

# ジャストインタイム生産ラインの管理方式

高橋 勝彦, 中村 信人

## 1. はじめに

本報では、ジャストインタイム生産を実現するための生産システム、中でも生産工程、運搬工程、および在庫点が段階的に連なったジャストインタイム生産ラインに対する管理方式について述べる。

まず、ジャストインタイム生産ラインの各工程における生産や運搬の開始を指示する方式について述べる。必要なものを必要なときに必要な量だけ生産するというジャストインタイム生産の考え方の特徴は、各工程における生産や運搬の開始を指示する方式にみることができる。ここでは、そのような指示方式として、かんばん方式とその改良方式であるコンカレント方式について述べる。

続いて、ジャストインタイム生産ラインにおける生産環境の変化に適応する方式について述べる。益々厳しくなる生産環境の下で効率的な生産活動を実施し、生産システムの高い競争力や機動力を維持するためには、変化に対する適応性が求められている。先に述べた指示方式において、需要の変化を検知し、それに対してかんばん枚数と同時にバッファサイズの変更により適応する方式、さらには指示方式の切り替えにより適応する方式について述べる。

本報で述べるジャストインタイム生産ラインでは、以下を前提としているものとする。また、図1には、本報で前提とする生産ラインの概念図を示した。

- (1) 見込み生産可能な単一標準製品を生産している。
- (2) 需要の到着間隔は、確率変動を伴い、分散は一定だが、平均が時間とともに変化する。また、需要の受注残は認められる。
- (3)  $N$  段階直列型の実生産工程からなる。最初の工程から順に第1, 第2, ..., 第  $N$  生産工程と呼ぶ。
- (4) 各生産工程の生産時間は、確率変動を伴う。



図1 生産ラインの概念図

- (5) 第  $n$  生産工程とその直前の生産工程との間を、第  $n$  運搬工程と呼ぶ。
- (6) 生産工程の前後に生産待ち在庫点  $B$  と生産済み在庫点  $A$  を設置している。
- (7) 各生産工程の前後の在庫点には、バッファが在庫され、そのサイズ  $S_B^{(n)}, S_A^{(n)}$  は、検知された需要の変動に対応して動的に制御される。

## 2. 各工程における処理の指示方式

ジャストインタイム生産ラインにおける各工程の処理開始を指示する方式として、ここでは2種類の方式について述べる。ジャストインタイム生産を主要な柱とするトヨタ生産方式により、かんばんと呼ばれるカードを利用したかんばん方式が提案されている。ここではそのかんばん方式と、その改良方式の中から、コンカレント方式について述べる。

### 2.1 かんばん方式

かんばん方式は、ある工程において次の3種類の条件が揃った時点でその工程に対して指示が行われる。すなわち、(1) かんばんにより後続工程から需要が在庫点に到着し、(2) それに対応する品目の在庫があり、(3) その処理が可能となった時点において、在庫品から添付されていたかんばんを外して、その処理を指示する。さらにその前工程に対しても、同様な手続きで指示が行われる。図2には、かんばん方式の概念図を示した。なお、ここでかんばんは、生産を指示する生産指示かんばんと運搬を指示する引き取りかんばんに分けて示した。

かんばん方式の考え方より、各在庫品それぞれにかんばんが添付され、かんばんが外されると同時に指示されるとした場合、かんばん方式における第  $n$  工程

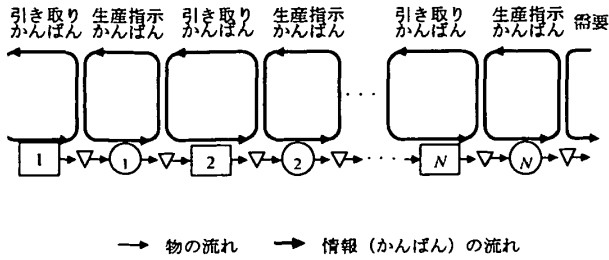


図2 かんばん方式の概念図

の第  $i$  番目の生産指示, 運搬指示の時点  $OP_i^{(n)}, OT_i^{(n)}$  は, 以下の式で定式化される (文献[5, 7]参照. ただし, 文献[15]では異なる式に定式化されている).

$$OP_i^{(n)} = \max\{OT_i^{(n+1)}, P_{i-S_i}^{(n)}, T_{i-1}^{(n+1)}\} \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

$$OP_1^{(N)} = \max\{D_i, P_{i-S_i}^{(N)}\} \quad (2)$$

$$OT_i^{(n)} = \max\{OP_i^{(n)}, T_{i-S_i}^{(n)}, P_i^{(n)}\} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

上の各式において, 右辺の最大値関数における各項のそれぞれが, 順に先の3種類の条件を表し, 最大値関数によりそれらが揃った時点を表している. また, 第2の条件, すなわち後続工程からの需要に対応した在庫があるという条件は, その在庫点に割当てられたバッファサイズだけ以前の処理が完了した時点により表している. ここで,  $D_i$  は, 第  $i$  番目の需要の到着時点. また,  $P_i^{(n)}, T_i^{(n)}$  は, 第  $n$  生産, 運搬工程の第  $i$  番目の処理完了時点を示し, 以下の式で表される.

$$P_i^{(n)} = \max\{OP_i^{(n)}, T_{i-S_i}^{(n)}, P_i^{(n-1)}\} + p_i^{(n)} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$T_i^{(1)} = \max\{OT_i^{(1)}, T_i^{(1)}\} + t_i^{(1)} \quad (5)$$

$$T_i^{(n)} = \max\{OT_i^{(n)}, P_{i-S_i}^{(n-1)}, T_i^{(n-1)}\} + t_i^{(n)} \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (6)$$

ただし,  $p_i^{(n)}, t_i^{(n)}$  は, 第  $n$  生産, 運搬工程の第  $i$  番目の処理時間を表す.

## 2.2 コンカレント方式

かんばん方式は後続工程から前工程に順次シーケンシャルに指示する方式といえ, それに対してすべての工程にコンカレントに指示するコンカレント方式[14]が提案されている. かんばん方式では, 後続工程からかんばんにより需要の情報が在庫点に到着しても, 対応する品目の在庫がないか, その処理が可能でなければ, 指示が行われず. それらにより, 一時的に指示遅延が発生した場合に, その原因を検討し, より望ましい生産ラインへの改善を促すことで, ジャストインタイム生産の実現を意図している. 一方, 需要の情報が到着すると同時に指示すると, ある工程で処理の遅

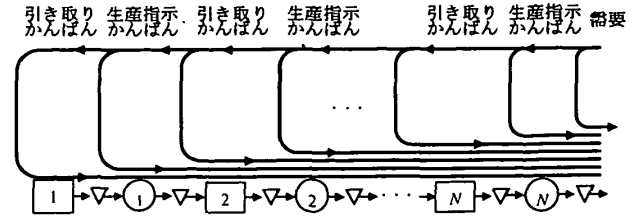


図3 コンカレント方式の概念図

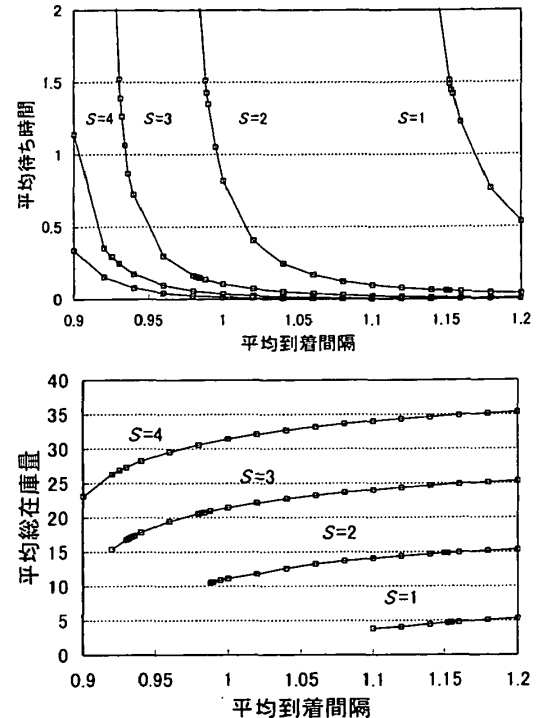


図4 かんばん方式における需要の平均到着間隔の影響

れが生じて, それを前後工程に波及させないことが期待できる. その方式は, 後続工程から需要の情報が到着すると同時に, すなわち製品需要が到着すると同時にすべての工程に同時並行してコンカレントに指示する方式といえる. 図3には, コンカレント方式の概念図を示した.

コンカレント方式における生産指示, 運搬指示の時点  $OP_i^{(n)}, OT_i^{(n)}$  は, 以下の式で表せる.

$$OP_i^{(n)} = D_i \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$OT_i^{(n)} = D_i \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

また, 生産や運搬の完了時点は, かんばん方式と同一の式(式(4)~(6))で表される.

## 2.3 指示方式の特性

指示方式の特性について数多くの研究が行われている (例えば, 文献[5, 7, 15]). また, 指示方式の比較も行われている (例えば, 文献[9]).

図4には, 定常状態のかんばん方式におけるバッファサイズ ( $S = S_i^{(n)} = S_i^{(n)}$ ), 需要の平均到着間隔と,

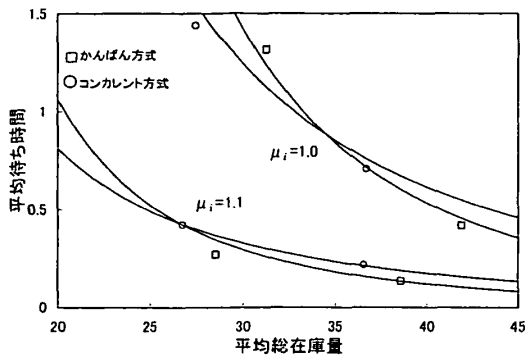


図5 両指示方式における平均総在庫量と需要の平均待ち時間のトレードオフ

需要の平均待ち時間、平均総在庫量との関係の例を示した(詳しくは文献[8]参照)。

図4より、かんばん方式において需要の平均到着間隔が減少し、より頻繁に需要が到着するようになったときに、バッファサイズとそれに添付するかんばん枚数をそのまま固定していた場合には、平均総在庫量は若干減少するものの、需要の平均待ち時間が急激に増大することがわかる。コンカレント方式においても同様の特性を示すが、かんばん方式における指示遅延を解消していることから、同じバッファサイズの下では、かんばん方式よりも需要の平均待ち時間は小さくなるかわりに、平均総在庫量が大きくなる。図5には、両方式における需要の平均待ち時間と平均総在庫量のトレードオフの例を示した(詳しくは文献[7, 9]参照)。

図5より、需要の平均待ち時間を小さく抑えたい場合にはかんばん方式が有利となり、逆に平均総在庫量を小さく抑えたい場合にはコンカレント方式が有利となるが、またその際の境界条件は、需要の平均到着間隔の影響を受けることがわかる。

### 3. 変化に適応する方式

上で示した指示方式の特性は、定常分布に従って需要が到着する場合の特性である。近年の生産環境は、益々厳しくなり、安定的に需要が到着する期間は短くなっているといえる。これより、需要が非定常変動を伴う場合に、非定常な変化に適応する方式が求められているといえる。ここでは、ジャストインタイム生産ラインに対して提案されている、需要の非定常変動に適応する方式について述べる。

#### 3.1 バッファサイズによる適応

上で示したようにバッファサイズを固定した下では、需要の平均到着間隔が減少すると、需要の平均待ち時間が急激に増大する。かんばん方式では、従来よりか

んばん枚数およびそれに連動したバッファサイズの制御が検討されている[1, 4]。それにより、需要の非定常変動に対する適応が考えられる[8]。

確率変動する需要データから非定常変動を検知するために、需要の第*i*番目の到着間隔  $d_i = D_i - D_{i-1}$  を、次式により指数平滑した値  $H_i$  を利用する。

$$H_i = \alpha d_i + (1 - \alpha) H_{i-1} \quad (9)$$

ここで、 $\alpha$  は平滑化係数を表す。求めた平滑値  $H_i$  に管理図[2]の考え方を応用し、以下で求める上下限值  $UCL_s, LCL_s$  により、現在のバッファサイズ  $s$  を変更すべき需要の平均到着間隔の非定常変動を検知する。

$$UCL_s = \bar{\mu}_s + \delta \sqrt{\frac{\alpha}{2 - \alpha}} \sigma_x \quad (10)$$

$$LCL_s = \underline{\mu}_s - \delta \sqrt{\frac{\alpha}{2 - \alpha}} \sigma_x \quad (11)$$

ここで、 $\delta$  は乗数。また、 $\underline{\mu}_s$  と  $\bar{\mu}_s$  は、需要の平均待ち時間を要求水準以下に抑えるために、バッファサイズを  $s$  に設定するのが望ましい、需要の平均到着間隔の下限値と上限値を示す。

需要の平均到着間隔の非定常変動が検知されたときのバッファサイズの制御則は、上述の上下限值を利用して、次式で表される。

$$S_i^{(n)} = \begin{cases} s & (LCL_s < H_i < UCL_s) \\ r & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $X = A, B$ 。また、バッファサイズの変更値  $r$  は、バッファサイズ  $r$  が望ましい、需要の平均到着間隔の区間  $[\underline{\mu}_r, \bar{\mu}_r]$  のうち、 $H_i$  が含まれた区間より求める。

図6には、先に示した図4に対して、バッファサイズを制御する方式の特性の例を示した。図6より、需要の平均到着間隔における変化に対して、かんばん方式において各在庫点のバッファサイズの制御により(図中の太線)、需要の平均待ち時間の要求水準(図では1.5)が満たせると同時に、バッファサイズを(この場合では4に)固定した場合と比較して、平均総在庫量の大幅な削減が期待できることを示している。

#### 3.2 指示方式の切替えによる適応

先の図5に示したように、需要の条件により、かんばん方式とコンカレント方式のいずれが有利となるかが影響を受ける。これより、需要の非定常変動に対して指示方式の切替えによる適応[10]が考えられる。

図7には、先に示した図5に対して、かんばん方式とコンカレント方式それぞれが有利となる条件を示した。

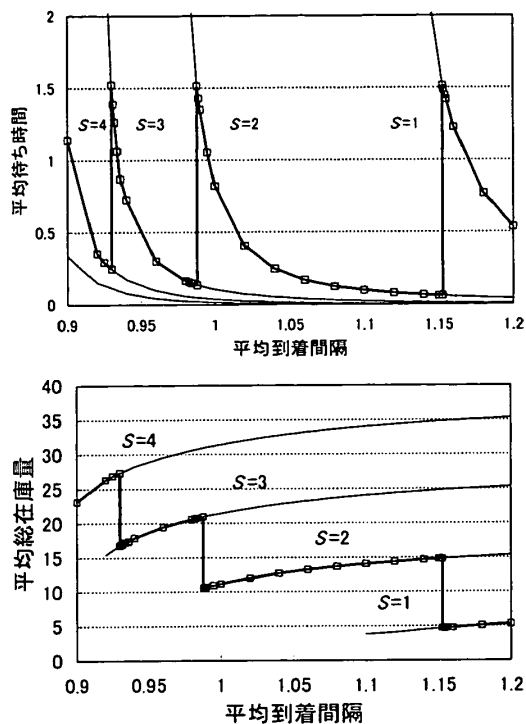


図6 かんばん方式における需要の平均到着間隔の影響とバッファサイズ制御

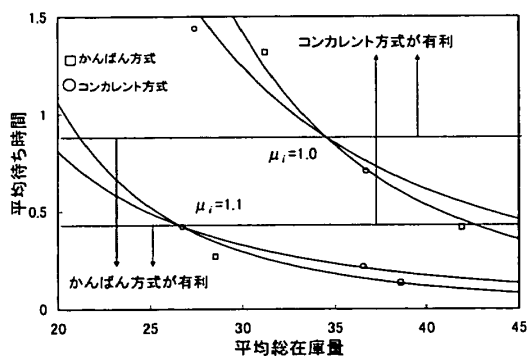


図7 両指示方式における平均総在庫量と需要の平均待ち時間の関係

図7より、需要の平均待ち時間に対する要求水準が厳しい場合にはかんばん方式が、そうでない場合にはコンカレント方式が有利となり、その境界条件は需要の平均到着間隔の影響を受け、需要の平均待ち時間が減少すると、かんばん方式が有利となる条件が増大することがわかる。需要の平均到着間隔について、図に示した以外の条件についても同様に特性のトレードオフを分析することにより、与えられた需要の平均待ち時間に対する要求水準を満たしながら平均総在庫量を小さく抑える指示方式と、その指示方式を採用する需要の平均到着間隔の条件が求められ、それによって先と同様な方式で検知した需要の非正常変動に対して、バッファサイズのみならず指示方式を切り替えること

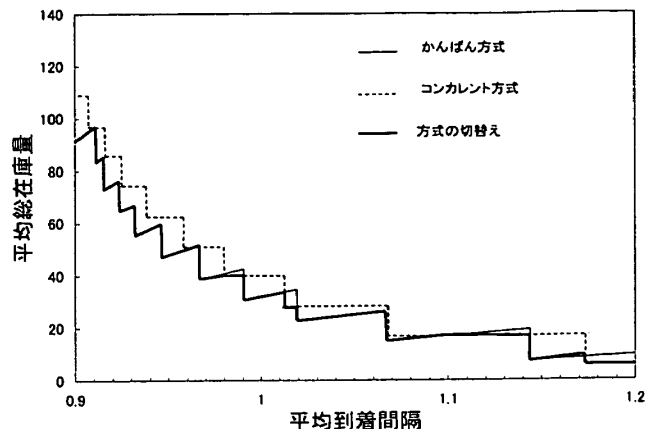


図8 両指示方式におけるバッファサイズのみ制御、および指示方式の切替えによる平均総在庫量

で、需要の変化に対して効果的に適応できる。

図8には、需要の非正常変動に対してそれぞれの指示方式でバッファサイズのみを制御した場合（図中の細線；かんばん方式、点線；コンカレント方式）、および両方式を切替えた場合（図中の太線）の平均総在庫量の例を示す（詳しくは文献[10]参照）。図8より、需要の非正常変動に対して、それぞれの指示方式でバッファサイズのみを制御することに加えて、両指示方式を切替えることにより、平均総在庫量は更に小さく抑えられることがわかる。

#### 4. おわりに

本報では、ジャストインタイム生産ラインの管理方式について述べた。まず、各工程における処理の開始を指示する方式として、かんばん方式とコンカレント方式について述べ、それらの特性を示した。続いて、需要の非正常変動に対してバッファサイズ、および指示方式の切替えにより適応する方式について述べた。

その他これまでに、かんばん方式を改良した指示方式として、階層型かんばん方式[3]や constant work-in-process (CONWIP) 方式[6]なども開発されている。また、変化に適応する方式として、工程により異なるバッファサイズも認める場合[11]、需要の到着間隔の平均ばかりでなく分散の変化も考慮した場合[12]などについても研究が行われている。今後の課題としては、バッファサイズや指示方式といった管理方式のみならず、処理時間など生産システムそのものによる対応[13]が挙げられ、現在研究が進められている。

#### 参考文献

[1] Gupta, S. M. and Y. A. Y. Al-Turki, "An Algorithm

- to Dynamically Adjust the Number of Kanbans in Stochastic Processing Times and Variable Demand Environment”, *Prod. Plann. Cont.*, 8(2), 133-141, (1997).
- [2] Lucas, J. M. and M. S. Saccucci, “Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements”, *Technometrics*, 32(1), 1-12, (1990).
- [3] 村木孝彰, 平川保博, “階層型かんばん制御生産システムの性能”, 日本経営工学会論文誌, 49(1), 31-35, (1998).
- [4] Rees, L. P., P. R. Philipoom, B. W. Taylor, III, and P. Y. Huang, “Dynamically Adjusting the Number of Kanbans in a Just-in-Time Production System Using Estimated Values of Leadtime”, *IIE Trans.*, 19(2), 199-207, (1987).
- [5] Spearman, M. L., “Customer Service in Pull Production Systems”, *Operat. Res.*, 40(5), 948-958, (1992).
- [6] Spearman, M. L., D. L. Woodruff, and W. J. Hopp. “CONWIP: A Pull Alternative to Kanban”, *Int. J. Prod. Res.*, 28(5), 879-894, (1990).
- [7] 高橋勝彦, 中村信人, “かんばん方式における指示遅延の効果”, 日本経営工学会誌, 46(5), 467-475, (1995).
- [8] 高橋勝彦, 中村信人, “適応型かんばん方式に関する研究”, 日本経営工学会論文誌, 48(4), 159-165, (1997).
- [9] Takahashi, K. and N. Nakamura, “Ordering Alternatives in JIT Production Systems”, *Prod. Plann. Cont.*, 9(8), 784-794, (1998).
- [10] 高橋勝彦, 中村信人, “指示方式の動的切替えに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, 50(3), 131-138, (1999).
- [11] 高橋勝彦, 中村信人, “かんばん枚数の配分を考慮した適応型かんばん方式”, 日本経営工学会論文誌, 50(5), 333-340, (1999).
- [12] 高橋勝彦, 中村信人, “需要の平均と分散の変化に対する適応型かんばん方式”, 日本経営工学会論文誌, 51(3), 203-212, (2000).
- [13] 高橋勝彦, 中村信人, “かんばん枚数と処理時間の制御による適応型かんばん方式”, 日本経営工学会平成12年度秋季研究大会予稿集, 70-71, (2000).
- [14] Takahashi, K., N. Nakamura, and M. Izumi, “Concurrent Ordering in JIT Production Systems”, *Int. J. Operat. Prod. Manage.*, 17(3), 267-290, (1997).
- [15] Tayur, S. R., “Structural Properties and a Heuristic for Kanban-controlled Serial Lines”, *Manage. Sci.*, 39(11), 1347-1368, (1993).