

ジャストインタイム生産システム

名古屋工業大学 生産システム工学科

大野 勝久

1. はじめに

ジャストインタイム (Just-In-Time) 生産システムは、徹底的なムダの排除によるコスト低減をめざした生産システムであり、その基本理念は平準化を基礎とするJITと自動化である。トヨタ生産方式として、1973年のオイル・ショック時に脚光を浴びて登場して以来、この26年間に本生産方式は、全世界にJIT Production SystemあるいはKanban Systemとして広く知られるようになってきた。

JIT生産システムの特徴は、

- 1) 多種少量生産システムに適合した後工程引き取り後補充生産方式 (pull方式)
- 2) 自律分散型生産システム
- 3) 改善による「徹底的なムダの排除」の「仕組み」と改善提案活動
- 4) 多能工とU字型生産ライン

である。本稿ではページ数の制限もあり、JIT生産システムにおけるモデル化を概説した [1] を参考に、定量引き取りかんばん方式、定期引き取りかんばん方式及びU字型生産ラインに関する研究を紹介する。

2 JIT生産システム

JITとは、必要な物を、必要な時に、必要なだけ生産するという理念であり、この理念を実現する方式として「後工程引き取り後補充生産方式」が創案され、工程内、工程間で必要な情報を必要なときに伝える手段としてかんばんが考え出された [2,3]。すなわち、いつ、何を、どれだけ必要かが最も早く、正確にわかる後工程が、使った分だけを前工程に引き取りに行き、前工程は引き取られた分だけを生産し、補充するという生産方式である。このとき、後工程が自工程の都合だけで部品をまとめて引き取れば、前工程はそのための在庫を持つか、あるいは生産能力を増やして対応しなければならず、負担を強いられることになる。したがって、後工程は前工程から引き取る部品の種類、量が平均化するように生産しなければならない。これを生産の平準化とよんでいる。自動化とは、機械に人間の知恵を付与することであり、良品のみを生産する理念である。すなわち、異常を自動的に検知して停止する機械、さらには不具合が発生すれば作業者がラインを停止させ、再発防止のための改善をはかる生産ラインを生み出している。

かんばんは、需要変動、部品在庫、設備故障、出勤状況の変化等々の不確実性のもとで、JIT生産を実現するために考案された「後工程引き取り後補充生産方式」における情報伝達・制御手段である。部品あるいは製品の収容箱には1枚のかんばんが付けられ、工程内あるいは工程間を循環し、各工程における生産と前工程からの部品の引き取りを制御する。かんばんには大別して、生産指示かんばんと引き取りかんばんの2種類があり、その流れは図1に示されている。すなわち、前工程で生産された部品は収容箱に入れられ、生産指示かんばんを付けられて所定の場所におかれる。後工程がこの部品を引き取りに来たとき、生産指示かんばんをはずして、かんばん受け取りポストに順に入れ、代わりに持ってきた引き取りかんばんをかけて収容箱を持ち帰る。はずされたかんばんは適宜集められ、はずれた順に生産指示かんばんポストにおかれる。前工程はそのかんばんの順に、対応する部品を収容箱の容量(収容数とよぶ)だけ生産する。このとき、かんばんはその最初の部品とともに工程を流れる。一方、後工程が前工程からの部品を用いて生産を始める際、収容箱の最初の1個を使用するとき、かけられている引き取りかんばんをはずし、引き取りかんばんポストに入れる。後工程は、あらかじめ定められた時間毎に、あるいは定められた枚数がたまる毎に、空の収容箱と一緒にかんばんを持って前工程へ部品を引き取りに行く。前者を「定期引き取り方式」、後者を「定量引き取り方式」とよんでいる。特に、前工程が外注工場である引き取りかんばんは、外注かんばんとよばれている。外注かんばんの場合、引き取りに行くのではなく、外注工場が定められた納入間隔で定期的に納入し、同時に発注をうける方式を採用している。したがって、外注かんばんは、本質的に定期引き取り・発注方式であり、発注から納入までの納入リードタイムは、自社内に比べて相対的に長く、無視できないものになる。このように、各工程で使われるかんばん枚数が決められると、その工程は自律分散的に生産活動を継続する。そして、生産指示かんばんの枚数がその工程の完成品の収容箱単位の最大在庫量になり、引き取りかんばんの枚数が前工程からの部品の収容箱単位の最大在庫量に対応する。も

しかんばん枚数を多くすれば、工程は過剰在庫を抱えることになり、逆に少なくすれば材料・製品切れを引き起こすことになる。

トヨタ自動車（株）におけるかんばん枚数の計算式は、かんばんが一巡する間に品切れを起こさないために必要となる量に安全在庫量を付け加えた枚数であり、その安全在庫量は過去の実績、計画あるいは改善を目指した戦略から経験的に定められている。

3 定量引き取りかんばん方式

Karmarkar and Kekre [4] は、収容数が1の生産指示かんばんによって生産が制御され、引き取りは生産指示かんばんポストにかんばんがある限り直ちに行われるものとした、2工程からなる生産指示かんばんモデルを考えている。各工程の加工時間が指数分布に従い、ポアソン過程に従う需要が第2（最終）工程の製品を引き取るものと仮定して、この生産指示かんばんモデルをマルコフ待ち行列として定式化し、標準的な釣合方程式からその定常分布を数値的に求めている。

Mitra and Mitrani [5,6] はより一般的に、工程 j が C_j 枚の生産指示かんばんをもつ、図2に示される N 工程からなる生産指示かんばんモデルを考えている。工程 j の機械の待ち行列 Q には、かんばんのついた工程 $(j-1)$ の完成品（部品）が加工を待っており、加工が完了したとき工程 $(j+1)$ の生産指示かんばんポスト A' にかんばんがなければ、完成品置き場 B で A' にかんばんが到着するのを待つ。一方、加工が完了したとき A' にかんばんがあれば、直ちに工程 $(j+1)$ の生産指示かんばんとともに待ち行列 Q' に入り、工程 j の生産指示かんばんは生産指示かんばんポスト A に戻る。そして、工程 $(j-1)$ の完成品置き場に部品があれば、直ちにその部品とともに待ち行列 Q に入る。

この生産指示かんばんモデルと同じ条件のもとで、工程 j がかんばんの代わりに C_j 個のバッファ（加工中を含む）をもつ通常の N 工程直列形生産ラインを考える。工程 j の加工が完了したとき、後工程のバッファに空きがなければ、加工済みの部品は工程 $(j+1)$ へ進めず、工程 j の機械をブロックする。これを生産ブロッキングとよぶ。生産指示かんばんはバッファに比べてより柔軟であり、通常の直列形生産ラインと比較し、需要の待ち時間が短く、生産リードタイムも短くなり、スループット（平均生産率）も向上することが示される。さらに、需要がポアソン過程に従って到着し、各加工時間が指数分布に従うとき、この生産指示かんばんモデルはマルコフ待ち行列としてモデル化でき、その定常確率は標準的な釣合方程式から原理的に求めることができる。しかしその計算は極めて大規模になるため、各工程毎に分割してfixed-point equationを用いた近似解法を導き、シミュレーションと比較してその精度を検証している [6]。

前節に述べたように、実際のJIT生産システムの引き取りは、引き取りかんばんを用いて行われる。一方、この生産指示かんばんモデルでは、生産指示かんばんポストにかんばんがある限り引き取られ、待ち行列 Q の様に実際のJIT生産システムにはない待ち行列がみられるものの、1枚を定量とする生産指示かんばんと同数枚の引き取りかんばんをもつ定量引き取りかんばん方式のモデルと考えることができる。

Tayur [7] は、図2に示される N 工程からなる生産指示かんばんモデルにおいて、より一般的に各工程 j が、十分なバッファをとって直列に配置された M_j 台の機械からなる生産ラインを考え、記号 $N/(M_1, \dots, M_N)/(C_1, \dots, C_N)$ で表している。そして、標本過程法により構造的な特性として優越性と可逆性を導いている。工程 N には常に製品需要が待っているものと仮定し、 T_n で n 番目の製品の完成時刻を表すことにする。各工程 j のかんばん枚数が C_j' のときの製品完成時刻を T_n' で表す。 T_n 、 T_n' の分布関数を $F(t)$ 、 $F'(t)$ で表したとき、 $F(t) \geq F'(t)$ ならば T_n は T_n' より確率的に小さいとよぶ。このとき、 T_n の平均が T_n' の平均より小さいこと等が導かれる。

定理1 [優越性] $M_1 = \dots = M_N = 1$ のとき、任意の $1 \leq j < k \leq N$ にたいして $C_j + \dots + C_k \geq C_j' + \dots + C_k'$ ならば、 T_n は T_n' より確率的に小さい。

この定理の系として、

系1

- 1) 各工程のかんばん枚数が増加すれば、スループットも増加する。
 - 2) 総かんばん枚数 $C = C_1 + \dots + C_N$ が一定のとき、 $N \geq 3$ ならば、 $C_1 = C_N = 1$ を満たす割り当てがスループットを最大にする。
- が示されている。さらに上記2)は、 $N/(1, M_2, \dots, M_{N-1}, 1)/(C_1, \dots, C_N)$ へと一般化されている。また、

全工程の機械数 $M=M_1+\dots+M_N$ と C が与えられたときの最適分割は次の定理で与えられる。

定理2 [最適分割] M と C が一定の全ての構成の中で、 $1/(M)/(C)$ が T_n を確率的に最小化する。

この定理はあくまでも、最大工程間在庫量 C が一定のときに、スループットを最大にする生産システムが、工程間在庫量一定の単一工程生産システムになることを主張するものである。数値的にはあるが、各工程が単一機械からなる図2の生産指示かんばんモデルが、同じ最大スループットをより少ない平均工程間在庫量で達成することが示されている [8]。

工程1から N の順番を逆にし、 N から1へと流す生産システムを逆システムとよぶ。両システムが共に空の初期状態から出発したとき、両システムの n 番目の製品完成時刻が全ての n で一致するとき、生産システムは D -可逆とよばれる。

定理3 [可逆性] 生産システム $N/(M_1, \dots, M_N)/(C_1, \dots, C_N)$ は、 D -可逆である。

$N/(M_1, \dots, M_N)/(\cdot)$ が与えられたとき、 C 枚のかんばんをスループットが最大になるように配分する問題を考える [7]。定理1~3等の結果を用いても、依然として多数の組み合わせ (C_1, \dots, C_N) にたいするスループットを評価しなければならない。この計算は、各機械の加工時間分布が指数分布に従う場合の厳密値でさえ困難であり、通常シミュレーションによらなければならない。相当の計算時間を覚悟しなければならない。そこで、スループットの代わりに、各機械の加工時間分布が指数分布に従う場合のマルコフ待ち行列の状態数を最大化することを提案し、そのアルゴリズムを与え、大多数の数値例で実際にスループットを最大化することを示している。

[8]では、一般化セミマルコフ過程 (generalized semi-Markov process) [11]を用い、定理1~3の他にSchur凹性等種々の構造特性を論じている。さらに、[9]では工程1への原材料の確率的な到着、工程 N からの需要の確率的な引き取りおよび各工程での機械故障、部品の再加工、部品の廃棄がある場合を論じ、部品の廃棄がある場合に可逆性が成立しない以外は、同様な結果が成り立つことを示している。

Buzacott and Shanthikumar [10, 第4章]は、原材料倉庫をもち、需要の確率的な引き取りがある単一工程生産指示かんばんモデルを考え、通常の待ち行列モデルと等価であることを示している。さらに、 N 工程直列生産システムにたいして、調達タグ (tag)、発注タグ、加工タグ、生産指示かんばんを用いるPAC (Production Authorization Cards)システムを提案し、MRP、かんばん方式、OPT等を含むことやその性質を示し、近似的な性能評価を与えている [10, 第10章]。また、Glasserman and Yao [11, 第5章]もかんばん方式の一般化である (a, b, k) モデルを提案し、一般化セミマルコフ過程を用いて単調性、凹性、可逆性等の性質を導いている。

Spearman [12]は、生産指示かんばんと引き取りかんばんを用いたかんばん方式をモデル化し、需要の平均待ち時間が加工時間に関して単調増加であり、かんばん枚数に関して単調減少になることを導いている。Askin et al. [13]は、 m 品種の部品を生産する工程を考え、近似的に最適生産指示かんばん枚数を決定する簡単な手順を導いている。すなわち、各品種毎に $M/G/1$ 待ち行列あるいは $GI/G/1$ 待ち行列から得られた生産繰り越し量を用いて、 $M/M/s$ 待ち行列に類似した釣合方程式を導き、その近似定常分布を解析的に求めている。この定常分布を用いれば、在庫費用と品切れ損失からなる平均総費用を最小化する最適生産指示かんばん枚数が得られる。最近の研究としては他に [14,15,16]がある。

4 定期引き取りかんばん方式

Kimura and Terada [17]は、直列形の N 工程からなる生産指示かんばんと引き取りかんばんを用いた定期引き取りかんばん方式をモデル化し、需要の確率的変動が前工程にどのように波及するかをシミュレーションを用いて論じている。シミュレーションによる研究は数多く行われているが、理論的な研究としてBerkley [18]は、加工時間がアーラン分布に従う N 工程からなる、生産指示かんばんと引き取りかんばんを用いた定期引き取りかんばん方式の定常分布を分解法を用いて計算している。

前節で述べたように、同一工場内の引き取りは定量で行われることが多い。唯一必ず定期引き取りが行われるのは、外注かんばんである。外注工場から部品を引き取り、製品を完成させる単一工程JIT生産システムを考える [19]。図1の前工程が対象のJIT生産システムであり、後工程は顧客の需要である。外注工場は、一定の納入間隔(1期とする)で納入リードタイム L 期前に発注された部品を納入し、同時に前期に生産に使われ、はずされた外注かんばんと空の収容箱を持ち帰る。生産指示かんばんと外注かんばんの枚数をそれぞれ C, M とおく。簡単のため収容数を1とし、工程の1期あたり生産能力を E とする。顧客の1期あたりの需要は、互いに独立で同一の分布に従うものとし、平均を

dとおく。満たされなかった需要は次期に繰り越されるものとする。この節では以下の記号を用いる。

D_k : 第k (=1,2,...)期の需要量

B_k : 第k期首における繰り越し需要量

J_k : 第k期首の生産指示かんばんポスト内のかんばん枚数

$X_k = B_k + J_k$: 第k期首の生産繰り越し量

$k \rightarrow \infty$ のとき、 X_k 等の分布が定常分布へ収束すれば、JIT生産システムは安定であるといわれる。待ち行列理論における安定性の議論と同様にして、次の定理が導かれる。

定理4 [安定性] $\Pr\{D_k \neq d\} > 0$ ならば、JIT生産システムが安定となるための必要十分条件は、

$$\min\{C, E, M/(L+1)\} > d$$

である。 $\Pr\{D_k = d\} = 1$ ならば、その必要十分条件は、

$$\min\{C, E, M/(L+1)\} \geq d$$

となる。

安定条件のもとで、 X_∞ の確率母関数を求めることができ、平均総費用を計算することで最適かんばん枚数を定めることができる [19]。Kirkavak and Dinçer [20]は、需要がポアソン到着し、加工時間が指数分布に従う、繰り越し需要のない定期引き取り方式の定常分布を計算する近似分解アルゴリズムを提案している。また、かんばんを用いることなく、各期首においてシステムの状態を観測し、部品発注量と製品生産量を決定する、単位時間当たり平均費用を最小化する最適発注・生産政策をマルコフ決定過程を用いて求めることができ、最適かんばん枚数のもとでのかんばん方式が決して最適ではないことが示されている [21]。関連した研究として、2工程直列生産システムの最適制御が [22] に論じられている。

5 U字型生産ライン

1節で述べたように、JIT生産システムを特徴づけるものが多能工とU字型生産ラインである。多能工とは、複数工程の作業を受け持つ作業者のことであり、U字型生産ラインとは、図2の工程1からNがU字型に配置された、原材料の入口と製品の出口が近接した生産ラインである。工程1とNを同じ多能工が受け持つことで、生産ライン内の部品在庫量を常に一定に保つことができ、また全工程を1人の多能工が受け持つことで、1個流しを実現できる。さらに、多能工数を調整することで、需要変動に柔軟に対応することができる。したがって、現今の需要の多様化と製品寿命の短命化に適合した数少ない生産ラインであるにもかかわらず、従来ほとんど研究されてこなかった。本節では紙数の関係で、U字型生産ラインの研究を簡単に紹介する [23,24,25]。

1人の多能工が工程1からNを受け持つものとし、時刻0で各工程jの機械(以下機械jとよぶ)は、加工を完了した1個の部品を保持しているものとする。多能工は、まず機械1から加工を完了した部品をはずして機械2へ送り、原材料部品を機械1へ取り付ける。ついで、機械1のスタートボタンを押し、機械2へ移動を開始する。この動作を機械2,...,N,1と繰り返す。もし機械jへ到着したとき、前の周期に始めた加工が完了していなければ、その完了を待たなければならない。製品の完成時間間隔をサイクル時間と呼び、スループットはその逆数で与えられる。[23]では、加工時間、作業時間、歩行時間が確率的に変動するU字型生産ラインの可逆性とサイクル時間分布が工程の初期条件に依存することが示されている。[24]では、加工時間、作業時間、歩行時間が主に確定的な場合の各工程での多能工の待ち時間を解析し、U字型生産ラインのサイクル時間を導いている。特に、歩行、作業、加工時間が全て定数となる場合、それらを r_j, s_j, t_j で表せば、サイクル時間Cは次式で与えられる。

$$C = \max \left\{ \max_{j=1, \dots, N} (s_j + t_j), \sum_{j=1}^N (r_j + s_j) \right\}.$$

さらに、多能工数が所与のときのサイクル時間を最小化する多能工最適割り当て問題を論じている。また、加工時間等が確率的に変動し、加工・作業の合計時間が他の工程よりも確率1で大きいボトルネック工程が存在する場合の平均サイクル時間を求めている。[25]では、加工時間が一般分布に従うU字型生産ラインの平均サイクル時間の上、下限を導き、これらの値を用いた平均サイクル時間の近似式を提案している。

6 おわりに

JIT生産システムの研究は、製造業の復権をめざす米国を中心に精力的に理論的研究が進み、既に

1000を越えるものと思われる。ページ数の関係もあり十分な紹介ができなかったが、本稿がこの分野へ興味をお持ちいただくきっかけとなれば望外の幸せである。

おわりに、資料をご提供いただいた名古屋工業大学中出康一講師、小島貢利助手、伊藤崇博技官に深謝いたします。

参考文献

- [1] 大野勝久, 1998, JIT生産システム, オペレーションズ・リサーチ, 43巻5号, 272-278.
- [2] 大野耐一, 1978, トヨタ生産方式-脱規模の経営をめざして, ダイヤモンド社
- [3] 門田安弘, 1991, 新トヨタシステム, 講談社
- [4] Karmarkar, U. S., and Kekre, S., 1989, Batching policy in kanban systems, *J. Manufacturing Systems*, 8, 317-328.
- [5] Mitra, D., and Mitrani, I., 1990, Analysis of a kanban discipline for cell coordination in production lines. I, *Management Sci.*, 36, 1548-1566.
- [6] Mitra, D., and Mitrani, I., 1991, Analysis of a kanban discipline for cell coordination in production lines. II, *Operations Res.*, 39, 807-823.
- [7] Tayur, S. R., 1993, Structural properties and a heuristic for kanban-controlled serial lines, *Management Sci.*, 39, 1347-1368.
- [8] Tayur, S. R., 1992, Properties of serial kanban systems, *Queueing Systems*, 12, 297-318.
- [9] Muckstadt, J. A., and Tayur, S. R., 1995, A comparison of alternative kanban control mechanisms. I, *IIE Transactions*, 27, 140-150.
- [10] Buzacott, J. A., and Shanthikumar, J. G., 1993, *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [11] Glasserman, P. and Yao, D. D., 1994, *Monotone Structure in Discrete-Event Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- [12] Spearman, M. L., 1992, Customer service in pull production systems, *Operations Research*, 40, 948-958.
- [13] Askin, R. G., Mitwasi, M. G., and Goldberg, J. B., 1993, Determining the number of kanbans in multi-item Just-In-Time systems, *IIE Transactions*, 25, 89-98.
- [14] Mitwasi, M. G., and Askin, R. G., 1994, Production planning for a multi-item, single-stage kanban system, *Int. J. Production Res.*, 32, 1173-1195.
- [15] Siha, S. 1994, The pull production system: modelling and characteristics, *Int. J. Production Res.*, 32, 933-949.
- [16] Mascolo, M.D., Frein, Y., and Dallery, Y., 1996, An analytical method for performance evaluation of kanban controlled production systems, *Operations Research*, 44, 50-64.
- [17] Kimura, O., and Terada, H., Design and analysis of pull system, a method of multi-stage production control, 1981, *Int. J. Production Res.*, 19, 241-253.
- [18] Berkley, B., 1992, A decomposition approximation for periodic kanban-controlled flow shops, *Decision Sci.*, 23, 291-311.
- [19] Ohno, K., Nakashima, K., and Kojima, M., 1995, Optimal numbers of two kinds of kanbans in a JIT production system, *Int. J. Production Res.*, 33, 1387-1401.
- [20] Kirkavak, N., and Dinçer, C., 1996, Performance evaluation model for single-item periodic pull production systems, *Operations Research*, 44, 239-250.
- [21] Ohno, K., and Nakashima, K., Optimality of a JIT production system, 1995, *Proc. Asian-Pacific Operational Res. Soc. '94*, 390-398.
- [22] Veatch, M. H., and Wein, L. M., 1994, Optimal control of a two-station tandem production/inventory system, *Operations Research*, 42, 337-350.
- [23] Nakade, K. and Ohno, K. Reversibility and dependence in a U-shaped production line, 1995, *Queueing Systems*, 21, 183-197.
- [24] Ohno, K. and Nakade, K. Analysis and optimization of a U-shaped production line, 1997, *J. Operations Res. Soc. Japan*, 40, 90-104.
- [25] Nakade, K., Ohno, K., and Shanthikumar, J. G., 1997, Bounds and approximations for cycle times of a U-shaped production line, *Operations Research Letters*, 21, 191-200.

