SCM における平準化生産・発注の最適化とその効果に関する研究*

田村 隆善^{*1}, 大野 勝久^{*2}

Optimization and Effectiveness of a Production Smoothing Policy in SCM

Takayoshi TAMURA^{*1} and Katsuhisa OHNO^{*1} Aichi Institute of Tech., Faculty of Business Administration
Jiyugaoka 2-49-2, Chikusa-ku, Nagoya, 464-0044 Japan

Kanban system has been known to be a superior tool to control complex production and inventory systems operating in the just-in-time (JIT) environment. The kanban system works more effectively at low inventory levels when the consumption rates of parts necessary to produce finished goods are leveled. The parts consumption leveling in JIT systems is called “Heijunka”. In this research, we investigate a multi-stage multi-product production and inventory system in which the production order quantity is exponentially smoothed. The paper presents an efficient algorithm based on simulation to determine the near optimal exponential smoothing factor and safety stock level at each workstation. We use numerical experiments to evaluate the performance of the exponentially smoothed ordering policy in a supply chain as compared to the original kanban system. And also the performance of the two types of optimization methods, global and local optimizations, in the supply chain are compared. We conclude that the locally optimized production smoothing is quite effective as a production and material replenishment ordering policy as an SCM.

Key Words : Multi-Stage Production System, Smoothed Ordering Policy, SCM, Multi-Items, Kanban, JIT

1. 緒 言

ジャストインタイム (JIT) は, 「必要なものを, 必要なときに, 必要なだけ生産する」ことを理念とした生産管理方式であり, その基礎は平準化とされる. JIT を実現するツールとしてかんぱん方式があるが, それは平準化の基礎があって効果的に機能する. 通常, 自動車の生産では, 最終組立ラインにおける製品投入計画において平準化が重要な課題として考慮されている⁽¹⁾.

製品生産の平準化によって, 部品在庫量は低減するが, 製品在庫量は増加する. 単一品種・多段階生産・在庫システムにおける平準化方式とその効果が Kotani⁽²⁾や Tamura ら⁽³⁾によって議論されている. しかし, 多品種生産における平準化指示の最適化とその効果に関してはほとんど議論されていない⁽⁴⁾⁽⁶⁾. たとえば, Matzka ら⁽⁵⁾は, 一定値をとる生産能力によって負荷が平準化できることを示し, 生産能力を予め各品目に割り当てることで多品目の平準化が可能としているものの, その割り当て法に関しては今後の課題としている. 多品種生産における平準化の議論は, これまで主に自動車生産における最終組立ラインへの製品投入順序の平準化に関するものであった⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 一方, 生産計画における平準化は, 生産負荷の平準化に関する議論が主であり⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, 個々の品目の平準化を扱った生産計画の議論は余りない⁽¹⁾⁽¹¹⁾.

本研究では, 図 1 に示すような製造サプライチェーンにおける平準化指示の最適化手順を提案することを最終目標としているが, 本稿では研究の第一歩として, 図 2 に示すような機械加工型多品種・多段階生産・在庫システムを扱うこととする. また, ここでの各サブシステム (図 2 での各工程) は, 指数平滑法を使って生産指示量を平準化する方式を考えている⁽³⁾⁽⁴⁾. この場合, 問題は各サブシステムにおける平滑化係数の値, ならびに各在

* 原稿受付 2012 年 7 月 2 日

^{*1} 正員, 愛知工業大学 (〒464-0044 愛知県名古屋市中種区自由ヶ丘 2-49-2)^{*2} 愛知工業大学

E-mail: tamuratak@aitech.ac.jp

The diagram illustrates a supply chain network with two suppliers and a maker (buyer).
Supplier 1 and Supplier 2: Each supplier has a 'P. Planning' (Production Planning) block and a 'Production' block. They receive 'Material' input and send 'Part' output. 'P. Planning' and 'Production' are connected by a dashed arrow. 'P. Planning' also receives an 'Order' signal from the Maker.
Maker (Buyer): Contains 'Purchase', 'Prod. Planning', 'Sales', and 'Production' blocks. 'Sales' receives 'Demand' and sends an 'Order' to 'P. Planning'. 'Prod. Planning' sends an 'Order' to 'Purchase'. 'Purchase' sends 'Part' to the Maker's 'Production' block. Both suppliers' 'Part' outputs feed into the Maker's 'Production' block. 'Prod. Planning' also sends an 'Order' to the Maker's 'Production' block. The final output is 'Shipment'.
Legend: Solid arrows represent 'Material flow'; dashed arrows represent 'Information flow'.

Fig. 1 An example of manufacturing supply chain

Fig. 2 Machinery type of multi-item multi-stage production system

2. 生産・在庫モデル

本研究では、図 2 に示す機械加工型の多段階生産・在庫システムについて議論する。モデル構築に当たって以下の前提条件を設定する。なお、各生産工程を以下では単に工程とよぶ。

- (1) 各工程はそれぞれ資材(前工程で完成し、後工程に届けられた品物もそのようによぶ)在庫と完成品在庫(最

終工程については製品在庫)をもつ (図2 参照)。

- (2) 時間は離散時間とする。
- (3) 需要は計数値とし、最終工程においてのみ発生する。各製品の各期の需要量は定常で独立な確率分布とする。
- (4) 各工程では生産と出荷のバックオーダー(遅れ)が許され、何れの工程でもロストセールスは考慮しない。
- (5) 各工程における生産指示と出荷指示は各期首に行う。
- (6) 前工程から資材の補充を受けるため、生産で消費された資材量を当該期末に発注する。
- (7) 各在庫点への資材や完成品の入荷は期首とする。
- (8) 生産能力は定常で独立な確率分布とする。
- (9) 各期の生産能力は、その期に生産着手される品物にのみ影響し、いったん生産着手された品物は一定のリードタイム後に完成する。したがって、過負荷による待ち時間は、生産着手直前に考慮される。
- (10) 各工程での資材調達リードタイム、生産リードタイム、および輸送リードタイムは既知で一定とする。なお、資材調達リードタイムには、前工程からの輸送リードタイムが含まれる。
- (11) 平準化は生産指示量に対してだけ行い、資材発注量の平準化は行わない。
- (12) 不良品の発生は考慮しない。
- (13) 各工程では1個の材料から1個の完成品が作られる。
- (14) 1個当たりの処理時間は、何れの工程においても1単位時間とし、段取りは考慮しない。

2・2 生産・在庫モデル

若干冗長となるが、生産・在庫モデルを詳細に定式化し、そのなかで記号の定義を行う。ただし、記号 i ($i=1, \dots, N$) は品目を、 t は時間(期とよぶ)を、 m ($m=1, \dots, M$) は工程をそれぞれ表すインデックスとする。 $m=M$ は最終工程である。なお、下記のリスト順は、1期間のシミュレーション手順とほぼ一致している。

(1) 完成品期首在庫量

前期の期末在庫量 $I_{im,t-1}$ と生産(着手)量 $X_{im,t-a_m}$ から工程 m での完成品期首在庫量 H_{imt} が次式で計算される。ただし、記号 a_m は工程 m での生産リードタイムを表す。

$$H_{imt} = I_{im,t-1} + X_{im,t-a_m} \quad (1)$$

(2) 新規の出荷要求量

各工程に届いた受注量、すなわち新規の出荷要求量 Q_{imt} は、最終工程においては外部需要量 D_{it} 、それ以外の工程では後工程から届いた受注量 $O_{i,m+1,t}$ (後工程の発注量)に基づく。ただし、外部需要は前期の需要量、最終工程以外は、後工程への品物の輸送時間を考慮し次式で設定される。

$$Q_{imt} = O_{i,m+1,t-b_{m+1}+w_{m+1}}, \quad m=1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$Q_{iMt} = D_{it} \quad (3)$$

ここでは、工程 $(m+1)$ が t 期に前工程へ発注した資材を、前工程は $(t+b_{m+1})$ 期に工程 $(m+1)$ へ届けられないといけない。ただし、前工程で完成品に欠品が生じたときはバックオーダーとなる。記号 b_{m+1} は工程 $m+1$ の資材調達リードタイムであり、前工程からの輸送時間 w_{m+1} が含まれるため、前工程 m はこれを考慮して、 $(t+b_{m+1}-w_{m+1})$ 期に発注する。

(3) 次工程への出荷要求量

次工程への完成品の出荷要求量 R_{imt} は、バックオーダー量 B_{imt} を考慮して求められる。

$$R_{imt} = B_{im,t-1} + Q_{imt} \quad (4)$$

(4) 次工程 m への出荷量（次工程での入荷量）

前工程 ($m-1$) から次工程 m ($m=2, \dots, M+1$) への実際の出荷量 Y_{imt} （工程 m での入荷量）は、前工程側での出荷要求量 $R_{i,m-1,t}$ と期首在庫量 $H_{i,m-1,t}$ とから次式で計算される。

$$Y_{imt} = \min\{R_{i,m-1,t}, H_{i,m-1,t}\} \quad (5)$$

ただし、 $Y_{i,M+1,t}$ は外部需要に対する出荷量である。先頭工程 ($m=1$) については、資材の入荷遅延はないと仮定する。このため、先頭工程への資材の入荷量は次式で設定する。

$$Y_{i,1,t} = O_{i,1,t-b_1+w_1} \quad (6)$$

(5) 資材の期首在庫量

資材の期首在庫量 K_{imt} は、期末在庫量 J_{imt} と入荷量 Y_{imt} を使って次式で与えられる。

$$K_{imt} = J_{im,t-1} + Y_{im,t-w_m} \quad (7)$$

(6) 完成品の期末在庫量

完成品の期末在庫量 I_{imt} は、期首在庫量と出荷量とから次式で計算される。

$$I_{imt} = H_{imt} - Y_{i,m+1,t} \quad (8)$$

(7) 完成品のバックオーダー量

完成品のバックオーダー量 B_{imt} は、出荷要求量と実際の出荷量との差で与えられる。

$$B_{imt} = R_{imt} - Y_{i,m+1,t} \quad (9)$$

(8) 生産指示量

平準化指示方式のもとでの生産指示量 P_{imt} は、新規出荷要求量（各工程での需要量）と生産遅れ S_{imt} を平滑化係数 α_m (≤ 1) によって平滑化し指示する⁽³⁾⁽⁴⁾。すなわち、

$$P_{imt} = [\alpha_m (S_{im,t-1} + Q_{imt})] \quad (10)$$

ただし、記号 $[a]$ は小数点を切り上げた整数値である。一般に平滑化係数は品目に依存するであろうが、品目ごとに平滑化係数を変えて生産指示量を計算するのは実務上煩雑であり、実際、JIT で管理されている職場のリーダーが平準化を実施する場合も、届いたかんばんを予め決めた期間に等分して差し立てる方法が利用されている。そこで本研究でも、平滑化係数は工程だけに依存し、品目には依存しないこととする。

(9) 生産着手量

生産指示量 P_{imt} は、期首資材在庫量 K_{imt} とその品目 i に使える生産能力 C_{imt} によって制約され、生産着手量が決まる。そのため、生産着手量 X_{imt} は次式で定まる。

$$X_{imt} = \min\{P_{imt}, K_{imt}, C_{imt}\} \quad (11)$$

ただし、生産能力 C_{imt} （前提条件(13)と(14)より個数の単位ではかっている）は、生産のプライオリティで決まる確率変数であり、次節で詳述する。

(10) 生産の遅れ（生産バックオーダー量）

生産指示平滑化と生産能力の制約によって起きる生産バックオーダー量 S_{imt} は次式で与えられる。

$$S_{imt} = S_{im,t-1} + Q_{imt} - X_{imt} \quad (12)$$

(11) 資材不足量（資材バックオーダー量）

資材バックオーダー量 A_{imt} は、生産可能量 $\min\{P_{imt}, C_{imt}\}$ に対する部品の不足量として次式で定義する。

$$A_{imt} = \min\{P_{imt}, C_{imt}\} - X_{imt} \quad (13)$$

(12) 資材期末在庫量

資材期末在庫量 J_{imt} は、期首在庫量から生産のために消費された量を引いて求める。

$$J_{imt} = K_{imt} - X_{imt} \quad (14)$$

(13) 前工程への資材発注量

JIT と同様、生産で消費した資材の量を資材発注量 O_{imt} として前工程に発注する。

$$O_{imt} = X_{imt} \quad (15)$$

(14) 残業時間: $C_{mt}^{(o)}$

残業時間 $C_{mt}^{(o)}$ は、その上限時間 V_{mt} と定時の稼働時間 $C_{mt}^{(r)}$ に関して次の制約式を満たさなければならない。

$$\sum_i X_{imt} \leq C_{mt}^{(r)} + C_{mt}^{(o)}, \quad C_{mt}^{(o)} \leq V_{mt} \quad (16)$$

(15) 目的関数

目的関数は、在庫費用と品切れ費用と残業費用の時間平均の最小化であり、式(17)で定義する。

$$\begin{aligned} \text{minimize } \lim_{T \rightarrow \infty} z = & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i,m} h_{im}^{(u)} J_{imt} + \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i,m} h_{im}^{(v)} I_{imt} + \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i,m} c_{im}^{(u)} A_{imt} \\ & + \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i,m} c_{im}^{(v)} B_{imt} + \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_m o_m C_{mt}^{(o)} \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、 $h_{im}^{(u)}$ と $h_{im}^{(v)}$ はそれぞれ資材と完成品の単位保管費用、 $c_{im}^{(u)}$ と $c_{im}^{(v)}$ は資材と完成品の単位バックオーダー費用、 o_m は単位残業費用である。

問題は、制約条件(1)～(16)、および次節で述べる生産能力割り当てルールのもとで目的関数(17)を最小化する平滑化係数 α_m と各在庫点での在庫水準を決定することである。ただし、求解はシミュレーションに頼るため、目的関数の評価は有限期間 T で評価することになる。ここで、需要量と生産能力の時系列が与えられ、平滑化係数が決められると、在庫量の時間平均（本稿では在庫水準ともよぶ）は、初期在庫量によって一意に定まる。したがって、問題は最適平滑化係数 α_m と初期在庫量を定めることである。

目的関数(17)におけるバックオーダー費用を評価するために必要な単位バックオーダー費用は、実務では評価が難しいという意見が存在するかも知れない。そのためか、Iwase と Ohno⁽¹⁵⁾ などでは資材や中間工程での完成品に対してバックオーダー費用が考慮されていない。しかし、実務においては生産に必要な資材の欠品を防ぐため、かなり注意深く管理がなされているのが実情であり、3.1 節で述べるように品切れ率と単位バックオーダー費用との関係を使って、単位バックオーダー費用を見積もることができる。そうでない場合、中間工程で高い品切れ率の生じることがある⁽¹⁴⁾。

2・3 生産プライオリティと生産能力の割り当て

多品種の品物を生産するとき、生産能力に制約があるから、どの品目を優先して生産するか、品目間でプライオリティを付ける必要がある。一般にプライオリティは、在庫量や品切れ量によって動的に変化させるのが望ましいが、余り複雑すぎるのは実用的でない。本研究では単純に、生産バックオーダー量と新規の出荷要求量とを用いて次式で計算する。ただし、記号 D_i は平均需要量 ($=E[D_{it}]$) である。

$$p_{imt} = \frac{S_{im,t-1} + Q_{imt}}{D_i} \quad (18)$$

この式の右辺の分子 ($S_{im,t-1} + Q_{imt}$) の値は、平準化しない場合、かんばん方式における「外れた生産かんばん枚数」に対応することから、ここで定義したプライオリティはある程度の合理性を有するであろう。

プライオリティが決定すると、プライオリティ p_{imt} の値の高い品目から降順に、以下の手順で各品目の生産量を決定する。ただし、記号 C_{mt} ($=C_{mt}^{(r)} + V_{mt}$) は残業を含む t 期の生産能力を、 $i(k)$ はプライオリティが k 番目に高い品目を表すものとする。なお、式(11)の計算に必要な品目 $i(k)$ に対する t 期の生産能力 $C_{i(k),mt}$ は、次の Step A.4 で決まる。

生産能力の割り当て(A)

Step A.1: $C_{i(1),mt} := C_{mt}$, $k := 1$.

Step A.2: 式(11)を使って生産量 $X_{i(k),mt}$ を設定する。

Step A.3: $k := k + 1$. $k > n$ ならば終了する。

Step A.4: $C_{i(k),mt} := C_{i(k-1),mt} - X_{i(k-1),mt}$

Step A.5: Step 2 へ戻る。

3. 在庫水準の最適化

平準化を行わない単一品目の場合においてさえ最適な在庫水準を理論的に求めるのは簡単でない⁽¹⁵⁾。そこで本研究では、シミュレーションによって各在庫点での在庫量の分布を求め、この分布を使って在庫水準を調整する近似最適化法を提案する。

3・1 各在庫点における在庫水準の最適化

一つの在庫点における在庫水準を最適化する問題を考えよう。記述を簡単化するため、在庫量を連続量 x とし、その確率密度関数を $f(x)$ で表す。ただし、 $x < 0$ のとき、 $-x$ はバックオーダー量を表す。この場合、在庫水準を r だけ減らしたとき（シミュレーションにおいては、初期在庫量を r だけ減らす）、在庫費用と品切れ費用の和 $y(r)$ は次式で与えられる。

$$y(r) = h \int_r^\infty (x-r) f(x) dx + c \int_{-\infty}^r (r-x) f(x) dx \quad (19)$$

$y(r)$ は r に関して凸であり、 r に関して微分し 0 とおくことで次の最適条件が得られる。

$$\theta(r) = \int_{-\infty}^r f(x) dx = \frac{h}{h+c} \quad (20)$$

ここに $\theta(r)$ は $y(r)$ を最小化する最適品切れ率である。在庫量を 1, 2, ... と計数値で計る場合、調整量 r だけ在庫水準を減らしたときの品切れ率をあらためて $\theta(r)$ 、在庫量が x となる確率関数を $f(x)$ と書くとき、最適な r は次式を満たす最大の r として求められる。

$$\theta(r) \leq \frac{h}{h+c} \quad \text{ただし, } \theta(r) = \sum_{x=-\infty}^{r-1} f(x) \quad (21)$$

本研究ではシミュレーションを行って $f(x)$ の近似値を求め、式(21)を満たす最大の r を求めて調整量を決定する。

3・2 在庫水準の全体最適化

図2に示す多段階生産・在庫システムにおいて、すべての工程が一つの企業内に配置されている場合やSCMでいう「神の手」が存在する場合、各工程の平滑化係数と各在庫点における初期在庫量を、システム全体の視点から最適化することができる。しかし、各在庫点での平均在庫量や平均バックオーダー量の評価は、上述のように簡単でないから、本研究ではシミュレーションを利用した近似最適化法を提案する。

まず本節では、平滑化係数 α_m が与えられたときの初期在庫量の最適化法を述べる。初期在庫量は計数値であり、シミュレーションを用いる離散変数の最適化では、メタ解法が有力な方法かも知れない(17, p.535)。しかし、メタ解法の利用においては数万回にも及ぶ費用評価を反復することが必要で、その回数だけシミュレーションを実行しなければならないことから効率的でない。そこで本研究では、近似の精度は若干劣るものの、前節で述べた最適条件を利用した以下の初期在庫量最適化法を提案する。

この方法は、以下の二段階から構成される。まず式(21)を使って最良の調整値を求め、すべての在庫点を同時に調整し最適化をはかる。このプロセスの収束は通常非常に早く、本研究で実施した数値実験では数回の反復で収束する。第二段階では、第一段階で得られた各在庫点での最良解と最良解から1だけ増減させた3水準を品目ごとに組み合わせて解を改善する。ここで、品目ごとに在庫点での在庫水準の組み合わせを考慮したのは、同一品目の在庫点間での交互作用に比べ、品目間の交互作用が小さいためである。

在庫水準最適化アルゴリズム(B)

Step B.1: 在庫量の調整を以下の手順で行う。

B.1.1: 初期在庫量 J_{im0} と I_{im0} をすべての品目と工程に対して設定する。

B.1.2: 計算終了基準を満たせば、次のステップ Step B.2 へ進む。

B.1.3: シミュレーションを行い、各在庫点での期末在庫量、すなわち、すべての品目と工程について $x = J_{imt} - A_{imt}$ の確率関数 $f_{im}^{(u)}(x)$ と、 $x = I_{imt} - B_{imt}$ の確率関数 $f_{im}^{(v)}(x)$ を求める。

B.1.4: 在庫点ごとに不等式(21)を満たす最大の r を求め、初期在庫量を調整する(資材なら $J_{im0} := J_{im0} - r$, 完成品なら $I_{im0} := I_{im0} - r$)。

B.1.5: ステップ B.1.2 へ戻る。

Step B.2: 品目ごとに下記の要領で最適化を行う。

B.2.1: $i = 1$.

B.2.2: 各工程 m について、3水準の初期在庫量 $J_{im0}^{(\ell)}$ と $I_{im0}^{(\ell)}$ ($\ell = 1, 2, 3$) を次式で設定する。

$$J_{im0}^{(1)} = J_{im0} - 1, \quad J_{im0}^{(2)} = J_{im0}, \quad J_{im0}^{(3)} = J_{im0} + 1, \quad I_{im0}^{(1)} = I_{im0} - 1, \quad I_{im0}^{(2)} = I_{im0}, \quad I_{im0}^{(3)} = I_{im0} + 1 \quad (22)$$

B.2.3: 初期在庫量のすべての組合せ $\{(J_{i,1,0}^{(\ell_1)}, I_{i,1,0}^{(j_1)}), \dots, (J_{i,M,0}^{(\ell_M)}, I_{i,M,0}^{(j_M)})\}$ を作成する。ただし、 $\ell_m, j_m \in \{1, 2, 3\}$.

B.2.4: 初期在庫量の各組合せについてシミュレーションを行って総費用 z を評価する。ただし、品目 i 以外の初期在庫量は、それまでに得られた最良値を使用する。

B.2.5: 総費用 z を最小にする初期在庫量の組合せを選択し、品目 i の最良値を更新する。

B.2.5: $i := i + 1$. $i > N$ ならばアルゴリズムを終了する。そうでなければステップ B.2.2 へ戻る。

ステップ B.2.3 の列挙は、図2の3工程問題では、組合せ数が $3^6 = 729$ となるから、3品目問題の Step B.2 でのシミュレーション回数は $3 \times 729 = 2187$ 回となる。在庫水準の最適化は、後述する平滑化係数の最適化において反復利用されることから、この回数を減らすことが望まれる。選択肢の一つは Step B.2 を実行しないこと、もう一つの選択肢は、在庫点を複数のグループに分割し、それらグループごとに在庫水準の組合せを行うことで組合せの数を減らすことである。後者の場合、例えば図2の問題では、在庫水準の組合せを $\{J_{i,1,0}^{(\ell_1)}, I_{i,1,0}^{(j_1)}, J_{i,2,0}^{(\ell_2)}\}$ と

$\{I_{i,2,0}^{(j_2)}, J_{i,3,0}^{(\ell_3)}, I_{i,3,0}^{(j_3)}\}$ に分けて最適化すれば、シミュレーション回数は $3 \times 2 \times 3^3 = 162$ に減らすことができる。なお、 $I_{im0}^{(j_m)}$ と $J_{i,m+1,0}^{(\ell_{m+1})}$ は相互に影響を与えあうことから、在庫点の分割においては、同一グループとなるようにする。

3・3 平滑化係数の最適化

平滑化係数は連続変数であるから応答曲面法を利用して最適化する⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。本稿で提案する最適化のステップは、まず一次探索を行い、そこで得られた最良解近辺で非線形回帰式を求めて最適化を行う。アルゴリズムは以下のとおりである。

平滑化係数の最適化アルゴリズム(C)

Step C.1：平滑化係数 α_m について、下記のステップで一次探索を行う。

C.1.1：2水準型完全実施計画を利用して一次の実験計画を作成し、実験を行う。

C.1.2：得られた結果について一次の回帰式(23)を作成する。

$$\hat{z}_1 = \beta_0 + \beta_1 \alpha_1 + \dots + \beta_M \alpha_M \quad (23)$$

C.1.3：すべての工程について、 $\alpha_m = 1$ から出発し、回帰式(23)の最急勾配の方向に一次探索を行う。ここでは以下の手順で最良値を求める。

C.1.3.1： α_M の値を4点選択する（図2の場合、例えば、1, 0.3, 0.1, 0.04など）。

C.1.3.2： α_M の各値に対して最急勾配に沿った α_m の値を次式から求める。

$$\alpha_m = 1 - (1 - \alpha_M) \frac{\beta_m}{\beta_M} \quad (24)$$

C.1.3.3：4点に対して3.2節のアルゴリズム(B)を使って初期在庫量を最適化し、総費用 z を求める。

C.1.3.4：C.1.3.3の結果から次の回帰式(25)を求める。

$$\hat{z}_2 = u_0 + u_1 \alpha_M + u_2 \frac{1}{\alpha_M} \quad (25)$$

C.1.3.5：式(25)の右边を最小化する α_M の値を現在の最良値 α_M^+ とする。すなわち、 $\alpha_M^+ = \sqrt{u_2 / u_1}$ 。ほかの工程については、 α_M^+ を式(24)に代入して α_m^+ を求める。

C.1.3.6：必要なら α_M^+ を加えた4点を設定し、ステップC.1.3.2～C.1.3.5を再度実行する。

Step C.2：Step C.1で得られた平滑化係数の最良値 $(\alpha_1^+, \dots, \alpha_M^+)$ の近傍で中心複合計画などを使って実験を行い回帰式を求め、平滑化係数の最適値を求める。ステップは以下のとおりである。

C.2.1：最良値 $(\alpha_1^+, \dots, \alpha_M^+)$ を中心に平滑化係数の水準を決める。例えば、 $\alpha_m^+ = 1$ である工程を除き、次の水準例が参考になる。

$$\alpha_M = \alpha_M^+ \pm 0.1, \quad \alpha_m = \alpha_m^+ \frac{\alpha_M}{\alpha_M^+} \quad (26)$$

C.2.2：中心複合計画⁽¹⁷⁾などを使って実験計画を作成する。

C.2.3：実験結果をもとに次の回帰式(27)を求める。ただし、 $v_m^{(1)} \leq 0$ や $v_m^{(2)} \leq 0$ となる工程については、回帰式(27)から除く。

$$\hat{z}_3 = v_0 + \sum_m v_m^{(1)} \alpha_m + \sum_m v_m^{(2)} \frac{1}{\alpha_m} + \sum_{m \leq M-1} v_{m,m+1} \alpha_m \alpha_{m+1} \quad (27)$$

C.2.4: $\hat{z}_3$ を最小化する平滑化係数を求め、最良値 ($\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*$) とする.

C.2.5: 必要なら最良値 ($\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*$) の近傍で、ステップ C.2.1~C.2.4 を再度実行する.

Step C.1 や Step C.2 で用いる実験計画は、生産・在庫システムの複雑性に依存する. システムが複雑になると因子数が増え、実験数が飛躍的に多くなるのに対処する工夫が重要となろうが、この点は今後の課題として残されている.

4. 数 値 例

4・1 データ

図2の3工程3品目のモデルについて、目的関数(17)を最小化する平滑化係数と在庫水準(初期在庫量)を求める. データを以下のように設定する.

工程数 $M=3$, 品目数 $N=3$, 需要量 D_{1t} , D_{2t} , D_{3t} はそれぞれ [8, 22], [6, 20], [5, 19] の一様整乱数, 生産能力 C_{mt} は何れの工程も [39, 53] の一様整乱数 (負荷率 87%) で生成する. 単位保管費用はすべての品目について $(h_{i,1}^{(u)}, h_{i,2}^{(u)}, h_{i,3}^{(u)}) = (0.4, 0.6, 0.8)$, $(h_{i,1}^{(v)}, h_{i,2}^{(v)}, h_{i,3}^{(v)}) = (0.6, 0.8, 1.0)$, 単位バックオーダー費用はすべての品目について $(c_{i,1}^{(u)}, c_{i,2}^{(u)}, c_{i,3}^{(u)}) = (7.6, 11.4, 15.2)$, $(c_{i,1}^{(v)}, c_{i,2}^{(v)}, c_{i,3}^{(v)}) = (11.4, 15.2, 19.0)$ (これらは式(20)より $h/(h+c) = 5\%$ の品切れ率に相当する), 生産リードタイムは $(a_1, a_2, a_3) = (3, 2, 2)$, 調達リードタイムは $(b_1, b_2, b_3) = (4, 4, 4)$, 輸送リードタイムは $(w_1, w_2, w_3) = (2, 2, 2)$ に設定する. 毎期の利用可能残業時間 V_{mt} は $[0.15 C_{mt}]$, 単位残業費用は $(o_1, o_2, o_3) = (6.4, 8, 8)$ で設定する. 日本では通常, 残業してでも欠品防止が優先されることから, 単位残業費用を単位バックオーダー費用より小さく設定している.

1回のシミュレーション期間は21000期とし, 最初の1000期を捨てた20000期を評価に利用する. 平滑化係数と初期在庫量を与えたときの総費用は, 10回の実行(したがって20000期×10回)の平均値で評価する. 同様に在庫量の分布も20000期×10回のシミュレーション結果から求める. なお, 以下では21000期×10回の実行をシミュレーション1回と数える. 1回の実行に要するCPU時間は2.045秒であった(CPU: Intel i5 2.6GHz, 言語: VB.net).

4・2 在庫水準の最適化

まず, 平滑化係数を $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (1, 0.847, 0.2)$ としたときの初期在庫量を最適化する例を示す. ただし, 初期値は, すべての品目について $(J_{i,1,0}, J_{i,2,0}, J_{i,3,0}) = (100, 100, 100)$, $(I_{i,1,0}, I_{i,2,0}, I_{i,3,0}) = (100, 100, 300)$ として, 初期在庫量以外, システムは空の状態ではシミュレーションを開始する.

初期値に対する総費用は1242.02, Step B.1における1回目の調整後の総費用は192.66であった. 4回の調整後, 解の改善は見られず, 9回でStep B.1を終了した(5回解が改善されないと計算を終了するよう打ち切り基準を設定). 得られた平均総費用は 191.42 ± 2.15 (t-検定による95%信頼区間) である.

Step B.2では, Step B.1で求めた最良解の近傍で列挙を行う. 列挙は, Step B.1で得た最良解と最良解±1の3水準の組合せで行った. また, 組合せの数を減らすため, $\{J_{i,1,0}^{(\ell_1)}, I_{i,1,0}^{(h)}, J_{i,2,0}^{(\ell_2)}\}$ と $\{I_{i,2,0}^{(h_2)}, J_{i,3,0}^{(\ell_3)}, I_{i,3,0}^{(h_3)}\}$ にグループ分けし, 水準組合せを作成して最適化を行った. Step B.1で得た最良解からの改良は, 品目2, 工程1の完成品初期在庫量を45→46へと改善するもので, 平均総費用は 191.37 ± 2.03 であった. 表1は, アルゴリズムBで得られた最良解である. 表より, 資材の初期在庫は工程によらず一定となっている. その理由として, 一般に資材の欠品率は在庫水準, 各工程の生産能力とその変動, ならびに資材調達リードタイムに依存するが, この例題では欠品率, 生産能力変動, 資材調達リードタイムなどをすべての工程で同一としたことに関係があると推察される.

Table 1 Best value of initial stock obtained by Algorithm B.

Item i	J_{im0}			I_{im0}		
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
1	68	68	68	51	37	105
2	60	60	60	46	33	93
3	56	56	56	43	31	87

Table 2 Result of experimental design L_8 .

Exp. No.	α_1	α_2	α_3	Total cost
1	1	1	1	264.88
2	1	1	0.2	192.74
3	1	0.2	1	234.26
4	1	0.2	0.2	197.98
5	0.2	1	1	262.77
6	0.2	1	0.2	200.09
7	0.2	0.2	1	242.63
8	0.2	0.2	0.2	206.56

Fig. 3 Result of linear search along the steepest descent.

また、完成品の初期在庫量は平準化の影響があらわれ、とくに製品の在庫量は大きい値になっている。

4・3 平準化係数の最適化

(1) 一次の実験計画

Step C.1 では、各工程での平準化係数を 2 水準 (1, 0.2) にとり、2 水準型完全実施計画 L_8 で実験を行う (図 2 のような直列型システムでは、最終工程での平準化の効果が大きいので、 α_1 と α_2 の水準を (1, 0.8) 程度とすることも考えられ、検討を行ったが、本稿の数値例ではあまり違いはなかった)。

8 個の実験で得られた平均総費用と平準化係数の水準を表 2 に示す。平均総費用について重回帰式(23)を求めると、 α_1 の回帰係数が負値となるので、 α_1 の回帰係数を 0 とし (したがって平準化係数を 1 に固定し平準化しない)、再度回帰式を求めると次式が得られた (重相関係数は 0.950)。

$$\hat{z}_1 = 178.88 + 12.44\alpha_2 + 64.97\alpha_3 \quad (28)$$

(2) 回帰式を使った一次探索

回帰式(28)を小さくする最急勾配(0, -12.44, -64.97)の方向に探索を行う。応答曲面法における一次探索では、探索幅を一定にして探索を行い、曲面の形を知ることが推奨される⁽¹⁸⁾。しかし本稿のモデルでは、応答曲面が比較的単純であることから、式(25)で与えられる回帰式を求めるのが効率的であろう。いま α_3 の値を 1, 0.3, 0.1, 0.04 の 4 水準にとり、式(24)を使って $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ の値を求めると (1, 1, 1), (1, 0.866, 0.3), (1, 0.828, 0.1), (1, 0.816, 0.04) となる。この 4 点について初期在庫量を最適化し平均総費用を求めると 264.88, 200.50, 191.09, 211.13 が得られた。これら 4 点から求まる回帰式は次式で与えられる。

$$\hat{z}_2 = 164.91 + 98.37\alpha_3 + \frac{1.685}{\alpha_3} \quad (29)$$

式(29)から α_3 の最良値 $\alpha_3^+ = 0.131$ が得られ、この値を式(24)に代入すると $\alpha_2^+ = 0.834$ が得られる。なお、 α_3 の各水準に対して求めた総費用と α_3 の関係を図3に示す。図中のマーカーがシミュレーションによって得た平均総費用である（実線は式(29)から描いたものでなく、13点の総費用から求めた次の回帰式(30)を使って描いた回帰曲線であり、重回帰係数は0.998）。これより、4点で求めた式(29)はかなりよい回帰式であることが分かる。

$$\hat{z}_2 = 166.04 + 98.61\alpha_3 + \frac{1.522}{\alpha_3} \quad (30)$$

(3) 最良解近傍での探索

一次探索で得られた平準化係数の最良値を中心に3水準の実験を計画し、応答曲面を求める。 α_3 は0.131を中心に0.2, 0.131, 0.08の3水準に設定する。ただし、 $\alpha_1^* = 1$ に固定する。 α_2 の水準幅を α_3 の水準幅と相対的に同じにするには、式(26)より $0.834 \times (0.2 \div 0.131) = 1.27 > 1$, $0.834 \times (0.08 \div 0.131) = 0.51$ となる。ここで、 α_2 をあまり小さくする（強く平準化する）のは、一次回帰式(28)から推察されるように望ましくない。以上の議論から、 α_2 の水準を1, 0.834, 0.7の3水準に設定する。因子数が2であるから、3水準型完全実施計画 L_9 で実験を行うこととする。

実験結果を表3に示す。 α_2 の影響はほとんどなく、 α_3 だけが最適化に影響を与えている（回帰分析を行うと $1/\alpha_2$ の係数は負値となり、t値も0に近い）。このため、 α_2 の最良値を $\alpha_2^* = 1$ に設定し、 α_3 について再度回帰式を求めると

$$\hat{z}_3 = 150.87 + 142.62\alpha_3 + \frac{2.466}{\alpha_3} \quad (31)$$

が得られる。回帰式(31)を最小化する α_3 は0.131となり、 α_3^+ との違いが僅かであるから、 $(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*) = (1, 1, 0.131)$ を最終的な最良解とする（総費用の95%信頼区間は 187.93 ± 2.08 ）。最良解に対する各在庫点での初期在庫量を表4に、各要素費用の平均値を表5に示す。

Table 3 Result of experimental design L_9 .

α_2	α_3		
	0.2	0.131	0.08
0.7	192.08	187.88	192.50
0.834	191.65	188.02	193.10
1	191.44	187.93	193.71

Table 4 Near optimal value of initial stock obtained using Algorithm C.

Items		Production process		
		$m=1$	$m=2$	$m=3$
Material	1	67	67	67
	2	59	59	59
	3	55	55	55
Finished	1	51	34	145
	2	45	30	128
	3	42	28	120

Table 5 Detailed cost at each process for the best solution obtained using Algorithm C.

Production process	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	Total cost
Holding cost (M)	8.40	12.51	16.64	37.55
Holding cost (F)	10.62	9.39	56.22	76.23
Shortage cost (M)	0.65	1.35	2.92	4.93
Shortage cost (F)	1.53	2.94	19.67	24.15
Over time cost	12.98	16.12	15.98	45.08
Total cost	34.18	42.32	111.43	187.93

(Note: M= Material, F= Finished good)

5. SCM における平準化の意義

5・1 異なった製造企業間で妥協生産計画を立案する難しさ

SCM (supply chain management) における生産計画と生産指示に関して多くの研究がみられる⁽¹⁹⁾。しかし、部品メーカーと組立メーカーの間のような異なった製造企業間で構成されるサプライチェーンにおいて、両者が納得できる（望ましくは win-win の関係を実現できる）有効な生産計画・生産指示方式はまだほとんど提案されていない。

例えば、Dudek⁽²⁰⁾によって提案されている生産計画立案法は、二つの企業間で片方が立案した生産計画を他方に情報提供し、それをキャッチボールすることで妥協案を作成しようとするアイデアである。このアイデアではまず、下流側企業が自社にとって最良の生産計画を立案するところから始まる。上流側企業は、下流側企業が作成した生産計画を検討し、妥協案を作成して下流側企業に戻す。これをもとに下流側企業も妥協案を作成し、それを相手に送る。これを何度かキャッチボールすることで最終的妥協案が作成される。

実務では、下流側企業は自社の都合を優先して生産計画を立案し、それに基づいて部品の所要量と所要時期を計算し、上流側企業に発注・納入指示を出すのが通常の姿であろう。Dudek が提案するようなキャッチボールをして得た妥協案は当然、下流側企業にとっては当初の計画よりコスト高、上流側企業にとってはコスト低減となるはずである。このため、そのような生産計画ロジックを SCM において利用するためには、妥協案の作成によって SCM 全体で低減された費用を按分する交渉を組み込んだ計画立案システムとしないことには、下流側企業を妥協案作成に参画させるモチベーションは生まれないであろう。この議論から容易に推察できることは、異なった製造企業間で構成される SCM において、両者が納得できる生産計画を立案するには、少なくとも以下の阻害要因が存在することになる。

- ① コストを含む詳細な情報の共有
- ② 妥協によって SCM 全体で得られた費用低減額を按分する仕組み
- ③ 計画立案システムの複雑化

これら阻害要因の中の①項と②項に関連して、商品の供給業者と小売り業者からなるサプライチェーンにおいて、両者がほとんど情報共有することなく win-win の関係を得る売買契約法が議論されていて興味深い⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾。しかし、本稿で取り上げた多段階生産・在庫システムでは、生産能力や残業費用など、各企業固有の制約や費用が生産計画・統制の巧拙に影響を与えるため、情報共有なしに生産管理のプロセスを協調して費用節減を図る方法、さらには得られた節減額を按分する有効なルールは、筆者らの知る限りまだ提案されていない。このためもあって、Dudek の提案する計画立案プロセスは煩雑である（上記③項）。これらの議論から、下流側と上流側に位置する複数の製造企業すべてが満足できる生産計画を立案するのは難しい課題であるといえよう。

5・2 「神の手」が存在するときの平準化の効果

JIT は SCM のツールである⁽⁴⁾。JIT ではまず、最終工程において平準化が図られるが、平準化のレベルはシステム全体の費用低減効果を評価して決められているわけではない。また、平準化の効果についても十分な議論はなされていない⁽⁴⁾⁽⁶⁾。そこで本節では、平準化をしない $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ の場合をかんばん方式とよぶこととし、このときの総費用と、生産・在庫システム全体を最適に平準化したときの総費用（「神の手」が存在するときの総

費用)とを比較することでまず平準化の効果を議論する。データは、4.1節で設定したデータに残業費用がすべての工程で0の場合、すべての在庫点での単位保管費用と単位バックオーダー費用がそれぞれ1.0と19.0の場合を加えたものを使用する。

表6にかんばん方式に対する平準化の効果を示す。表6の最後の2行が単位保管費用と残業の有無による平準化の効果の違いを費用低減率で評価したものである。ただし費用低減率は次式で定義する。

$$\text{費用低減率} = (\text{かんばん方式での総費用} - \text{最適平準化時の総費用}) \div \text{かんばん方式での総費用} \quad (32)$$

また、表の最後の行は、生産能力の変動が小さいとき（分布が[45, 47]のとき）の費用低減率である。表6から次の3点が観察される。

- ① 上流工程における単位保管費用が大きくなると、平準化の効果は大きくなる。
- ② 生産能力がかなり大きく変動するときでも平準化の効果は高い。
- ③ 生産能力の変動が小さいとき（最下行）、残業費用の有無で費用低減率は違ってくる。残業費用が高いときの方が平準化の効果（費用低減率）は大きい。

最後の③項は、生産能力の変動が小さい生産システムにおいて、下流工程で平準化が行われると、すべての工程で残業費用が小さくなるためである。このことは、残業が常用される日本の生産システムにおいて、設備故障などによって生じる生産能力の変動を小さくすることが平準化の効果を高める上で重要といえる。

Table 6 Cost reduction by production smoothing compared to kanban system.

Unit holding cost		Distribution of production capacity	Unit overtime cost	
Material	Finished		(6.4, 8, 8)	(0, 0, 0)
(0.4, 0.6, 0.8)	(0.6, 0.8, 1.0)	[39, 53]	29.05%	28.57%
(1.0, 1.0, 1.0)	(1.0, 1.0, 1.0)	[39, 53]	34.51%	35.48%
(0.4, 0.6, 0.8)	(0.6, 0.8, 1.0)	[45, 47]	37.50%	27.61%

5・3 部分最適化の効果

前節では、「神の手」が存在してシステム全体の総費用を最小化できる場合について議論した。生産システム全体の最適化は、システムを構成するすべての工程が単一企業内に存在すれば可能であろう。各工程がそれぞれ異なった企業に属する場合、「神の手」がなければ生産システム全体の最適化は難しい。本節では、「神の手」が存在したときの全体最適の意味、ならびに各工程がそれぞれ部分最適平準化を行ったときの最適化の有効性について、SCMの立場から議論する。ただし、各工程での部分最適化は、最終工程から先頭工程に向けて順に一度だけ実行するものとする。

表7は、実験A～Hの条件である。残業の有無と全体最適化か部分最適化かの区分、ならびに工程ごとの費用と総費用を表す。例えば、実験Aでは、残業有り、平準化無し、初期在庫量はシステム全体の総費用が最小となるよう設定された。実験DとHは各工程において部分最適化を行うSCMである。

表8は、表7の結果から費用低減率を計算した結果である。ただし、表8の第2列目は、低減率の計算法を示す。たとえば表8の第2行目の(A-B)/Aは、表7の実験AとBの結果を使って、この式で低減率を計算する。すなわち、この行の第3列目(m=1の列)の値は、(59.93-34.18)÷59.93=42.97%によって計算され、この値は、工程1での費用低減率を表す。表8の各行は、次の意味を有する。

- (A-B)/A と (E-F)/E：全体最適化したかんばん方式に対する全体最適化した平準化の費用低減率
- (A-D)/A と (E-H)/E：全体最適化したかんばん方式に対する部分最適化した平準化の費用低減率
- (C-D)/C と (G-H)/G：部分最適化したかんばん方式に対する部分最適化した平準化の費用低減率
- (C-A)/C と (G-E)/G：かんばん方式における全体最適化に対する部分最適化の費用増加率
- (D-B)/D と (H-F)/H：平準化における全体最適化に対する部分最適化の費用増加率

表8より、平準化に関して全体最適化を行うと、かんばん方式に対して総費用は大きく低減する((A-B)/A と (E-F)/Eの行を参照)。しかしこの場合、上流工程は大きく平準化の恩恵を受けるものの、最終工程は恩恵をあまり受けない(費用低減率は小さく、(E-F)/Eでは負値となる)。この実験から、システム全体の総費用最小化をSCM

における全体最適化ととらえるなら、全体最適化を考慮した平準化は、システム全体の総費用最小化に大きく寄与する方式といえるが、最終工程における全体最適化の利益は小さい。このため、平準化においても、最終工程すなわちメーカーには全体最適化への動機付けは生まれにくいと結論づけることができる。

かんばん方式に関しては、各在庫点での品切れ率がほぼ5%となるようデータが設定されていることから、部分最適化の結果と全体最適化の結果に大きな差は生じていない（ $(C-A)/C$ と $(G-E)/G$ の行参照）。

各工程が平準化を部分最適化する場合を考えよう。 $(D-B)/D$ と $(H-E)/H$ の行は、平準化の全体最適化に対する部分最適化の費用増加率を示したもので、部分最適化によって、総費用は若干増加するものの、最終工程での費用はかなり改善される（上流側工程では費用が増加する）。これをかんばん方式との比較でみたものが $(A-D)/A$ と $(C-D)/C$ あるいは $(E-H)/E$ と $(G-H)/G$ の行である。これらの結果が示すように、最終工程から順に平準化を行う部分最適化によって、最終工程においても平準化の利益を得ることができる。この点はDudek⁽²⁰⁾の最適化モデルと違う点である。本稿で提案した部分最適平準化は、上流工程に平準化の情報を提供すること以外、最終工程が不利になることはない。また、下流工程での平準化により、上流各工程において生産予測が容易になるといった利点も期待できる。このため、平準化は、サプライチェーンを構成する各工程（すなわち各企業）に受け入れられやすい有効な発注指示方式といえよう。なお、残業費用のあるときの方が、ないときに比べて最終工程では平準化の効果が大きいことも強調しておきたい。

Table 7 A comparison of local optimization to global optimization.

Over time cost	Smoothing factor optimization	Initial stock optimization	Exp. No.	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	Total cost
(6.4, 8, 8)	No	Global	A	59.93	84.58	120.37	264.88
	Global	Global	B	34.18	42.32	111.43	187.93
	No	Local	C	65.71	87.38	118.02	271.11
	Local	Local	D	41.65	53.17	104.75	199.57
(0, 0, 0)	No	Global	E	42.60	61.94	96.04	200.58
	Global	Global	F	20.36	26.08	96.84	143.28
	No	Local	G	48.30	64.63	93.60	206.53
	Local	Local	H	29.94	38.90	86.44	155.28

Table 8 Cost reduction rate at each process computed from cost data in Table 7.

Over time cost	How to compute	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	Total cost
(6.4, 8, 8)	$(A-B)/A$	42.97%	49.97%	7.43%	29.05%
	$(A-D)/A$	30.51%	37.14%	12.98%	24.66%
	$(C-D)/C$	36.62%	39.15%	11.25%	26.39%
	$(C-A)/C$	8.80%	3.20%	-1.99%	2.30%
	$(D-B)/D$	17.93%	20.41%	-6.38%	5.83%
(0, 0, 0)	$(E-F)/E$	52.20%	57.90%	-0.83%	28.57%
	$(E-H)/E$	29.71%	37.21%	10.00%	22.59%
	$(G-H)/G$	38.01%	39.82%	7.65%	24.82%
	$(G-E)/G$	11.80%	4.16%	-2.61%	2.88%
	$(H-F)/H$	31.99%	32.95%	-12.03%	7.72%

6. 結 言

本研究では多品種の品物を生産している機械加工型多段階生産・在庫システムを取り上げ、平滑化係数を使って毎期の生産量を平準化して指示する平準化生産指示方式に関して、システム運用のパラメータである平滑化係数と在庫水準をシミュレーションによって求める近似最適化法を提案し、数値実験を行ってその有効性を議論し

た。さらに、SCMにおける全体最適な平準化と部分最適な平準化の違いについて、数値実験を行って検討した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 平滑化係数が与えられたときの各在庫点での最適在庫水準の決定は、まず局所的最適条件を使って最適化を行った。このステップで求解に要するシミュレーション回数は10回程度である。次に、得られた解の近傍で列挙を行い最良解の改善をはかったが、その効果は小さい。
- (2) 平滑化係数の探索では応答曲面法を利用した。本稿で取り上げたモデルの応答曲面は比較的単純であり、探索を行った空間は22点である。各点ごとに在庫水準の決定が必要となるから、列挙を行わない場合のシミュレーション回数は、 22×10 回程度となる。
- (3) 数値実験から以下の知見が得られた。
 - ・多段階システムでは、平準化による費用低減効果が大きい。
 - ・上流工程で単位保管費用が大きいと、平準化の効果も大きい。
 - ・生産能力の変動がかなり大きいときでも平準化の効果は大きい。
 - ・生産能力の変動が小さく残業費用が高いとき、平準化の効果は大きい。
 - ・全体最適の視点で平準化を行ったとき、最終工程での平準化が強くなり、最終工程での費用低減効果は小さくなる。このため、全体最適となる平準化は、SCMにおける最終工程すなわちメーカーには受け入れ難いであろう。
 - ・部分最適化の視点での平準化は、各工程が勝手に平準化を行うだけで、すべての工程が平準化の恩恵を受けることができ、SCMにおける生産指示方式として都合がよい。

文 献

- (1) 門田安弘, トヨタプロダクションシステムーその理論と体系ー, (2006), ダイヤモンド社.
- (2) Kotani, S., "Analysis of Kanban System by the Exponential Smoothing Method", *Proceedings of 1st APORS within IFORS*, (1990), pp. 305-318.
- (3) Tamura, T., Dhakar, T.S. and Ohno, K., "Effectiveness of an Exponentially Smoothing Ordering Policy as Compared with Kanban System", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 34, No. 1 (2008), pp. 1-12.
- (4) 田村隆善, 生産・発注の平準化ーSCMを成功に導く理論的背景ー, (2011), 朝倉書店.
- (5) Matzka, J., Mascolo, M.D. and Fumans, K., "Buffer Sizing of a Heijunka Kanban System", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23, No. 1 (2012), pp. 49-60.
- (6) Hüttmeir, A., de Treville, S., van Ackere, A. and Mannier, L., "Trading off between Heijunka and Just-In-Sequence", *International Journal of Production Economics*, Vol. 118 (2009), pp. 501-507.
- (7) Boysen, N., Fiedner, M. and Scholl, A., "Sequencing Mixed-Model Assembly Lines: Survey, Classification and Model Critique", *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, No. 2 (2008), pp. 349-373.
- (8) Boysen, N., Fiedner, M. and Scholl, A., "Production Planning of Mixed-Model Assembly Lines: Overview and Extensions", *Production Planning and Control*, Vol. 20, No. 5 (2009), pp. 455-471.
- (9) Thomas, L.J. and McClain, J.O., *An Overview of Production Planning*: In S.C. Graves, A.H.G. Rinnooy Kan and P.H. Zipkin Eds., *Logistics of Production and Inventory*, Chapter 7 (1993), pp. 356-357, North-Holland.
- (10) Billington, P., McClain, J.O. and Thomas, L.J., "Mathematical Programming Approaches to Capacity-Constrained MRP Systems: Review, Formulation and Problem Reduction", *Management Science*, Vol. 29, No. 10 (1983), pp. 1126-1141.
- (11) Kojima, M., Tamura, T., Fujita, S., Ohno, K. and Shirata, M., "An Integrated Production Planning Problem for a Multi-Stage Production System Using Kanban", *Industrial Engineering and Management Systems*, Vol. 5, No. 1 (2006), pp. 11-22.
- (12) Kumar, C.S. and Panneerselvam, R., "Literature Reviews of JIT-Kanban System", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 3-4 (2007), pp. 393-408.
- (13) Junior, M.L. and Filho, M.G., "Variations of the Kanban System: Literature Review and Classification", *International Journal of Production Economics*, Vol. 125 (2010), pp. 13-21.
- (14) Rabbani, M., Layegh, J. and Ebrahim, R.M., "Determination of Number of Kanbans in a Supply Chain System via Memetic Algorithm", *Advanced in Engineering Software*, Vol. 40 (2009), pp. 431-437.

- (15) Iwase, M. and Ohno, K., “The Performance Evaluation of a Multi-Stage JIT Production System with Stochastic Demand and Production Capacities”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 214 (2011), pp. 216-222.
 - (16) Alabas, C., Altiparmak, F. and Dengiz, B., “The Optimization of Number of Kanban with Genetic, Simulated Annealing and Tabu Search”, *Proceeding of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 1 (2000), pp. 580-585.
 - (17) Barton, R.R. and Meckesheimer, M., *Metamodel-Based Optimization*: In S.G. Henderson and B.L. Nelson Eds., *Simulation*, Chapter 18 (2006), pp. 535-574, North-Holland.
 - (18) 岩崎学, 実験計画法, (2006), pp.91-107, 東京図書.
 - (19) De Kok, A.G. and Graves, S.C. Eds., *Supply Chain Mangement: Design, Coordination and Operation* (2003), Elsevier (黒田充, 大野勝久監訳, サプライチェーン・ハンドブック, (2008), 朝倉書店).
 - (20) Dudek, G., *Collaborative Planning in Supply Chains – A Negotiation-Based Approach –* (2003), Springer-Verlag.
 - (21) 曹徳弼, 中島健一, 竹田賢, 田中正敏, サプライチェーンマネジメント入門, (2008), pp. 42-53, 朝倉書店.
-