体から固体に変わる過程で収縮により起こる「ひけ巣」) が生じやすくダイカスト品の強度・気密性がばらつくため、溶けたアルミニウムを金型に流し込むプロセスで高圧力をかけ鑄巣を防止する必要があった。ダイカストマシンの大型化は大量生産に加えて耐高圧剛性を獲得するためでもあったが、ワンセル型ダイカストシステムでは、① 溶解炉からダイカストマシンへの給湯時にアルミニウムの温度を低下させず移動させるため、ヒータを内蔵し保温できる電磁ポンプを開発、② 鑄巣の原因となる金型内の空気を真空ポンプで排気する技術、③ ガス発生量の少ないドライ離型剤の使用によりガス成分の巻込み量を低減する技術を開発、従来比 2 分の 1 の鑄造圧力での加工を実現、システム小型化に成功した。

溶解炉ではアルミ・インゴットは生産量とは関わりなく5本ずつ投入しなければならなかったが、ワンセル構造ダイカストシステムでは、小型溶解炉でインゴットを少量ずつ（100g単位）溶かし、ダイカストマシンに必要な分だけを供給することが可能となり、かつ、成形品は直ちに熱処理炉に投入できるようになった。

DENSOでは、「ものづくりを知る人」が部門を超えて協働することを製造活動の基盤としているが、西尾製作所のダイカスト鑄造ラインでの変種変量生産に向けた取組においても、生産技術部門主導の生産ラインのコンパクト・ライン化（1/N化）と並行して、生産現場がカイゼンによりダイカスト鑄造ラインの「停滞・淀み」の原因であった段取替え時間の短縮を実現する（なお、DENSOは「ものづくりを知る人」は生産技術部門、生産現場に限らず製品企画研究、営業等すべての部門に存在するとし、部門横断的な協働を求める）。

第一に、ダイカスト工程では、①油圧ホースの配管を一つ一つ接続しなくとも一度につながる配管構造に変える、②金型の調整位置についても、金型を不必要に持ち上げる必要がないように台車の高さと同様になるよう設定する、③女性にも金型が取り扱いやすいように金型の着脱を押し込み方式とするなどの改善を実施。

第二に、切削工程では、従来、金型の作業台への固定のために製造部品の替わる度に治具（クランプ）を交換していたが、すべての金型に共通のボス（製品の押し出しやネジ穴等の形成のために設けられた突起部分）を付け、作業台の所定の位置に嵌め込めば固定できるようカイゼンを実施（1.5時間を要した治具交換時間がゼロに）。また、生産ラインのレイアウトについて、従来、労働安全のためロボットの稼働領域が柵で囲われ、人はロボット柵を避けて大きく動き回らざるを得なかったが、人が接近するとセンサで探知したロボットが自動停止するシステムを導入しロボット柵を撤去、人の作

業動線を一直線にして作業時間・負担の軽減に成功した。

かかる生産技術部門と生産現場の協働により、DENSO は、新たに多品種少量・変種変量生産に適合したダイカストシステムを開発し、ダイカスト鑄造ラインを（工程とラインの短縮された）コンパクト・ラインに作り直すことで、生産コスト▲33%減、設置面積▲80%減、エネルギー消費量▲50%減を達成する。鑄造でありながら「一個流し」の考え方を取り入れてタクトタイム約4秒を実現、カーエアコン生産ラインにおいて「製品が売れるスピードで生産」「サプライ・チェーンのリードタイム短縮」「停滞・淀みのないリーン生産活動」を実現する上でボトルネックとなっていたダイカスト鑄造ラインの改革に成功した。

（4）西尾製作所における生産システム改革

(2)(3)で示したように、西尾製作所はカーエアコン生産ラインを大量生産から多品種少量、変種変量生産に改革する過程で、川上のダイカスト鑄造ラインをコンパクト・ライン化し、川下の部品組立ラインに「工程集約度可変型」システムを導入することで、多品種少量・変種変量生産に対応する上でクリアしなければならない「一個流し」を実現した。DENSO の「量変動生産システム」は、生産技術部門が「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」との協働により生産システム改革に取り組む過程で得られた成果をパターン化したもので、生産技術部門が演繹的に3種類の生産システムを発明し生産現場に導入したわけではない。この点、“Industry4.0”においてCPSによる生産ラインの運転管理及び生産システム改革の自動化が次世代製造モデルとする者とは、生産システム改革に対するアプローチが本質的に異なると評せる。

そして、カーエアコン生産ラインの変種変量生産への対応では、生産ラインの抜本的な再構築に至るまでに、先行して生産現場での「自主的に学

習し絶えずカイゼンを行う組織」による生産性向上に向けたカイゼン取組があり、生産技術部門はその取組で得られた知見を基にしてダイカスト鋳造ラインのコンパクト・ライン化のような生産ライン再構築を行っている。また、新たに生産ラインが再構築された後も、生産現場は新たに与えられた生産ラインを機械的に運転管理するのではなく、生産ラインが所期の生産性向上等の目標を達成できるように運転管理方法の見直しや段取替え等のカイゼンを行い、運転過程でシステムの瑕疵を発見すれば生産現場での対応を検討し実施し、仮に、それが生産現場レベルでの解決が至難ないし不可能な問題であることが判明すれば、直ちに生産技術部門を交えて対処している。

ここで銘記すべきは、生産現場が生産ラインの運転管理とカイゼン取組を通じて蓄積した知識・ノウハウを生産技術部門が尊重して生産システム改革を実行している点であり、生産現場の知識・ノウハウには暗黙知に属するものも多いことから、“Smart Factory”の世界では生産関連データとして取り扱われない（取り扱えない）ものも含めて DENSO では生産システム改革の基盤としている。生産システム改革へのアプローチという観点からは、“Smart Factory”が生産技術部門主導で上から進める生産システム改革であるのに対して、TPS に立つ DENSO では、生産現場と生産技術部門という二つの異なるセクションがそれぞれの立場から生産システムアプローチし、それぞれ蓄積した知識・ノウハウを交換・共有することにより、新たな生産システムの発展なり改革なりの可能性を協働して探って行こうとしている。

西尾製作所におけるカーエアコン生産ラインの改革は一例に過ぎず⁸⁾、

8) 例えば、西尾製作所は HVAC (heating, ventilating and air-conditioning unit) (空調機能を集約したモジュール部品で、ヒータと送風、エアコンの各機能部分を一体化したもの) 成形工程についてもコンパクト・ライン化を実施。

トヨタ系列メーカーとして TPS に立脚する DENSO では、2000年代以降国内製造ニーズの変種変量生産へのシフトに対応して生産システム改革を行ってきたが、いずれの生産システム改革も生産技術部門主導で問題発見がなされ課題解決が図られるのではなく、生産現場の日常のカイゼン努力を通じた問題発見と課題解決をベースないし出発点として（生産現場発）、生産技術部門と生産現場がそれぞれ蓄積した知識・ノウハウを交換・共有することで、両者が協働して改革を可能としている。

(5) ま と め

欧米メーカーでは、生産技術部門の技術者と生産ラインの技能者が直接的に摺合せを行うことはなく、優秀な生産技術者が「こうあるべきだ」と

大量生産を前提とした生産ラインを多品種少量生産に転用していたため、小ロット生産でも大型金型交換が必要となり、金型交換に30分間（チャック（15kg）交換 5 分間、冷却ホース（10～20kg）交換 5 分間、金型クレーン（13t）交換15分間、金型内清浄作業 5 分間）を要し、カーエアコン生産ラインと同様に成形工程と組立工程を同期化できない問題を抱えていた。DENSO は、工程集約と設備小型化により、エアコン部品の生産量の変動に応じて原料を適量供給できるよう小ロット化。金型交換についても（金型小型化だけでなく）、自動段取りシステムの導入、（人が重い金型を押し出さずとも）使用を了した金型を、次に使用する金型が押し出す機構の採用、チャック交換・冷却ホース交換の自動化により交換時間を 1 分間と大幅短縮、中間在庫が成型工程で滞留する状況の解消に成功した。また、金型に成形過程で付着する樹脂の被膜を除去する作業が不可欠であり（放置しておくと製品が茶褐色となり外観が劣化するばかりか形状にも欠陥が発生）、従来は被膜除去に手間がかかっていたが、金型ヒーターランナー部分が265～280℃など高温とならず220℃に維持できると被膜が人手でも容易に剥がせることを発見、そこで放熱リングを装着することで被膜を簡単に除去できるようにし、成型工程に要する時間の短縮と不良品発生抑制に成功した。その他、西尾製作所では、段取り作業に関して細かいカイゼンを積み重ね、金型交換に要していた時間を年81日から年40日へと大幅に改善。以上の取組を通じて、中間在庫の解消、成型工程と組立工程の同期化を実現している。

いう設備や生産ラインを考え、現場の技能者はそれを使うだけであるのが通常で、仮に生産ラインで何か問題があったとしても、それを解決するのは生産ラインの運転管理者ではなく生産技術者の仕事であり、両者の権限・職務は截然と分けられ雇用契約上も相互に侵犯することは禁止される。これに対して、日本メーカーでは、生産技術部門の生産技術者と現場の技能者が協働して、より良い製品を生み出すために議論を重ね、工程改革・生産設備レイアウト改善など具体案を「摺合せ」により取りまとめ、量産準備段階で「作り込」を行い、量産活動に入っても、現場が生産設備をより効率的に使いこなし、さらに良いものを作るためカイゼン提案を行うことが要求される。

かかる日本と欧米等の労働組織・慣行の違いから、TPSがDrucker (1971) 等による認知から半世紀が過ぎたにもかかわらず、欧米メーカーは、トヨタ自動車等においてTPSの根幹を成す「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」の構築に成功していない。学術的にも、TPSが存立基盤とする「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」を欧米企業等で如何に構築するかに関する探究が求められているが、日本企業と労働組織・慣行の異なる欧米企業にTPSを移植した場合に惹起する摩擦に関する論文・著作はあまたあれども、TPSの組織原理化とそのための人的資源管理策に関しては見るべき成果が上がっていない (Stone (2012); Mann (2005); Liker (2007); Liker and Hoseus (2008))。このためドイツが市場動向に即応するマス・カスタマイゼーションを先進国製造業のサバイバル戦略として追求する中、TPSは生産システムの歴史にも名を残すような優れたモデルとして敬意を集めながらも、海外企業では変種変量生産に向けた唯一「解」として認識されなくなっている。

確かに「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」を実現できない欧米企業が、IoT技術、AI技術、クラウド技術により生産システムをデジタ

ル化し、市場動向に即して修正された生産計画に対して生産工場が柔軟かつ機動的に対応できるよう、企業情報システムが工場の生産ラインを自動制御する“Smart Factory”に向かうことは自然なことであるが、それにより生産システム改革のプロトコルが変化するとは考え難い。すなわち、生産ラインの抜本的な再構築等に至るまでに、生産現場での「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」による生産性向上に向けたカイゼン取組が先行し、生産技術部門はその取組で得られた知見を基にして生産ラインの再構築を実施するのではないだろうか。また、新たに生産ラインが再構築された後も、生産現場は生産ラインを機械的に運転管理するのではなく、生産ラインの運転管理方法の見直しや段取替え等のカイゼンを行い、仮にシステムに瑕疵を発見すれば、まずは生産現場での対応を検討し、瑕疵が生産現場レベルでは解決困難であることが判れば、生産技術部門が協働して対処するであろう。AIによる生産システム改革の自動化なりカイゼンの自動化は、生産システム改革の「課題発見→解決方法模索→解決方法試行→問題解決」のサイクルにおける生産技術部門と生産現場との協働を無視しており、製造実態から乖離していると言える。

4. TPS とオートメーション化

— DENSO における IoT への道 —

“Smart Factory”を次世代製造モデルとする向きの一部に、TPSは「現代のICT技術の可能性を利用」しておらず、マス・カスタマイゼーションと変種変量生産の対応に限界があるとする者がいるが、それは事実誤認ではないだろうか。TPSをゼロから創造した大野耐一によれば、TPSは「ムダの排除」のために「自動化」を一つの柱としており（Sugimori et al. (1977)；Ohno (1988)）、改めて他から「リーン・オートメーション（Lean Automation）」を提言されるまでもなく、トヨタ自動車及びトヨタ系列企業

は1970年代のFA化以降一貫して工場システムのIT化に取り組んできた。

例えば Kolberg et al. (2017) は“Industrie4.0”の成果として独 Wittenstein 社の設備稼働モニターを事例紹介しているが、DENSO では、設備稼働モニターは2000年代末に開発導入済みであるように、“Smart Factory”において新機軸とされる、IoT 技術と AI を活用した自動化は「設備稼働中の常時監視」「異常の予知」「異常発生時の迅速な対処」「異常の根本原因究明」「設備データ保守管理」等のいずれにしてもトヨタ自動車及びトヨタ系列企業は2000年代以降導入済みであり、それを“Smart Factory”が後追いつする形となっている。現在、TPS では2000年代に開発導入した自動化システムを IoT 技術と AI 技術を活用して再構築しようとしているところであるが、その結果、“Smart Factory”にせよ TPS にせよオートメーション化の取組は技術的に差異のないものとなっている (Wagner et al. (2017))。

とすれば“Smart Factory”と TPS に IoT 化に関して本質的な差異はなく、後発システムの“Smart Factory”は長期的に TPS に収斂していくのではないと思われるが、両者の IoT, AI, クラウド技術に対するアプローチは 2. 及び 3. で既に見たように出発点を異にする。“Smart Factory”が CPS による生産ラインの運転管理及び生産システム改革の自動化を実現すべく IoT 化に取り組むのに対し、TPS は IoT 化を「ムダの排除」による生産効率向上のツールの一つと捉え、生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」が生産システム全体を統合するという立場を崩さない。そして、“Smart Factory”が個別工場・企業の枠を超えて社会全体で「つながる」ことを観念しているのに対し、DENSO はあくまでも自己完結的に「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」の観点から IoT 化を進めようとしている。この製造思想の違いは長期的に如何なる差異を生むのか。

4. では、DENSO の「リーン・オートメーション」に関するケース・

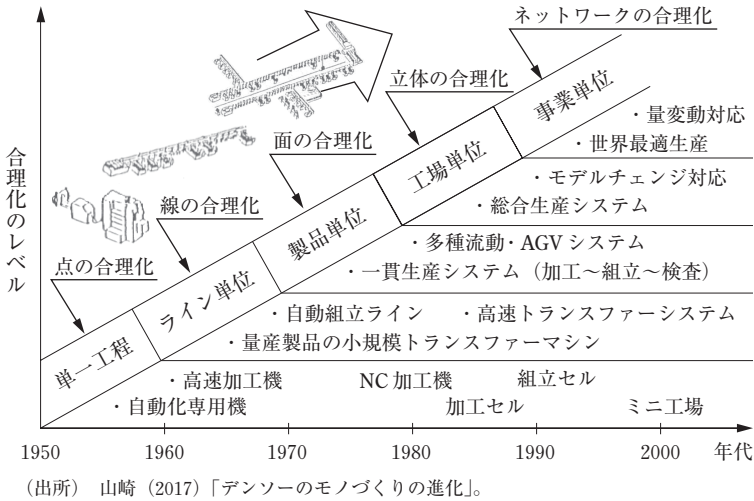
スタディを通じて、トヨタ自動車及びトヨタ系列企業は1970年代のFA化以降一貫して「リーン・オートメーション」に取り組んできており、IoT化についてもTPSの「ムダの排除」による生産効率向上の観点から自社の生産システムに組み込もうとしている事実を示す。TPSは「現代のICT技術の可能性を利用」しておらず、マス・カスタマイゼーションと変種変量生産の対応に限界があるとの一部の見解に反論するだけでなく、海外の先行研究には、TPSにおけるオートメーション化の取組実態についてケース・スタディしたものが乏しいことから（国内研究でもDENSO等特定メーカーのオートメーション化を取り扱ったものは限られる）、TPSにおけるオートメーション化への取組をケース・スタディした点に学術的貢献も認められるものと考えられる。

(1) 工場オペレーションのIT化（“Intelligent Automation”）

2. 及び3. で分析したように、DENSOは、国内製造ニーズが大量生産、多品種少量生産、変種変量生産と変化するのに対応し、生産技術部門と生産現場の協働により生産ラインを進化させてきた。同社の生産システム改革は、コンパクト・ライン化、生産ライン改革などの物的システムに関する工夫のみに向けられていたわけではなく、1980年代以降は工場オペレーションのIT化にも向けられ、製造現場のオペレータが長年の熟練と勘に基づき職人芸的に行ってきた品質管理・稼働管理にIT技術を導入することで、通常のオペレータもより高度な管理をより簡単にできるようなITシステム改革が実施された。

DENSOの自動化は1970年代に生産ラインの自動化（FA化）からスタート。生産ラインの自動化は「不良ゼロ」「高生産性」「ジャスト・イン・タイム」を課題として発展したが（図5参照）、生産ラインの自動化から工場オペレーションの自動化に進もうとしたところで、自動化の壁にぶつか

図5 DENSOの自動化に向けた取組



る。第一に、生産ラインの個別機械・設備をコントロールする制御層ではコンピュータ制御による自動化が進んだものの、実行層での品質管理・稼働管理の自動化が進まず、制御層とのシステム連携も人手に依存したため、生産系・情報系でシステムがバラバラだった。第二に、メーカーや製造年代が異なる工作機械、ロボット等の制御装置はPCとの接続仕様が標準化されておらず、機械・装置毎に専用ソフトウェアの開発が必要だったことから、1990年代、実行層における品質・稼働管理の自動化は遅々として進まず、工場オペレーションの自動化は足踏みすることとなった。

こうした中、1998年以降、メーカーや製造年代が異なる工作機械、ロボット等の制御装置を相互接続するための標準開発が日本ロボット工業会主導でスタート、2002年にORiNが開発される。2000年代前半、DENSOはORiNをプラットフォームとして工場内のすべての設備・機械を接続する工場内管理システムを構築、品質管理・設備管理を多面的にサポートする

アプリケーションを開発する。DENSO が開発した「設備稼働中の常時監視」「異常の予知」「異常発生時の迅速な対処」「異常の根本原因究明」「設備データ保守管理」に関するシステムは“Smart Factory”の原型というべきものであり、DENSO は工場オペレーションの自動化を進めた。

(2) DENSO における IoT 化

① 基本的な考え方

2010年以降、DENSO は東日本大震災後の超円高の中で更なる生産効率の向上と、新興国市場の本格的成長に伴う部品ニーズの多様化に応える変種変量生産のため、従来の工場オペレーションの IT 化を IoT 技術、AI 技術により更に進化させる「工場 IoT (Factory IoT)」を目標に掲げた。“Smart Factory”における IoT 化は、CPS による生産システムの運転管理の自動化による、柔軟かつ機動的な変種変量生産の実現が目標であるが、DENSO の IoT 化は TPS の一環として「ムダの排除」による生産性向上が目的であり、投入・産出の双方でムダを削減し生産性を引き上げるツールとして位置づけられている。

工場 IoT 化では「状況可視化」「高度事象分析」「要因可視化」の3段階が想定され、「リアルタイムでの情報・状況の可視化」を実現した後、高度事象分析段階では、「正常・異常のアラーム発信」「蓄積した生産関連データからの予知・予測」の実現、要因可視化段階では「生産関連データに基づく生産ラインの自律制御」の実現を想定している。現在、工場 IoT 化は着手されたばかりで、2000年代以降の工場オペレーションの IT 化に IoT 技術を適用した段階であるため、取組はデータ可視化（見える化）と正常・異常のアラーム表示のレベルに止まり、IoT 技術により蓄積した膨大な生産関連データに基づく予知・予測までは進めていない。

② 「見える化」

現在、DENSOは「リアルタイムでの状況・情報の可視化」に取り組んでいるが、これはAIによる大容量データ解析ないしビッグ・データ解析の前提であり、AI解析を良品率改善、自動制御化、カイゼン高度化につなげることを意図している。

第一に、DENSOでは、技術的に解明できず現場の経験知に良品率維持を委ねてきた分野において、従前よりも広範な領域のデータをリアルタイムで取得し相関関係を見て、未知の加工条件と不良品発生の因果関係を明らかにしたいとする。因果関係が分かれば、製造現場はそれに基づき加工条件の最適化方法を判断でき、更にそれを自動化システムに組み込んでしまえば、生産ラインが自律的に加工条件を変更して最適加工できる。ただし、この場合でも、DENSOは加工条件の変更をITシステムによる完全自動化に委ねず、製造現場のオペレータの関与が残る形ととしている。TPSでは「自主的に学習しカイゼンを行い続ける組織」(Liker (2004))がシステム全体を統合しており、人の関与のない生産システムは想定していないが、ここでも生産システムの運転管理及びカイゼンなどシステムの完全自動化を目指す“Smart Factory”との製造思想の違いが露わとなっている。

第二に、DENSOは、従来のカイゼンにより安定生産を達成しているラインについても、IoT技術とAIの活用によりデータ解析を行い安定生産のレベルを上げるとする。現在、製品の原価・コストは必ずしも生産ライン毎に把握できておらず、生産関連データは工場単位にまとめられた形でしか本社生産技術部門には上がらないため、高効率ラインと低効率ラインのデータが合成されたデータからは実態は認識できなかった。IoT技術の活用により、個別生産ラインの生産データ、生産ラインを流れる個別製品の生産データがリアルタイムで取得可能となり、従来見えなかった生産ラ

インの問題を認識できることを期待している。ここでも生産システムの運転管理及びカイゼン等改革の完全自動化というよりは、人による生産システムの運転管理及びカイゼンを支援するツールとしてIoT技術は捉えられている。

③ AIによる生産ライン制御

AIによる生産ライン制御はDENSOにとり未達の領域であるが、生産システムの運転管理及び改革の自動化を目指す“Smart Factory”にも未知の世界である。「見える化」までは、“Smart Factory”もTPSに立つDENSOも取組に差異はないが、この未到達の領域であるAIによる生産ラインの自動制御において両者は道を分かち。

“Smart Factory”を次世代製造システムとする者は、AIによる生産ライン制御について、新しい外乱が生じる都度、生産結果が如何に変動するのか、なぜ変動が生じたのかを追い続け日々学習するAIが弛まず生産システムを自動的にカイゼンしていくことを期待するが、DENSOでは、一旦AIを用いて生産ラインの制御方法を確立し、それを定常状態でコントロールする仕組みを構築してしまえば、後はAIが常時データを解析し生産ラインをカイゼンし続けなくとも問題は生じないと考える。

すなわちDENSOは、従来、技術的に因果関係等が解明されておらず現場の経験知に対処を任されてきた課題についてAIを活用し、隠された因果関係を発見することにAI活用の意義はあるが、生産システムをブラック・ボックスと見立てて、AIが確率論的に導出した因果関係に基づき、ブラック・ボックス状態のまま生産ライン制御を行う立場は採らない。例えば、外観検査は良品・不良品の選別基準を数値等客観化できないため人手に頼っているが、AIに良品と不良品の違いを深層学習させて区別方法を確立できれば、後は区別方法をロボットにティーチングすることで検査工程の自動化が一気に達成できる。DENSOはここまではAIを活用して

も、AIに引き続き深層学習を続けさせて、良品と不良品の区別方法を自動更新・改良させ、検査工程に自動的に新しい区別方法に基づく選別を指示することまでは望まない。

AIにより導出された関係に基づいて、生産技術部門なり生産現場なりが加工条件等と加工結果の因果関係を解析し、解析より得られた知見・ロジックに基づき生産ラインをカイゼンすることを原則とするDENSOにとり、良品と不良品の区別方法を採用して検査に不具合が生ずれば、その原因を製造現場で探求して見て、要すればAIにより良品・不良品の区別方法を解析し直せばよいということになる。一方、市場動向に即応したマス・カスタマイゼーションを第一義的な目的とし、CPSによる生産システムの運転管理及び改革の自動化を次世代製造システムと考える論者には、AIに引き続き深層学習を続けさせれば、良品と不良品の区別方法が自動更新・改良され、かつ、検査工程に自動的に新しい区別方法に基づく選別を指示までしてくれるというのに拒絶するDENSOを理解できないであろう。

(3) “Smart Factory” と工場 IoT の異なるネットワーク化

以上、IoT技術及びAIの活用に関して、“Smart Factory”がCPSによる生産システムの運転管理及び改革の自動化を考えるのに対し、DENSOの工場IoT化が人による生産システムの運転管理及びカイゼンを支援するツールである違いが確認できた。それと並んで“Smart Factory”が個別工場・企業の枠を超えて社会全体で「つながる」ことを観念しているのに対し、DENSOはあくまでも自己完結的に「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」の観点からIoT化を進めようとしている点で“Smart Factory”とDENSOの工場IoT化は異なる。

① 「個別工場の部分最適」から「複数工場の全体最適」に向けて

IoTはリアルタイム性を特長とするが、リアルタイム性には、「リアルタイムに情報を収集し、これを分析して予兆を捉え、ジャスト・イン・タイムに準備を行い、適時に価値提供する」時間的なものと、「物理的に場所が離れている事象を可視化し、遠隔地で発生している事象の同時処理を可能とする」空間的なものの二つがある。

顧客である自動車メーカーのグローバル生産に対応して、DENSOは世界60ヶ国に130工場をグローバル展開している。総合電機メーカーでは国内生産拠点は量産機能を喪い、グローバル展開した量産工場の模範たり得なくなったが、国内生産台数1,000万台弱を維持する自動車産業では、自動車メーカー及び自動車部品メーカーの国内生産拠点は量産機能を喪ってはならず、DENSOの国内生産拠点は量産も含めて世界の全工場のモデルとしてのマザー工場たり続けている。そして、DENSOの海外130工場は日本国内とほぼ同一の製品を製造し、生産方式も国内マザー工場と同一システムを採用していることから、国内マザー工場のカイゼンの成果が瞬時に海外工場に伝播できれば、グローバルに飛躍的な生産性向上が期待できる。

しかしながら、現実にはDENSO用語で「ものづくりを知る人の協働」に支えられたカイゼン取組と成果を、異なる生産拠点間で共有することは難しく、DENSOは海外工場に対しても、生産現場が日々ライン改造や加工条件変更等に取り組み生産システムを進化させ続けることを要求していることから、各生産拠点の主体性・自律性が強い点もカイゼンのグローバル共有のネックとなっている。DENSOでは、国内マザー工場におけるカイゼン成果をグローバルに共有するツールとして「工場IoT化」に期待を寄せており、同時に海外生産拠点のカイゼン取組と成果をグローバルに共有することも考えている。

すなわち、グローバルに現場のカイゼンや加工データを共有し、相互に比較可能なシステムを構築し、その上で普遍的に生産性向上に資するカイゼンであれば直ちにグローバル展開し、個別生産現場を前提とした特殊なカイゼンは当該現場で展開するに留めることで、各地域・各国の事業の強みを活かしたイノベーションを共有しグローバル・グループとしての競争力強化を図ることが意図されており、「個別工場の部分最適」から「複数工場の全体最適」がモットーとなっている。

② 生産活動のグローバル統合

第一に、工場 IoT 化により、グローバル分散する全生産拠点の生産状態及び生産能力をリアルタイムで把握できれば、人件費・部材費・在庫コスト等も総合的に勘案して、グローバル最適生産をリアルタイムで制御する道が開ける。現在、自動車部品は生産工場・生産ラインも含めて顧客指定を受けており任意に事後変更できないが、DENSO では、将来的には、契約上、部品生産地に関して複数地からの選択権を認めてもらい、グローバル生産最適化を考えたいとする（この場合、ERP 等基幹情報システムとの連携が必要で、工場 IoT システムと基幹情報システムとの統合が課題）。

第二に、工場 IoT 化により、グローバル分散した全生産拠点の生産状況及び生産能力が「見える化」されれば、同一生産ラインにもかかわらず国内拠点と海外拠点で稼働率に差が生じている場合、生産ラインを比較して異同を発見し、異同の原因を探求することで、カイゼンをはるかに迅速かつ効率的に進めることができる。成果をグローバル共有することで、従来は生産拠点毎に取り組んできたカイゼンにおいて、国内マザー工場だけでなく DENSO の全生産拠点の「ものづくりを知る人の知恵」を借りることが可能となる。それにより、DENSO はカイゼンのスピードの飛躍的向上と個別生産拠点で特殊化しがちなカイゼンのグローバル収斂を期待している。

③ 自己完結的なネットワーキング

DENSO は「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」の観点から IoT 化を TPS に組み込もうとしているが、これはあくまでも個別メーカーの範囲内における IoT 化であり「部分最適」の追求に止まっている。一方、“Industrie4.0”では“Smart Factory”化を個別メーカーの範疇に止めず、トヨタ自動車が協力企業と構築しているような企業グループ・ネットワークから、更にはサプライ・チェーン全体に関与する主体すべてに広げることを構想しており、それにより経済社会全体での最適化を実現しようとしている。

DENSO の IoT 化がリアル・ビジネス段階の事業活動の成否を左右する取組であるのに対し、“Smart Factory”はようやくコンセプト段階から実装段階に移行しようとしている段階で、様々な者が様々な技術的可能性を語っているという面はあるが、IoT 化は従来範囲が制約されてきた企業のネットワーキングを社会全体まで一気に拡張することを可能としている点にメリットがある。ネットワークの拡張可能性は、基本的に個別工場を単位とする TPS からは脱落してしまう視点であり、「リーン・オートメーション」で「部分最適」のみ追求しているうちに、経済社会全体での最適化を失念して「全体最適」を達成できない危険が内在している。

私は“Industrie4.0”の革新性は経済社会全体での最適化を提言した点にあると考えるが、今後の DENSO の IoT 化が DENSO グループに限られた「全体最適」を目指すのに止まるのか、あるいは、IoT の経済社会全体をつなぐ力に目覚めて経済社会全体での「最適化」をビジネスに組み込むことにより企業競争力を更に強化していくかは注視していくべき点であろう。

5. 結 び

ドイツの“Smart Factory”はTPSに取って代わるものなのだろうか。あるいは両者は変種変量生産に適合的な生産システムとして並立するモデルとなるのだろうか。TPSが1990年以降トヨタ自動車の高いパフォーマンスに裏書される形で国際的に認知されたモデルであるのに対し、“Industrie4.0”で提唱されてから日も浅い“Smart Factory”はコンセプト・モデルから具体化への道を歩みだしたばかりに過ぎない。

先進国製造業のサバイバルを市場動向に即応したマス・カスタマイゼーションと変種変量生産に求める“Smart Factory”論者の一部には、未だコンセプト段階に止まる、CPSによる生産システムの運転管理及びシステム改革の自動化を次世代製造モデルとして絶対視し、①TPSは多品種少量生産に対応した生産システムであり、変種変量生産への対応には限界がある、②生産システム改革は、生産ラインのIoT化によりリアルタイムで収集されたビック・データをAIに解析させることで最適化でき、TPSのように生産現場のカイゼンに依存する改革は時代錯誤である、③TPSは生産現場に依存する傾向からオートメーション化への取組が不十分でIoT化に対応できない等の批判を寄せてきた。

本稿では、第一に、TPSは多品種少量生産に対応した製造システムであるとの見解に対しては、①TPSは「ムダの排除」を製造の根幹に置く製造思想であり、「ムダの排除」を追及する過程で「工程の流れ化」「ジャスト・イン・タイム」「全工程の同期化」「pull型生産」を体系化、これらの一つのシステムとして統合する方法として「カンバン方式」を形成・確立してきたものであり、多品種少量等の特定の製造ニーズに応えるための製造手法ではない、②国内製造ニーズが大量生産、多品種少量生産、変種変量生産と転換する中、TPSは新たな生産システムを開発し、生産ラ

インの運転管理でカイゼンを積み重ねることで製造ニーズに応じてきたが、“Industrie4.0”の言う市場動向に即応した変種変量生産についても、TPSは生産システム開発と生産ラインの運転管理のカイゼンにより対応しつつあることを、TPSに関する先行研究レビューに基づき明らかにした。

第二に、欧米等海外の経営者・生産技術者に観察されるTPSの人的要素を軽視する傾向に対しては、①TPSでは、ジャスト・イン・タイム、カンバン方式等のTPSの構成要素を纏め上げ、TPSを一つの統合されたシステムたらしめているのが生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」である、②カイゼンは問題発見と解決の繰り返しであるが、生産ラインの運転管理における問題発見は生産現場でなければ不可能な面があるため、TPSでは、まずは生産現場が課題解決を試み、生産現場だけでは解決できない場合には、生産現場と生産技術部門が協働することでソリューションを創造してきた、③生産システム改革がAI活用により自動化できるとする見解は、生産システム改革が生産技術部門と生産現場の「自主的に学習し絶えずカイゼンを行う組織」の協働作業として進められる実態について無知であるためであることをDENSOのケース・スタディにより示した。

第三に、TPSは「現代のICT技術の可能性を利用」しておらず、マス・カスタマイゼーションと変種変量生産の対応に限界があるとの見解に対しては、TPSは「ムダの排除」の観点から元々「自動化」を一つの柱としており、改めて「リーン・オートメーション」を提唱されなくても、既にトヨタ自動車及びトヨタ系列企業は1970年代のFA化以降一貫して工場システムのIT化に取り組んできていることをDENSOのケース・スタディにより明らかにした。また、DENSOの「リーン・オートメーション」は“Smart Factory”が「売り」とするIoTによるネットワーク構築に及んで

いるが、「個別工場の最適化から複数工場の最適化」「生産活動のグローバル統合」は DENSO グループの枠内に止まるものであり、経済社会全体の“Smart Factory”化も視野に入れる“Industrie4.0”がネットワークキングで「全体最適」を追求しているのと異なる点を同様にケース・スタディにより明らかにした。

以上より、“Smart Factory”と TPS の関係については、両者は異なる製造思想に立脚する生産システムであるが、変動する市場動向に即応した変種変量生産という製造ニーズへの対応としては共通性も多く認められるモデルと評価できる。ドイツにも、“Smart Factory”は TPS をベースとして具現化すべきとの見解 (Khanchanapong et al. (2015); Kasper and Schneider (2015); Staufen AG (2016)) が存在するように、両者は二律背反的に捉えるのではなく、市場動向に即応した変種変量生産のための並立する生産システムとしてハイブリッド化の可能性を探求することが妥当であると考えられる。なお、最後に日本機械学会東海支部の DENSO 西尾製作所視察において同社の第 4 次産業革命への対応及び生産システム改革の在り方について同社より懇切かつ詳細な説明をいただいたことを感謝して本稿を終わることとした。

参考文献

- 伊藤誠吾 (2011) 『株式会社デンソー 自動車用発電機：Ⅲ型オルタネータの開発・事業化』, 一橋大学イノベーション研究センター。
- 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。
- 大野耐一 (1978) 「トヨタ生産システム—脱規模の経営をめざして—」ダイヤモンド社。
- 加藤宣明・片山三太郎・宮本芳樹他 (2017) 『省エネ小型低圧ダイカストシステム』。
- 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。

- 岸達・壁谷光・大見卓也他 (2017) 「アルミダイカスト関連設備の同期一貫ライン構築による原価低減」『*鑄造工学*』第89巻第1号, 27-31頁。
- 黒川文子 (2007) 「自動車産業における効率的なサプライチェーン」『*情報科学研究*』第24号, 51-71頁。
- 黒田吉孝 (2015) 「部品と工場の進化を支えるモノづくり革新技術」『*デンソーテクニカルレビュー*』Vol. 20, 26-34頁。
- 小島史夫 (2004) 「デンソーにおける生産システム技術の現状と展望」『*デンソーテクニカルレビュー*』Vol. 9 No. 1, 9頁。
- 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」。
- 杉戸克彦・井上保・上島益美・竹田修二・横井俊之 (2004) 「変化に対応し長期間使える循環型生産方式」『*精密工学会誌*』Vol. 70 No. 6, 737-741頁。
- 高木博巳 (2006) 「デンソーにおけるダイカスト部品の高品質化の取り組み」『*デンソーテクニカルレビュー*』Vol. 11 No. 2, 59-66頁。
- 日経「強い工場」取材班「コンパクトライン革命」, 『*日経ものづくり*』2013年9月号 (<https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/HONSHI/20130823/298983/>)。
- 日本機械工業連合会 (2016) 「世界の製造業のパラダイム・シフトへの対応調査研究—ICTの徹底活用と新しい現場力 TAKUMI4.0を目指して—」。
- 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。
- 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。
- 山崎康彦 (2017) 『*デンソーのモノづくりの進化—ダントツ工場づくりへの挑戦—*』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)」。
- 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ャリングの実践 ケース: 工作機械を核とする加工プロセスの生産性向上」。
- Bauer, Sven-Vegard, Jan Ola Strandhagen and Felix T.S. Chan (2018), "The link between Industrie4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda," *International Journal of Production Research*, 56 (8), pp. 2924-2940.
- Bilberg, Arne and Ronen Hadar (2012), "Adaptable and Reconfigurable LEAN Automation — A competitive Solution in the Western Industry," In *22nd International*

- Conference on Flexible Automation Intelligent Manufacturing (FAIM)*, Barcelona, Spain, 1–8. Piscataway, NJ : IEEE, September 16–19.
- Brandenburg, D. and A. Ellinger (2003), “The future : just-in-time learning expectations and potential implications for human resource development,” *Advances in Developing Human Resources*, Vol. 5 No. 3, pp. 308–320
- Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie (2016), *Plattform Industrie4.0 Digitale Transformation “Made in Germany”*.
- Cappelli, P. and N. Rogovsky (1998), “Employee involvement and organizational citizenship : implications for labor law reform and ‘lean production,’” *Industrial & Labor Relations Review*, Vol. 51 No. 4., pp. 633–653.
- Carnes, K. and S. Hedin (2005), “Accounting for lean manufacturing another missed opportunity?,” *Management Accounting Quarterly*, Vol. 7 No. 1, pp. 28–35.
- de Geus, A. (1997), “The Living Company,” *Havard Business Review*, March-April, pp. 51–59.
- Detty, R.B. and J.C. Yingling (2000), “Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation : a case study,” *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 429–445.
- Goto, F. (1989), *Maintenance prevention* In S. Nakajima. ed. *TPM development program — implementing total productive maintenance*. Productivity Press, Cambridge, MA.
- Hines, P. and D. Taylor (2000), *Going Lean*, Lean Enterprise Research Centre, Cardiff.
- Kagermann, H., J. Helbig, A.Hurzig and W. Wahlster (2013), *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSRIE4.0 : Securing the Future of German Manufacturing Industry : Final Report of the Industrie4.0 Working Group*, Acat ech, Berlin.
- Kasper, S. and M. Schneider (2015), “Lean Und Industrie4.0 in Der Intralogistik : Effizienzsteigerung Durch Kombination Der Beiden Ansaetze,” *Productivity Management* 20 (5), pp. 17–20.
- Khanchanapong, T., D. Prajogo, A.S.Sohal, B.K. Cooper, A.C.L. Yeung and T.C.E. Cheng (2015), “The Unique and Complementary Effects of Manufacturing Technologies and Lean Practices on Manufacturing Operational Performance,” *International Journal of Production Economics* 153, pp. 191–203.
- Kolberg, Dennis., Joshua Knobloch and Detlef Zuehlke (2017), “Towards a lean for workstations,” *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 10, pp.

2845-2856.

- Lewis, M.A. (2000), "Lean production and sustainable competitive advantage," *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20, No. 8, pp. 959-978.
- Liao, Y., F. Deschamps, E.D.F.R. Lourse and L.F.P. Ramos (2017), "Past, Present and Future of Industry4.0 — a Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal," *International Journal of Production Research*, 55 (12), pp. 3609-3629.
- Liker, J.K. (2004), *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*, McGraw-Hill, New York.
- Liker, J.K. (2007), *Toyota Talent: Developing Your People the Toyota Way*, McGraw-Hill, New York, NY.
- Liker, J.K. and M. Hoseus (2008), *Toyota Culture: The Heart and Soul of the Toyota Way*, McGraw-Hill, New York, NY.
- Mann, D.W. (2005), *Creating a Lean Culture Tools to Sustain Lean Conversions*, Productivity Press, New York, NY.
- McIntosh, R.I. et al. (2000), "A Critical evaluation of Shingo's 'SMED' (single minutes exchange of die) methodology," *International Journal of Production Research*, 38 (11), pp. 2377-2395.
- Mersha, T. and R. Merrick (1997), "TQM implementation in LDC's driving and restraining forces," *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17, pp. 164-183.
- Moeuf, A., R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo and R. Barbaray (2017), "The Industrial Management of SMEs in the Era of Industry4.0," *International Journal of Production Research* 92, pp. 1-19.
- Ohno, T.(1988), *Toyota Production System — beyond large-scale production*, Production Press, Cambridge, MA.
- Pegels, C.C. (1984), "The Toyota Production System — lessons for American management," *International Journal of Operations and Production Management*, 4 (1), pp. 3-11.
- Rother, M. and J. Shook (1999), *Learning to See: Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*, Lean Enterprise Institute, Cambridge, MA.
- Roy, D., P.Mittag and N. Baumeister (2015), "Industrie4.0 — Einfluss der Digitalisierung auf die fuenf Lean-Prinzipien Schank vs.Intelligent," *Productivity Management*, 20 (2), pp. 27-30.
- Ruettimann, Bruno and Martin Stoeckli (2016a), "Lean and Indudtry4.0 — Twins,

- Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems," *Journal of Service and Management*, Vol. 9, pp. 485–500.
- Ruettimann, Bruno and Martin Stoeckli (2016b), "Going Beyond Triviality : The Toyota Production System-Lean Manufacturing beyond Muda and Kaizen," *Journal of Service and Management*, Vol. 9, pp. 140–149.
- Sekine, K.(1992), *One-piece flow — cell design for transforming the production process*, Production Press, Portland, Oregon.
- Shingo, S. (1989), *A Study of Toyota Production System from industrial viewpoint*. Productivity Press, Cambridge, MA, pp. 85–164.
- Staufen AG (2016), *Deutscher Industrie4.0 Index 2015*, Satufen AG, Koengen.
- Stewart, P. (1998), "Out of chaos comes order from Japanization to lean production : a critical commentary," *Employee Relations*, Vol. 20 No. 5, pp. 127–137.
- Stone, K.B. (2012), "Lean transformation : organizational performance factors that influence firm's leanness," *Journal of Enterprise Transformation*.
- Sugimori, Y., K. Kusunoki, F. Cho and S. Uchikawa (1977), "Toyota Productions System and Kanban System : Materialization of Just-in-Time and Respect-for-human System," *International Journal of Production Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 553–564.
- Thun, J.H. (2006), "Maintaining preventive maintenance and maintenance prevention : analyzing the dynamic implications of Total Productive Maintenance," *System Dynamics Review*, 22 (2), pp. 163–179.
- Thun, J.H., M.Drueke and A.Gruebner (2010), "Empowering Kanban through TPS-principles — an empirical analysis of the Toyota Production System," *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 23, pp. 7089–7106.
- van Eijnatten, F.M. and G. Putnik (2004), "Chaos, complexity, learning, and the learning organization — towards a chaotic enterprise," *The Learning Organization*, Vol. 11 No. 6, pp. 430–449.
- Wagner, T., C. Herrmann and S. Thiede (2017), "Industry 4.0 impacts on lean production systems", *Procedia CIRP* 63, pp. 125–131.
- Womack, J., D. Jones, D. Roos (1990), *The Machine that Changed the World*, Rowson Associate, New York, NY.
- Womack, J. and D. Jones (1996), *Lean Thinking : Banish Waste and Create Wealth in your Corporation*, The Free Press, New York, NY.
- Yamamoto, Y. and M. Bellgran (2010), "Fundamental mindset that drives improvements towards lean production," *Assembly Automation*, Vol. 30 No. 2, pp. 124–130.

付録（参考）

DENSO の企業概要

1. 企業概要

- 株式会社デンソー（DENSO Corporation）
- 1949年12月16日設立
- 本社所在地 愛知県刈谷市昭和町1-1
- 資本金 1,874億円
- 売上収益 連結 5 兆1,083億円（2017年度）
- 営業利益 連結 4,127億円（2017年度）
- 当期利益 連結 3,206億円（2017年度）
- 従業員数 連結 168,813名, 単独 39,315名
- 連結子会社数 220社（日本 72, 北米 31, 欧州 35, アジア 76, 南米／その他 6）
- 持分法適用会社数 38社（日本 14, 北米 4, 欧州 4, アジア14, 南米／その他 2）
- 1949年, 日本電装株式会社として創業以来, トヨタ自動車を中心に自動車用電装部品を拡販, 現在は世界の主要自動車メーカーに製品供給。

2. 主要製品

| | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| パワーレイン事業 | ハイブリッド車及び電気自動車用製品, ガソリン・ディーゼルエンジンの制御システム及び関連製品, 駆動系製品, 並びにオルタネータやスタータ等の電源供給・始動システム製品の開発・生産 |
| 電子事業 | 半導体センサ, IC等のマイクロエレクトロニクスデバイス, エンジン制御コンピュータ等のエレクトロニクス製品の開発・生産 |
| 熱事業 | 自動車用エアコンシステム, ラジエータなどの冷却用製品の開発・生産 |
| 情報安全事業 | カーナビ, ETC等のITS製品, テレマティクス, エアバッグ用センサ・制御コンピュータ等の走行安全関係製品, ボディー系制御コンピュータ, メータ等の開発・生産 |
| 小型モータ | ワイパシステム, パワーウィンド, パワーシート, スライドドア, パワーステアリング, エンジン制御用などの各種モータの開発・生産 |

3. 製造拠点

| 拠点名・住所 | 創業・従業員数 | 主要事業 |
|------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| 安城製作所 愛知県安城市里町長根2-1 | 1967年 3,203名 | スタータ、オルタネータ、インバータ、MGの製造 |
| 西尾製作所 愛知県西尾市下羽角町住崎1 | 1970年 7,106名 | カーエアコン、ラジエータ、電子制御式ディーゼル・ガソリン燃料噴射装置の製造 |
| 高棚製作所 愛知県安城市高棚町新道1 | 1974年 2,918名 | 情報通信関係製品、走行安全関係製品、半導体デバイス／センサ関連製品の製造 |
| 大安製作所 三重県いなべ市大安町門前1530 | 1982年 4,696名 | 点火系製品、先進安全関係製品、動弁系製品、駆動系製品、吸排気系製品の製造 |
| 幸田製作所 愛知県額田郡幸田町大字芦谷字丸山5 | 1987年 3,452名 | IC、電子制御製品の製造 |
| 豊橋製作所 愛知県豊橋市明海町3-23 | 1987年 1,021名 | カーエアコン、サーボモータモジュール、自然冷媒CO ₂ 家庭用ヒートポンプ給湯機の製造 |
| 阿久比製作所 愛知県知多郡阿久比町大字草木字芳池1 | 1990年 874名 | 生産設備、熱流センサ、LCPモジュール基板の製造 |
| 善明製作所 愛知県西尾市善明町一本松100 | 1998年 1,137名 | 電子制御式ディーゼル燃料噴射装置の製造 |
| 湖西製作所 静岡県湖西市梅田390 | 1979年 4,373名 | ワイパシステム・パワーウィンドウモータ等、自動車用小型モータの製造 |
| 豊橋東製作所 愛知県豊橋市原町字南山1-323 | 1990年 690名 | ブロワモータ・クーリングファンモータ等、自動車用小型モータの製造 |
| 東広島工場 広島県東広島市八本松飯田2-15-1 | 1979年 93名 | ワイパシステム・ウォッシュシステム等、自動車小型モータの製造 |