

研究ノート

オペレーションズマネジメントにおける トヨタ生産システムの特徴

高桑 宗右エ門

目 次

1. 諸 言
2. トヨタ生産システム
3. 納期・数量の視点
4. コスト（原価）の視点
5. 品質の視点
6. 結 言

1. 諸 言

トヨタ生産システム／TPS (Toyota production system) は、ジャストインタイム生産と自動化が中心のアプローチである。そして、トヨタ生産システムは、徹底してムダを排除することにより、品質の向上、コストの低減、納期の短縮の実現を目指した生産方式であり、生産現場の実際に即した考え方や手法が包括されたものである。本稿では、生産の価値要件を高めるという考え方に基づいて、特にオペレーションズマネジメントの観点から、トヨタ生産システムの基本的な特徴について検討する。

オペレーション (operation) には、作業、作戦、市場の操作、手術、演算など、種々の意味がある。また経営学では、管理のレベルとして、戦略的 (strategic)、戦術的 (tactical)、オペレーショナル (operational) な意思決定のうちのオペレーショナルな意思決定において用いられる。本稿では、オペレーションを生産 (production) と同義として用いることとする。すなわち、オペレーショナルな管

理レベルの意思決定としてだけでなく、オペレーションには、生産全般に関わる戦略的な意思決定を含めた広範囲な事項が含まれる。

ところで、生産とは、製品 (products) ないしサービス (service), すなわち財 (goods) を創出することである¹⁾。生産活動に伴う入出力を左から右に、そしてエネルギーの入力と環境負荷の出力を上から下に示した生産の基本的構成を図1に示す。特に、生産における品質 (Quality), コスト (Cost), 納期 (Delivery) に係る価値要件に関する管理が生産・経済性管理の中心をなす。

図1に示すように、生産活動は人 (Man), 設備 (Machine), 原材料 (Material), 金 (Money) (あるいは、方法 (Method)) の「生産の4M」を入力 (投入) として、品質, コスト, 納期のQCDに、生産量 (Production), 環境 (Environment) 安全 (Safety), 意欲 (Morale) を加えてPQCDESMを出力 (産出) とする活動と捉えることができる。特に、QCDとしては、次のようにまとめられる²⁾。

- ① 品質 顧客のニーズに基づいて、企画や設計部門で定義された品質を、ロスなく実現する。
- ② コスト 顧客と自社の両方に利益をもたらすように、合理的なコストダウンを計画し実行する。
- ③ 納期 約束した納期を正確に守る。工場で製造する時間をできるだけ短くする。

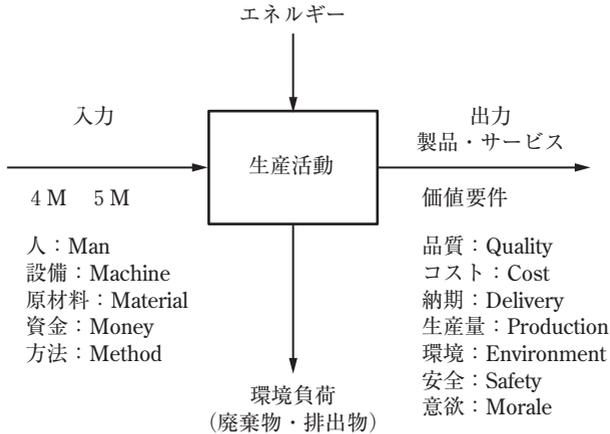
さて、管理 (マネジメント) とは、経営目的に沿って、人, 物, 金, 情報などさまざまな資源を最適に計画し運用し、統制する手続きおよびその活動である。そして、オペレーションズマネジメントとは、投入物 (input) を産出物 (output) に変換することにより、製品やサービスの形で価値を生み出す一連の活動を管理することである。

また、エネルギーや環境負荷の観点からは、エネルギーを消費して、廃棄物や二酸化炭素などの排出物として環境負荷を外部環境に与える。

1) 財は、広義には、製品とサービスを含む。狭義には、製品と同義として用いられる。

2) JIS Z814: 2001「生産管理用語」の定義による。「管理 (マネジメント)」に関しても同様である。

図1 生産の構成³⁾



(出所) 高桑 (2012) 4 頁。

2. トヨタ生産システム

2.1 7つのムダ

トヨタ生産システムでは、生産現場のムダを7つに分類している⁴⁾。

- ① つくり過ぎのムダ
- ② 手待ちのムダ
- ③ 運搬のムダ
- ④ 加工そのもののムダ
- ⑤ 在庫のムダ
- ⑥ 動作のムダ

3) 高桑 (2012) 4 頁。

4) 大野 (1978) 38頁。なお、トヨタ生産システム (トヨタ生産方式)、ジャストイン生産システム、かんばん方式などに関して、小川 (1994)、ジャストインタイム生産システム研究会 (2004)、門田 (1985) など多数の著書がある。

⑦ 不良をつくるムダ

上記7つのムダ (the seven major wastes) のうち、特につくり過ぎが最も悪いムダとされる。いま、生産現場において、能率について考えてみる。同じ作業員数で生産数量を増加させる場合と、同じ生産数量をより少ない作業員数で達成する場合の2通りの方法が考えられる。必要数が一定の場合には、前者を「見かけの能率向上」、そして後者を「真の能率向上」と区別して呼んでいる。これは、たとえ能率が向上しても、生産数量が増加した分は「つくり過ぎのムダ (waste of overproduction)」と考えるからである。このことは次のように説明される。ある生産ラインでは、10人で1日に100個の製品を生産していた。その後の改善の結果、能率が上がり10人で1日に120個の割合で生産できるようになったとする。このような場合、1日の生産必要数が100個のとき、10人で120個生産するのではなく、8人で必要数の100個を生産すべきである。つまり、20個の製品は「つくり過ぎ」とみなす⁵⁾。

図2 マンマシンプロセスチャート

作業内容	作業員 (min)	NC 旋盤 (min)
素材取付け	0.28	0.52
チェック締付け	0.20	
作動	0.04	
	【遊休】	1.80
完成品取外し	0.24	0.24
パレットに置く	0.10	
		取外し 遊休

(出所) 高桑 (2015) 154 頁を修正。

5) 大野 (1978) 109 頁。

「手待ち (waiting)」とは、作業者が何もせずに待つことである。たとえば、部品の遅れによる待ち、あるいは設備の故障による復旧待ち、などがこれにあたる。いま、作業員1人が旋盤1台を担当(1人1台持ち;単能工)する場合、マンマシンプロセスチャートを図2に示す。この場合、作業員は素材取付けと完成品取外しの付随作業間の主作業(旋削)の間には、作業者の手待ちが生ずる。そこで、多台持ち(単能工)あるいは多工程持ち(多能工)にすることにより、さらになめらかなモノの流れを実現し、かつ手待ちのムダを少なくすることができる。前者のシミュレーションモデルを図3、後者については図4にそれぞれ示す。ここで、シミュレーションモデルを構築することにより、手待ちに関する作業パフォーマンスの分

図3 多台持ち(単能工)のシミュレーションモデル

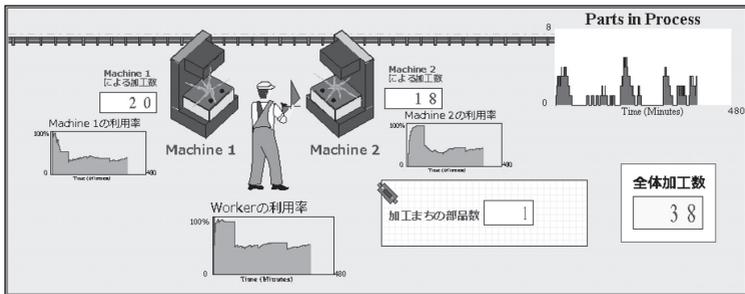
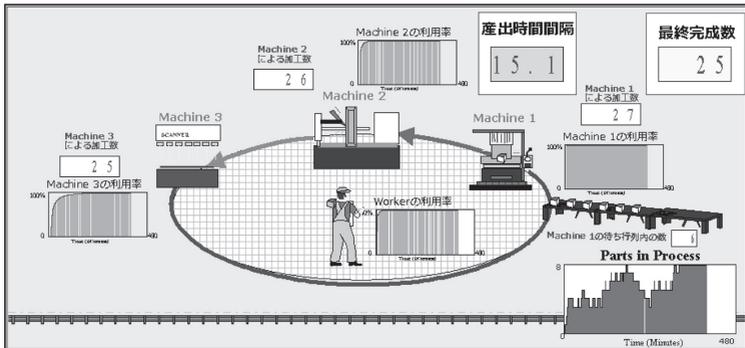


図4 多工程持ち(多能工)のシミュレーションモデル



析を行うことができる⁶⁾。

2.2 ジャストインタイム生産と自動化

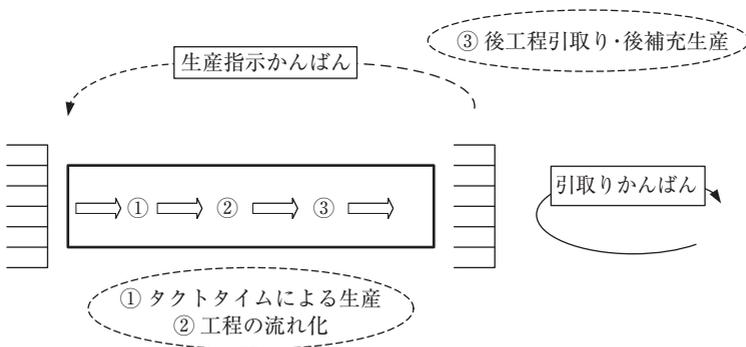
トヨタ生産システムでは、次の2つの中心的なアプローチがある⁷⁾。

- ① ジャストインタイム生産
- ② 自動化

ジャストインタイム (just-in-time) とは、必要なものを必要なときに必要なだけ生産するシステムのことであり、優れた品質のものをできるだけコストを抑え、短いリードタイムで製品品目を提供することを目指す。

ジャストインタイム生産を実現するための中心的なアプローチは次の3つがあり、図5に概要を図示する。

図5 ジャストインタイム生産の概要



(出所) 高桑 (2015) 185 頁を修正。

- ① タクトタイムによる生産
- ② 工程の流れ化

6) Arena シミュレーション言語 (高桑 (2007)) を用いてモデルを構築した。

7) 大野 (1978) 9 頁。

③ 後工程引取り・後補充生産（プルシステム）

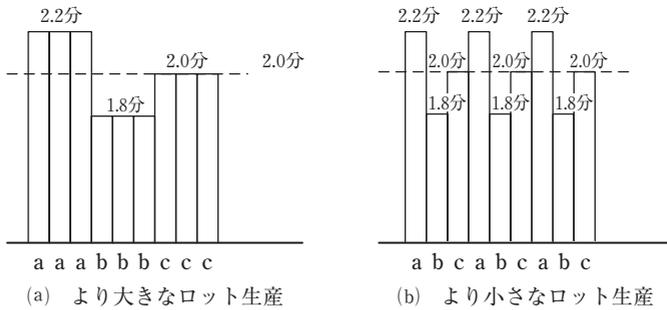
これらについて，次章で詳しく検討することにする。

3. 納期・数量の視点

3.1 平 準 化

ここでは，納期・数量の視点からトヨタ生産システムの特徴について考察する。ジャストインタイムでは，はじめに平準化を行う。ロット生産において，一般に，大きなロットサイズで生産すると段取作業の回数が少なくてすむ反面，まとめて生産することにより品質不良を検知しにくくする，と認識される。そこで，複数の大きなロット生産（図6(a))を実施する状況においては，より小さなロットで交互に生産して平準化する（図6(b))。

図6 ロット生産と平準化



(出所) 高桑 (2015) 186 頁。

3.2 タクトタイムによる生産

次に，「つくり過ぎ」をせずに，必要なだけ生産するために行われる工程設計の手順について述べることにする。図5に示すように，タクトタイム (Takt time)，流れ化，そして後工程引取り，の考え方に基づいて工程を設計していく。

【ステップ1】はじめに，後工程（顧客）の需要に合わせて，製品・部品1個当りの生産時間を求める。タクトタイム TT は，1日当り稼働時間 TW を要求される生産

量 UR で割ることにより求められる。

$$TT = \frac{TW}{UR} \quad (1)$$

【ステップ2】次に、当該作業に関する総作業時間（要素作業⁸⁾の合計）を TO とすれば、タクトタイムで割ることにより、必要な作業員数 WR を得る。

$$WR = \frac{TO}{TT} \quad (2)$$

【ステップ3】さらに、必要な作業員数が求められたら、生産工程における作業の流れを考慮して、すべての工程をフロー型の生産ラインに並べてラインバランシングを行う⁹⁾。

簡単な数値例として、いま、ある生産ラインでは、1日当り140個の組立製品を受注生産しているとしよう。8時間1シフトで作業をしているがそのうち7時間が実質作業時間である。また、組立作業は5つの要素作業で構成されており、要素作業Aは3.0分、Bは1.6分、Cは1.4分、Dは2.7分、そしてEは2.4分であるとする。この生産ラインに対するタクトタイムは式(1)より、次のように求められる。

$$TT = \frac{7 \times 60}{140} = 3(\text{分})$$

次に、必要な作業員数は式(2)より、次のように求められる。

$$WR = \frac{3.0 + 1.6 + 1.4 + 2.7 + 2.4}{3} = 3.7 \cong 4(\text{人})$$

3.3 工程の流れ化

組立生産のように、生産ライン上の各作業ステーション（工程）に作業を割り付けておき、品物がラインを移動するにつれて加工が進んでいくような方式はライン生産方式（line production system）である。特に、20世紀初頭に、フォード（H.

8) 要素作業（work element）とは、単位作業を構成する要素で、目的別に区分される一連の動作または作業である（JIS Z814：2001「生産管理用語」）。

9) ライン生産方式において、生産ラインの各作業ステーションに割り付ける作業量を均等化する方法がラインバランシング（line balancing）である。

表1 生産システムのパラメータ

項目	作業時間					工程間搬送時間
	工程1	工程2	工程3	工程4	工程5	
時間 (分)	NORM* (1, 0.2)	NORM (1, 0.2)	NORM (1, 0.2)	NORM (1, 0.2)	NORM (1, 0.2)	1

*正規分布。カッコ内は平均および標準偏差。

Ford) が単一品種の自動車生産にベルトコンベヤを導入して、流れ作業/コンベヤシステム (conveyor system) を組織的に採用した。また、すべての品物の移動と加工時間が同期化して繰り返されるライン生産方式がタクト生産方式 (takt production system, Takt-verfahren (独)) である。これは「流れ化」を実践するものである。

ここで、品物の流し方の相違に着目して、ライン生産方式およびタクト生産方式のパフォーマンスについて、簡単なシミュレーション分析を試みる。前者では、各工程で作業の終了後に次工程へ品物が搬送され、各工程において仕掛在庫が生じたり、手待ちが生じたりする。後者では、工程間の移動時間と作業時間が同期化されている。生産システムのパラメータを表1に示す。また、各工程における作業時間は平均1分、標準偏差0.2分の正規分布に従うものとする。そして、コンベヤによる工程間の品物の搬送時間は1分であるものとする。ライン生産システムおよびタクト生産システムにおいて、作業時間および工程間の搬送時間は同じであり、品物の「流し方」だけが異なる。それぞれのシミュレーションモデルを図7および図8に示す¹⁰⁾。

シミュレーション実験の結果得られたサイクルタイム、スループットタイム、生産数量のパフォーマンス (単独の値は平均, [] 表示は平均の95%信頼区間) を表2にまとめて示す。なお、実験の反復回数はそれぞれ30回、ウォームアップ期間を1分、正味7時間の作業時間についてシミュレーション実験を実施した。その結

10) Arena シミュレーション言語 (高桑 (2007)) を用いてモデル構築および分析を行った。

図7 ライン生産方式のシミュレーションモデル

ライン生産方式

(各工程で作業終了後に次工程へアイテムが搬送される生産方式)

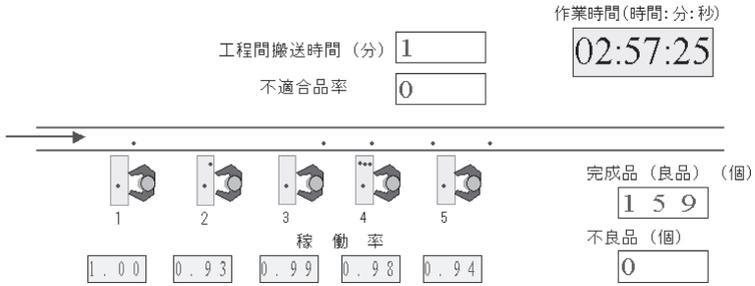


図8 タクト生産方式のシミュレーションモデル

タクト生産方式

(工程間の移動時間と作業時間が同期化されたライン生産方式)

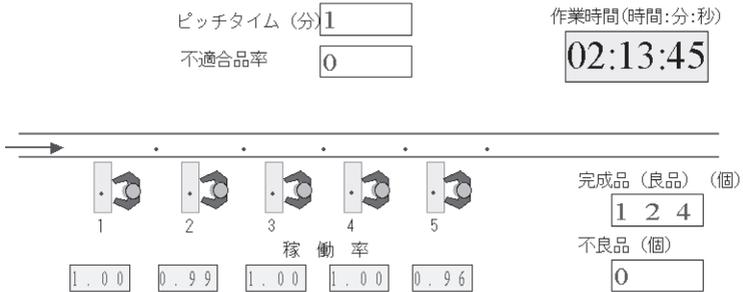


表2 タクト生産システムとライン生産システムのパフォーマンス

生産システム	サイクルタイム(分)	スループットタイム(分)	生産数量(個)
ライン生産システム	1.022	[17.778, 19.593]	[409.54, 412.20]
タクト生産システム	1.000	10.000	421

果、サイクルタイム（完成品の産出時間間隔）はほぼ1分で同じであることがわかる。しかし、ライン生産システムでは、各工程で仕掛品としての滞留時間が生じるため、スループットタイムについては、タクト生産方式と比較してかなり長くなることがわかる¹¹⁾。トヨタ生産方式では、品質保証の観点からも、一般に「1個流し」のタクト生産方式が採用される。

3.4 後工程引取り・後補充生産（プルシステム）

生産実施に際しては、後工程引取りつまりプルシステムにより、後工程（顧客）の要求がある生産量だけ生産指示が行われる。ここで、ジャストインタイムを具現するために、「かんばん（Kanban）」が用いられる。かんばんは、後工程引取りのためのツールであり、図5に示したように「引取りかんばん（Withdrawal Kanban）」と「生産指示かんばん（Production Kanban）」の2種類がある。前者は前工程から部品を引き取る際に使われ、工場内における「工程間引取りかんばん」とサプライヤとの間で用いられる「納入指示かんばん」の2種類がある。そして後者は、生産の指示を与える際に使われる。「工程間引取りかんばん」および「納入指示かんばん」を考慮したプルシステムのシミュレーションモデルの構築例を図9に示す¹²⁾。図中、顧客から工程2へかんばんが移動し(①)、品物の引取り(②)および工程2への生産指示が行われ、プルシステムの実施の様子を表現することができる。

かんばんには、一般に次の事項が記載されている。

- (1) 部品名、品番
- (2) 前工程・サプライヤ
- (3) コンテナ（容器）の容量
- (4) 使用工程
- (5) 引取り（納入）サイクル

引取りサイクルは、 $a - b - c$ 、で表される。たとえば、「1-16-3」は、1日に

11) スループットタイム（throughput time）は、品目が生産工程の開始から終了までに要した時間である。

12) Takakuwa and Nomura (2004).

図9 かんばん方式のシミュレーションモデル

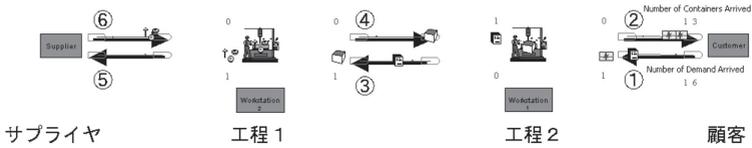
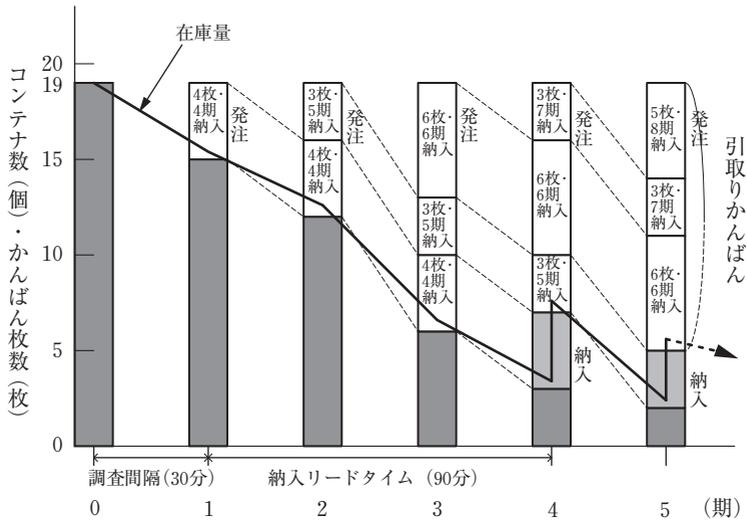


図10 かんばん方式におけるコンテナ内の在庫推移



(出所) 高桑・三輪 (2006)。

16回、すなわち1日8時間1シフトとすれば、30分間隔で調査および納入が行われ、90(=30×3)分後に(つまり、納入リードタイムが90分で)、当該かんばんが掛けられたコンテナ(品物を入れる容器)に対応する部品が納入されることを意味する。ここで、かんばん方式におけるコンテナ内の在庫推移の様子を図10に示す。これは基本的には定期発注方式であり、発注量はかんばん1枚に対応するコンテナ容量であり、発注しない場合もある¹³⁾。

13) 高桑・三輪 (2006)。

かんばん枚数ないしコンテナ個数の必要数を求めるためには、納入リードタイムと安全在庫量をあらかじめ調べておく必要がある。かんばん枚数 n は、納入リードタイム期間中の需要量 D と安全在庫量 S の和をコンテナの容量 P で割ることで、次式により求められる。

$$n = \frac{D + S}{P} \quad (3)$$

4. コスト（原価）の視点

利益を確保するために、売値と原価との関係において、次の2つの考え方があ
る。

$$\textcircled{1} \quad (\text{売値}) = (\text{原価}) + (\text{利益}) \quad (4)$$

$$\textcircled{2} \quad (\text{利益}) = (\text{売値}) - (\text{原価}) \quad (5)$$

需要が供給よりも多い場合には①の考え方がよいが、供給が需要よりも多い状況では、①の考え方で利益を確保することは困難である。そこで、トヨタ生産システムでは、②において、原価を可能な限り低減させること、つまり原価低減により、将来にわたって利益を確保することができる、と考える¹⁴⁾。

また、原価企画（target costing）は、製品の企画、開発・設計段階を中心に、生産準備、購買、生産、流通、販売・サービス、廃棄・リサイクルに至るすべてのプロセスを通して、総合的な原価低減を行うための活動である。これは、事業の企画や開発・設計の段階で、製品原価の大半が決定されるという考えに基づいており、トヨタ生産システムの実施においても原価企画は重視される。

原価企画のプロセスを次に示す¹⁵⁾。

① 製品企画 製品コンセプトと目標利益が設定される。

② 目標原価の設定 目標原価を次式により設定する。

$$(\text{目標原価}) = (\text{予定販売価格}) - (\text{目標利益}) \quad (6)$$

③ 目標原価の構造毎の展開 製品を構成する構造毎に目標原価を設定する。こ

14) 大野（1978）18頁。

15) 日本技術士会（2004）50頁。

ここで、構造とは、半製品などの機能をもったまとまりのことである。

- ④ 目標原価の部品毎の展開 ③の構造から、さらに部品毎に目標原価を設定する。
- ⑤ 設計上の原価低減の検討 原価低減のために、設計変更を検討する。
- ⑥ 製造への移行 目標原価に合致した設計を行った後、製造に移行する。ここで、さらなる仕様変更が行われることもある。
- ⑦ 原価企画活動の改善 最終的な改善策を取りまとめ、今後の原価企画活動につなげる。

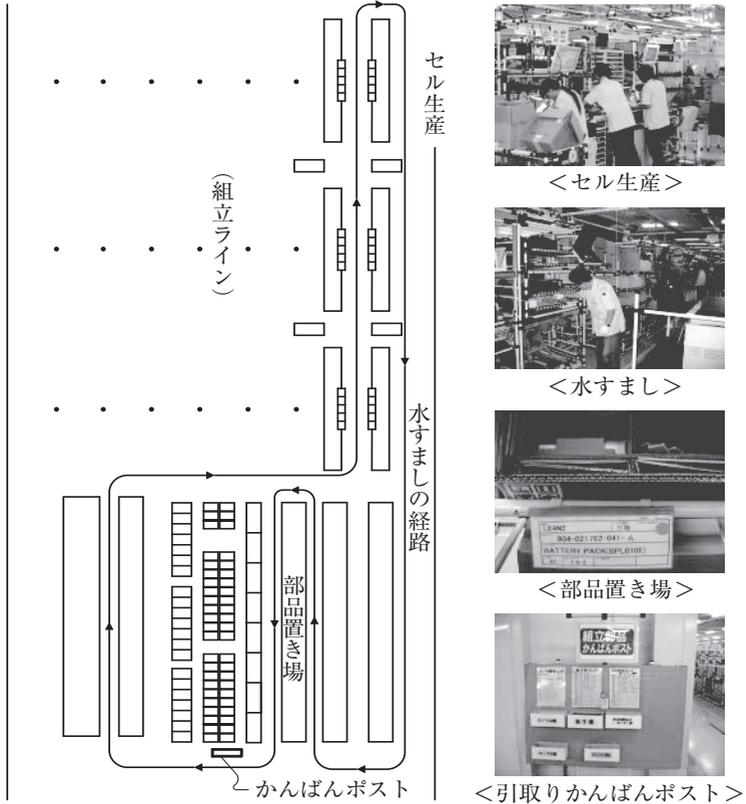
5. 品質の視点

さて、2.2で言及した「自動化」とは、異常が発生したり不良が発生したりするときに、それを検知し、即座に停止して必要な対応をすることであり、ジャストインタイム生産とともにトヨタ生産システムの基本的な考え方である。この自動化を具現するツールがアンドン（Andon）である。アンドンは異常が発生するとランプが点灯することで知らせる役割をもっており、「目で見える管理（visual management）」のツールの1つである。

トヨタ生産システムでは、後工程が引き取る部品には不良品を送らない、との考え方に基づいて、たとえ不良品をつくったとしても、次工程に送らないようにする。これは「自工程品質保証」であり、「品質を工程でつくり込む」と表現する。事例として、PC組立のセル生産・水すまし・かんばん方式を取り入れたジャストインタイム生産システムを図11に示す。

図中、組立ラインでは、3名ないし数名の作業員によるセル生産方式を採用している。ここでは、複数のPC組立ライン（コンベヤは使用していない）で構成されていて、各ラインでは作業者が一列に並んで、部品組付け・検査（エージング前および後）・梱包の各作業をセル生産方式で実施している。製品本体への部品の組付けは、作業者が手作業により行っている。各作業者に対して基本的な作業内容は与えられているが、適時、作業者間で「助け合い」が行われる。ここで、出荷前のすべての検査はラインの作業者が担当しており、合格すれば、当該ラインの最後の作業者によって、完成品（PC）は出荷のために梱包される。

図 11 ジャストインタイム生産システム



(出所) 高桑・三輪 (2006) を修正。

6. 結 言

トヨタ生産システムは、徹底してムダを排除することにより、品質の向上、コストの低減、納期の短縮の実現を目指した生産方式である。オペレーションズマネジメントの観点から、特に品質・コスト・納期(数量)に関して、シミュレーションモデルの構築ならびに事例を通して、トヨタ生産システムの基本的な特徴について検討した。

生産数量つまり必要数と稼働時間によってタクトタイムを決定することにより、1個あるいは1台当りの生産時間が決まる。このタクトタイムに基づいて、生産ラインの工程設計が行われる。さらに、生産実施に際しては、後工程引取りつまりプルシステムにより、後工程（顧客）の要求がある生産量だけ生産指示が行われる。ここで、「かんばん」が用いられる。

また、企業の利益は原価低減によってもたらされるとし、原価企画などの活動を通して、徹底したムダの排除を実践していく。

そして、不良品を後工程に送らないように、「品質を工程で作りこむ」。異常が発生したり不良が発生したりするときに、それを検知し、即座に停止して必要な対応をする「自動化」が行われる。

なお、品質、コスト（原価）、納期・数量の他の価値要件としては、特に図1における「環境」が重要であるが、この問題に関しては割愛する（高桑（2013））。

参考文献

- 大野耐一（1978）『トヨタ生産方式』ダイヤモンド社。
- 小川英次（1994）『トヨタ生産方式の研究』日本経済新聞社。
- ジャストインタイム生産システム研究会（編）（2004）『ジャストインタイム生産システム』日刊工業新聞社。
- 高桑宗右エ門（監訳）（2007）『シミュレーション—Arenaを活用した総合的アプローチ』（第4版）コロナ社。
- 高桑宗右エ門（編著）（2012）『東アジアのモノづくりマネジメント』中央経済社。
- 高桑宗右エ門（編著）（2013）『モノづくりと環境のマネジメント』中央経済社。
- 高桑宗右エ門（2015）『オペレーションズマネジメント』中央経済社。
- 高桑宗右エ門・三輪冠奈（2006）「セル生産・水すまし・かんばん方式援用生産システムにおける部品在庫管理のシミュレーション最適化」『オペレーションズ・リサーチ』Vol. 50, No. 7, 63-71頁。
- 日本技術士会（2004）『技術士制度における総合技術監理部門の技術体系』（第2版）日本技術士会，50頁。
- 門田安弘（1985）『トヨタシステム』講談社。
- Nomura, J. and S. Takakuwa (2004). Module-based modeling of flow-type multistage manufacturing systems adopting dual-card kanban system, in *Proceedings of 2004 Winter Simulation Conference*, IEEE, 1065-1072.