

# 早期納入を考慮した生産在庫システムに関する研究

## Production-Inventory System Considering Early Delivery

王 暁 華

### 1 はじめに

本研究の目的は、複数の顧客区分と先行需要情報 (Advance demand information, ADI)<sup>1</sup>をもつ多段階生産在庫システムの性能を分析することである。顧客の区分は要求納期により、ジャストインタイム (JIT) 納入と早期納入の2タイプに分類する。具体的には、平均総費用、平均製品在庫、平均仕掛在庫、および平均受注残を評価尺度とし、需要 (顧客オーダー) の到着率や需要リードタイム、JIT納入比率、早期納入水準、基点在庫水準などの要因がシステムのパフォーマンスに与える影響を評価する。なお、顧客オーダーはポアソン過程に、各生産工程における生産リードタイムは指数分布に従うと仮定し、生産と在庫の制御は、基点在庫方式と看板方式を統合した拡張看板方式[3]を採用する。このような多段階生産在庫システムを数理モデルで分析するのが困難であるため、不確実性のシステム分析に強いシミュレーション手法を研究手段とする[4,5]。

先行需要情報をもつ在庫システムに関する研究は、Hariharan and Zipkin [6]から始まり、現在に至るまでさまざまな研究が行われている。ここでは基点在庫方式と看板方式を統合した生産在庫の制御方式および先行需要情報を用いるシステムに関する先行研究を概観する。まず、Liberopoulos

---

1 納入に先行し、事前に受け取る顧客オーダーの情報である。詳細は上野 [1, pp.156-159] と王 [2] を参照されたい。ただし、本稿では上野 [1] における「納入リードタイム」と「製造リードタイム」をそれぞれ「需要リードタイム」と「生産リードタイム」と呼ぶ。

and Koukoumialos [5]では、1段階および2段階の生産在庫システムを取り上げ、基点在庫基準やかんばん枚数、需要リードタイムなどの間におけるトレードオフの関係を研究している。その結論として、基点在庫基準、需要リードタイム、および計画生産リードタイムの間にはトレードオフが存在し、最適かんばん枚数はシステムの能力を決定し、需要リードタイムに依存しないと報告している。次に、Krishnamurthy and Claudio [7]とClaudio and Krishnamurthy [8]では、3段階の生産在庫システムを取り上げ、需要の到着率やかんばん枚数、基点在庫基準、需要リードタイム、費用の比率などを変動させ、評価尺度である平均在庫、受注残、総費用を比較している。結論として、完全な需要リードタイムが利用できる場合、見込生産から受注生産へ転換できる。さらに、Claudio and Krishnamurthy [8]では、需要リードタイムの不確実性や顧客注文のキャンセル、非対称の先行需要情報なども研究している。また、Sarkar and Shewchuk [9]では、上述した研究[7, 8]と同様に3段階の生産在庫システムを対象としているが、生産指示の延期を行わず、早期納入が可能なシステムを提案している。これを含め、3つのシステムの性能を比較し、提案しているシステムが優れていると結論づけている。

JIT納入と早期納入を同時に考慮する点は、本研究と先行研究の主な違いである。JIT納入は、需要リードタイムが経過した後、納期どおり需要を満たすのに対し、早期納入は製品在庫が早期納入水準以上ならば、早期に納入を行うことができることを意味する。換言すれば、早期納入はJIT納入より、柔軟性をもつ早期に納入が可能な方式である。本論文では、特にJIT納入の比率および早期納入の水準に注目し、システムのパフォーマンスを考察する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では対象とする生産在庫システムを述べる。3章ではシミュレーションモデルおよび実験計画を論述し、そして4章ではシミュレーション結果を考察する。最後に、5章では結論を述べる。

## 2 対象システム

### 2.1 前提条件

対象とする生産在庫システムを図1に示す。なお、以下の前提条件をもつと仮定する。

- (1) 製品は単一の標準製品とし、需要は1回あたり1個到着する。到着率はポアソン分布、需要のリードタイムは正規分布に従う。
- (2) 生産工程は直列の3段階からなり、各工程における生産リードタイムは指数分布に従い、工程間の運搬時間は考慮しない。
- (3) 生産済みの在庫を製品在庫、加工中あるいは生産待ちの在庫を仕掛在庫とする。需要が満たされない場合、受注残になる。
- (4) 生産在庫政策は基点在庫方式と看板方式を統合したプル型生産システムを採用する。
- (5) 需要のキャンセルが許されない。
- (6) そのほかには、資材の制約や不良品などを考慮しない。

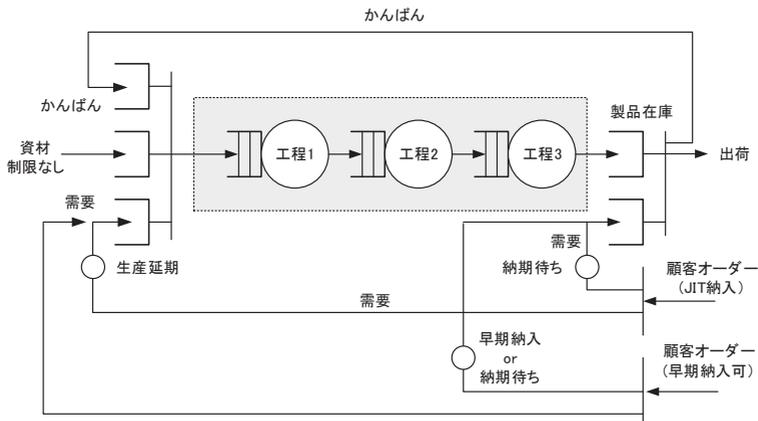


図1 対象生産在庫システム (王[2]を加筆)

## 2.2 記号

本研究で使用する記号は以下のとおりである。

- $K$  : かんばん枚数
- $S$  : 基点在庫水準
- $R$  : 早期納入水準
- $T$  : シミュレーション期間
- $p$  : JIT納入比率 (%)
- $h$  : 単位時間・単位量あたりの保管費用 (\$)
- $b$  : 単位時間・単位量あたりの受注残費用 (\$)
- $w$  : 単位時間・単位量あたりの仕掛在庫の保管費用 (\$)
- $\lambda$  : 需要 (顧客オーダー) の到着率
- $n$  :  $t$ 時刻における生産完了した注文数
- $N$  : 総注文数
- $DL$  : 需要リードタイムの平均値
- $CV$  : 需要リードタイムの変動係数
- $FG(t)$  :  $t$ 時刻における製品在庫
- $BD(t)$  :  $t$ 時刻における受注残
- $WIP(t)$  :  $t$ 時刻における仕掛在庫
- $LT(t)$  :  $t$ 時刻における平均生産リードタイム
- $L_i$  :  $i$ 番目顧客オーダーの需要リードタイム
- $LT_i$  :  $i$ 番目顧客オーダーの生産リードタイム
- $D_i(t, t+L_i)$  :  $t$ 時刻に到着し, 需要リードタイム $L_i$ をもつ $i$ 番目の顧客オーダー

## 2.3 注文処理と生産指示

本研究では, かんばん方式と基点在庫方式を統合した政策を用い, 生産指示および在庫管理を行う[2, 8, 9]。具体的な政策とプロセスは以下のとおりである。

### (1) かんばん方式と基点在庫方式を統合した生産在庫政策

基点在庫方式において、顧客の需要が在庫から満たされたら、その減少した分、つまり需要量を生産指示量として生産工程に指示を出す。かんばん方式は在庫が使用されるときに、かんばんが外され、一定の時間間隔あるいは一定の枚数になると上流側に補充あるいは生産指示を出す。かんばんはトヨタのジャストインタイム生産が実現する手段であり、大別して生産指示かんばんと運搬かんばんがある[10, 11]。高橋 [12]では、かんばん方式に関する研究を詳細に概観している。

一般的には、かんばんが部品あるいは製品が入るコンテナに添付される。しかし、対象システムでは、初期に使用するかんばん枚数は基点在庫水準 ( $S$ ) と同じ、換言すれば、基点在庫水準はシステムの初期在庫であり、初期在庫にかんばんを添付する。一方、予備用かんばん ( $K-S$ ) を準備する。以下はこれをフリーかんばんとする。そして、このシステムでは、工程間に加工待ち以外のバッファが設置されないため、これはシステム内おける仕掛在庫が一定数に維持するCONWIPシステムといえる[13]。かんばん枚数 ( $K$ ) はシステムにおける最大の仕掛在庫と製品在庫の合計になる。つまり、かんばん枚数 ( $K$ ) により、システムの能力が制限される。

### (2) 注文処理と生産指示

先行需要情報をもつ生産在庫システムでは、いつ顧客の注文を処理するか、いつ生産指示を出すかということは意思決定の課題である。本研究では、先行需要情報をもつ2種類の顧客を考慮する。1つはJIT納入を要求し、もう1つは納期前にいつでも納入が可能であるが、早期の納入を希望する。そのため、2種類の顧客注文に違う対策を提案する。

まず、JIT納入を要求する顧客に対し、顧客オーダーの到着から納期までの需要リードタイムを延期し、納期になったら需要を満たす。注文処理の時点において、在庫の不足が生じる場合、その分が受注残となり、そして受注残の費用が課される。この注文に対する生産指示も延期戦略をとる。つまり、需要リードタイムが計画生産リードタイムより長い場合、その時

間差を延期する。ただし、実際の生産を開始するには、フリーのかんばんが必要となる。ここで、計画生産リードタイムは顧客オーダーが到着したとき、生産が完了した製品の平均生産時間とする。すなわち、 $i$ 番目の需要に対し、生産を延期するかどうかは $MAX(0, L_i - LT(t))$ により決定される。ここで、 $LT(t)$ は $t$ 時刻までの平均生産リードタイムであり、 $LT(t) = \sum_{i=1}^n LT_i/n$ で求める。

次に、早期納入が可能な注文に対し、オーダーが到着したら、まずその情報を生産工程に伝達する。それと同時に、製品在庫 $FG(t)$ をチェックし、それが早期納入水準 ( $R$ ) 以上であれば、この注文を満たす。そうでなければ、製品在庫が水準 ( $R$ ) 以上か納期までに注文の処理を待つ。

## 2.4 評価尺度

本研究では、平均仕掛在庫、平均製品在庫、平均受注残、および平均総費用を尺度とし、対象システムの性能を解析する。それぞれは以下のとおりである。

(1) 平均仕掛在庫

$$(2) \text{ 平均製品在庫} \quad E(WIP) = \int_0^T WIP(t) dt / T \tag{1}$$

$$(3) \text{ 平均受注残} \quad E(FG) = \int_0^T FG(t) dt / T \tag{2}$$

$$(4) \text{ 平均総費用} \quad E(BD) = \int_0^T BD(t) dt / T \tag{3}$$

$$E(TC) = w \cdot E(WIP) + h \cdot E(FG) + b \cdot E(BD) \tag{4}$$

以下では、それぞれを仕掛在庫、製品在庫、受注残、総費用と略する。

### 3 シミュレーション実験計画

#### 3.1 シミュレーションモデル

2章で提案したシステムは主に3つのプロセスからなり、それぞれは需要の到着、注文処理、生産プロセスである。上述のプロセスに対し、以下の手順でシミュレーションを行う。なお、シミュレーションモデルはArena/SIMAN[14]を用いて構築した。

STEP 1：初期設定。 $K, S, R, p, h, w, b$ などの初期値を定める。

STEP 2：需要 $D_i(t, t+L_i)$ が到着する。

STEP 2-1：JIT納入の需要ならば、STEP 2-2に進む。さもなければ、STEP 2-3に進む。これはJIT納入比率 $p$ で判断する。

STEP 2-2：需要情報を複製し、 $MAX(0, L_i - LT(t))$ と $MAX(0, L_i)$ をそれぞれ延期した後に、対応する生産工程のステーション (STEP 3) と注文処理のステーション (STEP 4) に進む。

STEP 2-3：需要情報を複製し、1つはただちに生産工程に進む。もう1つは次の条件で注文処理のステーションに進むタイミングを判断する。 $FG(t) \geq R$ あるいは $L_i = 0$ ならば、注文処理のステーションに進む。さもなければ、条件を満たすまで待つ。

STEP 3：生産工程ステーション。フリーのかんばん ( $K - WIP(t) - FG(t)$ ) と到着した需要情報がそろったら、生産を開始し、 $WIP(t) = WIP(t) + 1$ 。さもなければ、条件がそろうまで待つ。生産が完了すると、 $WIP(t) = WIP(t) - 1$ 、 $FG(t) = FG(t) + 1$ と更新する、

STEP 4：注文処理ステーション。 $FG(t) \geq 1$ ならば、 $FG(t) = FG(t) - 1$ 、かんばんを1枚生産工程へ送る。さもなければ、 $BD(t) = BD(t) + 1$ と更新する。

STEP 5：シミュレーション終了。 $E(WIP), E(FG), E(BD), E(TC)$ などを計算する。

### 3.2 シミュレーション実験の手順

3.1節で述べた手順はシミュレーション実験を1回実行するものである。本研究の目的を達成するには、多数のシミュレーション実験が必要となる。毎回実験のパラメータを変更する煩雑な手続きを省くために、実験データが保存されているExcelファイルとシミュレーションモデルをつなげるVisual Basic for Applications (VBA)プログラムを開発した。それにより、シミュレーション実験を行うには、次の手順で行う。①実験計画を立て、そのデータをExcelファイルに保存する。②シミュレーションモデルを開き、実験回数を入力する。③Excelファイルに保存されているデータが自動的に読み取られるうえで、シミュレーションモデルが実行される。毎回の実験が完了したら、結果が自動的にExcelファイルに書き込まれる。この手順を図2に示す。

シミュレーションの実行時間は11000単位時間で、初期条件の偏りを減らすために、1000単位時間のウォームアップ期間を設定する。

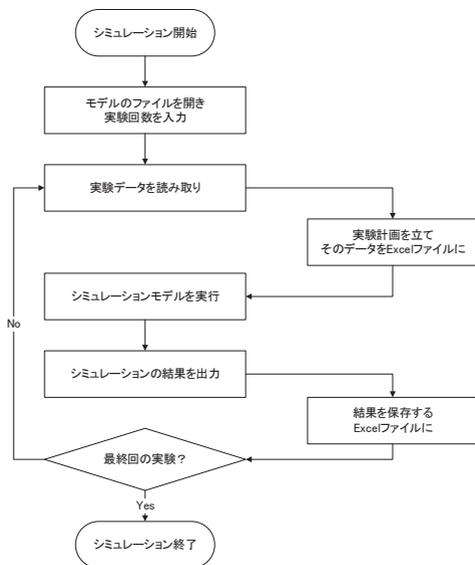


図2 シミュレーション実験の手順

### 3.3 シミュレーション実験の計画

本研究で需要の到着率 ( $\lambda$ ) , 需要リードタイム ( $DL$ ) , JIT納入比率 ( $p$ ) , 早期納入水準 ( $R$ ) , 基点在庫水準 ( $S$ ) , かんばん枚数 ( $K$ ) などの要因を取り上げる。因子の水準値によって、次のシステムが考えられる。① $DL=0$ ,  $CV=0$ の場合、システムの性能は $p$ ,  $R$ の値と関係がなく、先行需要情報がない在庫システムになる。② $DL>0$ の場合、先行需要情報をもつシステムになる。また、 $CV\neq 0$ の場合、各オーダーの需要リードタイムが違うことを意味する。②のシステムは、さらに以下のような特徴をもつ。

- (1)  $p=100$ ならば、すべての需要がJIT納入を求め、つまり注文処理が納期まで延期される。そして、生産も延期戦略をとる。
- (2)  $p=0$ ならば、すべてのオーダーが早期納入可能となる。ただし、需要情報が到着した後、すぐ注文の処理を行うかどうかは $R$ と $FG(t)$ に依存する。
- (3)  $0<p<100$ ならば、JIT納入と早期納入が混在するシステムとなる。この場合、早期納入が可能なオーダーに対し、注文処理のタイミングが $R$ の値によって変わる。 $R=0$ ならば、完全な早期納入となり、つまり需要情報が到着したら、すぐ注文処理を行う。 $R>0$ ならば、注文の処理が延期され、延期の時間が $R$ の値によって違う。ただし、最長は要求納期までになる。注文の処理を行うとき、製品在庫が不足ならば、受注残が生じる。

本研究は、(3)のケースを中心に解析する。シミュレーションの実験は表1に示すパラメータで行い、結果は4章で考察する。

表1 シミュレーション実験のパラメータ

項目	パラメータ
到着率 ( $\lambda$ )	0.6, 0.8
需要リードタイムの平均値 ( $DL$ )	3, 6
需要リードタイムの変動係数 ( $CV$ )	0.5
JIT納入比率 ( $p$ )	0, 50, 100
早期納入水準 ( $R$ )	0, 5, 10
基点在庫水準 ( $S$ )	10, 20
かんばん枚数 ( $K$ )	40
費用構成比	1:2:10*
各工程における生産リードタイム	EXPO(1)**単位時間

\* $w:h:b$ の比率

\*\*平均値は1単位時間の指数分布

#### 4 結果解析

4.1節と4.2節では、JIT納入比率 ( $p$ ) および早期納入水準 ( $R$ ) を中心に、上述した要因がシステムの性能に与える影響を総費用により評価する。なお、4.3節では、評価尺度の間における関係に注目し、システムのパフォーマンスを考察する。

##### 4.1 JIT納入比率 ( $p$ ) の影響

JIT納入比率がシステムに与える影響を考察するために、上記のパラメータに対し、①  $\lambda=0.6, 0.8$ 、②  $DL=3, 6$ 、③  $p=0, 50, 100$ 、④  $(R, S) = (5, 10), (10, 20)$ の組合せごとにシミュレーション実験を実施した。

シミュレーションの結果を表2に示す。図6はその結果をもとに、JIT納入比率を横軸に、総費用を縦軸にとり、需要リードタイムと基点在庫水準の組合せごとに図示したものである。図3の (a) の到着率は  $\lambda=0.6$ 、(b) は  $\lambda=0.8$ となっている。表2と図3から以下のことがわかる。

まず、JIT納入比率の増大により、総費用は増える傾向にある。JIT納入比率は顧客オーダーのなか、JIT納入を要求するオーダーの比率である。こ

の比率が大きいほど、早期納入が可能な需要が少ない。 $p=100$ の場合、すべてのオーダーがJIT納入になることを意味する。つまり、需要リードタイムが存在するなら、オーダーの処理が延期される。また、早期納入の需要であっても、早期納入水準がゼロ以上なら、かつ需要リードタイムが存在する場合、この種のオーダー処理も延期される。換言すれば、単純なJIT納入より、柔軟性をもつ。

次に、JIT納入比率が一定の場合、需要リードタイムの影響を考察する。図3の (a) から、基点在庫水準が同じ、かつJIT納入比率が小さい値をとる場合、需要リードタイムの影響がほぼない。それに対し、JIT納入比率が高い値をとる場合、需要リードタイムが長いほど、総費用が高くなる。需要リードタイムを利用する利点がないといえる。これは次の理由が考えられる。図3の (a) は需要の到着率  $\lambda=0.6$  の結果であるため、単位時間あたりに到着するオーダー数を意味する。本研究で取り上げるシステムは3工程からなり、各工程における生産リードタイムは平均1単位時間の指数分布に従うと仮定しているため、 $\lambda=0.6$  の到着率という水準はシステムの能力より負荷が小さいといえる。なお、このシステムでは、基点在庫水準 ( $S$ ) は安全在庫の役割を果たし、低い水準値 ( $S=10$ ) であっても、生産工程における変動をカバーできると考えられる。図4は受注残の変動を示すものである。図から在庫不足が到着率  $\lambda=0.6$  のとき、少ないことがわかる。

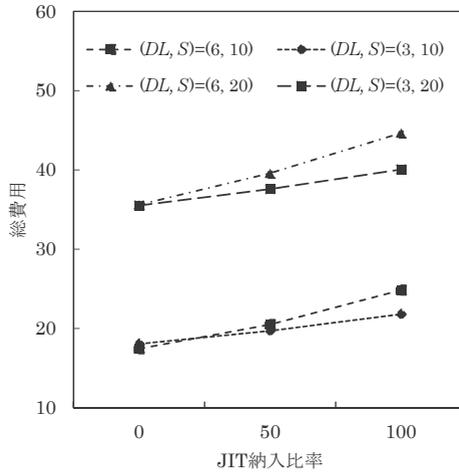
一方、図3の (b) を見ると、基点在庫水準  $S=10$ 、需要リードタイムの平均値  $DL=6$  の場合、総費用が  $DL=3$  より低い。つまり、先行需要情報を活用する価値が大きい。図4からわかるように、到着率  $\lambda=0.8$ 、 $DL=3$  のとき、受注残がもっとも多い。これは、オーダーを処理する時点において、在庫の不足が生じたことを意味する。通常、受注残の費用が製品在庫よりはるかに高い。本研究では単位あたりの受注残費用が仕掛在庫費用の10倍、製品在庫費用の5倍と仮定している。したがって、受注残が多いほど、総費用も高い。

また、基点在庫水準の影響について、需要リードタイムとの交互作用を上述したが、ここで到着率  $\lambda=0.6$ 、基点在庫水準  $S=20$  の場合、総費用が高

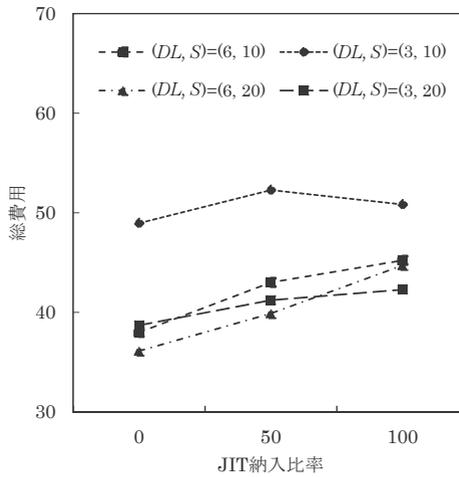
くることが、さらに図3の (a) からわかる。

表2 JIT納入比率のシミュレーション結果

No.	$\lambda$	$DL$	$p$	$R$	$S$	$E(WIP)$	$E(FG)$	$E(BD)$	$E(TC)$
1	0.6	6	0	5	10	4.80	6.03	0.06	17.45
2	0.6	6	50	5	10	4.66	7.66	0.05	20.50
3	0.6	6	100	5	10	4.60	10.05	0.02	24.85
4	0.8	6	0	5	10	12.88	3.03	1.91	38.00
5	0.8	6	50	5	10	13.17	3.67	2.25	43.01
6	0.8	6	100	5	10	13.19	5.60	2.08	45.23
7	0.6	3	0	5	10	4.80	5.89	0.15	18.05
8	0.6	3	50	5	10	4.81	6.67	0.16	19.71
9	0.6	3	100	5	10	4.80	7.76	0.15	21.80
10	0.8	3	0	5	10	12.88	2.49	3.11	48.95
11	0.8	3	50	5	10	13.18	2.65	3.38	52.28
12	0.8	3	100	5	10	12.89	3.42	3.11	50.83
13	0.6	6	0	10	20	4.80	15.41	0.00	35.61
14	0.6	6	50	10	20	4.66	17.46	0.00	39.58
15	0.6	6	100	10	20	4.60	20.03	0.00	44.66
16	0.8	6	0	10	20	12.88	9.89	0.35	36.13
17	0.8	6	50	10	20	13.17	11.20	0.43	39.90
18	0.8	6	100	10	20	13.18	13.89	0.38	44.73
19	0.6	3	0	10	20	4.80	15.34	0.00	35.51
20	0.6	3	50	10	20	4.81	16.37	0.00	37.58
21	0.6	3	100	10	20	4.80	17.61	0.00	40.06
22	0.8	3	0	10	20	12.88	9.25	0.73	38.70
23	0.8	3	50	10	20	13.18	9.74	0.86	41.22
24	0.8	3	100	10	20	12.89	11.05	0.73	42.29



(a)  $\lambda = 0.6$



(b)  $\lambda = 0.8$

図3 JIT納入比率の影響

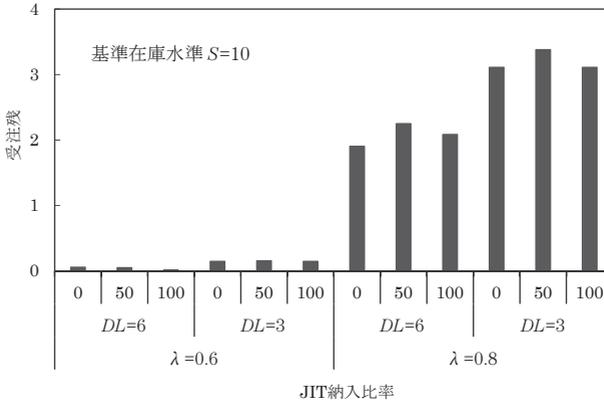


図4 平均受注残の変動

#### 4.2 早期納入水準 ( $R$ ) の影響

早期納入水準の影響を評価するために、①  $\lambda=0.6, 0.8$ 、②  $DL=3, 6$ 、③  $p=50$ 、④  $R=0, 5, 10$ 、⑤  $S=10, 20$ の組合せでシミュレーション実験を実施した。シミュレーションの結果を表3に示す。図5の (a) と (b) はそれぞれ、需要の到着率が  $\lambda=0.6, 0.8$  の場合、早期納入水準  $R$  の変化によって、総費用の変動を示したものである。表3および図5から以下のことがわかる。

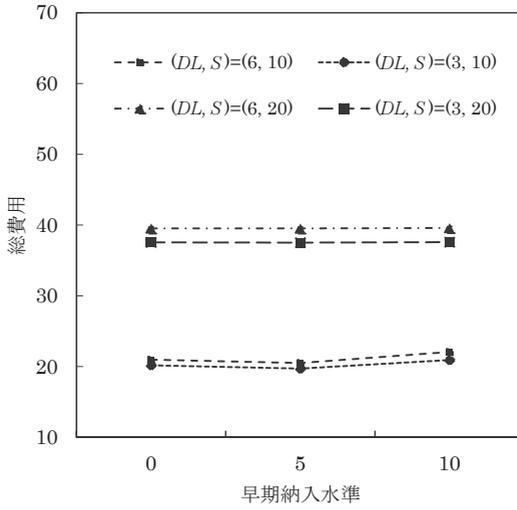
まず、図5の (a) を見ると、早期納入水準の変化は総費用にほぼ影響を与えず、需要リードタイムは基点在庫水準  $S=20$  の場合、 $DL=6$  に対応する費用が  $DL=3$  よりやや高い。一方、前節での結果と同様に、基点在庫水準の設定がシステムに与える影響が大きい。具体的には、基点在庫水準が高い水準、つまり  $S=20$  の場合は、低い水準  $S=10$  より費用の増加が顕著である。これは低い負荷に対し、能力が過剰になっているといえる。そして、この場合は先行需要情報のメリットが見られない。

次に、図5の (b) から、早期納入水準  $R=0$  から  $R=5$  に変化する場合、いずれのシナリオの総費用は減少する傾向にある。さらに、 $R=10$  に増えると、費用がやや上昇するが、その程度が非常に小さい。言い換えれば、負荷が

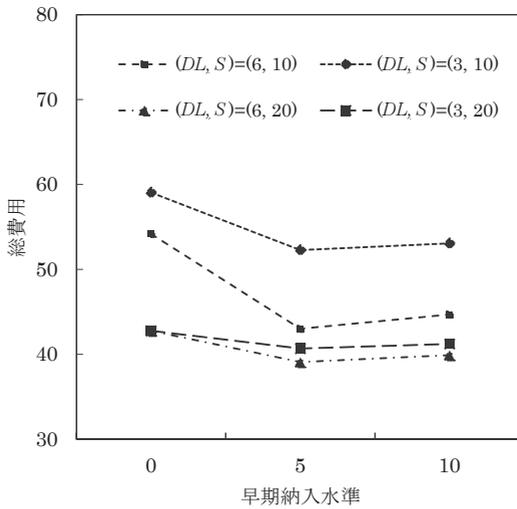
大きいシステムにおいて、早期納入水準の設定がシステムの性能に影響を与えるといえる。しかし、能力が十分ある場合、影響の程度が下がる傾向が見られる。たとえば、図5の (b) における基点在庫水準 $S=20$ 場合、 $R$ の変化によって、費用の変化が $S=10$ と比べ緩やかになっている。なお、負荷が大きいシステムにおいて、先行需要情報の利用価値が大きいと見られる。

表3 早期納入水準のシミュレーション結果

No.	$\lambda$	$DL$	$p$	$R$	$S$	$E(WIP)$	$E(FG)$	$E(BD)$	$E(TC)$
1	0.6	6	50	0	10	4.66	7.54	0.12	20.97
2	0.6	6	50	5	10	4.66	7.66	0.05	20.50
3	0.6	6	50	10	10	4.66	8.45	0.05	22.06
4	0.8	6	50	0	10	13.17	3.24	3.45	54.17
5	0.8	6	50	5	10	13.17	3.67	2.25	43.01
6	0.8	6	50	10	10	13.17	4.53	2.25	44.69
7	0.6	3	50	0	10	4.81	6.54	0.23	20.18
8	0.6	3	50	5	10	4.81	6.67	0.16	19.71
9	0.6	3	50	10	10	4.81	7.27	0.16	20.92
10	0.8	3	50	0	10	13.18	2.36	4.11	59.06
11	0.8	3	50	5	10	13.18	2.65	3.38	52.28
12	0.8	3	50	10	10	13.18	3.05	3.38	53.07
13	0.6	6	50	0	20	4.66	17.42	0.00	39.53
14	0.6	6	50	5	20	4.66	17.43	0.00	39.52
15	0.6	6	50	10	20	4.66	17.46	0.00	39.58
16	0.8	6	50	0	20	13.17	10.62	0.84	42.76
17	0.8	6	50	5	20	13.17	10.78	0.44	39.08
18	0.8	6	50	10	20	13.17	11.20	0.43	39.90
19	0.6	3	50	0	20	4.81	16.33	0.01	37.55
20	0.6	3	50	5	20	4.81	16.34	0.00	37.51
21	0.6	3	50	10	20	4.81	16.37	0.00	37.58
22	0.8	3	50	0	20	13.18	9.34	1.09	42.77
23	0.8	3	50	5	20	13.18	9.46	0.86	40.67
24	0.8	3	50	10	20	13.18	9.74	0.86	41.22



(a)  $\lambda = 0.6$



(b)  $\lambda = 0.8$

図5 早期納入水準の影響

### 4.3 性能評価

4.1節と4.2節では、JIT納入水準と早期納入の視点から、総費用を尺度として対象システムの性能を評価した。生産在庫システムにおいて、仕掛在庫、製品在庫、および受注残も重要な尺度であるため、本節では4.1節のシミュレーション実験結果を用い、評価尺度の間における関係の視点からシステムの性能を考察する。

図6は、表2に示す総費用、仕掛在庫、製品在庫、および受注残を縦軸に、実験No.を横軸にとり、なお到着率と製品在庫の昇順に並べ替えを行ったものである。図6から、以下の知見が見られる。まず、需要の到着率 $\lambda=0.6$ の場合、仕掛在庫は低いものに対して、 $\lambda=0.8$ の場合は高い。そして、それぞれのケースにおいて、仕掛在庫がほぼ一定値に維持している。これはリトル法則に一致することがわかる。リトル法則により、システムにおける仕掛数がシステムのスループットとサイクルタイムによって決まる[15]。また、需要の到着率が上昇するにつれて受注残が高くなる。しかし、仕掛在庫のように一定にならない。これは到着率以外、ほかの要因から影響を受けると考えられる。

次に、製品在庫の結果を考察する。図6から一番高いシナリオは実験番号No.15で、 $\lambda=0.6, DL=6, p=100, R=10, S=20$ という組合せである。このシナリオは長い需要リードタイムをもち、需要の到着率が低く、基点在庫水準が高いものの、すべてのオーダーの処理が延期されるという特徴がある。需要リードタイムが生産リードタイムより長いので、生産も延期される。いわば、受注生産になる。ただし、実際の生産リードタイムが確率変数であるため、変動の要因を考慮し、安全在庫を配置すべきである。それにもかかわらず、安全在庫の役割を果たす基点在庫水準を $S=20$ に設定するのが高すぎるといえる。その結果、高い製品在庫をもたらしたと考えられる。一方、製品在庫が一番低いシナリオは実験番号No.10で、 $\lambda=0.8, DL=3, p=0, R=5, S=10$ という組合せである。低い在庫が望ましいが、このシナリオにおいて、受注残が比較的に高い。ほかの製品在庫が低いシナリオ、たとえば、No.11, 4, 12, 5も、高い受注残を示している。受注残が発生したら、納期ど

おりに納入できないため、サービスレベルに影響する。

さらに、総費用の結果を考察する。到着率  $\lambda=0.6$  の場合、総費用がほぼ製品在庫の増加にそって上昇する。それに対して、到着率  $\lambda=0.8$  の場合、総費用が一定の範囲で変動し、なお一番低いシナリオはNo.16で、 $DL=6$ ,  $p=0$ ,  $R=10$ ,  $S=20$  という組合せである。このシナリオの特徴として、①すべての顧客オーダーが早期納入可能であり、そして長い需要リードタイムをもち、②システムでは早期納入の水準が設定され、なお高い基点在庫水準をもつ。

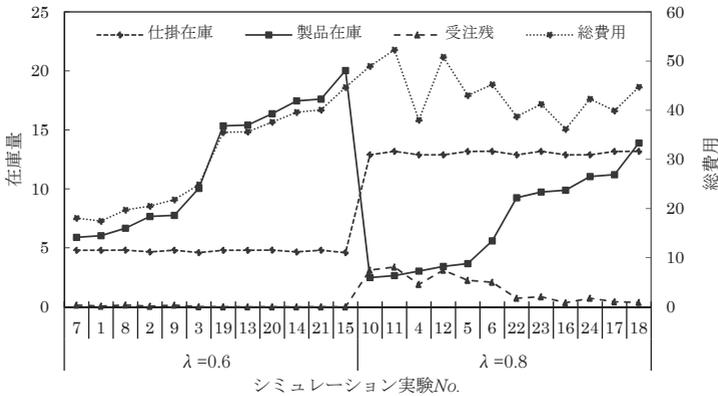


図6 評価尺度の変動

## 5 おわりに

本論文では、JIT納入および早期納入を考慮した3段階生産在庫システムに対し、総費用、仕掛在庫、製品在庫、および受注残を尺度とし、需要の到着率や需要リードタイム、JIT納入比率、早期納入水準、基点在庫水準などの影響を、シミュレーション手法を用いて考察した。

結果として、以下のことを明らかにした。①JIT納入比率の増大により、総費用は増加の傾向にある。つまり、早期納入の比率が大きいほど、費用低減の効果が大きいと見られた。②需要の到着率が低い場合、早期納入水

準の大小を問わず、システムへの影響がほぼないといえる。一方、需要の到着率が大きい場合、この水準値の増大により、費用低減の効果が認められたが、また費用が上昇に転じるケースもある。すなわち、ある条件下で最適な早期納入水準が存在すると考えられる。③需要の到着率が低い場合、長い需要リードタイムのメリットが見られなかった。それに対して、需要の到着率が大きい場合、需要リードタイムの活用により、費用低減の効果が見られた。④基点在庫水準がシステムに与える影響が顕著であることが認められた。需要の到着率が大きく、この水準の値が小さいとき、受注残が目立つのに対して、需要の到着率が小さく、この水準が大きいとき、製品在庫が目立つということがわかった。以上をまとめると、負荷が高いシステムにおいて、需要リードタイムの活用や柔軟な早期納入による効果が大きいと考えられる。

今後の課題として、①早期納入水準の最適解を探索すること、②需要リードタイムと生産指示のタイミングの関係、③JIT納入の最適比率、などが挙げられる。

## 参考文献

1. 上野信行, 内示情報と生産計画—持続可能な社会における先行需要情報の活用—. 2011: 朝倉書店.
2. 王曉華, 先行需要情報を用いた生産在庫システムのシミュレーション分析. 西南学院大学商学論集, 2015. 62(1): pp. 53-74.
3. Liberopoulos, G. and Y. Dallery, *A unified framework for pull control mechanisms in multi stage manufacturing systems*. Annals of Operations Research, 2000. 93: pp. 325-355.
4. Jain, S., et al., *Development of a high level supply chain simulation model*, in *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, B.A. Peter, et al., Editors. 2001, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 1129-1137.
5. Liberopoulos, G. and S. Koukournialos, *Tradeoffs between base stock levels*,

- numbers of kanbans, and planned supply lead times in production/inventory systems with advance demand information*. International Journal of Production Economics, 2005. 96(2): pp. 213-232.
6. Hariharan, R. and P. Zipkin, *Customer-order information, leadtimes, and inventories*. Management Science, 1995. 41(10): pp. 1599-1607.
  7. Krishnamurthy, A. and D. Claudio, *Pull systems with advance demand information, in Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, M.E. Kuhl, et al., Editors. 2005, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp. 1733-1742.
  8. Claudio, D. and A. Krishnamurthy, *Kanban-based pull systems with advance demand information*. International Journal of Production Research, 2009. 47(12): pp. 3139-3160.
  9. Sarkar, S. and J.P. Shewchuk, *Use of advance demand information in multi-stage production-inventory systems with multiple demand classes*. International Journal of Production Research, 2013. 51(1): pp. 57-68.
  10. 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.
  11. 門田安弘, トヨタプロダクションシステム—その理論と体系. 2006: ダイヤモンド社.
  12. 高橋勝彦, *かんばん方式の研究と課題*. 日本経営工学会論文誌, 2006. 57: pp. 89-100.
  13. Spearman, M.L., D.L. Woodruff, and W.J. Hopp, *CONWIP: a pull alternative to kanban*. international Journal of Production Research, 1990. 28(5): pp. 879-894.
  14. Kelton, W.D., R.P. Sadowski, and D.T. Sturrock, *Simulation with arena*. 3rd ed. 2004, New York: McGraw-Hill.
  15. Hopp, W.J. and M.L. Spearman, *Factory physics*. 3rd ed. 2008, New York: McGraw-Hill.