CONWIP の新近似解法とそれに基づく適正 WIP 決定法

水野 博之^{*1}, 江口 竜太郎^{*2}, 圓川 隆夫^{*2}

New approximate solution of CONWIP and a method for determining appropriate level of WIP

Hiroyuki MIZUNO^{*1}, Ryutaro EGUCHI^{*2} and Takao ENKAWA^{*2}^{*1} Toyota Industries Corporation

2-1 Toyoda-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8671, Japan

^{*2} Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received 21 June 2015

Abstract

CONWIP (Constant Work in Process), which is a simple pull production control method keeping WIP (Work in Process) of a whole production line constant, has been considered a better alternative to Kanban in some ways. However, CONWIP involves a trial-and-error process to determine the appropriate constant WIP level by commonly employing MVA (Mean Value Analysis) for its performance measure estimation. This trial-and-error approach with the recursive nature of MVA might prohibit industries from widely implementing CONWIP in practice. This paper proposes a new simpler approximate solution of CONWIP by focusing on the bottlenecks in the system. The precision of the proposed approximation method is evaluated by simulation. It is found that the proposed method tends to outperform MVA by far, particularly in the range of relatively small process variability. In addition, a practical method determining the appropriate level of WIP is proposed to maximize TH (throughput) based on the current system performance. Moreover, through the formulation incorporating the influence of process variability such as machine failures, practical implications are derived to accommodate CONWIP to situations such as unstable production ramp-ups or overseas productions where Kaizen could not be readily expected.

Key words : TPS, JIT, CONWIP, MVA, Queueing theory, Pull production, Kanban, Bottle-neck, Process variability

1. 結論

トヨタ生産方式 (Toyota Production System; TPS) (大野, 1978)に代表されるジャスト・イン・タイム (Just-In-Time; JIT) や、それを普遍化したリーン生産 (Lean Production) (Womack, et al., 1991)を導入して効果を上げるには、長期継続的な改善活動が求められる。多くの企業、とくに海外の企業にとっては、そうした地道な改善活動を前提とする JIT やリーン生産の導入が容易ではないことは、これまでも指摘されてきた(近藤, 2005, Zipkin, 1991)。

そこで欧米では、JIT やリーンのような長期継続的な改善活動によって生産システム内の変動性をとことん低減するアプローチの重要性は認めつつ、そのときどきの所与の変動性の下で最大の生産性を得られるようにコントロールの最適化を図る生産マネジメント手法が体系化されてきた。その一つである Factory Physics(Hopp and Spearman, 2008)の中核的手法が、「かんばん」よりも簡易にプル生産を実装できる CONWIP (Constant Work in Process) である(Spearman, et al., 1990)。

「かんばん」が工程ごと部品ごとの生産コントロールに適用されるのに対して、CONWIP はラインからジョブが完成した時点で先頭工程に新たなジョブが投入されるというコントロール方式である。ライン中の仕掛在庫総数(WIP)の上限値を定めることで、長期的には WIP が一定量に保たれることから CONWIP の名称が与えられている。「かんばん」より運用が単純で適用が容易でありながらプル生産の恩恵を受けられ、工程変動の影響も受けにくい、といった利点があるとされている(Spearman, et al., 1990, Buzacott and Shanthikumar, 1993, Hopp and

No.14-00649 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00649], J-STAGE Advance Publication date : 10 August, 2015

^{*1} 正員, (株)豊田自動織機 (〒448-8671 愛知県刈谷市豊田町 2-1)

^{*2} 東京工業大学大学院 経営工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 W9-57)

E-mail of corresponding author: hiroyuki.mizuno@mail.toyota-shokki.co.jp

Spearman, 2004, 2008) .

CONWIP 生産システムは、閉ループ型待ち行列ネットワークとしてモデル化することができるため、運用に際して適正な *WIP* 上限値の推定には、従来おもに Mean Value Analysis (MVA) が用いられてきた(Reiser and Lavenbreg, 1980, Hopp and Spearman, 2008). しかしながら、*WIP* を一つずつ増やしながら再帰的に生産システムの性能指標を計算するため煩雑であり、またモデル化の前提条件として現実の生産システムよりもかなり大きな工程変動を仮定(変動係数が 1 近く)しているため、精度のよい適用範囲に限られる、といった課題があった(Buzacott and Shanthikumar, 1993).

本研究では、所与の *WIP* レベルにおける CONWIP 生産システムの性能指標を、MVA よりも簡便かつ精度よく求める近似式を導出・提案する。本稿の構成は以下の通り。

第 2 章では、上述の Factory Physics の枠組みに依拠して、基本となる生産システムの待ち行列モデルを定義し、CONWIP 生産システムにおける MVA の適用目的とアルゴリズム、およびその課題について概説する。

第 3 章では、ボトルネック工程の影響を考慮することにより、所与の *WIP* レベルにおける CONWIP 生産システムの *TH* の新しい近似解法を導出し、現状の工程変動のレベルに応じた CONWIP 生産システムの適正 *WIP* 上限値の決定法を提案する。

第 4 章では、第 3 章で提案した近似解法の精度および MVA に対する優位性の範囲を、第 5 章では、第 2 ボトルネックおよび故障等による工程変動の影響について、それぞれシミュレーションによって数値検証を行った。

第 6 章では、提案内容と検証結果のまとめとともに、本研究を通じて得られた CONWIP の効率的な導入、運用への示唆について述べ、結論とした。

2. CONWIP 生産システムと MVA

2・1 1 工程生産システムの待ち行列モデル

CONWIP 生産システム(以下 CONWIP)検討の前に、本研究で依拠した待ち行列モデルを 1 工程生産システムについて定義する。

図 1 において、素材は 1 個ずつ工程に到着し、1 個ずつ加工されて製品となる(以下、素材・仕掛品・製品は、状況に応じてワークあるいはジョブと呼ぶ)。素材の到着率(時間あたりの到着数)を r_a 、到着時間間隔の平均、標準偏差および変動係数をそれぞれ t_a 、 σ_a 、 c_a 、有効加工時間の平均、標準偏差および変動係数をそれぞれ t_e 、 σ_e 、 c_e とする。ここで有効加工時間とは、工程本来の自然加工時間(平均 t_0 、標準偏差 σ_0 、変動係数 c_0)に、故障や段取替等による停止時間の影響を加味したものである(Hopp and Spearman, 2008)。故障のような突発停止と段取替のような計画停止の影響を区別した議論は 5・3 節で扱う。

Fig. 1 A model of 1-station production system with queueing notations.

図 1 中 u は到着率 r_a と加工率 r_e の比 r_a/r_e (あるいは t_e/t_a) で定義され、負荷率(あるいは利用率)と呼ぶ。*TH* はスループット(時間当たり生産量)であり、*LT* はこの工程(やラインなどの生産システム)への素材到着から製品完成までにかかる時間であり、本稿ではリードタイムと呼ぶことにする。また、仕掛数(加工中のものを含む)を *WIP* (Work in Process) とすると、待ち行列理論のリトルの公式から、到着間隔や加工時

間の分布にかかわらず（一般系分布，すなわち待ち行列記法による $G/G/1$ に相当），定常状態において以下の関係が成り立つ．

$$TH = WIP / LT \quad (1)$$

またこのとき， LT は Hopp らが Kingman の公式と呼ぶ以下の式で近似的に与えられることが知られている (Hopp and Spearman, 2008)．

$$LT = LT_q + t_e = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e + t_e \quad (2)$$

以上より，工程に係る変動性 c_a ， c_e および負荷率 u が大きくなる程 LT が増加すること，また LT が増加することで低下する TH を維持するためには WIP を増やす必要のあることが示される．これらのことから一般に，同じ TH を得ている場合でも， WIP が相対的に少なくて済む生産システムと，より多くの WIP が必要な生産システムとが存在し得ることが示唆される（前者がより lean，後者がより fat なシステムと言える）．

また逆に， c_a や c_e など工程に係る変動性や工程の負荷率 u を低減することができれば LT を短縮でき，必要な TH を維持しながら WIP を削減できることも自明である．ここまでのモデルではプル生産のメカニズムが考慮されていないものの，平準化の導入（ c_a の低減）や継続的改善（ c_e 等の低減）等によって， WIP を抑制しながら高い TH を得る（すなわち lean になる）という，TPS/JIT の本質的な考え方が裏付けられている．

2・2 1 工程プル生産システム

次に，1 工程からなるプル生産システムのモデルを図 2 に示す．工程直後には加工済品のストア（バッファ）を設け，その容量を z とする．この工程への生産指示は，後工程がストアから加工済品を引き取ることによって発生する．つまり，引き取りによってストア内の WIP が z を下まわると，工程は WIP が再び z に達するまで部品を加工し続ける．ただしストアが空のときは，後工程は引き取りを停止する．また簡単のために，素材（前工程の加工済品）は常に引き取り可能とする（すなわち，欠品が発生しない）．

Fig. 2 A model of 1-station production system with queueing notations.

このモデルにおいては，後工程による加工済品ストアからの引き取り間隔 t_a に基づく $r_a = 1/t_a$ が，前節に示したワーク到着率（＝生産指示の到着率）に相当する．一方加工率については，前節のモデル同様，この工程の加工時間に関する各パラメータから決定される．ここでも t_a ， t_e は一般系分布を持つ確率変数である．Buzacott and Shanthikumar は，図 2 のような生産システムを produce-to-stock 生産の一つの実現形と考え，ストアの空き容量（0～ z ）の挙動が，待ち行列長に制限のある $G/G/1/z$ モデル（3・1 節で詳述）によって説明できることを示した (Buzacott and Shanthikumar, 1993)．上記のような部品引き取りによって生産指示が発行されるしくみは，TPS における「かんばん」によって典型的に実現されている．その際，あるルールに基づいて

設定した「かんばん」の上限枚数がストア容量 z に相当する．例えば自動車の JIT 最終組立ラインに部品を供給する部品加工工程などは，このシステムの一例と見ることができる．

Hopp らはプル生産とプッシュ生産について詳しく検討し，それらを次のように定義している(Hopp and Spearman, 2004).

“A pull production system is one that explicitly limits the amount of work in process that can be in the system. By default, this implies that a push production system is one that has no explicit limit on the amount of work in process that can be in the system.”

この定義に従えば，図 2 に示した生産システムは，ストア容量（あるいは「かんばん」枚数）に上限があることでプル生産システムの要件を満たしている．また式(1)より， WIP に上限が存在するプル生産システムでは， WIP 以外の条件が同じプッシュ生産システムに比べて TH が低くなり得ることが示唆される．（このことは，緒論で述べたような JIT やリーン導入の困難さの一因となっていると考えられる．）

2・3 CONWIP と Mean Value Analysis (MVA)

次に CONWIP と Mean Value Analysis (MVA) の関係，および課題について概説する．図 3 は 3 工程 CONWIP 生産システムのモデルであり，系内（全工程＝ライン）の WIP を一定（ $WIP=w$ ）に保つように素材の投入をコントロールする方式を示している．製品が 1 個完成すると系内の WIP は $w-1$ になり，そのとき先頭工程に新たな素材 1 個が投入され再び $WIP=w$ となることを繰り返す．したがって，CONWIP 生産システムは閉ループの循環型待ち行列ネットワークとしてモデル化される(Hopp and Spearman, 2008).

Fig. 3 A model of 3-station CONWIP production system.

CONWIP は，前節のシステムとは異なり各工程の仕掛数（ $WIP_1, WIP_2, \dots$ ）は制限しないが，系内に存在し得る仕掛総数（ WIP ）には上限があるため，前節の定義に従えば，プル生産システム的一种と言える．また，CONWIP 生産システムのコントロール上の制御変数は WIP 上限値 w のみであり，この値をいかに設定するかによって生産システムの性能が定まる．このような閉ループ循環型待ち行列ネットワークの TH や LT を近似的に求めるアルゴリズムとして Mean Value Analysis (MVA) があり，従来 CONWIP における WIP 上限値は，この MVA を用いて，次のように試行錯誤的に求められてきた(Reiser and Lavenbreg, 1980, Hopp and Spearman, 2008).

WIP 総数が w ($WIP=w$) のときの工程 j の負荷率，リードタイム， WIP をそれぞれ $u_j[w]$, $LT_j[w]$, $WIP_j[w]$ とし，ライン全体のスループットを $TH[w]$ と表示する．このラインに $WIP=w$ とすべく投入されたジョブのリードタイムは，残りの $w-1$ のジョブをもつラインの平均的挙動で説明できる．さらに各工程 j に M/G/1 モデルを仮定することによって次式が導かれる．なお，ここからしばらくは t_e , c_e の添字 e は省略し，代わりに工程 j の添字を用いることにする．

$$LT_j[w] = \frac{t_j^2}{2} (c_j^2 - 1) TH[w-1] + (WIP_j[w-1] + 1) t_j \quad (3)$$

MVA では, $w=0$, $TH[0]=0$, $WIP_j[0]=0$ から始め, w を一つずつ増やしながら式(3)およびリトルの公式を繰り返し工程 j およびライン全体に適用し, ラインの性能指標, すなわち $TH[w]$ および, それに対応した $LT[w]$, $WIP[w]$ を算出する. これにより必要な $TH[w]$ を得られる最小の w を推定し, それを WIP 上限値とするものである.

MVA は, 表計算ソフト等を用いた計算も楽であるとされるが, それでもなお再帰計算のスプレッド・シートへの実装には工夫が必要であり, 簡単なプログラムを書いて計算の方が適切かもしれない. いずれにしても, 生産現場に導入するには煩雑な計算手法であり, CONWIP 生産ラインの性能指標を, より簡便に計算できる方法が望まれる. (課題 1)

また一方, Buzacott and Shanthikumar は, MVA による近似が有効な c_e の範囲を 0.7 から 1.4 (c_e^2 が 0.5 から 2) としている(Buzacott and Shanthikumar, 1993). これは定式化の段階で各工程を M/G/1 でモデル化しているからであるが, 現実の生産システム (例えば, c_e が 0.1 から 0.5 程度) に比較してかなり大きく, これも実務導入上の阻害要因となり得る. (課題 2)

以上, CONWIP 導入上の障害となり得る MVA の課題二点を改善すべく, 次章以降では, ライン全体の TH はボトルネックによって決まるという事実に着目し, より小さな変動性領域で成り立ち, かつ WIP 総数上限値推定の煩雑さを緩和できる CONWIP ラインの TH 近似解法を考える.

3. ボトルネックに着目した CONWIP ラインの TH 近似解法の定式化

3・1 ボトルネック工程の挙動

よく知られているように生産ラインの挙動は主にボトルネックで決まる. ここでボトルネックとは, ライン全体の中で最も有効加工時間の平均が長い工程とする(Hopp and Spearman, 2008). WIP の多くは, このボトルネックの前に滞留することに着目し, これに待ち行列長に制限がある G/G/1/ z モデルを適用することによって近似解法の定式化を行う.

Fig. 4 G/G/1/ z model of 2-station production system.

図 4 に示すような隣り合う 2 工程で, 工程 2 をボトルネックとする. 工程 2 の前のバッファには制限があり, バッファがいっぱいの時 ($WIP=z$, バッファ内の仕掛数= $z-1$), 工程 1 はブロックされて作業ができない. すなわち, バッファにある仕掛品と工程 2 で作業中のワークを合わせた WIP が z 個で制限される G/G/1/ z モデルとなる(Hopp and Spearman, 2008).

工程 1 からの製品の到着率 (時間あたりの到着数) を r_1 , 工程 1 の有効加工時間の平均, 標準偏差および変動係数をそれぞれ t_1 , σ_1 , c_1 , 工程 2 の有効加工時間の平均, 標準偏差および変動係数を t_2 , σ_2 , c_2 とし, t_2 , σ_2 はボトルネックのため t_b , σ_b と表示すると, 負荷率は $u = t_b/t_1$ ($u > 1$) となる.

G/G/1/z モデルは、行列長に制限の無い G/G/1 モデルを用いて近似できる(Buzacott and Shanthikumar, 1993, Hopp and Spearman, 2008) . まず G/G/1 モデルの平均系内数 $\hat{N}$ を用いて、パラメータ ρ を次のように定義する ($u > 1$ の場合).

$$\rho = \left(\hat{N} - \frac{1}{u} \right) / \hat{N} \quad (4)$$

G/G/1 モデルの平均系内数 $\hat{N}$ の近似式は種々提案されているが、ここでは、式(1)のリトルの公式と式(2)の Kingman の公式を援用して次のように求める(Hopp and Spearman, 2008).

$$\hat{N} \approx r_1 \left\{ \left(\frac{c_1^2 + c_b^2}{2} \right) \left(\frac{\frac{1}{u}}{1 - \frac{1}{u}} \right) t_b + t_b \right\} = \left(\frac{c_1^2 + c_b^2}{2} \right) \left(\frac{\frac{1}{u^2}}{1 - \frac{1}{u}} \right) + \frac{1}{u} \quad (5)$$

式(4)に式(5)を代入して求めた ρ を用いて、G/G/1/z モデルの系内数 n の確率分布 $p(n)$ は、次式のように近似的に与えられる(Buzacott and Shanthikumar, 1993, Hopp and Spearman, 2008).

$$p(n) \approx \begin{cases} \frac{1-u}{1-u^2 \rho^{z-1}} & n=0 \\ \frac{u(1-\rho) \rho^{n-1}}{1-u^2 \rho^{z-1}} & n=1, \dots, z-1 \\ \frac{(1-u)u \rho^{z-1}}{1-u^2 \rho^{z-1}} & n=z \end{cases} \quad (6)$$

さらに、図4の工程の TH は、工程1からの製品到着率に工程1がブロックされない確率、すなわち z に少なくとも1個空きがある確率 $p(n < z)$ を乗ずることで得られる。したがって、式(6)の $p(z)$ を用いて、最終的に TH の近似値を次のように求めることができる。

$$TH \approx r_1 \{1 - p(z)\} = \frac{1-u \rho^{z-1}}{1-u^2 \rho^{z-1}} r_1 \quad (7)$$

以上は、ボトルネック工程が CONWIP ラインの先頭工程ではない場合について考えた。ボトルネックが CONWIP ラインの先頭工程である場合、最終工程の完成の度に先頭工程にジョブが到着するため、最終工程の平均有効加工時間を t_m とすると $u = t_1/t_m$ であり、 t_1 がボトルネックであるから、やはり $u > 1$ である。したがってこの場合でも、図4のモデルにおける工程1のパラメータとして最終工程の数値 (t_m , σ_m , c_m) を使えば、同様に式(7)を求めることができる。このように、式(7)は CONWIP ライン中のボトルネック工程の位置にかかわらず成り立つ。これは4節や5節のシミュレーションでも確認でき、CONWIP ラインの特徴と言える。

3・2 G/G/1/z モデルの CONWIP ライン全体への拡張と TH の新近似解法の定式化

ここでの目的は、現実的な工程変動係数 (例えば、0.1 から 0.5) の範囲で、CONWIP 生産ラインの精度の高い TH の新近似解法を提案することである。まず、前節で考察したボトルネック工程の G/G/1/z モデルを、CONWIP ライン全体に拡張することを考える。式(5)から $\rho > 1$ であるので、式(7)は z についての連続的な増加関数であることがわかる。さらに式(7)の右边は、次式のように変形できる。

$$TH \approx r_1(1/\rho^{z-1} - u)/(1/\rho^{z-1} - u^2) \quad (8)$$

したがって、 $z \rightarrow \infty$ において $TH \rightarrow r_1/u = 1/t_b$ であり、これは CONWIP において w を増やしたときの TH の上限 TH_{upper} が、ボトルネック単一工程の TH に収束し、かつ式(7)が非整数でも成り立つことを意味する。

このような準備をもとに、CONWIP 全体の仕掛数 WIP を w 個としたとき、ボトルネック工程で加工中のジョブを含めたボトルネック前の平均 WIP を w_b 、ボトルネック以外の工程の平均 WIP を w_{nb} とし、次式を近似的に求めたい。

$$w_b = w - \sum_{j \neq b} w_{nb} \quad (9)$$

先述の TH_{upper} (すなわち $1/t_b$) を実現するには、非ボトルネック工程への到着率が $1/t_b$ を下まわらないことが必要条件となる。一方、CONWIP システム全体のスループットはボトルネック工程で $1/t_b$ に抑えられることから、非ボトルネック工程のスループットを $1/t_b$ を超えて高めても WIP が余分に発生するだけとなり意味が無い。したがって、適正 WIP のもとでは非ボトルネック工程 j の前には仕掛がほとんど無いと仮定できるため、非ボトルネック工程 j の平均 WIP 数は次式で与えられる。工程 j が加工中である確率を $P_j(\text{busy})$ とすると、

$$w_{nb} = p_j(\text{busy}) \times 1 + \{1 - p_j(\text{busy})\} \times 0 = u_j \quad (10)$$

すなわち、非ボトルネック工程の平均 WIP 数は、工程 j の負荷率 u_j で近似でき、

$$u_j = t_j / t_b \quad (11)$$

が成り立つため、式(9)は近似的に次式で与えられる。

$$w_b = w - \sum_{j \neq b} \frac{t_j}{t_b} \quad (12)$$

式(12)で求めた w_b から、 $z = w_b$ とし $G/G/1/z$ モデルをボトルネック工程に適用し、所与の w における TH の近似値を式(7)から求めることができる。これを、CONWIP ラインの TH の新近似解法として提案する。

なお、式(12)導出の前提条件から、 TH が $1/t_b$ を大きく下回る場合、すなわち適正 WIP に比べてかなり小さい w のもとでは必ずしも良い近似精度が得られないことが予想されるが、これは後述の数値例で検証する。

3・3 適正 WIP 上限値の決定法

次に、前節で求めた CONWIP ラインの TH の新近似解法を用いて、適正 WIP 上限値の決定法を考える。

前掲のボトルネック条件下で得られる TH の上限は、式(8)から求めた TH_{upper} である。これを達成するために必要な WIP の下限値である限界 WIP 数 w_0 を求め、 WIP (w) を w_0 から増やしていき、式(7)によって求めた TH が TH_{upper} に最も近づいた時点の w を適正 WIP 上限とすればよい。まず $TH_{upper} = 1/t_b$ であり、そのときの WIP はリトルの公式、式(1)から、次の通りとなる。

$$WIP = TH_{upper} \times LT = LT / t_b \quad (13)$$

CONWIP ライン全体の平均有効加工時間の総和を $T_0 = \sum t_j$ とすると、 $LT > T_0$ であることから、

$$w_0 = T_0 / t_b \quad (14)$$

が得られ、 TH 最大化のためには少なくとも w_0 以上の WIP が必要とされることがわかる。

以上から、CONWIP 生産システムの適正 WIP 上限を求めるための計算手順は次のようになる。

- 手順(1) 平均有効加工時間 t_j が最も大きい工程をボトルネック工程と規定し、その平均加工時間 t_j を t_b とする。
 手順(2) CONWIP ライン全体の平均有効加工時間の総和を $T_0 = \sum t_j$ とし、式(14)から限界 WIP 数 w_0 を求め、これを整数値に丸めた値を w とする。
 手順(3) 式(12)に w を代入し、 w_b を求め、これを式(7)における z とする。
 手順(4) ボトルネックの前の非ボトルネックの有効加工時間の平均を t_1 とし、 $u = t_b/t_1$ を計算した上で、ボトルネックの変動係数 c_b 、その前の非ボトルネックの変動係数 c_1 とともに式(5)に代入して $\hat{N}$ を求める。そして、その結果を u とともに式(4)に代入することで ρ を求める。
 手順(5) 最後に、 ρ 、 u 、 $r_1=1/t_1$ を式(7)の右辺に代入し、求めた TH が $TH_{upper}=1/t_b$ に十分近ければ、そのときの w を適正 WIP 上限とする。 TH が $TH_{upper}=1/t_b$ に比べて小さければ、 $w=w+1$ として手順(3)に戻り、 TH が $1/t_b$ を超えるまで、この手順を繰り返す。

以下、数値例を示す。

3 工程 CONWIP システムで $t_b=11$ 分、非ボトルネックは $t_f=10$ 分 ($c_f=0.1$ で全工程共通) のとき (手順(1))、 $T_0=31$ であるので、式(8)から TH_{upper} は 0.0909 (時間当たり換算で 5.45/h)、式(14)から $w_0=2.82$ となる (手順(2))。そこで、 $WIP=3$ からはじめると、式(12)から $w_b=1.182$ が得られる (手順(3))。一方、 $u=11/10$ 、変動係数 $c_1=c_b=0.1$ を式(5)に代入すると $\hat{N}=0.9998$ 、そして式(4)から $\rho=11.01$ が得られる (手順(4))。これらをボトルネックへの到着率 ($r_1=1/t_1=0.1$) とともに式(7)に代入することにより、 $TH=0.0805$ (4.83/h) が得られる (手順(5))。この場合、 TH はまだ上限値 TH_{upper} と差があるので $WIP=4$ として手順(3)に戻り、 $w_b=2.182$ と式(7)から $TH=0.09044$ (5.43/h) となって、ほぼ上限値 $TH_{upper}=0.0909$ に近づいたと言えよう。

一度これらを計算すると、手順(3)以降は w 、すなわち WIP に対応する式(7)で z (あるいは w_b) だけを変化させて TH が求まる。

ちなみに $WIP=5$ ($w_b=3.182$) で $TH=0.0909$ (5.45/h) となり有効桁数の範囲で上限値に一致する。したがって、この例での適正 WIP 上限値は、4 または 5 個と求まる。

4. 精度の確認と考察

4・1 シミュレーションによる精度確認

提案した CONWIP システムの TH の新近似解法 (提案法) の近似精度の確認、および MVA との精度の比較を行うため、Visual SLAM (AweSIM) Ver.3.02 を用いて、シミュレーションにより真値を求める実験を行った。各実験条件について 11 万時間のシミュレーションを実施し、最初の 1 万時間を除いた 10 万時間の統計値を求め、それを異なる乱数系列で 5 回繰り返し、その平均をシミュレーションによる真値とした。

実験条件として、非ボトルネック工程の平均有効加工時間を各 10 分とし、ボトルネックの平均有効加工時間 (t_b) と各工程の変動係数 (c_j) を変化させ、各変動係数値に対応した対数正規分布を加工時間分布として用いた。

なお、 TH が求めれば LT はリトルの公式、式(1)から求まることから、以下 TH で精度を確認する。

表 1 は、3 工程 CONWIP システムで $t_b=11$ 分、15 分のときに $c=0.1$ から 1.5 までの 5 水準を与え、 WIP を w_0 以上から変化させ、それぞれの場合に時間当たり換算した TH を掲げたものである。各条件で真値に相当する 5 回のシミュレーション値の平均値 (Simulation) と、その下に、それから不偏分散 V を計算することによって求めた真値の 95%信頼区間の幅 (95%CI, $t(4,0.05)\sqrt{V/4}$)、さらにその下に MVA による計算結果と提案法による近似解とが示されている (信頼区間の幅が有効桁数の 0.01 未満の場合には - で表示)。また MVA と提案法の近似精度の比較のため、真値に近い値の方をハイライトしている。

表 1 から分かるように、 $WIP=3$ のときの 5 ヶ所 (MVA の好適範囲とされる $c_j=1$ 付近でかつ WIP が小さいとき) を除き、すべての領域で提案法の方がはるかに真値に近づいている。提案法は、特に変動係数が小さく TH が上限 TH_{upper} に近づく付近では、ほぼ真値と一致している。

Table 1 *TH* comparisons among Simulation, MVA, and New Approximation for a 3-station CONWIP production system.

(a) $t_b=11, w_0=2.81$						(b) $t_b=15, w_0=2.33$					
c	<i>WIP</i>	3	4	5	6	c	<i>WIP</i>	3	4	5	6
0.1	Simulation	5.36	5.45	5.45	5.45	0.1	Simulation	4.00	4.00	4.00	4.00
	95% CI	-	-	-	-		95% CI	-	-	-	-
	MVA	4.19	4.71	5.00	5.17		MVA	3.66	4.06	4.06	4.33
	Approximation	4.83	5.43	5.45	5.45		Approximation	3.93	4.00	4.00	4.00
0.2	Simulation	5.07	5.40	5.45	5.45	0.2	Simulation	3.99	3.99	4.00	4.00
	95% CI	-	-	-	0.01		95% CI	-	-	-	-
	MVA	4.16	4.67	4.96	5.13		MVA	3.63	4.02	4.21	4.30
	Approximation	4.40	5.33	5.42	5.45		Approximation	3.83	3.99	4.00	4.00
0.5	Simulation	4.33	4.78	5.02	5.16	0.5	Simulation	3.71	3.85	3.98	4.00
	95% CI	0.01	0.01	0.01	0.01		95% CI	-	0.01	0.01	-
	MVA	3.97	4.43	4.72	4.90		MVA	3.46	3.82	4.01	4.11
	Approximation	3.55	4.77	5.10	5.24		Approximation	3.46	3.85	3.95	3.98
1.0	Simulation	3.59	3.97	4.23	4.42	1.0	Simulation	3.12	3.42	3.59	3.70
	95% CI	0.01	0.01	0.02	0.02		95% CI	0.01	0.02	0.03	0.03
	MVA	3.48	3.86	4.14	4.34		MVA	3.02	3.32	3.52	3.66
	Approximation	3.09	3.91	4.34	4.60		Approximation	2.97	3.42	3.64	3.78
1.5	Simulation	3.20	3.51	3.73	3.91	1.5	Simulation	2.81	3.07	3.23	3.37
	95% CI	0.02	0.04	0.02	0.02		95% CI	0.01	0.02	0.01	0.01
	MVA	2.99	3.33	3.59	3.79		MVA	2.60	2.86	3.06	3.21
	Approximation	2.97	3.46	3.80	4.05		Approximation	2.73	3.07	3.30	3.46

なお、表 1 の条件において、ボトルネック工程が工程 1 から 3 のどの位置であっても、シミュレーション値の結果は全く同じとなった。

4・2 工程数の影響

以上は工程数が 3 の場合について近似精度を確認したが、次に工程数を 5 から 10 まで増やし、 w_0 以上の z について、前節と同様な手順でシミュレーション実験を行った。

より収束が遅くなるように、ボトルネックと非ボトルネックの平均有効加工時間の差が小さい $t_b=11$ の場合を選定し、より現実に近いと思われる $c=0.1$ から 0.5 までのケースについて表 2 に *TH* の計算結果を示す。

各 *WIP* 数について、真値に相当するシミュレーション結果の平均値（および 95%信頼幅）、MVA、提案法を比較し、真値により近い方をハイライト表示していることは表 1 と同じである。

表 2 から分かるように、工程数にかかわらず全てのケースで提案法は MVA に比べてはるかに優れ、適正 *WIP* 上限値を求めるために十分な精度をもつことが推察される。

一方、工程数が増えるにしたがって *TH* 上限への収束に要する *WIP* 数は著しく増大し、さらに c が大きくなるほど真値よりも提案法の方が *TH* 上限への収束が速くなっていく。例えば、工程数 10 で $c=0.5$ のとき、提案法では *WIP*=22 で 5.45 に達しているのに対し、真値ではまだ 5.17 に過ぎない。この傾向は、近似精度よりも、適正 *WIP* 上限を求めるという点で問題を生じる可能性がある。

Table 2 *TH* comparisons, Effects of 5 or more stations in a CONWIP(a) 5-station, $w_0=4.63$

<i>c</i>	<i>WIP</i>	5	6	7	8	9	10	15	20	25
0.1	Simulation	5.37	5.45	5.45	5.45	5.45				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.90	4.22	4.46	4.64	4.78				
	Approximation	5.17	5.44	5.45	5.45	5.45				
0.2	Simulation	5.05	5.34	5.43	5.45	5.45				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.87	4.19	4.42	4.61	4.75				
	Approximation	4.85	5.36	5.43	5.45	5.45				
0.5	Simulation	4.20					5.12	5.34	5.42	5.45
	95% CI	0.01					0.01	0.01	0.01	0.01
	MVA	3.70					4.68	5.04	5.23	5.33
	Approximation	3.97					5.37	5.44	5.45	5.45

(b) 7-station, $w_0=6.45$

<i>c</i>	<i>WIP</i>	7	8	9	10	11	12	17	22	27
0.1	Simulation	5.39	5.45	5.45	5.45	5.45				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.90	4.22	4.46	4.64	4.78				
	Approximation	5.17	5.44	5.45	5.45	5.45				
0.2	Simulation	5.05	5.29	5.39	5.44	5.45				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.87	4.19	4.42	4.61	4.75				
	Approximation	4.85	5.36	5.43	5.45	5.45				
0.5	Simulation	4.15					4.96	5.24	5.36	5.42
	95% CI	-					0.01	0.01	-	0.01
	MVA	3.59					4.40	4.80	5.02	5.17
	Approximation	4.25					5.37	5.44	5.45	5.45

(c) 10-station, $w_0=9.18$

<i>c</i>	<i>WIP</i>	10	11	12	13	14	16	22	28	34
0.1	Simulation	5.40	5.45	5.45	5.45	5.45				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.69	3.86	4.00	4.13	4.25				
	Approximation	5.38	5.45	5.45	5.45	5.45				
0.2	Simulation	5.05	5.24	5.35	5.41	5.44				
	95% CI	-	-	-	-	-				
	MVA	3.67	3.83	3.98	4.11	4.22				
	Approximation	5.22	5.40	5.44	5.45	5.45				
0.5	Simulation	4.11					4.86	5.17	5.32	5.40
	95% CI	-					0.01	0.01	0.01	0.01
	MVA	3.51					3.51	4.24	4.64	4.89
	Approximation	4.54					5.40	5.45	5.45	5.45

5. 第2ボトルネックの影響と工程変動を考慮したモデルによる考察

5・1 平均有効加工時間基準による第2ボトルネックの影響の考察

これまで述べてきたように、ボトルネックは各工程の平均有効加工時間が最大のものであり、それがラインのどの位置でも結果は変わらない、というのが CONWIP の特徴である。そこで次に、第2ボトルネックの影響について考察する。第2ボトルネックの定義として、本節では、ボトルネック工程の次に平均有効加工時間が大きい工程とする。

まず表2の5工程、 $t_b=11$, $c_b=0.1$ のケースにおいて（ボトルネックは第3工程）、第2ボトルネックの平均有効加工時間が10、その他の工程の平均有効加工時間が5の場合を考える。表3はその TH 算出結果であり、(a)は第2ボトルネックが第1工程にある場合、(b)はボトルネック工程の前、すなわち第2工程に第2ボトルネックが位置する場合である。その他、第2ボトルネックがボトルネックの後、第4工程、第5工程にある場合には、(a)とシミュレーション、提案法、MVA の全ての値が同じであったため、掲載を省略してある。

Table 3 TH comparisons, Effects of the second bottleneck in a CONWIP

(a) $t_1=10, t_2=5, t_3=11, t_4=5, t_5=5, w_0=3.27$							(b) $t_1=5, t_2=10, t_3=11, t_4=5, t_5=5, w_0=3.27$						
c	WIP	4	5	6	7	8	c	WIP	4	5	6	7	8
0.1	Simulation	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	0.1	Simulation	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
	95% CI	-	-	-	-	-		95% CI	-	-	-	-	-
	MVA	4.65	5.09	5.35	5.50	5.58		MVA	4.65	5.09	5.35	5.50	5.58
	Approximation	5.41	5.45	5.45	5.45	5.45		Approximation	5.36	5.45	5.45	5.45	5.45
0.2	Simulation	5.37	5.45	5.45	5.45	5.45	0.2	Simulation	5.37	5.45	5.45	5.45	5.45
	95% CI	-	-	-	-	-		95% CI	-	-	-	-	-
	MVA	4.62	5.05	5.31	5.46	5.55		MVA	4.62	5.05	5.31	5.46	5.55
	Approximation	5.34	5.45	5.45	5.45	5.45		Approximation	5.18	5.40	5.44	5.45	5.45
0.5	Simulation	4.78	5.10	5.25	5.33	5.38	0.5	Simulation	4.78	5.10	5.25	5.33	5.37
	95% CI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		95% CI	-	0.01	0.01	0.01	0.01
	MVA	4.41	4.81	5.07	5.24	5.34		MVA	4.41	4.81	5.07	5.24	5.34
	Approximation	5.05	5.39	5.44	5.45	5.45		Approximation	4.05	4.99	5.19	5.29	5.34

一方、(a)と(b)では真値、すなわちシミュレーションの結果は全く同じである。ボトルネックに加えて、第2ボトルネックの位置の違いでも TH と WIP の関係は変わらないと言えよう。異なるのは提案法の値であり、これは式(4)、(5)、(7)で用いる u 、3・3節の計算手順(4)の $u = t_b / t_1$ における t_1 の違いに起因するものである。本稿のこれまでの定義では、 t_1 はボトルネックの前工程の平均有効加工時間であるので、(a)では $t_1=5$ 、(b)では $t_1=10$ として計算した。真値との関係を観察すると、特に $c=0.5$ の場合に見られるように、 $t_1=5$ とした場合には収束が速すぎる傾向がある。表1の結果や他の事例の計算結果に鑑みて、提案法における t_1 の定義としては、工程全体の第2ボトルネックの平均有効加工時間とした方が合理的であることが示唆される。

5・2 変動係数基準による第2ボトルネックの影響の考察

次に、平均有効加工時間はボトルネック工程よりも小さいが、有効加工時間の変動係数 c_e はボトルネック工程を含めて最大となる工程を第2ボトルネック工程とする場合について考察する。前節と同じ条件について、残り工程の平均有効加工時間は等しく10であり、工程1から工程5までの変動係数が0.1よりも大きな次の4つのケースを考える。

ケース1 : 0.2, 0.3, 0.1, 0.4, 0.5

ケース2 : 0.5, 0.2, 0.1, 0.3, 0.4

ケース3 : 0.4, 0.5, 0.1, 0.2, 0.3

ケース4 : 0.3, 0.4, 0.1, 0.5, 0.2

表 4 は 4 ケースそれぞれのシミュレーション等の TH 算出結果である。ここで注意すべきは、真値に相当するシミュレーション結果の値である。僅かな違いはあるものの、ほとんど各ケースで同じ値となっている。すなわち、変動係数基準で見た第 2 ボトルネック工程（この場合、ボトルネック工程との平均有効加工時間の差は 1 であるのに対し、変動係数はボトルネック工程の 5 倍の 0.5）についても、ライン中の位置の影響は無いことが分かる。

Table 4 TH comparisons, Effects of the second bottleneck with maximum c_e in a 5-station CONWIP production system. ($t_b=11$, $c_b=0.1$,

	WIP	5	6	7	8	9
Case 1: $c_5=0.5$	Simulation	4.68	5.02	5.21	5.32	5.38
	95% CI	-	-	-	-	-
	MVA	3.81	4.12	4.36	4.54	4.69
	Approximation	4.78	5.33	5.42	5.44	5.45
Case 2: $c_1=0.5$	Simulation	4.69	5.03	5.22	5.32	5.38
	95% CI	-	0.01	0.01	-	-
	MVA	3.81	4.12	4.36	4.54	4.69
	Approximation	4.99	5.40	5.44	5.45	5.45
Case 3: $c_2=0.5$	Simulation	4.69	5.03	5.22	5.32	5.38
	95% CI	-	-	-	-	0.01
	MVA	3.81	4.12	4.36	4.54	4.69
	Approximation	3.94	4.66	4.82	4.89	4.92
Case 4: $c_4=0.5$	Simulation	4.67	5.01	5.20	5.31	5.37
	95% CI	-	-	0.01	-	-
	MVA	3.81	4.12	4.36	4.54	4.69
	Approximation	4.55	5.24	5.37	5.42	5.44
Approximation for average of c_j		4.66	5.29	5.40	5.43	5.45

一方、提案法の TH の近似値を各ケース間で比較すると、全 WIP 数においてケース 3 < ケース 4 < ケース 1 < ケース 2 となり、ボトルネックの前工程の変動係数の大きさと逆順となることが分かる。とくにケース 3 の $w=5$ とした場合の精度が真値との乖離が最も大きい。これは提案法の計算手順(4)における式(5)の c_1 の計算において、ボトルネックの前工程の変動係数としているためで、これが過大になっているからと思われる。

今、非ボトルネックの有効加工時間の変動係数を c_j 、負荷率を u_j (<1)、図 1 における到着時間間隔の変動係数を c_a 、とすると、工程 j から出て行く時間間隔の変動係数 c_d は、次式で与えられることが知られている。

$$c_d^2 = u_j^2 c_a^2 + (1 - u_j^2) c_d^2 \quad (15)$$

これより、変動が工程間で伝播して行くにしたがい平均化されて行くことが想定され、その結果、表 4 に見られるように、各ケースの真値がほとんど等しくなっているものと考えられる。そこで、非ボトルネックの変動係数の平均値（ここでは 0.35）を c_1 に用いて提案法で近似値を求め、結果を表 4 の一番下の行に記載した。

少なくともケース 3 よりも精度は改善され、非ボトルネック工程の変動係数が異なる場合には、 c_1 としてボトルネックの前工程の変動係数の代わりに、ボトルネックを除くライン全体の変動係数の平均を用いることも精度を高める一つの方策となり得る。前節で言及した、ライン中の第 2 ボトルネックの平均有効加工時間を t_1 として用いることとともに、提案法の改善案として示唆される。

5・3 故障等の工程変動を考慮したモデル

2・1 節で述べたように、工程の有効加工時間の平均 t_e と標準偏差 σ_e (変動係数 c_e) は、ライン設計時の平均 t_0 とその自然な標準偏差 σ_0 (変動係数 c_0) に故障等の工程変動の影響を加味して記述される。各工程の平均加工時間 t_0 と変動係数 c_0 は基本的に等しいが、故障等による工程変動によってボトルネックが生じるモデルについて最後に考える。

工程変動の源泉としては、故障のような突発停止以外に段取替時間等の計画停止時間の影響も存在する。後者の影響も組み込めるが(水野他, 2011), ここでは故障の影響だけを取り上げる。ある工程で故障が多発したことにより、その工程がボトルネックとなっている。そのときのボトルネック工程の可動率を A ($=m_f/(m_f + m_r)$, m_f : 平均故障間隔, m_r : 平均修復時間) とする。ボトルネック工程の t_e は t_0/A であり。そのときの σ_e^2 は修復時間の変動を無視すると、

$$\sigma_e^2 = \left(\frac{\sigma_0}{A} \right)^2 + \left(\frac{1-A}{A} \right) m_r t_0 \quad (16)$$

で与えられる。したがって c_e^2 はその定義より、次式によって近似的に与えられることになる。

$$c_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2} = \frac{\frac{\sigma_0^2}{A^2} + \frac{(1-A)}{A} m_r t_0}{\left(\frac{t_0}{A} \right)^2} \quad (17)$$

今、3 工程ラインで各工程の平均加工時間 10 分、 c_0 が 0.1, 0.2 という小さな変動を想定し、ボトルネック工程の可動率が 0.90 ($m_f=9$ 時間, $m_r=1$ 時間) と, 0.75 ($m_f=9$ 時間, $m_r=3$ 時間) という 2 つのシナリオを考えよう。

両者は $t_e=t_0=10/0.9$ で同じであるが、式(16)から前者では $c_e=c_b=0.74$ であり、後者の場合には 1.84 である。これらを $r_1=1/t_0=1/10$ とともに式(5), 式(7)に代入することで、提案法の TH が求まる ($u=1.11$, $c_l=0.1$)。

表 5 は、故障のモデルも組み込み、前節までと同様の実験結果 (TH) を示したものである。シミュレーションには c_0 に対応した対数正規分布、そして故障時間間隔には指数分布を用いた。

Table 5 TH comparisons, Effects of breakdowns in a CONWIP

(a) $A=0.90$, $m_f=9h$, $m_r=1h$, $c_e=0.74$

c	WIP	4	5	6	7	8	9
0.1	Simulation	5.34	5.38	5.39	5.40	5.40	5.40
	95% CI	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
	MVA	4.44	4.72	4.89	5.01	5.10	5.16
	Approximation	4.69	5.02	5.17	5.25	5.30	5.33
0.2	Simulation	5.16	5.28	5.33	5.36	5.38	5.39
	95% CI	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	MVA	4.41	4.69	4.87	4.99	5.08	5.14
	Approximation	4.63	4.98	5.14	5.23	5.28	5.32

(b) $A=0.75$, $m_f=9$, $m_r=3h$, $c_e=1.84$

c	WIP	5	6	7	8	8	9
0.1	Simulation	4.45	4.48	4.49	4.51	4.50	4.50
	95% CI	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
	MVA	3.21	3.42	3.57	3.69	3.78	3.86
	Approximation	3.37	3.66	3.86	4.00	4.10	4.18
0.2	Simulation	4.30	4.39	4.45	4.46	4.49	4.49
	95% CI	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02
	MVA	3.31	3.52	3.67	3.78	3.87	3.95
	Approximation	3.36	3.65	3.85	3.99	4.09	4.17

表 5 の結果から、提案法はこのような工程変動を考慮したモデルのもとでも実用的な精度を与えていることがわかる (前節までと異なり、加工時間の乱数に加え故障時間間隔にも乱数を用いているため、真値の信頼幅が少し大きくなっている)。またこのシナリオのもとでは、可動率 0.75 の状況から 0.90 に改善することにより、時間当たり TH が約 20% 向上することもわかる。

なお、本節のモデルの場合、MVA や提案法の誤差には、故障に伴う c_e の式(17)の近似誤差も含まれる。したがって、前節の数値例との比較においては、むしろその誤差の方が大きいと考えられる。

6. 結論

以上、本研究では、プル生産を簡易に実装できる CONWIP 生産システムにおいて、所与の WIP に対して TH を求める近似解法を、Factory Physics の枠組みとボトルネックの挙動に着眼することで定式化した。そして提案法が、再帰計算を必要とする従来法 MVA に比べて広い範囲でよい近似を与えることを確認し、同時に TH の上限値とそのとき必要な限界 WIP を用いることで、 TH を最大化するための適正 WIP の決定法を提案した。変動係数が 0.5 までの現実的な状況においては、適正 WIP 付近で提案法がほとんど真値と一致することも併せて示した。また、工程数が増えるにつれ、本稿で取り上げた工程数 10 でも $c=0.5$ のときには収束性に問題を残すが、良い近似を与えることを示した。

また CONWIP において、適正 WIP 上限値とそのときの TH は、ライン中のボトルネックの位置によらないことを理論およびシミュレーションによって確認した。さらに、ライン中の第 2 ボトルネックを平均有効加工時間基準と変動係数基準の 2 種定義し、その影響について、平均有効加工時間基準においてはボトルネック同様ライン中の工程位置によらないこと、そして変動係数基準においては、非ボトルネック工程の変動係数の平均値に依存するという示唆を引き出した。また、上記新たな知見に対応した提案法の改善についても同時に示唆した。

さらに CONWIP が、故障等の変動低減活動が要求されるかんばん方式への移行過程や生産立ち上げ時の工程が不安定な時期に適用されることも想定し、故障等の工程変動を伴うモデルと、改善に伴う TH の変化の例についても示した。

海外への生産シフトが加速している現在、簡易に在庫を抑え TH を確保するコントロール方式として CONWIP の活用場面がますます増加すると思われる。国内にあっても、かんばん方式の本格導入に向かう改善過程や、ライン立ち上げ時における故障やチョコ停が押さえこめない工程変動の大きな状況において、システムの現状性能に応じて、過剰な在庫を持たずに TH を最大化する WIP 上限値を定めるにあたり、本稿の適正 WIP 決定法が参考となると考える。

今後の研究の方向性として、計算負荷における優位性に関する MVA との定量的な比較、現実の大規模生産システムの工程数を想定した近似法の有効性の評価、様々な CONWIP のバリエーションにおける影響やそのメカニズムの検討を課題としたい。

文 献

- Buzacott, J.A. and Shanthikumar, J.G., Stochastic models of manufacturing systems (1993), Prentice Hall.
- Hopp, W.P. and Spearman, M.L., Factory Physics, third ed. (2008), Irwin McGraw-Hill.
- Hopp, W.P. and Spearman, M.L., To pull or not to pull: What is the question?, Manufacturing & Service Operations Management, Vol.6, No.2 (2004), pp.133-148.
- 近藤修司, 勝眞一郎, 失敗事例から導くトヨタになれない三つの理由, 日経 BizTech, No.005 (2005), pp.32-35, 日経 BP 社.
- 大野耐一, トヨタ生産方式—脱規模の経営をめざして (1978), ダイヤモンド社.
- 水野博之, セルダル・ベイサン, 圓川隆夫, 工程内変動の OEE, リードタイム, 仕掛在庫に与える影響と関係, 日本設備管理学会誌, Vol.23, No.3 (2011), pp.170-176.
- Reiser, M. and Lavenbreg, S.S., Mean-Value-Analysis of closed multi-chain queueing networks, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol.27, Issue.2 (1980), pp.313-322.
- Womack, J.P. Jones, D.T. and Roos, D., The machine that changed the world: The story of lean production (1991), Perennial.
- Zipkin, P.H. Does manufacturing needs a JIT revolution?, Harvard Business Review, January February (1991), pp.40-50.
- Spearman, M.L., Woodruff, D.L. and Hopp, W.J., CONWIP: a pull alternative to kanban, International Journal of Production Research, Vol.28, No.5 (1990), pp.879-894.

References

- Buzacott, J.A. and Shanthikumar, J.G., Stochastic models of manufacturing systems (1993), Prentice Hall.

- Hopp, W.P. and Spearman, M.L., *Factory Physics*, third ed. (2008), Irwin McGraw-Hill.
- Hopp, W.P. and Spearman, M.L., To pull or not to pull: What is the question?, *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol.6, No.2 (2004), pp.133-148.
- Kondo, S. and Katsu, S., Shippai-jirei kara michibiku Toyota ni narenai mittsu no riyuu, *Nikkei BizTech*, No.005 (2005), pp.32-35, Niekkei BP (in Japanese).
- Mizuno, H., Baysan, S., and Enkawa, T., Effects of process variability on OEE, leadtime and WIP, and their relationship, *Journal of the Society of Plant Engineers Japan*, Vol.23, No.3 (2011), pp.170-176 (in Japanese).
- Ohno, T., *Toyota Production System: Beyond large-scale production* (1978), (in Japanese).
- Reiser, M. and Lavenbreg, S.S., Mean-Value-Analysis of closed multi-chain queueing networks, *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol.27, Issue.2 (1980), pp.313-322.
- Spearman, M.L., Woodruff, D.L. and Hopp, W.J., CONWIP: a pull alternative to kanban, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5 (1990), pp.879-894.
- Womack, J.P. Jones, D.T. and Roos, D., *The machine that changed the world: The story of lean production* (1991), Perennial.
- Zipkin, P.H. Does manufacturing needs a JIT revolution?, *Harvard Business Review*, January February (1991), pp.40-50.