

かんばん方式におけるかんばん枚数の 最適化解析

高桑宗右エ門

目 次

- I. 緒 言
- II. かんばん方式（ジャスト・イン・タイム生産方式）
- III. かんばん方式を採用した生産システム
- IV. シミュレーション解析
- V. かんばん枚数の最適決定法
- VI. 結 言

I. 緒 言

かんばん方式は「ジャスト・イン・タイム (JIT) 生産」, 「トヨタ生産方式」とも称され, 有効な生産現場主導の方式として国際的にも注目されている^{1,2)}。FA システム高度化型 CIM では, 基本的な生産理念とも目されている。この方式では, 各工程に「必要なものを必要な時に必要な量だけ」供給するジャスト・イン・タイム生産と, 現場において作業指示情報を視覚的に表示するための「かんばん」を使用することが特徴である。これにより, 在庫を極限まで少なくすることを目指している。昨今, かんばん方式は, バーコード・システムを採用することにより, 「電子かんばん方式」として, 生産情報ネットワークが導入された工場における進捗管理に導入されている。

本研究では, はじめに, かんばん方式についてシステムの特徴を整理する。そして, シミュレーション実験をとおして, かんばん方式におけるかんばん枚数と安全在庫について, 生産速度との関係について解析を行う。さらに, 最適なかんばん枚数および安全在庫の決定方法を提案し, 数値例によりその有効性を確認する。

II. かんばん方式（ジャスト・イン・タイム生産方式）

かんばん方式は、1962年頃からトヨタ自動車工業（株）で導入されてきた生産管理方式であり、「トヨタ生産方式」ともいう。この方式では、生産現場において、工程間の仕掛品を減少させるために「かんばん」を用いる。「かんばん」は製造指図書に相当するもので、「かんばん」が掛けられた部品を使いきると、その「かんばん」をはずして前工程へ持っていく。前工程では、それを受けて「かんばん」に示された部品を指定数量だけ生産する。この意味で「後工程引取り（プル）方式」ともいわれ、前工程（上流工程）から流される「流し込み（プッシュ）方式」と対比される。

かんばん方式では、無駄を排除して、生産システム内の各工程に「必要なものを必要な時に必要なだけ」供給する「ジャスト・イン・タイム生産」と、「かんばん」を用いて作業指示を行う現場自主管理が特徴である。

CIM 実現に向けて、特に重要な生産管理方式がMRPとかんばん方式である。MRPはMaterial Requirements Planningの略語であり、資材所要量計画と邦訳される。これは、1971年に、APICS（American Production and Inventory Control Society）により提唱された。MRPは、製品の生産計画に基づいて、原材料、部品から最終製品に至るまでのおのおのの所要量と時期を設定して、計画をたてる手法である。かんばん方式とMRPについて、特徴を対比したものを表1に示す。MRPは生産計画・指示を中心としたコンピュータによる情報システムの一環として組み込まれている。他方、かんばん方式は、生産現場における作業者の自主管理に主眼が置かれている。

表1 MRPとかんばん方式の比較（注1）

比較項目	MRP	かんばん方式
設備稼働率	生産計画	平準化生産
製品品目と数量	基準生産計画	基準生産計画
部品調達	資材所要計画	「かんばん」
生産能力	能力所要計画	目で見える管理
計画実行	入出量管理	目で見える管理
生産順位	出庫、着工報告	「かんばん」
購買品目	購買報告	「かんばん」と仮発注
情報フィードバック	遅延予測報告	「アンドン」
管理の特徴	計画主導型	現場自主管理型

近年、バーコードが工場においても盛んに用いられるようになった。ワーク（加工対象物）やワークを入れて運搬するコンテナにバーコードや磁気カードを付随させ、ロット番号や品番を認識できるようにする。このことにより、当該工程における作業内容を明確にすることができる。さらに、LANを導入して、各工程からの情報をホストコンピュータに収集することにより、工場内の全工程における作業進行状況を把握することができ、進捗管理を効率的に実施することができる。このようなシステムでは、従来の作業日報作成が不要となり、コンピュータによる生産管理システムが構築されることになる。そして、従来の「かんばん」もいわゆる「電子かんばん」に移行しつつある。

Ⅲ. かんばん方式を採用した生産システム

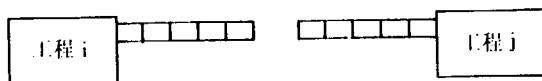
1. かんばん方式のモデル化

本研究で考察するかんばん方式を採用した多段階生産システムを図1に示す。以下に条件設定を列挙する。

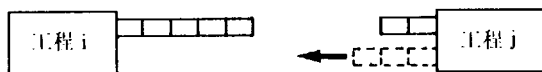
- (1) 各工程は稼働状態あるいは遊休状態のいずれかである。
- (2) 最終工程において、ロット・サイズは生産技術的理由あるいは経済的ロット量を求める計算式より得られるものとする。
- (3) 生産指示は、後工程に対して生産開始前に行われる（図1(a)）。
- (4) 「引取りかんばん」（後工程から引き取られる品名と数量が示されている）が後工程から前工程へと移動して、必要な部品の種類とその数量が要求される（図1(b), (c)）。
- (5) 前工程において、取り出された部品が入っていたコンテナに付けられている「生産指示かんばん」がはずされる。この生産指示に基づいて、取り出された部品の種類とその数量の生産が行われる。その後、仕掛品が後工程へ運搬される（図1(d)）。
- (6) (4)ないし(5)が最初の工程まで順次さかのぼって実行され、生産時間が持続する間繰り返行われる。

2. かんばん枚数の決定法（従来の方法）

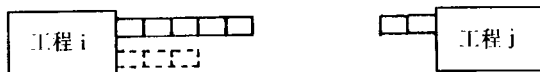
かんばん方式を生産システムに適用する場合のかんばん枚数の決定法について、種々の計算式が提唱されている。ここでは、文献⁴⁾について検討する。いま、かんばん枚数を m （枚）とすると、 m は次式で表わされる。



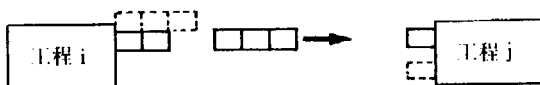
(a) 工程 j で作業を開始する。



(b) 「引取りかんばん」付きコンテナが工程 i へ向かう。



(c) コンテナが工程 i へ到着する。



(d) コンテナへ仕掛品を積載後、工程 j へ向かう。

図 1 「かんばん」付コンテナの工程間移動

$$m = \frac{D(t_p + t_w)(1 + \alpha)}{b} \quad (1)$$

ここに、

b = コンテナ当り収容数 (個)

D = 単位時間当り所要量 (個)

t_p = 生産・運搬時間 (時間)

t_w = かんばんの待ち時間 (時間)

α = 安全係数

数値例として、コンテナ当り収容数が 25 個 ($b = 25$)、1 時間当り所要量が 125 個 ($D = 125$)、生産・運搬時間とかんばんの待ち時間の合計が 1.5 時間 ($t_p + t_w = 1.5$) であるとする。生産現場の能力により、安全係数を 0.2 とする ($\alpha = 0.2$) と、式 (1) より $m = 9$ が求められる。すなわち、25 個積載できるコンテナに対して、かんばん枚数は 9 枚でよいことになる[注 2]。

式 (1) の内容を以下に少し詳しく検討する。まず、コンテナ収容数 b は使用するコンテナとそれに積載する品目によって決定されるので、決定変数とはならないか、あるいは決定変数であっても選択できる値は多くなく限定された範囲のなかから選択される。所要量は最終工程への生産指示によって与えられるので、単位時間当り所要量 D も所与の値となる。生産・運搬時間は前後 2 工程間を一往復する時間とかんばん枚数分だけのコンテナに積載される量だけの生産に要する時間の和である。この時間は引取りかんばんの枚数 (つまりロット・サイズ) が決ってから算出ないし推定することができる時間である。また、当然、かんばんの待ち時間もかんばん枚数によって影響を受ける。以上の考察より式 (1) はかんばんの枚数を決定するための算出式というより、むしろ内容を説明するための式である。

そこで、次項で生産速度とかんばん枚数の関係、および安全在庫が生産の能率に及ぼす影響などについて解析し、最適なかんばん枚数の決定法を提案する。

IV. シミュレーション解析

1. シミュレーション・プログラムの入出力

かんばん方式を採用した生産システムを解析するためにシミュレーション実験を行う[注 3]。解析を進めるうえでフロー型多段階生産システム (工程

数は M) を念頭におく。

実験に必要な入力として以下に示す各項がある。

- ・ コンテナ当り収容数 (b : 個)
- ・ 引取りかんばん枚数 (m : 枚)
- ・ 安全在庫 (s : 枚, かんばん枚数として設定する)
- ・ 単位生産時間 ($t_{ai}, i=1, 2, \dots, M$: 時間)
- ・ 工程間移動時間 ($I_{ij}, i, j=1, 2, \dots, M, i \neq j$: 時間)
- ・ 総処理個数 (総所要量) (D : 個)

シミュレーション実験の結果得られる出力の一例として次の項目が挙げられる。なお、これらは総処理予定個数だけ生産された時点における統計量の形で出力される。

- ・ 総処理時間 (時間)
- ・ 各工程の稼働率
- ・ 平均滞留時間 (時間)

2. 生産速度とかんばん枚数の関係 (2 工程の場合)

前工程および後工程の生産速度の大小関係と, (引取り) かんばん枚数が工程の稼働率に及ぼす影響を調べる目的で, 2 段階生産システムを対象として解析を行った。ここに, 引取りかんばん 5 枚分の部品数量 (1 コンテナに 10 個積載できるから総数量は 50 個) は後工程の 1 ロット当りロット・サイズより決定されているものとする。また, 各工程における単位生産時間の変動係数は 0.3 とじゅうぶん大きくとってある。なお, ここでは, コンテナの移動時間は無視できるものとしている。また, 本研究をとおして, シミュレーション実験回数はすべてそれぞれ 5 回である。表 2(a)に示した実験条件のもとにシミュレーション実験を実施した。その結果, 前工程の単位生産時間が後工程のそれより小さい場合には, 安全在庫は不要であることがわかり, 反対に, 前工程の単位生産時間が後工程のそれより大きい場合には, 安全在庫の量が後工程の稼働率すなわち生産システム全体の能率に影響を及ぼすことがわかった。

次に, 適正な (必要最小限な) 安全在庫量を求める目的で, 安全在庫と両工程の生産時間比率との関係について検討する。表 2(b)に示した実験条件のもとに実施した実験結果を図 2 に示す。このケースにおいても各工程の単位生産時間の変動係数を 0.3 とじゅうぶん大きくとってある。図 2 より, 後工

図固

表 2 シミュレーション実験のための実験条件

実験	工程数	加工時間 (分)			コンテナ移動時間 (各工程共通) (分)		引取りかんば ん枚数 (枚)	安全在庫 (コンテナ)
		第 1 工程	第 2 工程	第 3 工程	積載した場合	空の場合		
a	2	N(0.8, 0.24 ²)	N(1.0, 0.30 ²)	—	0	0	5	0
		N(1.0, 0.30 ²)						
		N(1.2, 0.36 ²)						
b	2	N(1.0, 0.30 ²)	N(1.0, 0.30 ²)	—	0	0	5	0 - 5
		N(1.2, 0.36 ²)						
		N(1.4, 0.42 ²)						
		N(1.6, 0.48 ²)						
		N(1.8, 0.54 ²)						
		N(2.0, 0.60 ²)						
c	3	N(1.2, 0.12 ²)	N(1.2, 0.36 ²)	N(1.0, 0.10 ²)	5.0	3.0	1 - 5	0 - 2
d	3	N(1.44, 0.432 ²)	N(1.2, 0.36 ²)	N(1.0, 0.30 ²)	5.0	3.0	2	(決定変数)

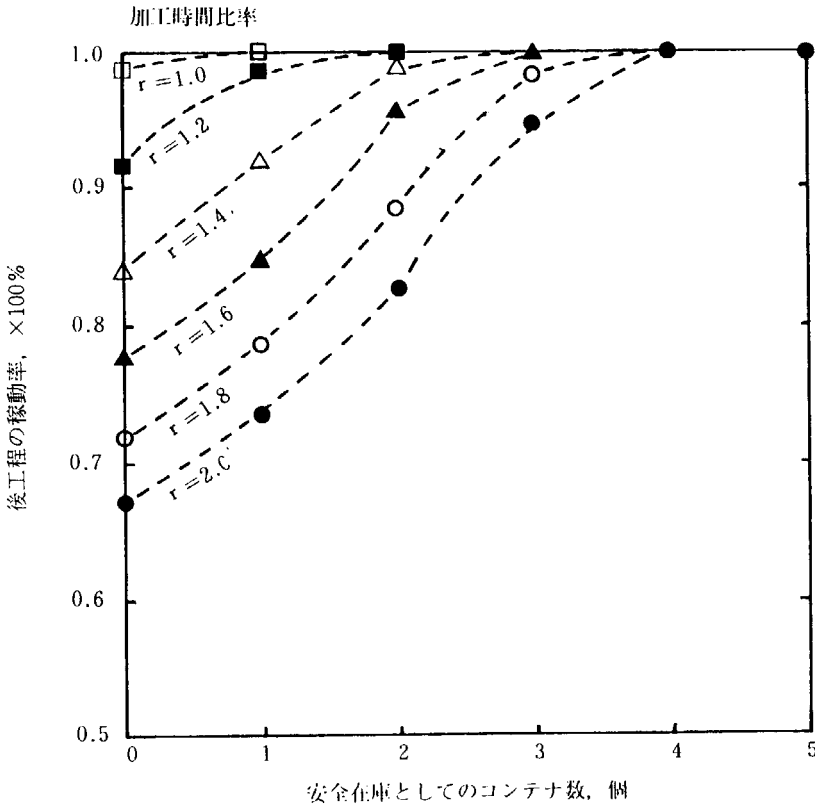


図2 安全在庫が後工程の稼働率に与える影響

程の稼働率が100%となるために、単位生産時間比率が2.0（すなわち前工程の単位生産時間が後工程のそれより平均して2倍長い）の場合、安全在庫のためのかんばん枚数は4枚あればよいことがわかる。そして、単位生産時間の比率が1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0の各場合には、それぞれ4, 3, 3, 2, 1枚を安全在庫として設置すれば、後工程の稼働率として100%が達成されることがわかる。

さて、2段階生産システムにおいて、前工程の平均生産時間が後工程のそれより長い場合、後工程の稼働率を最大にするための安全在庫のかんばん枚

数として近似的に次式を得る。

$$m_s = \frac{(\text{総生産数量}) \times (r-1) / r - (\text{生産開始時における工程間仕掛在庫量})}{(r-1) \quad (\text{コンテナの容量})} \quad (2)$$

ここに、 r は単位生産時間比率であり、次式で表わされる。

$$r = (\text{前工程の平均単位生産時間}) / (\text{後工程の平均単位生産時間}) \quad (3)$$

式(2)は、総生産数量分の製品を後工程で生産するのに必要な時間で、前工程で生産しきれない分量の(後工程への)仕掛品をもつことを意味する。式(2)より、後工程に対して生産指示があった総生産量が多いほど、あるいは前工程の単位生産時間が後工程のそれに比べて長いほど、後工程の稼働率を高めるために、安全在庫量を多くする必要があることが推測される。

単位生産時間の変動によって多少の増減は予想されるものの、安全在庫の最適量を求める際の初期解として式(2)を用いれば、シミュレーション実験などにより、より速く最適解に到達することができよう。

3. コンテナの移動時間を考慮した場合の安全在庫量と生産量の関係(3工程の場合)

ここでは、コンテナの移動時間を考慮した場合について、生産指示かんばん枚数(ロット・サイズ)と安全在庫量が最終工程の稼働率に及ぼす影響について解析する。

表2(c)に示す生産情報に基づいた3段階生産システムを対象として、生産指示かんばん枚数が1ないし5枚(ロット・サイズは10ないし50個)の場合についてシミュレーション実験を実施した。実験結果を図3に示す。生産指示かんばん枚数のいずれのケースについても、安全在庫量として2コンテナ分(コンテナ数でカウントする)設置すれば、最終工程の稼働率がほぼ100%になることがわかる。コンテナの移動時間や、多段階工程に起因する能率の低下を防ぐために、安全在庫が有効であることがわかる。そこで、次節で、最終工程における最人能率を達成するために必要な安全在庫量を決定する手順を提案し、数値例を示す。

V. かんばん枚数の最適決定法

1. かんばん枚数の最適決定問題

本研究で検討しているかんばん方式モデルでは、ロット編成ルールあるいは経済的ロット量から引取りかんばん枚数が決定されることを前提としている。したがって、多段階生産システムにおいては各工程への安全在庫量を決

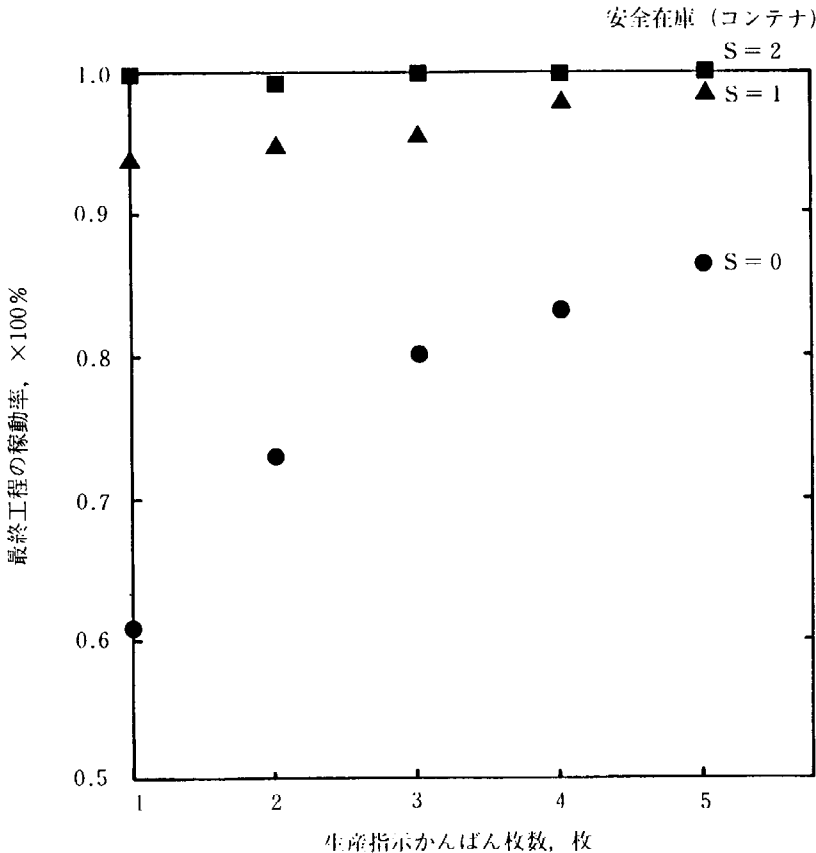


図3 安全在庫が最終工程の稼働率に与える影響
(かんばんの移動時間を考慮した場合)

定する問題に帰着される。この生産システムでは、はじめに最終工程へ生産指示が行われるので、生産システム全体の生産率を最終工程における稼働率に置き換えて評価することができる。そこで、目標関数と決定変数は次のようになる。

- (1) 目標関数：最終工程の稼働率
- (2) 決定変数：各工程への安全在庫量

ここでは、フロー型多段階生産システム（プッシュ型）における移動在庫を含めたバッファ容量決定のための最適化手順⁷⁾をこの問題に修正して適用する。式（2）を考慮して、初期解を設定すると効率的に最適解を得ることが可能であろう。なお、2段階生産システムのように単一決定変数の場合には、文献⁸⁾に示された最適化手順が有効である。

2. シミュレーション技法を用いた多目標最適化問題の一解法

無制約最適化のための直接探索法の一つであるパターン探索法を修正した1つのアプローチを示す。以下の手順において、単一の目標関数 $f(\mathbf{T})$ （最終工程の稼働率）で表現されるシミュレーション・モデルに対する最適化手順を構築する。なお、決定変数の数は P であり、 $\Delta_i = (0, \dots, \Delta_i, \dots, 0)$ 。

[ステップ1] 最初($m=1$)の基点、 $\mathbf{B}_1$ を設定する。探索移動距離(Δ)、探索回数(A)、移動距離縮小回数(C)を設定する。そして、試行点： $\mathbf{T} \leftarrow \mathbf{B}_1$ とおき、 $j \leftarrow 0$ 、 $k \leftarrow 0$ とおく。また、各シミュレーション実験において得られる標本の大きさと、統計的検定における有意水準を設定する。

[ステップ2] $k \leftarrow k+1$ とおく。

[ステップ3] もし $k > A$ ならば、ステップ8へ行く。さもなければ、ステップ4へ行く。

[ステップ4] 試行点($m=1$ の場合は $\mathbf{B}_1$)の周りに探索移動を行い、次のような試行点、 $\mathbf{T}$ を決定する。

- (a) $i \leftarrow 1$ とおく。
- (b) シミュレーション実験の結果、 $f(\mathbf{T} + \Delta_i) > f(\mathbf{T})$ であれば、 $\mathbf{T} \leftarrow \mathbf{T} + \Delta_i$ としてからステップ4(d)へ行く[注3]。さもなければ、そのままステップ4(c)へ行く。
- (c) シミュレーション実験の結果、 $f(\mathbf{T} - \Delta_i) > f(\mathbf{T})$ であれば、 $\mathbf{T} \leftarrow \mathbf{T} - \Delta_i$ としてからステップ4(d)へ行く。さもなければ、そのままステップ4(d)へ行く。
- (d) もし $i=P$ ならば、ステップ4(e)へ行く。さもなければ、 $i \leftarrow i+1$ として

ステップ4(b)へ行く。

(e) $f(T) > f(B_m)$ ならば、ステップ6へ行く。さもなければ、そのままステップ5へ行く。

[ステップ5] $m = m + 1$ として、 $B_m \leftarrow T$ とおく。パターン移動により、 $T \leftarrow 2B_m - B_{m-1}$ を得る。そしてステップ2へもどる。

[ステップ6] $m = m + 1$ とし、探索移動距離を縮小(通常0.5倍)し、 $j = j + 1$ とおく。そして、 $B_m \leftarrow B_{m-1}$ 、 $T \leftarrow B_m$ とおく。

[ステップ7] もし $j \geq C$ ならばステップ8へ行く。さもなければ、ステップ2へもどる。

[ステップ8] 探索終了。 B_m が解である。

3. 数値例

表2(c)に示す3段階生産システムについて、最終(第3)工程の稼働率が100%を達成するための安全在庫量を求める。ここでは、コンテナの工程間移動時間を考慮する場合を扱う。各工程における安全在庫量を決定変数とし、初期基点をすべて0(コンテナ数)とする。また、探索移動距離を1(コンテナ数)とし、探索移動距離の縮小はしないものとする。前項で示した手順を適用すると、最終工程の稼働率を最大にするためには、各工程ともコンテナ2個分の安全在庫があればよく、その場合に最終工程の稼働率は100%が達成される。そして、最終工程において、200個の完成品が産出されるのにおよそ206.4分必要であることがわかった。なお、各工程の安全在庫が0の場合と1(いずれもコンテナ数)の場合では、最終工程の稼働率はそれぞれ67.3%、93.1%であり、100%は達成されない。

この数値例のように工程数が多い場合には、それほど困難なく最適解が得られるのであるが、工程数が多い場合や、工程経路が複雑な場合には、前項で示した手順を適用することにより、効率的に最適解を得ることができよう。

VI. 結 言

かんばん方式について、引取りかんばんおよび安全在庫について種々の解析を行い、かんばん枚数についていくつかの知見を得た。前後2工程の生産システムを考慮した場合、最終工程の稼働率を高めるために、両工程において安全在庫をもつことが必要であり、稼働率を最大化するための安全在庫量

を設定することができる。その場合、前工程が後工程のための仕掛在庫をもたなければならない。また、コンテナの移動時間を考慮する場合にも、適正な安全在庫をもつことにより生産性を高めることができる。多段階生産システムの場合には、工程間の負荷がアンバランスであると、安全在庫を多くもたなければならないことも指摘できる。そして、かんばん方式を採用した生産システムにおいて、安全在庫を含めたかんばん枚数を最適決定するための手順を提案し、数値例を示した。

注

[注1] 文献³⁾に加筆した。

[注2] 以上の説明は文献⁵⁾による。

[注3] 本研究では、シミュレーション実験にはSIMAN シミュレーション言語を用いた⁶⁾。また、シミュレーション・モデルの構築に際しては、Cinema アニメーションを併用することにより、モデルの妥当性を確認した。

[注4] 場合によっては、2組の標本に関して、分散比の検定と母平均の差に関する検定を実施する。ステップ4(c), (e)についても同じ。

文 献

- 1) 大野耐一、『トヨタ生産方式』, (1978), ダイアモンド社.
- 2) 門田安弘, 『トヨタシステム』, (1985), 講談社.
- 3) 「インテリジェント工場—FA から CIM へ」, 『日経メカニカル別冊』, 日経マگزローヒル, (1986), 90.
- 4) Sugimori, Y. *et al.* "Toyota Production System and Kanban System, Materialization of Just-in-Time and Respect-for-Humanity System," *International Journal of Production Research*, Vol. 15, No. 6 (1977), 553-564.
- 5) 小川英次, 『現代生産管理論』, (1982), 金原出版, 381-399.
- 6) 高桑宗右エ門 (訳) (C. D. Pegden 原著) 『SIMAN による FA・生産システムのシミュレーション』, コロナ社 (1987).
- 7) 高桑宗右エ門: 「フロー形多段階機械生産システムにおけるバッファ容量の最適化に関する研究 (生産情報に不確実性のある場合の移動在庫を含めた解析) 」, 日本機械学会論文集 (C 編, 生産管理) 56, 527, (1990), 348-352.
- 8) Takakuwa, S.: "Module Modeling and Economic Optimization for Large-Scale AS/RS," 1989 Winter Simulation Conference Proceedings (E. A. MacNair, K. J. Musselman, P. Heidelberger (eds.)), (1989), 795-801.