

セル生産・水すまし・かんばん方式援用生産システムにおける部品在庫管理のシミュレーション最適化

高桑 宗右エ門, 三輪 冠奈

1. 緒言

ジャストインタイム生産方式を形成するセル生産方式・水すまし方式・かんばん方式を採用したPC組立生産システムを対象にして、部品の在庫管理について検討する。ジャストインタイム生産方式では、必要以上の在庫を持たないことが要求されるが、他方、組立ラインに重大な影響を及ぼす欠品（品切れ）が生じないようにするための在庫も必要とされる[1~3]。これらの方式に対しては、従来からシミュレーションによる研究が行われている（例えば[4, 5]）。これまで、セル生産方式、水すまし方式、かんばん方式のそれぞれについて個別に取り上げられ、検討されることが多かったのであるが、ここでは、これら3つの方式を統合的に採用した生産システムについて検討する。そして本研究では、組立ラインおよび部品・部材置き場における容器を表すトレーおよびかんばんについて、欠品を生じさせないという制約の下で、おのおのの必要最小限の数量を決定することを「最適化」問題と定義し、部品の在庫管理の観点から体系的かつ総合的に最適化を図るために、スプレッドシートシミュレーションによる最適化手順を提案する。

はじめに、セル生産方式・水すまし方式・かんばん方式を採用した生産システムの特徴を明らかにしたうえで、仕掛在庫量と部品を収容するトレー数およびかんばん枚数に関して、在庫管理の観点から考察する。そして、実際の作業時間測定より得られた結果を用いて、本研究で提案する最適化手順を適用することにより、実務上の有用性を検証する。さらに、同様のジャ

ストインタイム生産方式を採用する生産システムに対する応用可能性に言及する。

2. 対象とするジャストインタイム生産システムの概要

2.1 セル生産・水すまし・かんばん方式援用生産システム

本研究で対象とする工場では、PCの組立生産を実施している[注1]。特にモデル構築の対象としたエリアを図1に示す。実務において、セル生産方式、水すまし方式、かんばん方式の運用に際しては、それぞれ種々の方法が採られているので、当該生産システムで採用されている実施上の特徴を以下に列挙する。

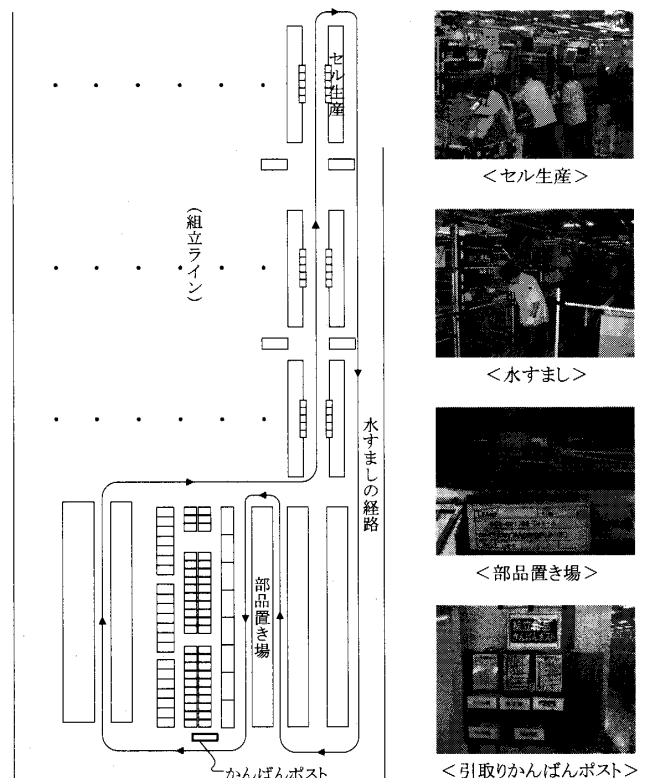


図1 ジャストインタイム生産システム

たかくわ そうえもん, みわ かな
 名古屋大学 大学院経済学研究科
 〒464-8601 名古屋市千種区不老町
 受付05.5.17 採択06.5.16

- (1) 組立ラインでは、分割方式（ないしリレー方式）のセル生産方式を採用している[注2]。本システムは、複数のPC組立ライン（コンベヤは使用されていない）で構成されていて、各ラインでは複数の作業者が一列に並んで、部品組付け・検査（エージング前および後）・梱包の各作業をセル生産方式で実施している。製品本体への部品の組付けは作業者が手作業により行っている。各作業者に対して基本的な作業内容は与えられているが、作業者間で「助け合い」が可能である。
- (2) 部品・部材（以下では、区別せずに「部品」という）を組立ラインへ運ぶ間接作業は水すまし作業（以下では、たんに「水すまし」という）が担当している[注3]。水すましは図1に示すような決められたルートを間断なく巡回する。組立ライン脇の棚から空のトレイ（容器）を取り出し、部品置き場で補充してから、再び棚へ補給する。
- (3) 部品置き場で、水すましにより、新たなコンテナから部品が取り出されると、そのコンテナ（「トレイ」と区別するために、容器をさすことばとして用いる）からかんばんが外され、所定のかんばん置き場へ置かれる[注4]。
- (4) 部品毎に決められた時間間隔でかんばんが回収されて、補充されてから部品置き場のコンテナへ補給が行われる「定期引取り」方式が採用されている。

2.2 記号

本稿で用いる記号をまとめて示す。なお、部品を特定した表記であり、基本時間単位は秒である。

- a : かんばんの納入日単位 (日)
- b : かんばんの a 日間での納入回数 (回)
- c : かんばんの納入リードタイム (回)
- d_{ij} : 水すまし i が j 番目に訪問する組立ラインの生産速度 (秒/個)
- i : 水すまし番号 ($i=1, 2, \dots, R$)
- j : 水すましの訪問順序番号 ($j=1, 2, \dots, S_i$)
- K : かんばん枚数 (枚)
- L_i : 水すまし i の調査間隔 (納入リードタイム) (秒)
- M_{ij} : 水すまし i が j 番目に訪問する組立ラインのトレイ数 (個)
- N : トレイの容量 (個)

- P : コンテナの容量 (個)
- R : 水すましの作業員数 (人)
- S_i : 水すまし i が当該部品に対して訪問する組立ラインの総数 (ライン)
- T : 1日の作業時間 (秒)
- α_K : 安全在庫量 (コンテナ数)
- α_M : 安全在庫量 (トレイ数)

3. セル生産と水すまし

3.1 システムの概要

2.1節で述べたように、組立ラインの作業員には、「標準的な作業」が割り当てられているが、隣接する作業員間で「助け合い」が可能であるので、作業の内容がその都度増減することがある[注5]。ここでは、当該作業員に対する標準的な割当て作業について、その作業時間を「生産速度」として示すことにし、検討を進めることにする[10]。

さて、組立ラインでは、作業員が手を伸ばせば届く位置にラックが設置されており、そのラックの中には、傾斜を付けられた棚の上に、組付けで用いられる部品が入ったトレイが置かれている。作業員が組付けのために部品を使いきると、空のトレイがラック下方に置かれて、部品補給を担当する水すまし作業員が休みなく巡回訪問し、その空トレイを回収する。そして、水すましは担当の組立ラインを順次訪問して、空のトレイを回収しおえると、補給のために部品置き場へ行き、回収したそれぞれの空トレイに所定数の部品を入れて、次回の巡回時に、部品毎に定められた棚の位置に置いていく。なお、各水すましには、担当する組立ラインが割り当てられており、各組立ラインで使用する部品すべてに対して、運搬・補給を担当しており、2個以上の空トレイが一度に回収されることもある。

このセル生産・水すまし方式におけるトレイに関する在庫推移の様子を図2に示す。調査時点で空のトレイが回収され、次回の調査時点（納入リードタイム経過後）で補充される様子が示されている。

3.2 必要最小限のトレイ数

水すまし i の調査間隔（納入リードタイム）と、その水すましが j 番目に訪問する組立ラインの生産速度の期待値をそれぞれ $E(L_i)$ および $E(d_{ij})$ とすると、調査間隔（納入リードタイム）の2回分に相当する期間に対して、必要とする部品の需要量の期待値に相当する分量を収納するために必要なトレイ数の期待値 M_{ij}^* は次式で与えられる。

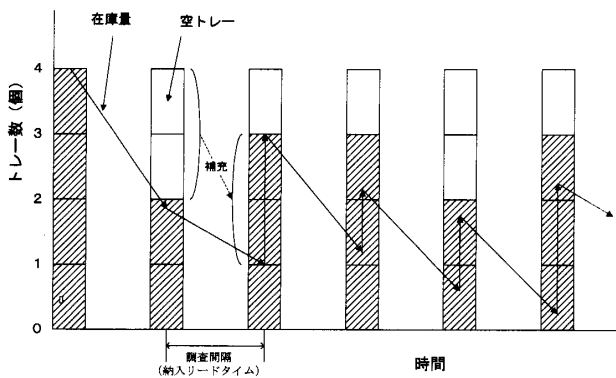


図2 水すまし方式におけるトレー内の在庫推移

$$M_{ij}^E = \left[\frac{2E(L_i)}{E(d_{ij})N} \right] + 1 \quad (1)$$

ここに、 $[\]$ はガウス記号である。上式において、第1項の分母はトレー1個分の部品の消費時間である。5節で述べるシミュレーションを用いた最適化手順においては、トレー数の初期値として上式を用いることにする。なお、上式において記号内の値がちょうど割りきれられる場合にも、安全在庫量を考慮することから、最適解により近い値でもあり、簡潔な同式を用いることにする。

さらに、水すましの調査間隔および組立ラインにおける生産速度の変動に起因する作業中の欠品を防ぐために、安全在庫量 a_M を加味して、必要最小限のトレー数 M_{ij}^T は次式で与えられる。

$$M_{ij}^T = \left[\frac{2E(L_i)}{E(d_{ij})N} + a_M \right] + 1 \quad (2)$$

4. 水すましとかんばん方式

4.1 システムの概要

本生産システムにおいては、複数の水すましがそれぞれ担当する組立ラインから空のトレーを回収して、当該部品置き場で部品を補充している。したがって、ある特定の部品に対して、関与している水すましは1人あるいは複数いることがあり、それぞれの水すましは1つ以上の組立ラインを担当している。したがって、各水すましは、おのおの独立に空トレーの回収および補充のために、それぞれのルートを巡回している。

部品置き場においては、部品はコンテナに格納されている。水すましがコンテナから1個でも部品を取り出すと、そのコンテナに掛けられていた「かんばん」がはずされ、かんばん回収ポストまで持っていかれて、その中に置かれる。その後、納入サイクルに基づく次の納入時に「発注」が行われて、既定のかんばん納

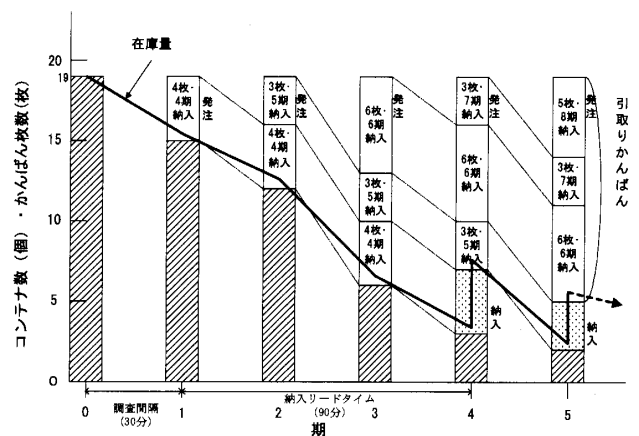


図3 かんばん方式におけるコンテナ内の在庫推移

入りリードタイムを経て補充される。なお、水すましが部品を取り出して、そのコンテナが空になったら、次のコンテナから部品を取り出す。

ここでのかんばんは、いわゆる「引取りかんばん」であり、通常、納入サイクルは、 $a-b-c$ 、で示される(例えば文献[11])。例えば、「1-16-3」は、1日に16回、つまり1日8時間1シフトとすれば30分間隔で調査および納入が行われ、90(=30×3)分後に、当該かんばんが掛けられたコンテナに対応する部品が納入されることを意味する。このような納入サイクルについて、かんばんおよびコンテナを含めて、在庫量の推移の様子を図3に示す。これは基本的には定期発注方式であって、発注量の単位はかんばん1枚に対応するコンテナ容量であり、発注しない場合もあることに留意する。

4.2 必要最小限のかんばん枚数

調査間隔に納入リードタイムを加えた期間に対する需要量の期待値に相当する分量を収納するために必要なかんばん枚数 K^E (枚) は次式で表される。

$$K^E = \left[\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{S_i} \frac{Ta(1+c)}{E(d_{ij})Pb} \right] + 1 \quad (3)$$

上式は、第1項は、当該部品を扱うすべての水すましが担当する組立ラインに関して、かんばんの調査間隔と納入リードタイムを合わせた期間について、部品の需要量の期待値に相当する分量を収納するためのコンテナに対応するかんばんの枚数である。なお、式(1)の場合と同様に、上式においても記号内の値が割りきれられる場合にも、同式を用いることにする。

さらに、各水すましの調査間隔および各組立ラインにおける生産速度の変動に起因する欠品を生じさせないための安全在庫量 a_K を考慮すると、必要なかんばん枚数 K^T (枚) は次式で表される。

$$K^T = \left[\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{S_i} \frac{Ta(1+c)}{E(d_{ij})Pb} + a_k \right] + 1 \quad (4)$$

5. 最適化手順

5.1 シミュレーションモデルと実行条件

ここでは、Excelによるスプレッドシートシミュレーションモデルを構築する。モデル全体の手続きを図4に示す。さらに、[処理1 水すまし]および[処理2 かんばん]のフローチャートを図5および図6にそれぞれ示す。本研究では、品切れにより当該作業が中断することを回避するために、品切れが生じない必要最小限のトレー数を「最適トレー数」ということにする[注6]。そして、後工程から前工程への引取り（プル方式）の考え方を適用して、まず処理1において最適

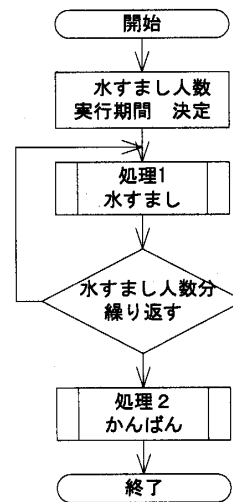


図4 全体の手続き

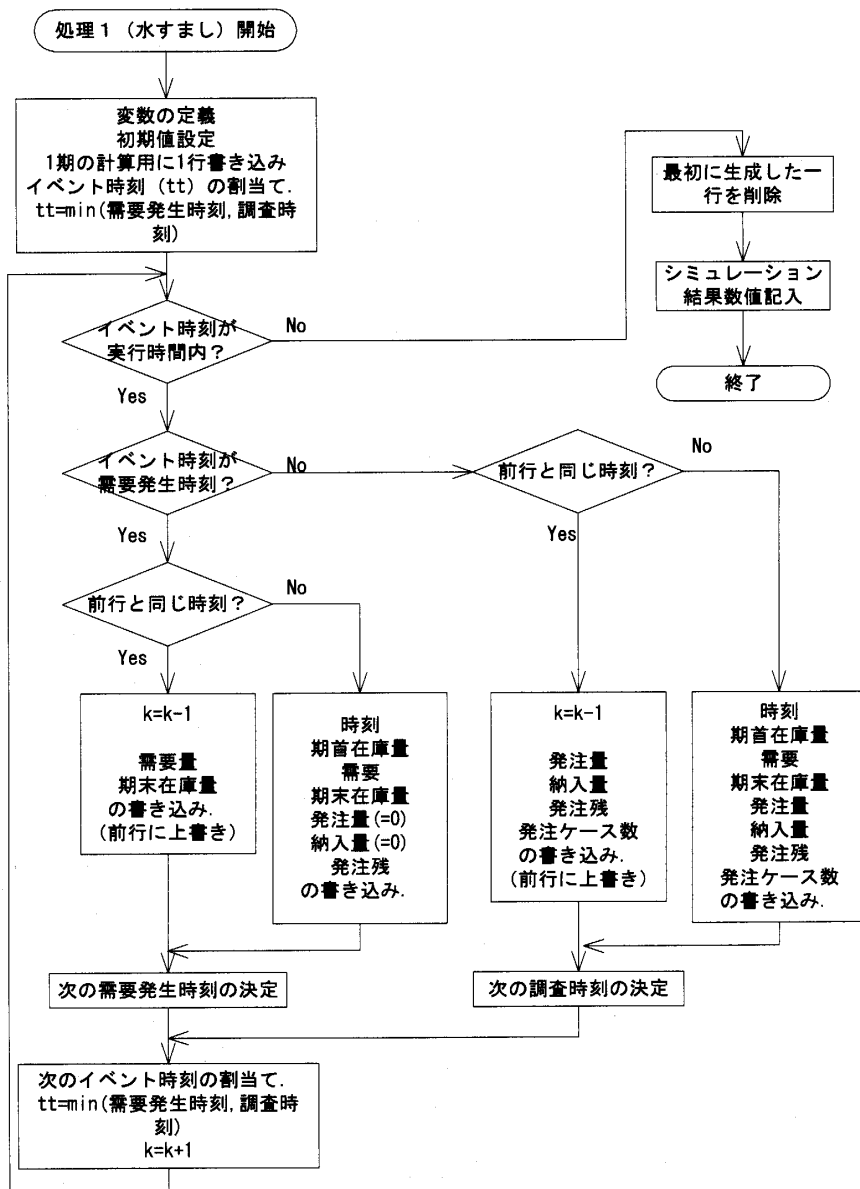


図5 [処理1 水すまし]のフローチャート

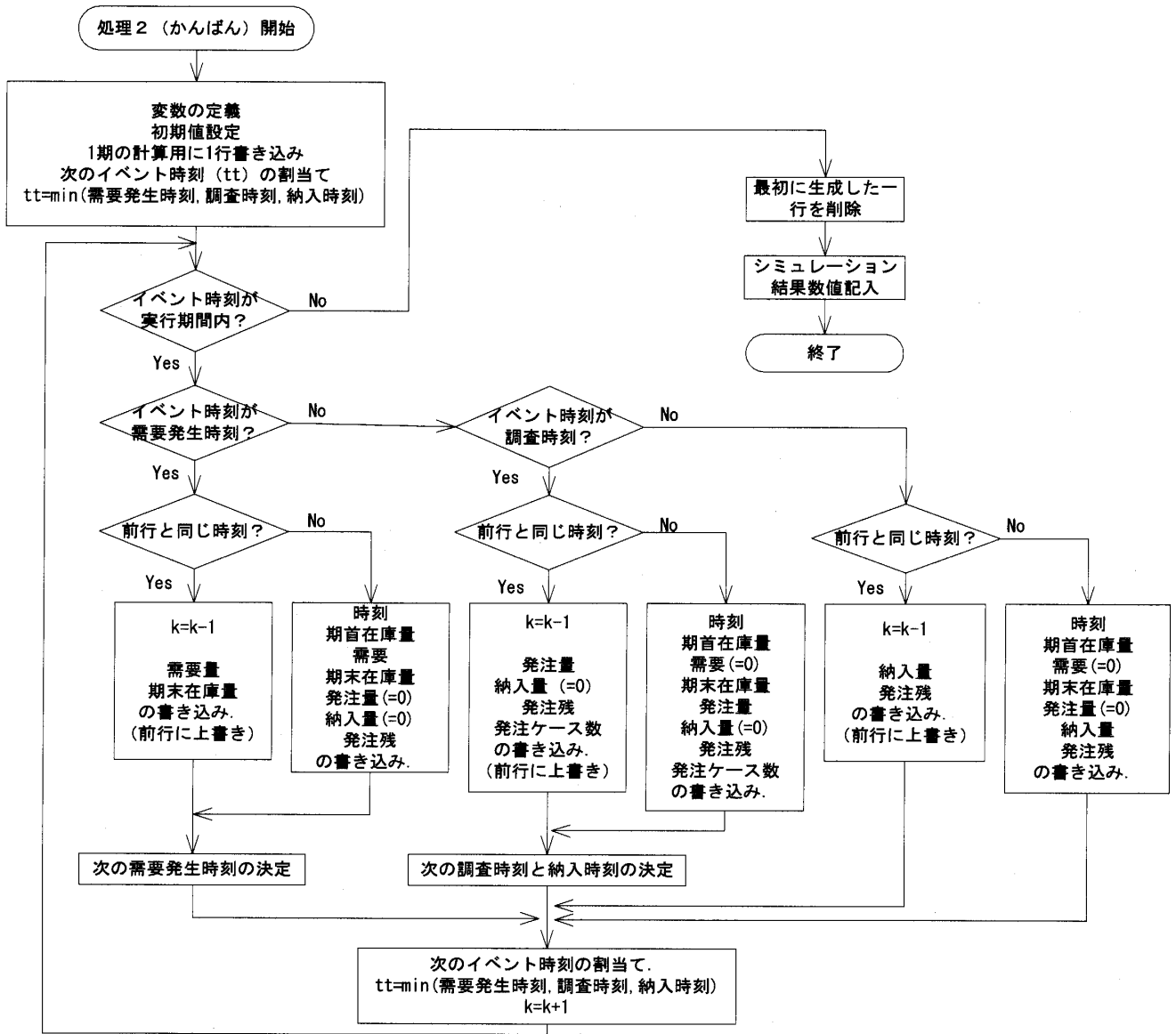


図6 [処理2 かんばん]のフローチャート

なトレー数を決定し、次いで処理2において最適なかんばん枚数を決定することにする。

最適化手順を実行するまえに、シミュレーション反復実行条件について決定する。つまり、実際の作業の実施状況をよく観察して、シミュレーション実行時間の長さで終結・非終結システムの区別を決定しておく必要がある[13]。

5.2 最適トレー数に関する特性解析

実務の場合においては、式(2)における安全在庫量に関しては、できる限り小さいほうが望ましいとされる[14]。ここでは、水すましの調査間隔ならびに生産速度のそれぞれのバラツキの度合いが最適トレー数に及ぼす影響について、前節で示した[処理1 水すまし]によるシミュレーション実験により検討する。

実験条件として、生産速度の平均(期待値)を

100(秒)とし、1日8時間1シフトとして30シフトのじゅうぶん長い実行長さを設定する。はじめに、生産速度の変動係数(c.v.)を0.2として、水すましの調査間隔を生産速度の期待値の5, 10, 15, 20倍の長さに設定し、さらにそれぞれの調査間隔の変動係数を0.1ないし0.5に設定して、最適トレー数を求めたのが図7である。この図より、水すましの調査間隔が長くなるほど、そしてバラツキが大きくなるほど最適なトレー数は多くなる傾向があることが確認できる。

次に、水すましの調査間隔の変動係数を0.2と設定し、そして水すましの調査間隔を生産速度の期待値の5, 10, 15, 20倍の長さに設定し、さらに生産速度の変動係数を0.1ないし0.5に設定して、最適トレー数を求めたのが図8である。この図より、生産速度のバラツキが大きくなるほど最適なトレー数は多くなる傾

向があることが確認できる。

5.3 トレー数およびかんばん枚数の最適化手順

はじめに、5.1節で示したシミュレーションの反復実行条件について設定しておく。以下の手順を実行することにより、すべての部品について、セル生産・組立ラインにおけるトレー数、ならびに部品置き場におけるかんばん枚数の最適化を図ることができる。

[ステップ1] 1つの部品を取り上げ、そして1人の水すましを対象にして、さらに1つのセル生産・組立ラインを取り上げて、式(1)より必要なトレー数の期待値を計算する。

[ステップ2] [ステップ1]で得られたトレー数をじゅうぶん上回る数のトレー数を設定して、[処理1 水すまし]を実行して、組立ラインにおいて品切れが生じない必要最小限のトレー数を見出す。

[ステップ3] もし当該水すましが担当する他のセル

生産・組立ラインがあれば、順次、1つずつ取り上げて、すべてのセル生産・組立ラインについて、[ステップ1]ないし[ステップ2]を繰り返す。

[ステップ4] もし他の水すましが当該部品を担当するのであれば、[ステップ1]ないし[ステップ3]を繰り返す。そうでなければ、[ステップ5]へ進む。

[ステップ5] 式(3)より必要なかんばん枚数の期待値を計算する。

[ステップ6] [ステップ5]で得られたかんばん枚数をじゅうぶん上回る数のかんばん枚数を設定して、[処理2 かんばん]を実行して、部品置き場において品切れが生じない必要最小限のかんばん枚数を見出す。

[ステップ7] 別の部品があれば、すべての部品について、順次取り上げて、[ステップ1]ないし[ステップ6]を繰り返す。

6. 応用

6.1 応用例

実際の生産システムについて、必要最小限のトレー数を得るために、本研究で開発したシミュレータを用いて、最適化のための数値実験を実施してみる。

ある部品について、部品補充のために水すましが2人担当していて、それぞれが3つならびに1つの組立てラインを訪問している。また、水すましの調査間隔の平均はそれぞれ688(秒)および655(秒)であり、トレーの容量はすべて5(個)である。そして、かんぱんの納入サイクルは、「1-16-3」であり、コンテナ容量は12(個)である。その他の必要なパラメータを含めて表1にまとめて示す。

シミュレーション反復実行条件として、1日8時間1シフトの30シフトについて、非終結システムとする。

いま、水すましNo.1の1番目に訪問する組立ライン(No.11)について、検討してみる。[ステップ1]

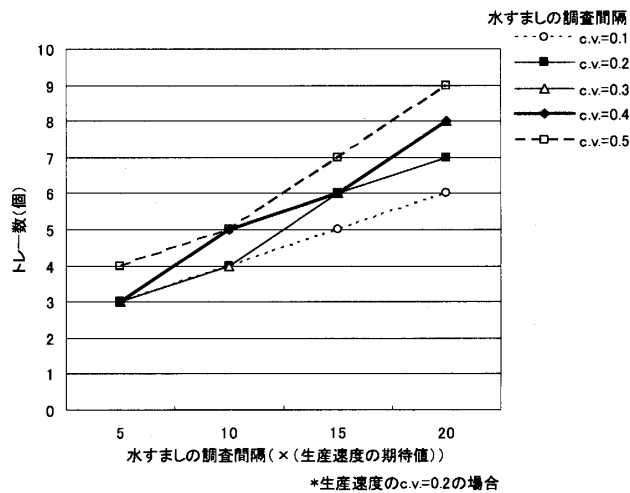


図7 水すましの調査間隔のバラツキによる影響

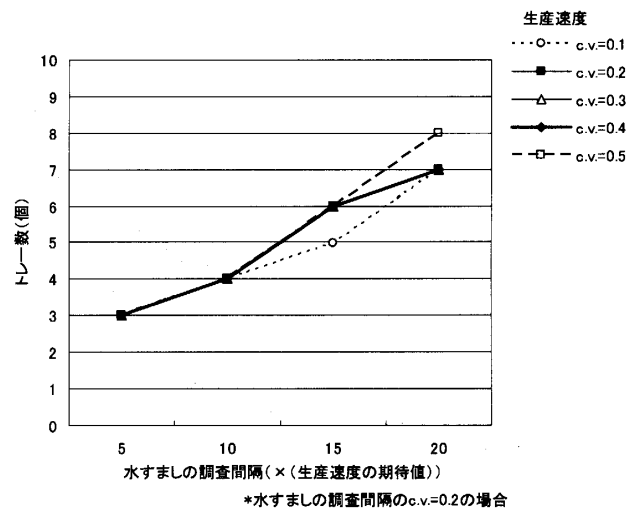


図8 生産速度のバラツキによる影響

表1 応用例におけるパラメータ

項目		パラメータ	
水すましNo.1担当	組立ラインNo.11生産速度(秒)	d_{11}	TRIA(196,227,341)(*1)
	組立ラインNo.12生産速度(秒)	d_{12}	TRIA(59,155,379)
	組立ラインNo.13生産速度(秒)	d_{13}	TRIA(120,150,417)
水すましNo.2担当	組立ラインNo.21生産速度(秒)	d_{21}	TRIA(216,250,375)
	水すましNo.1の調査間隔(秒)	L_1	NORM(688,65)(*2)
	水すましNo.2の調査間隔(秒)	L_2	NORM(655,60)
	トレーの容量(個)	N	5
	コンテナの容量(個)	P	12
	1日の作業時間(秒)	T	28800
	かんぱんの納入サイクル	$a-b-c$	1-16-3

(*1) 三角分布(最小値, 最頻値, 最大値)

(*2) 正規分布(平均, 標準偏差)

において、調査間隔の平均は688(秒)で、生産速度の平均は254.7(秒)であり、そしてトレーの容量は5(個)であるから、式(1)より、必要なトレー数の期待値 M_1^E として2が得られる。[ステップ2]におけるシミュレーション実験の結果、品切れを生じさせないためには、必要最小限3個のトレーが必要であるという結果が得られた。次に、[ステップ3]において、2番目および3番目に訪問する組立ラインにおいては、いずれも3個(つまり $M_{11}^E = M_{12}^E = M_{13}^E = 3$)のトレーが必要であるという結果が得られた。以上の結果が得られた画面(抜粋)を図9に示す。そして、[ステップ4]において、水すましNo.2が訪問する組立ライン(No.21の1箇所のみ)では、2個(つまり $M_{21}^E = 2$)のトレーが必要であるという結果が得られた。

次に、かんぱんの納入サイクルは、「1-16-3」であり、コンテナ容量は12(個)である。そして、1日の作業時間は8時間、つまり28,800秒であるので、[ステップ5]での式(3)より、必要なかんぱん枚数の期待値 K^E として11枚が得られる。[ステップ6]におけるシミュレーション実験の結果、品切れを生じさせないためには、必要最小限12枚(つまり $K^T = 12$)の

かんぱんがあれば欠品は生じないという結果が得られた。この結果が得られた画面(抜粋)を図10に示す。

6.2 実務への応用に関する留意事項

(1) 新製品の導入や作業方法の変更などに起因するセル生産・組立ラインの新規編成の際に、直接作業員への作業の割当てが済んだ時点で、本研究で

みずすましNo.	1					
担当ライン数	3					
調査間隔の平均(秒)	688					
調査間隔の標準偏差(秒)	65					
ラインNo.	1	2	3	4	5	6
トレー数(個)	3	3	3			
トレーの容量(個)	5	5	5			
初期在庫量(個)	15	15	15	0	0	0
結果						
品切れ回数	0	0	0			
調査時点での空の最大トレー数(個)	1	2	1			
最大需要量(調査間隔)(個)	4	7	6			
隣接する2調査時点での最大必要トレー数(個)	2	3	3			

図9 最適トレー数が得られた画面(抜粋)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		時刻(秒)	期首在庫量	需要量	期末在庫量	発注量	納入量	発注数	かんぱん枚数(発注コンテナ数)	品切れ回数	Mizusumashi_Start		Kanban	
2	demand	777	144	10	134	0	0	0			入力が必要な初期値		Clear(kanban)	
3	demand	1445	134	5	129	0	0	0			コンテナ数(個)	12	All Clear	
4	demand	1468	129	5	124	0	0	0			コンテナの容量(個)	12		
5	20	1800	124	0	124	24	0	24	2		初期在庫量(個)	144		
6	demand	2014	124	10	114	0	0	24			実行期間(秒)	864000		
7	demand	2718	114	5	109	0	0	24			調査間隔の平均(秒)	1800		
8	demand	2750	109	10	99	0	0	24			リードタイム(秒)	5400		
9	demand	3366	99	5	94	0	0	24			モデルの注番号			
10	30	3600	94	0	94	36	0	60	3		*調査時にかんぱん枚数を確認(1つでも使用したケースも含める)			
11	demand	3959	94	5	89	0	0	60			*調査間隔より、納入リードタイムが長くてもよい。しかし、必ず発注の順番に納入される。			
12	demand	4116	89	10	79	0	0	60			*かんぱん枚数以上の発注は行われぬ。			
13	demand	4794	79	10	69	0	0	60			かんぱんサイクル	1	16	3
14	demand	5293	69	5	64	0	0	60						
15	30	5400	64	0	64	24	0	84	2		*1日の作業時間(時間)	8		
16	demand	5628	64	10	54	0	0	84						
17	demand	6262	54	10	44	0	0	84						
18	demand	6756	44	5	39	0	0	84			結果			
19	demand	6922	39	5	34	0	0	84			品切れ回数	0		
20	30	7200	34	0	34	36	24	96	3		発注したかんぱんの最大枚数	4		
21	demand	7548	58	10	48	0	0	96			最大需要量(調査間隔)	45		
22	demand	8128	48	10	38	0	0	96			需要量平均	30573		
23	demand	8131	38	5	33	0	0	96						
24	demand	8807	33	10	23	0	0	96						
25	35	9000	23	0	23	36	36	96	3					
26	demand	9480	59	10	49	0	0	96			かんぱん枚数(調査間隔+リードタイム中)	12		
27	demand	9481	49	5	44	0	0	96						
28	demand	10386	44	10	34	0	0	96						

図10 最適かんぱん枚数が得られた画面(抜粋)

提案した最適化手順を適用することにより、主要な部品に関して、セル生産・組立ラインにおける最適なトレー数、ならびに部品置き場における最適なかんばん枚数を極めて短時間かつ容易に得ることができる。それにより、従来、安全在庫(量)として位置づけられていた分に対して定量的な把握が可能となる。

- (2) 3.1節で述べたように、セル生産・組立ラインにおいて、直接作業による作業時間について、固定した作業内容に対する作業時間分布をあてはめることはできない。そこで、本研究で提案するシミュレータを適用するにあたっては、作業測定で得られた時間値をそのまま用いる方法、あるいは当該作業者の作業時間について、観測データを収集し、分布・パラメータを便宜的に特定してシミュレーションを実行する方法、のいずれかを採用することで、実務上は差し支えないであろう。
- (3) 5.3節で示した最適化手順[ステップ2]および[ステップ6]において、探索法などの最適化手順を併用することにより、より効率的に最適解を得ることができることがある[15]。

7. 結言

ジャストインタイム生産方式を形成するセル生産方式・水すまし方式・かんばん方式を採用したPC組立生産システムを対象にして、組立ラインおよび部品置き場における容器の数を表すトレー数およびかんばん枚数の最適化手順を提案した。欠品の発生事象に着目することにより、在庫管理方式における特異性を考慮することで、シミュレーションによる最適化を図ることができることを示した。本研究で提案する最適化手順を適用することにより、実務上の有用性を確認することができた。

注

- [注1] 企業の概要ならびに経営戦略などについては、文献[6]に詳しい。
- [注2] セル生産方式には、本研究で取り上げる分割方式の他に、1人生産方式や巡回方式などがある[7,8]。
- [注3] 水すましは、工程間の資材運搬をもっぱら行う作業者のことで、後工程引取りを実現するために重要な役割を果たしている。水すましは、定期的に工程間を巡回したり、あるいは工程の要求に応じたりして、

資材を必要としている工程に供給する作業を行う。その作業の様子が、水面に生息する昆虫のミズスマシに似ていることから、水すましと呼ばれるようになったといわれる。

[注4] かんばんは、後工程引取り生産を維持し、ジャストインタイムを遂行するための道具で、部品を引き取るための引取りかんばんと、作業指図としての仕掛けかんばん(生産指示かんばん)がある。実際の引取りかんばんを図1中〈部品置き場〉に示す。

[注5] このような作業方法による作業時間は統計的に独立であるとはみなせず、厳密には、固定された作業内容に対する作業時間分布に関する分析方法を適用することはできない[9]。

[注6] シミュレーション実験終了後、品切れ回数が判明するので、総需要量から品切れ回数を差し引いて総需要量に対する比率を求めることにより、サービス率を求めることができる[12]。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、機会を与えていただいたNECパーソナルプロダクツ株式会社の片山徹社長と、研究内容に関する討論に加わり貴重なコメントをいただいた郡山眞也部長ならびに同社米沢事業場の皆さんに深甚なる謝意を表す。本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)16330071により遂行された。なお、本文中の応用例の数値は、実測に基づいて作成した説明のためのものであることを付記する。

参考文献

- [1] 大野耐一, トヨタ生産方式, ダイヤモンド社, 1978.
- [2] 門田安弘, トヨタシステム, 講談社, 1985.
- [3] ジャストインタイム生産システム研究会編, ジャストインタイム生産システム, 日刊工業新聞社, 2004.
- [4] 野村淳一, 「水すまし作業を導入した生産システムの作業条件の最適化に関する研究」, 経営システム学会誌, Vol. 20, No. 2, 21-27, 2004.
- [5] J. Nomura and S. Takakuwa, "Module-based modeling of flow-type multistage manufacturing systems adopting dual-card kanban system," in *Proceedings of 2004 Winter Simulation Conference*, 1065-1072, 2004.
- [6] 益津力, 「ノートパソコン開発における時間競争戦略」, 経営システム, Vol. 8, No. 2, 31-35, 1998.
- [7] 篠原司, 「特集 コンベヤ撤去の衝撃走る」, 日経メカニカル, No. 459, 20-38, 1995.
- [8] 岩室宏, セル生産システム, 日刊工業新聞社, 2002.
- [9] 木暮正夫, 「作業測定の原理的諸問題」, 日本工業経営学

会生産システム研修会報文集, 29-31, 1971.

- [10] 高桑宗右エ門, 三輪冠奈, 「在庫管理のシミュレーション・アニメーション・モデル 第3回 2ピン方式 (ダブル・ピン方式)」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 48, No. 6, 39-45, 2004.
- [11] 小谷重徳, 「かんばん方式の数理」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 32, No. 11, 730-738, 1987.
- [12] 人見勝人, 新・生産管理工学, コロナ社, 1997.
- [13] W. D. Kelton, R. P. Sadowski and D. T. Sturrock, Simulation with Arena, Third Edition, McGraw-Hill, 2004./高桑宗右エ門監訳, シミュレーション—Arenaを活用した総合的アプローチ (第3版), コロナ社, 2005.
- [14] 平野裕之, ジャスト・イン・タイム生産の実際, 日本経済新聞社, 1990.
- [15] 高桑宗右エ門, CIM生産システムのシミュレーション最適化, コロナ社, 1994.