

シミュレーションを用いた生産指示の遅延に関する研究

横瀬, 健心 / YOKOSE, Kenshin

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

平成16年度 修士論文

シミュレーションを用いた
生産指示の遅延に関する研究

RESEACH ON THE DELAY OF PRODUCTION DIRECTIONS
BY USING A SIMULATION

指導教員 福田 好朗 教授

平成17年2月

法政大学大学院 工学研究科

システム工学専攻 修士課程

生産システム研究室

横瀬 健心

Kenshin YOKOSE

【Abstract】

In a Kanban system, WIP is reducing according to the delay of production directions. A Kanban system has some loops by the Kanban. The production direction delay is influenced by the feedback point of a Kanban loop. Therefore, in this research, the simulator which can simulate the Kanban movement is developed. The relation between production direction delay and the Kanban loops are analyzed by the simulation.

【要旨】

かんばん方式は、生産指示の遅延によって不必要な生産をしないため、仕掛在庫が削減されている。その指示遅延は、かんばんのループにも影響を受けることが考えられる。そこで、本研究では、かんばんのループの多重化について検討を行う。そのためにかんばんのループの多重化を検討できるシミュレータの開発を行う。このシミュレータを用い、実験を通じてシミュレータの有効性の確認を行い、かんばんループの多重化がシステムに及ぼす効果を明らかにする。

目次

| | |
|--------------------------|----|
| 第1章 緒論 | 3 |
| 1.1 研究背景 | 3 |
| 1.2 研究目的 | 4 |
| 1.3 論文構成 | 5 |
| 第2章 かんばん方式の特性 | 6 |
| 2.1 かんばん方式 | 6 |
| 2.1.1 かんばん方式のシステム | 6 |
| 2.1.2 かんばん方式の運用 | 7 |
| 2.2 かんばん方式における指示遅延 | 9 |
| 2.2.1 かんばん方式における実績情報 | 10 |
| 2.2.2 かんばん方式における指示遅延の影響 | 11 |
| 2.3 指示方式のモデル | 13 |
| 2.3.1 かんばん方式 | 13 |
| 2.3.2 CONWIP方式 | 14 |
| 2.3.3 階層型かんばん方式 | 15 |
| 2.4 階層型かんばん方式によるかんばん制御 | 16 |
| 2.4.1 階層型かんばんシステムモデルの定義 | 16 |
| 2.4.2 階層型かんばん制御システムの構造解析 | 17 |
| 第3章 シミュレータ | 19 |
| 3.1 シミュレータ概要 | 19 |
| 3.1.1 開発環境 | 19 |
| 3.1.2 シミュレータの特徴 | 20 |
| 3.2 生産システム要素決定 | 21 |
| 3.3 実行フロー | 24 |
| 3.4 実行表示 | 31 |

| | | |
|------|-------|----|
| 第4章 | 実験 | 33 |
| 4.1 | 実験環境 | 33 |
| 4.2 | 実験モデル | 33 |
| 4.3 | 評価指標 | 35 |
| 4.4 | 実験条件 | 36 |
| 4.5 | 実験 | 38 |
| 第5章 | 結論 | 45 |
| 参考文献 | | 46 |
| 謝辞 | | 47 |

第1章 緒論

1.1 研究背景

消費者ニーズの多様化が進行し、さらに消費者情報流通のスピード化が増大している今日、製造業においては在庫を圧縮し、市場に即応できる生産体制を構築、運営していくことはますます重要となってきた。工程が多段階に連なり工程間に在庫点を設置した多段階生産在庫システムに対する生産管理に、ジャストインタイム生産の考え方がある。ジャストインタイム生産は必要なものを必要なときに必要な量だけ、生産、運搬することにより、不必要な在庫量の削減につながる効率的な生産を意図した考え方である [1][5]。

そのジャストインタイム生産を実現するための方式の一つに、多段階生産在庫システムの各工程での生産や運搬の指示を行うかんばん方式がある。

しかし、かんばん方式は、かんばん枚数やかんばんループの設定などその運用方法によって効果に大きな差異の出る方式である。そこで、かんばんの運用方法の最適化のために多くの研究がなされている[1][2][3]。それらの研究では、ある限定された条件においてかんばん枚数を最適化するなど、解析的な部分が大きく、前提条件や目的関数が多様である実際の生産現場では、かんばん方式の設計及び、日常的な改善活動を行っていくことは困難である。むしろ現時点の条件に合わせて生産システム設計者あるいは生産現場が主体的にかんばん運用方法について考え、運用方法の良し悪しを効率的に判断しながら決定していくことが重要であるといえる [4]。

1.2 研究目的

そこで、本研究においては、単に最適化を追求するのではなく、与えられた生産条件に対して、多面的にかんばん運用方法を検討できる環境を整えることが重要であると考え、従来のかんばん方式と、新しいアプローチであるループの多重設定による階層型かんばん方式等を考慮した、様々な方式を迅速且つ容易にシミュレーションできるシミュレータの開発を行う。そしてそのシミュレータを用い、実験を通じてシミュレータの有効性の確認を行い、かんばんループの多重化がシステムに及ぼす効果を明らかにする。

1.3 論文構成

本研究論文は全 5 章から構成されている。第 1 章では生産システムが抱える現状，そして研究目的について述べ，第 2 章では研究対象となるかんばん方式の特性，生産指示方式の違い，そして提案モデルである階層型かんばん方式の特性について述べる。第 3 章では本研究で開発したシミュレータのモデル化と実行フローについて述べる。そして，第 4 章では，構築したシミュレータを用いて実験を行い，その様子と結果を示す。最後に，第 5 章で本研究における結論を述べる。

第2章 かんばん方式の特性

本章ではまず、研究対象となるかんばん方式の特性を述べる。そして生産や運搬の指示に関係する実績情報とかんばん方式の関係について述べ、かんばん方式における指示の遅延の影響について述べる。そして提案モデルである階層型かんばん方式について述べる。

2.1 かんばん方式

2.1.1 かんばん方式のシステム

かんばん方式は、ジャストインタイム (Just in Time) 生産を実現する方式として創案された生産システムである[5]。これは必要なものを、必要な時、必要な量が把握できるのは後工程であるため、後工程が使った分だけを前工程に引取りに行き、前工程は引き取られた分だけを生産し、補充する生産システムである。システムの基本構成図を図2-1に示す。なお、製品および部品の置き場を在庫ロケと表記する。図に示すように、このシステムでは基本的に工程の前後に部品、または製品が在庫として構えられる。そして、その収容箱には1枚のかんばんが付けられ、このかんばんがシステムにおいて情報伝達・制御手段として用いられる。なお、かんばんは、工程間の生産指示に用いられる「生産指示かんばん」と、工場や企業間における納入指示に用いられる「引き取りかんばん」の2種類が存在する。(なお、本研究では直列の工程を対象としているため、以後の説明は前者のみとする。) また、これらのかんばんには、部品や製品名、数量などの情報が記載されている。

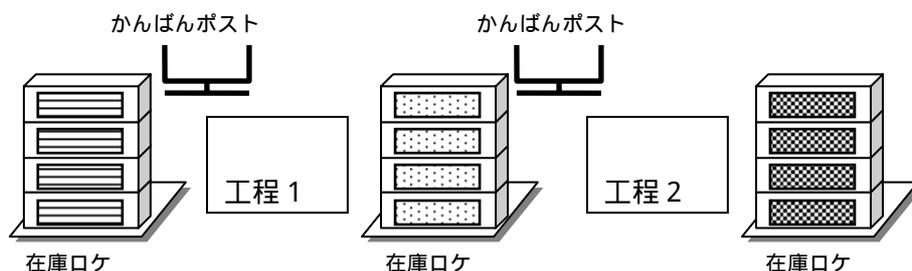


図 2-1 . かんばん方式の構成

2.1.2 かんばん方式の運用

かんばん方式の基本的な運用について図 2-2 に示す直列 2 工程をもとに説明する。かんばん方式は後工程引取りのため、後工程となる工場や企業が必要な量を図 2-2 中の在庫ロケより引き取る。そして、その際に収容箱に付けられていたかんばんが外され、工程 2 に振り出される。(a)

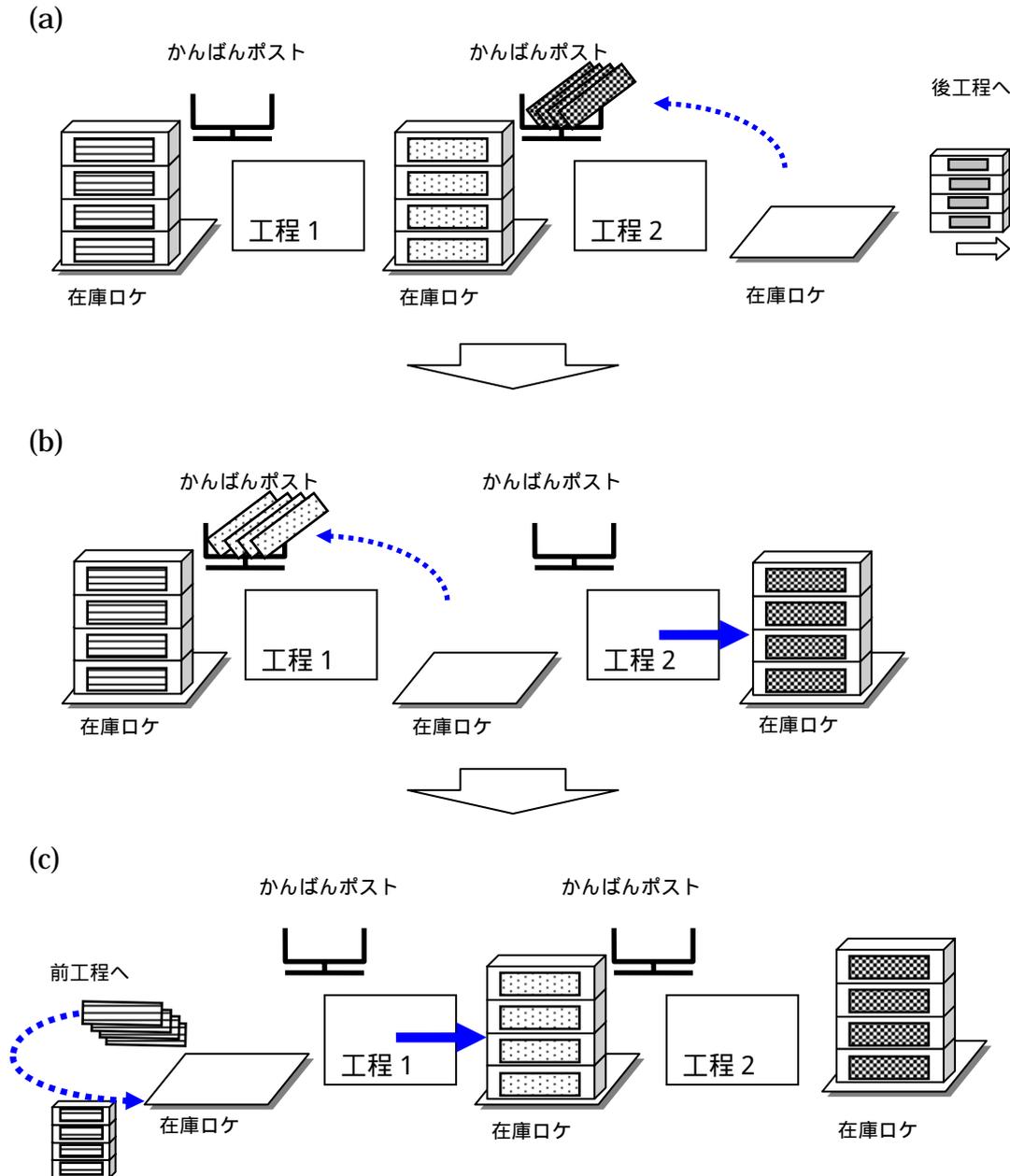


図 2-2 . かんばん方式運用

次に、工程 2 は振り出されたかんばんに記載された部品と数量だけを生産し、かんばんを付けて在庫ロケ に補充する。生産の際に使用した部品の収容箱に付けられたかんばんは前工程となる、工程 1 に振り出される (b)。かんばんを振り出された工程 1 は、かんばんに記載された情報に基づいて、生産、在庫ロケ に補充する。以後前工程が順にこの動作を繰り返す。このようにかんばん方式は最終工程からかんばんを用いて上流に需要が伝わり、そのかんばんに基づいて生産が行われていく。(c)

2.2 かんばん方式における指示遅延

前述のとおりかんばん方式は需要が生じて初めて生産や運搬の指示を行う方式で、需要を予測したり、見込みでは生産しない方式であるといえる。すなわち、かんばん方式は実績に基づき指示を行う方式であるといえる。実績に基づく指示はひとつの方式に限らず、指示に利用する他の実績情報によりいくつかの方式が考えられる。これらについては後述するが、かんばん方式はそのような実績に基づく指示方式の一種であるといえる^{[1][3][5]}。その指示方式の特徴は需要が到着してもすぐには指示をしないで、生産や運搬の処理が可能となるまで指示を遅延させる点にある。この特徴が様々な影響を与えられられることからこれを“指示遅延”とよび、ここでは生産や運搬の指示に関する実績情報とかんばん方式の関係について述べ、かんばん方式における指示遅延の影響について述べる。

2.2.1 かんばん方式における実績情報

多段階生産在庫システムにおける生産や運搬の指示に関する実績情報としては次の 3 種類の情報が考えられる。

1. 後続工程（市場）からの需要の到着
2. 前工程からの部品の供給
3. 当該工程が処理可能

かんばん方式はこの 3 種類の実績情報を次のように利用する方式である。図 2-3 にかんばん方式における実績情報と指示の関係を示す。

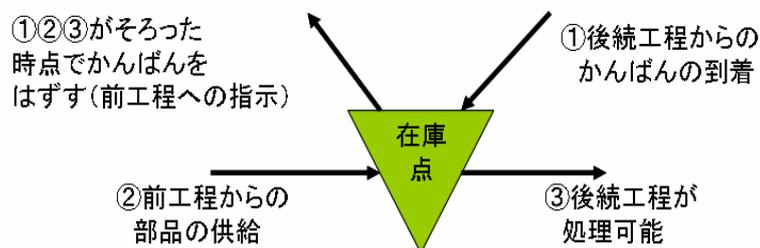


図 2-3 . かんばん方式における実績情報と指示の関係

図 2-3 に示したとおり、かんばん方式では後続工程からかんばんが到着し、そのかんばんに示された生産や運搬に必要な部品が供給され、当該工程で生産や運搬の処理が可能となった時点で生産や運搬が開始されるが、その際に部品からかんばんをはずし、前工程に指示を伝える。すなわちかんばん方式ではこれら 3 種類すべての実績情報により、当該工程での処理が可能となってから初めて指示を行う方式であるといえる。

2.2.2 かんばん方式における指示遅延の影響

かんばん方式では需要が到着しても前工程からの部品の供給の遅れ，当該工程が生産中の時点等では指示は遅延することになる．さらにかんばん方式では最終工程から逐次生産指示を伝える方式（pull 型生産）であるから，ある工程での遅延はその工程以前の全ての工程の遅延にもつながる．このことがもたらす影響を図 2-4 に示す．

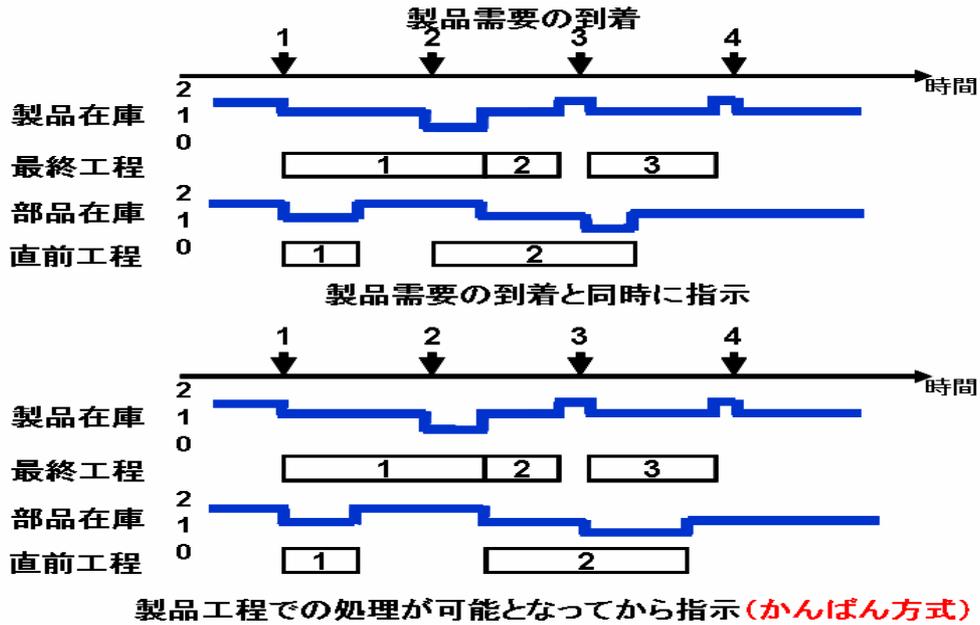


図 2-4．生産指示遅延の影響

図 2-4 は到着した製品需要に対する最終工程とその直前工程での生産の状況，および製品在庫と部品在庫の推移を示している．製品や部品の初期在庫はそれぞれ 2 としている．また，簡単のために工程間の運搬は省略している．図をみると，かんばん方式（下）は当該工程の処理が可能となってから生産指示を行うため第 2 番目の製品の生産は遅延している．その結果は，この場合は部品在庫に現れ，指示が遅延している間の部品在庫が 1 少なくなっている．すなわち，かんばん方式による指示の遅延は生産や運搬を遅らせることにより在庫の削減につながっている．

ところが、各在庫点の初期在庫を減らすとこれとは異なる影響を及ぼす。図 2-5 には初期在庫をそれぞれ 1 とした場合を示す。

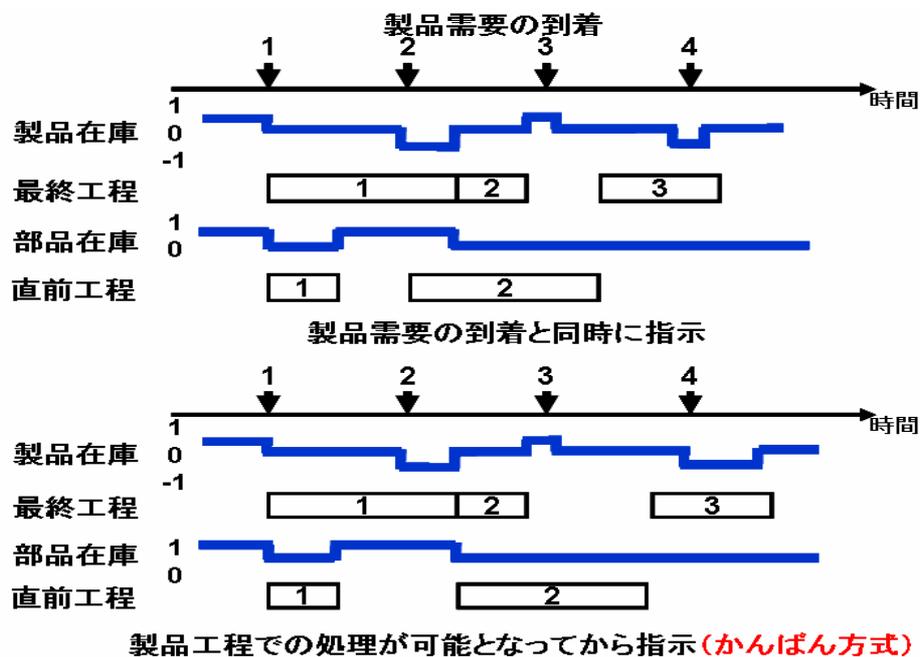


図 2-5 . 初期在庫が 1 の場合

図 2-5 を見ると、部品在庫等がなくなってしまう時点などでは需要が到着していても前工程の処理が終わらないので生産が遅れ、指示が遅延した時間だけ需要の待ち時間になってしまう場合があることがわかる。

以上より、かんばん方式の指示遅延は、過剰な生産や運搬を防ぎ、各在庫点の在庫量を削減する働きを持つと同時に、初期在庫の設定によっては需要の待ち時間の増加にもつながってしまうことがわかる。したがってかんばん方式の指示遅延を検討する際は在庫量と需要の待ち時間の双方を問題にする必要がある。

2.3 指示方式のモデル

ここではかんばん方式と、かんばん方式とは異なる実績情報を用いた生産指示を行う方式として、CONWIP方式と階層型かんばん方式にふれ、それぞれの生産指示の特徴について述べる。

2.3.1 かんばん方式

かんばん方式の生産指示の特徴はこれまでに数々ふれてきたが、ここでは他の方式と比較するために生産指示の特徴を整理してみる。図 2-6 はかんばん方式の直列 3 工程からなるかんばん方式の生産指示のループ、生産指示時点を示したものである。

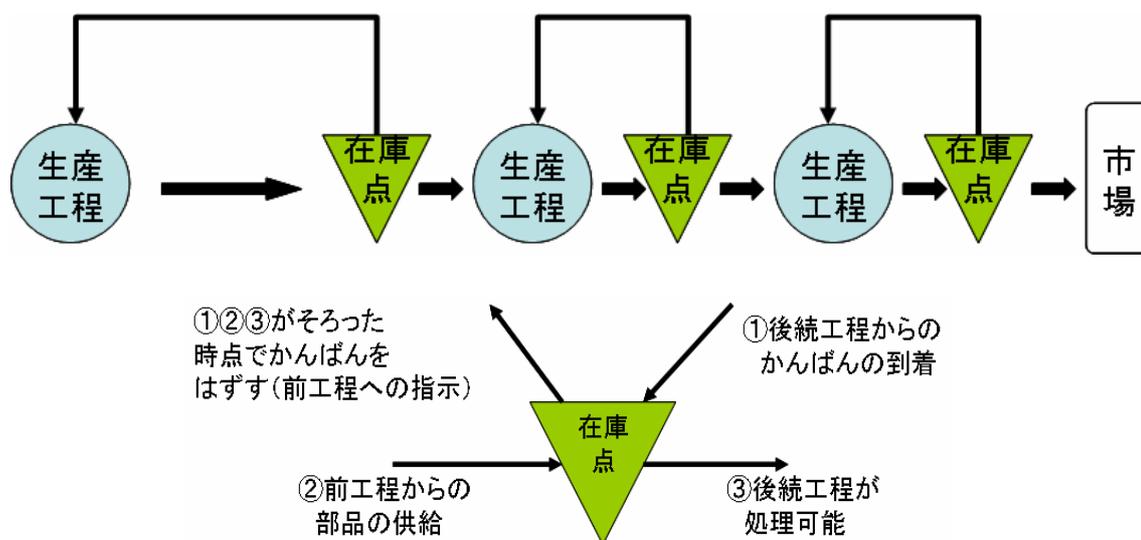


図 2-6 . かんばん方式の生産指示

図 2-6 からわかるようにかんばん方式では、
、
、
の全ての実績情報が揃ってから、直前工程に生産の指示が行われる。当該工程が処理可能となるまで生産指示を遅らせることから、指示遅延が起こることがわかる。また、かんばん枚数によって各工程の最大仕掛量を調整することができる。この指示の遅延を起こさないプル型の生産指示方式として Spearman らによって CONWIP 方式が提案され^[5]、しばしばかんばん方式との比較がなされている。次にこの CONWIP 方式について詳しく述べる。

2.3.2 CONWIP 方式

CONWIP 方式では需要が到着して製品在庫によって満たされると、それを契機に最初の処理工程に処理の指示がされる。それ以降の工程は上流側の工程から処理されて品目が送られ、その処理が可能となった時点で処理を行う。この方式では看板方式のように各工程に対して指示が行われることはない。看板方式に対して CONWIP 方式は図 2-7 のように示される。

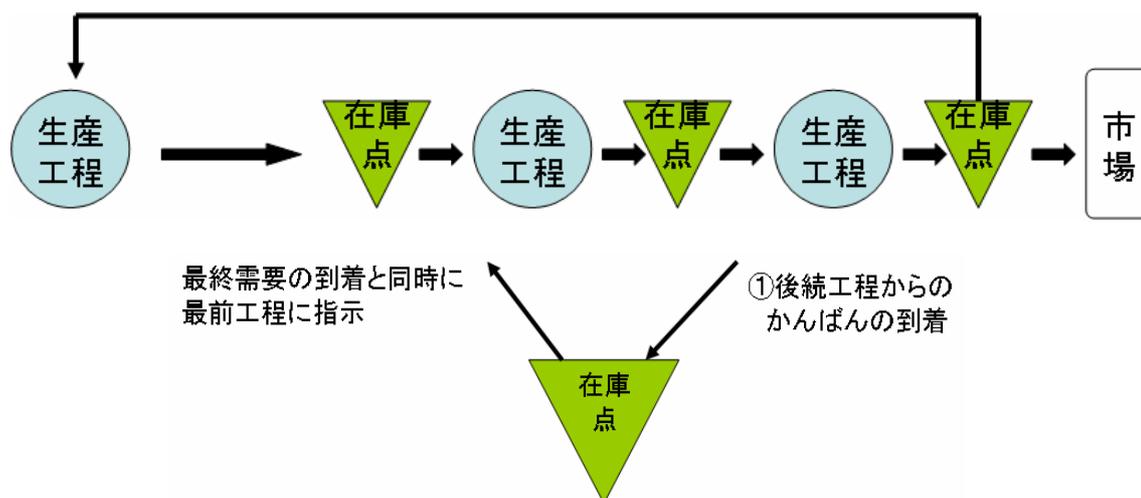


図 2-7 . CONWIP 方式

図 2-7 からわかるように CONWIP 方式は多段階生産工程を単一工程とみなした 1 つのループで制御している。この方式では、工程ごとにかんばんループを持つ従来の方式に比べて、総看板枚数が等しいという条件の下で、より高いシステム生産率を達成できるといわれている。しかし CONWIP 方式では全ての在庫点にかんばん枚数相当分の在庫スペースが必要である、多くの工場にとって在庫スペースの確保は容易ではなく、必要でないスペースは持つべきではないと考えるのが普通である。

2.3.3 階層型かんばん方式

階層型かんばん方式は多段階生産工程の制御に用いるかんばんループを多重化し、最大仕掛在庫量と総在庫スペースの調整を可能とするために考案されたシステムである[3]。この方式の基本概念は、前述したかんばん方式と CONWIP 方式の利点を結合することであり、効果が期待される。図 2-8 にこの方式の制御方法を示す。

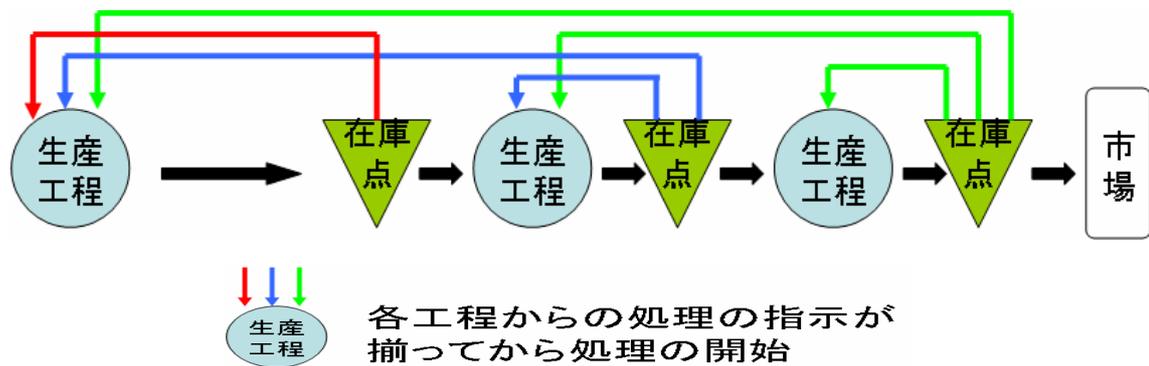


図 2-8 . 階層型かんばん方式

各工程からの処理の指示（かんばん）が到着しない限り処理に着手しないことから、前倒しの処理がなくなり、仕掛在庫の減少が起こり、また前工程は自身より全ての後工程から指示（かんばん）が到着することから、後工程の処理の状況、故障、停滞等の情報を自立的に把握することができる。ここでは生産指示の時点に注目したが、次に階層型かんばんシステムの構造を解析していく。

2.4 階層型かんばん方式によるかんばん制御

2.4.1 階層型かんばんシステムモデルの定義

ここでは 2 段階直列工程を例に，多段階生産工程の階層型かんばん制御システムを定義する．図 2-9 は 2 段階生産工程の階層型かんばん制御システムの概念図である．

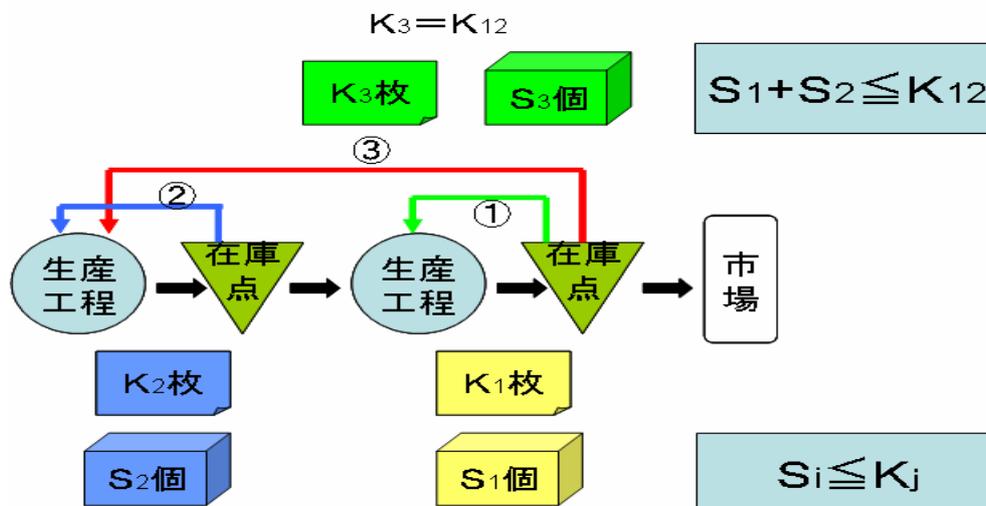


図 2-9 . 2 段階生産工程の階層型かんばん制御システムの概念図

一般に n 段階の生産工程の場合では $n(n+1)/2$ 通りのかんばんループが設定可能であるから，2 段階生産工程の場合 3 通りのかんばんループを持つ．ループ i はそれぞれステージ i のものの流れと，仕掛在庫を制御している．ループ i のかんばん枚数をそれぞれ K_1, K_2 であらわす．このとき仕掛在庫量 S は $S \leq K$ で制約される．これはかんばん方式と同じで，各々のループは独立していることから，システム全体での総仕掛在庫の最大値は $K_1 + K_2$ になる．したがって工程が多段になるにつれ，格段のかんばん枚数が累積され，仕掛在庫量が増大することになる．これに対し，ループ 3 はシステム全体の仕掛在庫量を制約する．このループ 3 のかんばん枚数を K_{12} とあらわす．このときシステム全体での総仕掛在庫量は $S_1 + S_2 \leq K_{12}$ で制約される．CONWIP 方式は，このループ 3 のかんばんのみによって制御する方式である． $K_{12} = K_1 + K_2$ として，かんばん方式と，CONWIP 方式を比較すると，CONWIP 方式のほうが高い生産率を達成することができる．しかしこの場合は全ての在庫点にかんばん枚数 K_{12} に相当する在庫保管スペースが必要になってしまう．そこで，階層型かんばん制御システムでは，これら 3 通りのループを同時に用いる多重のループによって，この問題点を解消しようとするものである．

2.4.2 階層型かんばん制御システムの構造解析

2段階生産工程を例に,仕掛在庫空間に着目して階層型かんばん制御システムの構造を解析する. 図 2-10 は2段階生産工程の階層型かんばん制御システムにおける仕掛在庫の状態空間(S_1, S_2)を示したものである.

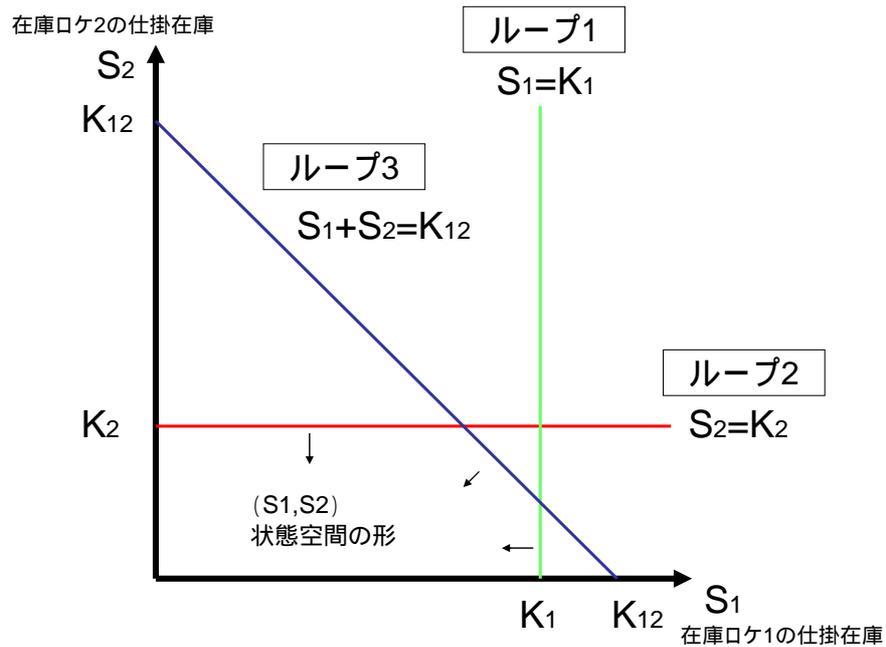


図 2-10 . 仕掛在庫の状態空間

ステージ のかんばん枚数 K_1 により,仕掛在庫量 S_1 は直線 $S_1 = K_1$ の左側に制限される. 同様に S_2 は直線 $S_2 = K_2$ の下側に制限される. さらに工程 1 と工程 2 を含有するループ のかんばん枚数 K_{12} によって総仕掛在庫量 $S_1 + S_2$ は直線 $S_1 + S_2 = K_{12}$ の下側に制限される. この状態空間の形状は, 3つのループ, , のかんばん枚数によって変化する. この形状は 5 タイプに分類され, その様子を表 2-11 に表す.

表 2-11 . 階層型かんばん制御システムの構造

| タイプ | ループ | 状態空間の形 | 最大在庫 | 総在庫スペース | 従来の研究 |
|-----|-----|---|-----------|--------------|----------|
| 1 | 001 |  | K_{12} | $2K_{12}$ | CONWIP方式 |
| 2 | 011 |  | K_{12} | K_1+K_{12} | |
| 3 | 101 |  | K_{12} | K_1+K_{12} | |
| 4 | 111 |  | K_{12} | K_1+K_2 | |
| 5 | 110 |  | K_1+K_2 | K_1+K_2 | かんばん方式 |

表中のループ L_1 , L_2 , L_3 は各々かんばん枚数の設定により , そのかんばんループが機能する場合を 1 , 機能しない場合を 0 で示している . たとえばタイプ 1 の 001 はループ L_1 のみをもつ CONWIP 方式に相当する . このとき仕掛在庫の状態空間の形状は三角形である . かんばん方式はタイプ 5 に相当し , ループ L_1 , L_2 をもち , ループ L_3 をもたない . このとき仕掛在庫の状態空間の形状は長方形である . これに対し , 3 つのループ全てが機能しているタイプ 4 では , それが状態空間の形状に反映し , 在庫スペースを K_1 と K_2 , 最大在庫量を K_{12} で制御できることがわかる .

第3章 シミュレータ

本研究では前述した生産システムの評価をシミュレーションにて実施するため、各システムをモデル化し、シミュレータの開発を行った。本章ではまず、シミュレータの概要、各生産システムの要素の決定、実行フローを示し、最後に完成したシミュレータの実行及び、実行画面等の表示を示す。

3.1 シミュレータ概要

3.1.1 開発環境

本シミュレータは以下のような環境で開発を行った。

- ・ Microsoft Windows XP Professional
- ・ Microsoft Office Excel 2003
- ・ Microsoft Visual Basic.NET

Microsoft Visual Basic.NET を用いてシミュレータを開発した。Excel 上で各生産システムの要素を決定しているため、簡易ながら汎用的に使用しやすいものになっている。開発したシミュレータは図 3-1 のようなフローで実行される。

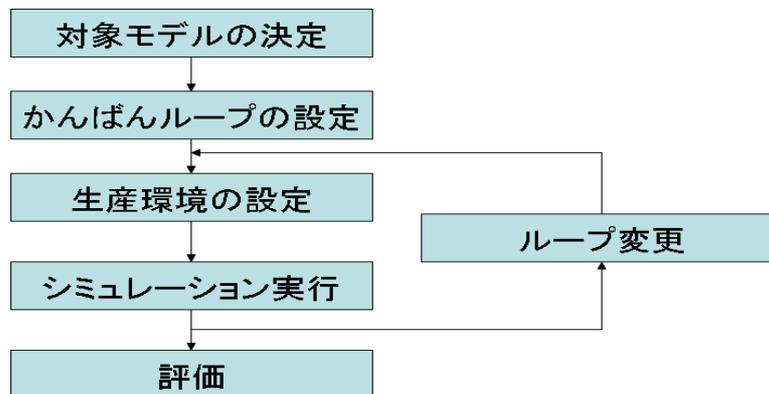


図 3-1 . シミュレーション実行フロー

3.1.2 シミュレータの特徴

また、開発したシミュレータの特徴として以下のような点が挙げられる。

- ・ Excel 上に表現されているため、様々なデータの読み込みや出力が簡単に行える。機能を随時追加することができ、より詳細なシステムにも対応可能である。
- ・ 各生産システム要素の設定が容易に行うことができる。
- ・ 入力させる需要情報等を、様々なパターンで計算し、取り込むことができる。また各工程等が独自に属性値を持つことができ様々な工程の表現が可能である。
- ・ シミュレーション実行状況（かんばんポスト内枚数、かんばん移動、工程稼働状況、在庫数等）が、ビジュアルで確認可能である。
- ・ 実行後の結果のデータ（システム内平均在庫等）や、システムの状態推移（稼働状況、在庫推移、かんばん情報等）の出力値の編集が容易に行うことができる（図 3-2）。また、このような機能を充実させている。これにより、システムを評価する際の作業が簡素化されている。

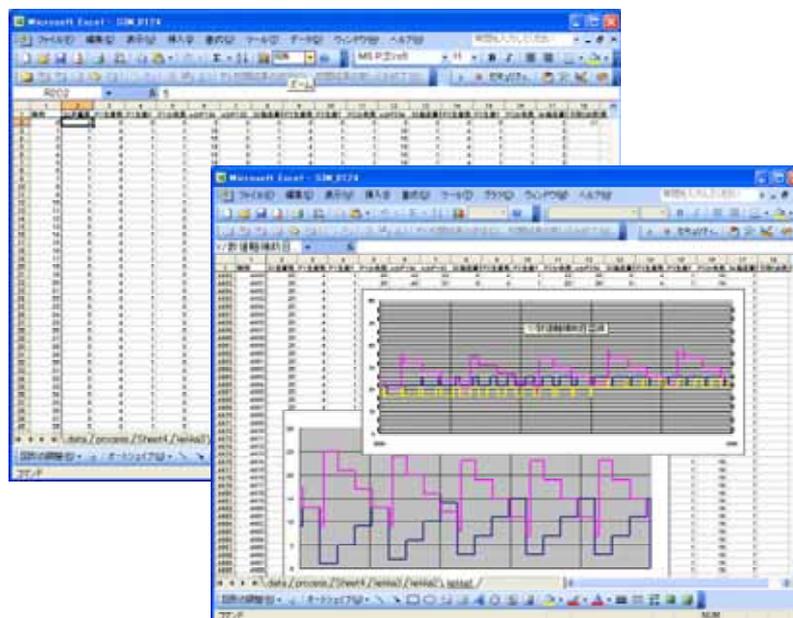


図 3-2．実行結果の出力等

3.2 生産システム要素決定

シミュレータの開発にあたり，生産システムを構成する各要素について説明する．かんばん方式等の生産方式のフローに関しては，第2章で説明したとおりである．開発したシミュレータでは，7つの要素から生産システムが構築されている．この7つの要素をオブジェクトとして定義すると，その構成，機能は以下のようになり，必要に応じて組み合わせでシミュレーションを実行する．

(1) 工程オブジェクト

工程オブジェクトは，対象となるモデルの生産ラインにおける生産機能をモデル化している．使用する部品とかんばんを引き取り，工程上にて加工し，次に接続される在庫ロケにかんばんをつけて部品を出力する．シミュレータ上で稼働状況を色で表現することができ，また総稼働時間を同時に出力することができる．また，稼働実績を結果として出力することが可能である．初期設定において生産処理時間，生産ロットサイズを設定することができるため様々な生産状況を実験することができる．

(2) 在庫ロケ(ストア)オブジェクト

在庫ロケオブジェクトは対象となるモデルの在庫管理に関する機能をモデル化している．前工程からかんばんのついた処理済の部品を引き取り（最前工程の場合はシステム外から），在庫として在庫ロケに累積させる．また，かんばんによる引き取り指示があった場合には後工程に部品として納入する．シミュレータ上で在庫累積情報，平均在庫量を出力することができ，これらの実績を時間を追って結果データとして出力することができる．初期設定において在庫ロケ内の在庫初期値を設定可能であるので，様々な在庫状況で実験を行うことができる．

(3) かんばんオブジェクト

かんばんオブジェクトは生産システム内で使用されるかんばんをモデル化している。かんばんの運搬時間を設定することができ、また指定されたループを生産指示、在庫管理のために移動する。今回のシミュレータの特徴である多段階のループを移動するかんばんは、電子かんばんとしての処理を想定しており、通常のかんばんとは別に、かんばんの移動時間を 0 から設定可能にしてある。

(4) かんばんポストオブジェクト

かんばんポストオブジェクトは対象となるモデルのかんばん制御に関する機能をモデル化している。かんばんの引取りを行い、かんばんを累計し、指定されたロットサイズにまとめ、かんばんを振り出す。シミュレータ上でかんばんの累計数、平均数、滞留時間を出力し、これらの実績を時間を追って結果データとして出力することができる。初期設定時にかんばん枚数、かんばんロットサイズを設定可能であるから、様々な状況に対応できるものとなっている。また、多段階のループを行く電子かんばんは、電子かんばんポストとして情報のやり取りのみを行うことも可能である。

(5) 部品オブジェクト

部品オブジェクトは生産システム内で加工され、製品となって出荷されるものをモデル化している。工程内では加工品となり、在庫口ケでは在庫として、出荷時には製品として表現されている。システム内に部品オブジェクトがいくつ滞留しているかを表現できるようになっている。

(6) 出荷オブジェクト

出荷オブジェクトは最終在庫口ケにある製品を、あらかじめ設定された確定需要のタイミングに合わせて、システム外へ出荷する機能を表現したオブジェクトである。需要のくる時刻に最終在庫口ケに製品がなかった場合、需要待ち状態になり、出荷を遅らせる機能も有する。この機能によって、かんばん方式で問題になっている、需要の待ち時間を表現することができる。またこの様子をシミュレータ上に出力する機能も持つ。シミュレーション時間中にシステム外へどれだけ製品を出荷できたかを出力することができる。

(7) 入荷オブジェクト

入荷オブジェクトは生産システム外から部品を入荷する機能をモデル化したオブジェクトである。最前在庫口から部品が引き取られ次第すぐに納入するか、また一定時間経過した後、または決まった時刻に納入するかを選択することによって欠品0状態でのシミュレーション評価もできるようになっている。またシミュレーション時間内にシステム内へどれだけ部品が納入されたかを出力することができる。

3.3 実行フロー

本研究で開発したシミュレータの実行状態の流れについてフローチャートで示す。四角形は処理を，ひし形は判断を，三分割の四角形は定義済み処理を表す。

入出力フロー

本シミュレータは，図 3-3 に示すようにユーザーが評価データ（シミュレーション時間，評価時間），生産データ（工程生産時間，ロットサイズ），かんばんデータ（かんばんループ，かんばん枚数，運搬時間），需要データ等を入力してシミュレーションを実行する。そして設定された時間が終了した後，シミュレーションは自動的に終了し，結果データを Excel 上の指定したファイルに出力される。

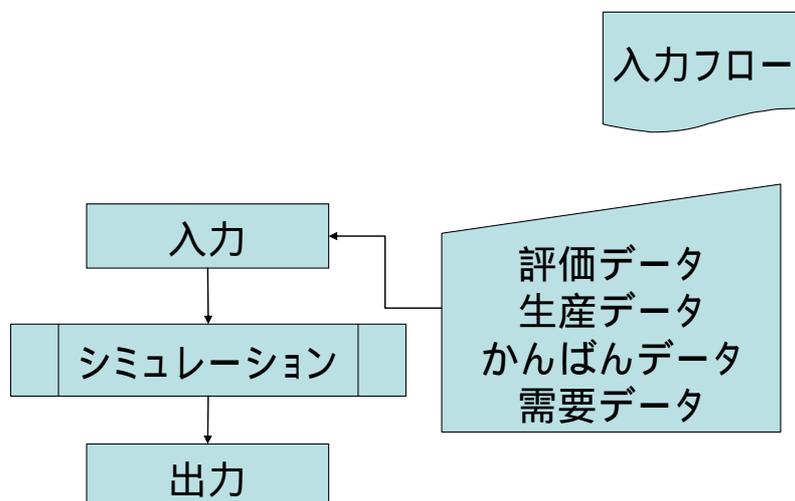


図 3-3 . 入出力フロー

実行フロー

シミュレーション実行中の主な内部の流れは、図 3-4 のようになる。まず、各工程、かんばんポスト等の設置が行われる。次に先ほどの入出力フローで入力したデータから評価、生産、かんばんデータを読み込み、続いて需要データを読み込む。そして、最終の在庫口ケ、および工程の処理が行われ、順次前工程にロケーションを変更し、先頭工程が終了後、先頭在庫口ケの処理を行う。そしてシミュレーション終了時間に達していない場合は、時間を更新し、再度工程、および在庫口ケの処理を行う。シミュレーション終了時間に達した場合は、シミュレーションを終了する。

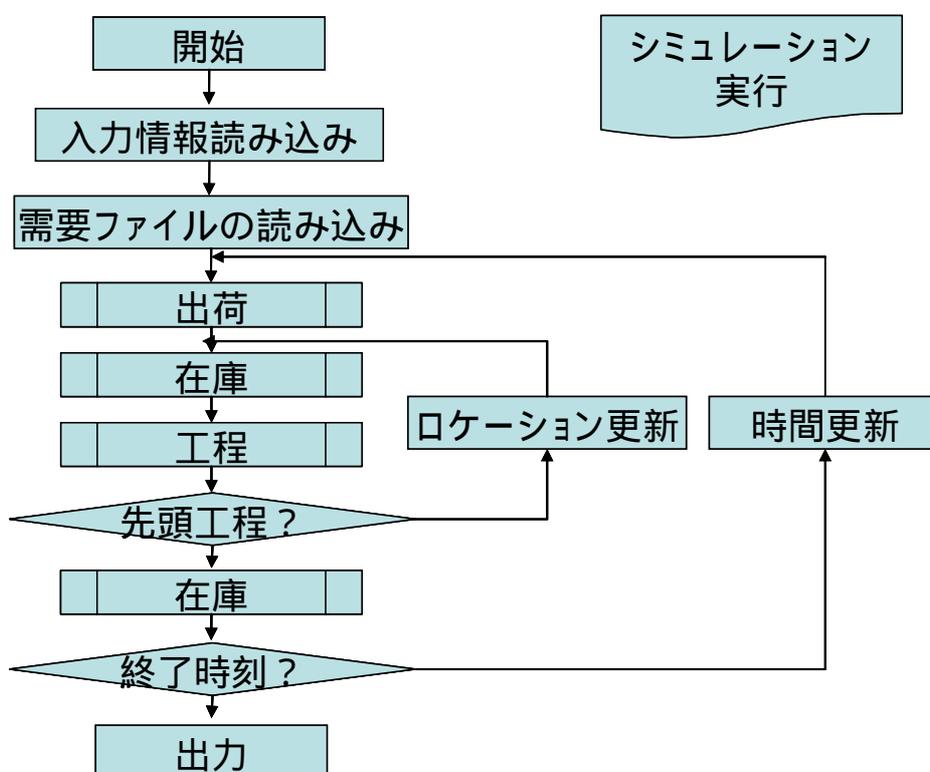


図 3-4 . 実行フロー

出荷フロー

出荷フローでは、事前に読み込んだ確定需要のタイミングに合わせて出荷処理を行う。図 3-5 に示すように現在時間が出荷時間になった際に、最終在庫ロケに出荷情報(時間,数)を渡し、出荷を行う。そして、次回の出荷情報を取得し、処理を終了する。現在時刻が出荷時刻に一致しない場合は、処理は行われない。

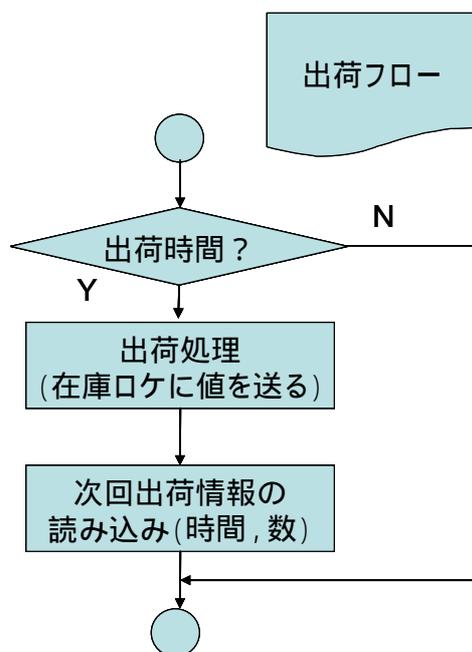


図 3-5 . 出荷フロー

在庫フロー

在庫フローでは、納入、引取りの指示があった場合のみ図 3-6 に示すように処理が行われる。まず納入処理、そして引取処理が行われ、滞留している在庫数を計算し終了する。納入、引取りがない場合は処理は行われない。

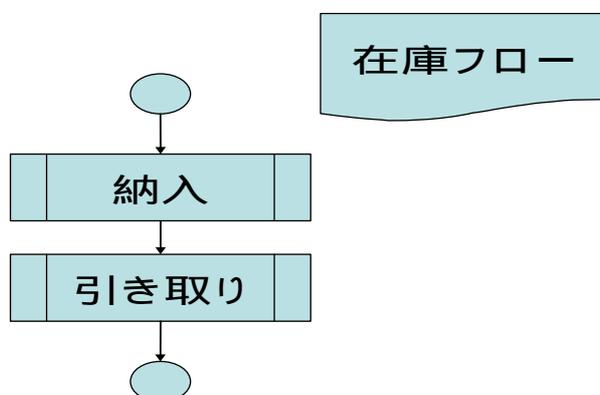


図 3-6 . 在庫フロー

納入フロー

納入フローでは図 3-7 に示すように、現在時刻が納入時間になった際に、在庫データの更新の処理が行われる。現在時刻が納入時間と一致しない場合は、処理が行われない。

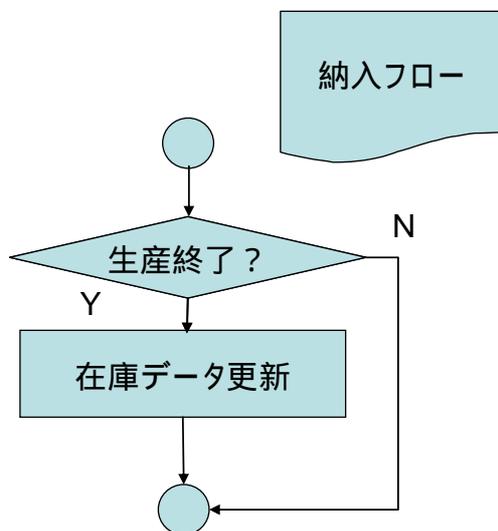


図 3-7 . 納入フロー

引取フロー

引取フローでは、図 3-8 に示すように、現在時刻が引取時間になった際に、引取数に合わせて在庫データを更新する。その後、引き取られた数に合わせて、前工程に対してかんばんの振り出し処理が行われ、終了する。なお、現在時刻が引取時間に一致しない場合は、処理は行なわれない。

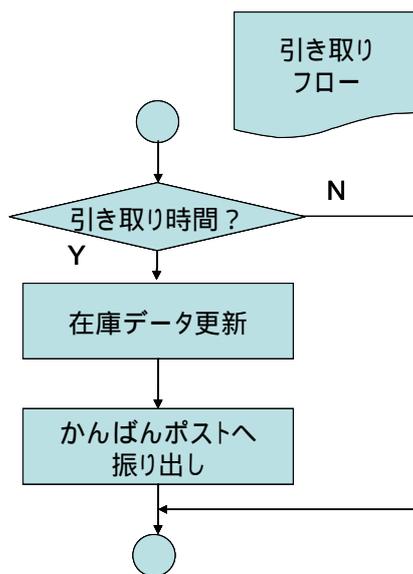


図 3-8 . 引き取りフロー

かんばんポスト判断フロー

かんばんポスト判断フローは図 3-9 に示すように、まず在庫ロケからかんばんが振り出されたかどうかを判断する。そしてかんばんの蓄積枚数を更新し、その枚数が指定されたロットサイズより大きければ、指定されたループにかんばんを振り出す。その際にかんばんの移動時間を考慮、計算し、生産指示へ枚数、時刻を更新する。

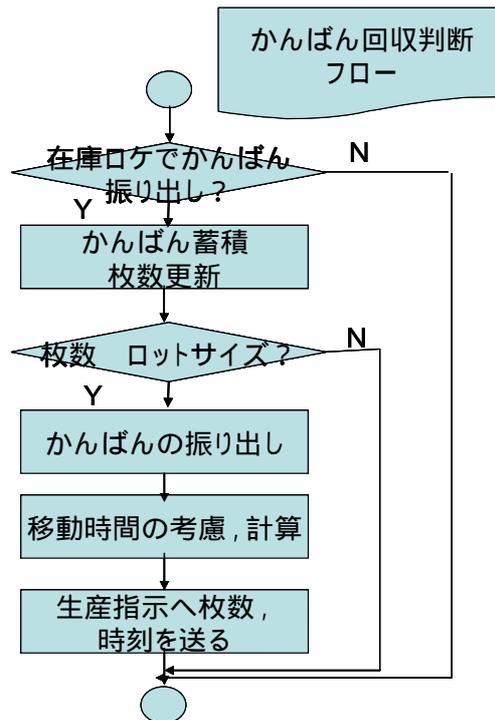


図 3-9 . かんばんポスト判断フロー

生産指示フロー

生産指示フローでは，図 3-10 に示すように，まず指定されたルート全てからかんぱんが到着しているかを判断する．そしてライン稼働状況を確認して停止中の場合，ロットサイズが設定されており，かんぱん枚数がロット形成枚数以上，またはロットサイズが設定されておらず（生産ロットサイズ 0 の場合），かんぱん枚数が 0 以外で，且つ，前工程在庫ロケに在庫がある場合に限り生産が開始される．生産開始の際は，生産稼働フラグ切替，引取かんぱん減枚，生産終了時間算出といった処理が行なわれる．

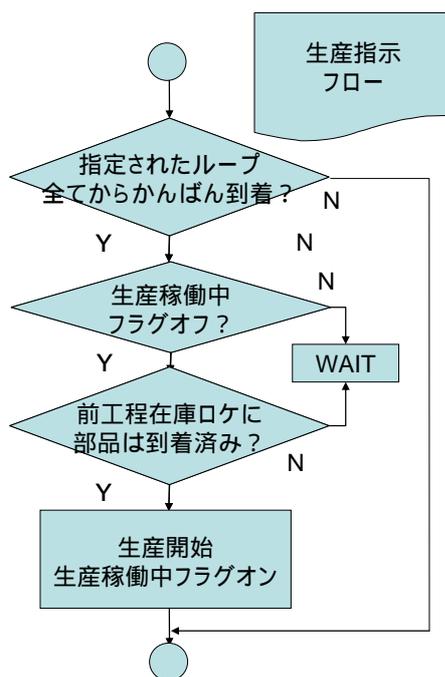


図 3-10 . 生産指示フロー

生産完了フロー

生産完了フローは図 3-11 に示すように、現在時刻が生産終了時刻になった際に、生産データの初期化（稼働フラグの切替、生産時間など）を行う。そして次に続く在庫口ケへ部品を送る処理を行う。

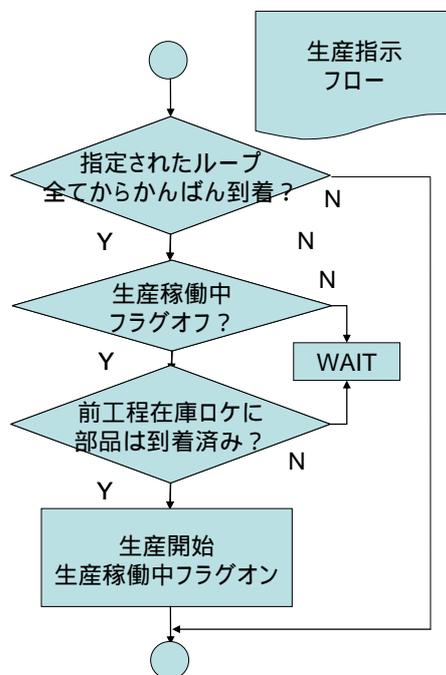


図 3-11 . 生産完了フロー

データ出力、処理フロー

データ出力、処理フローはシミュレーション終了後、結果データを Excel 上の指定されたファイルに出力を行う。グラフ作成の作成が必要な場合は、シミュレーション終了後にデータ処理画面から指定されたグラフの作成を自動的に行う。

3.4 実行表示

シミュレーションの実行は図 3-12 に示す画面にて表示される。またシミュレータの操作も画面上にて可能となっている。データ入力には図 3-13 に示すフォームから行われる。

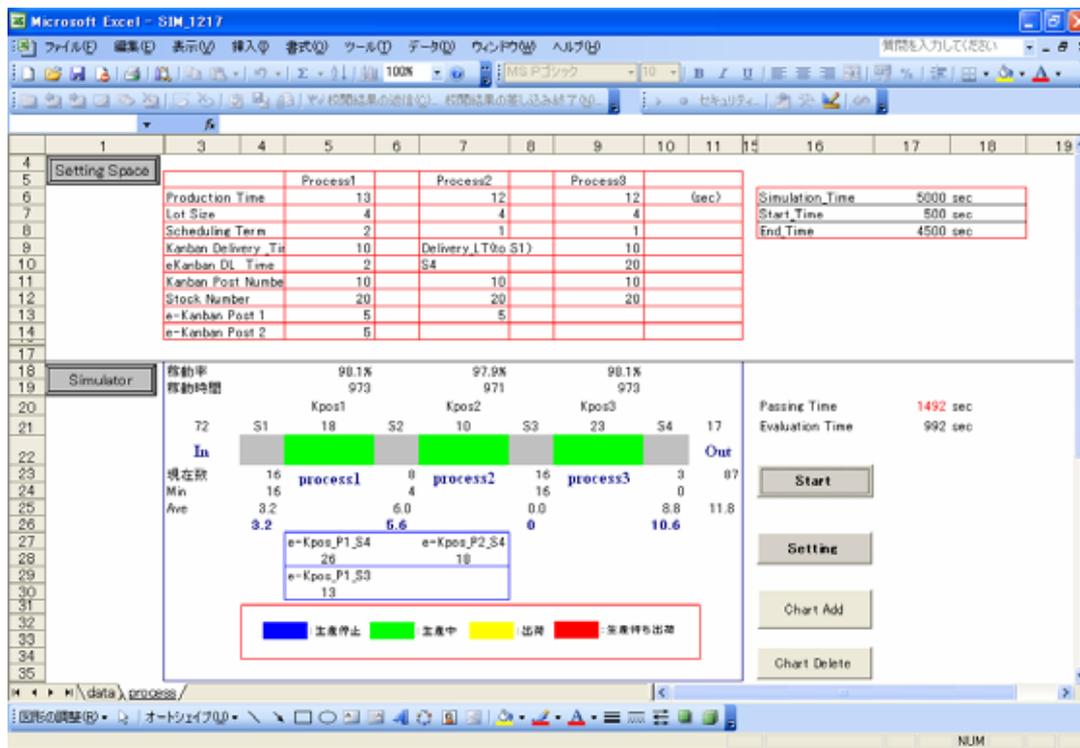


図 3-12 . シミュレータ実行状況

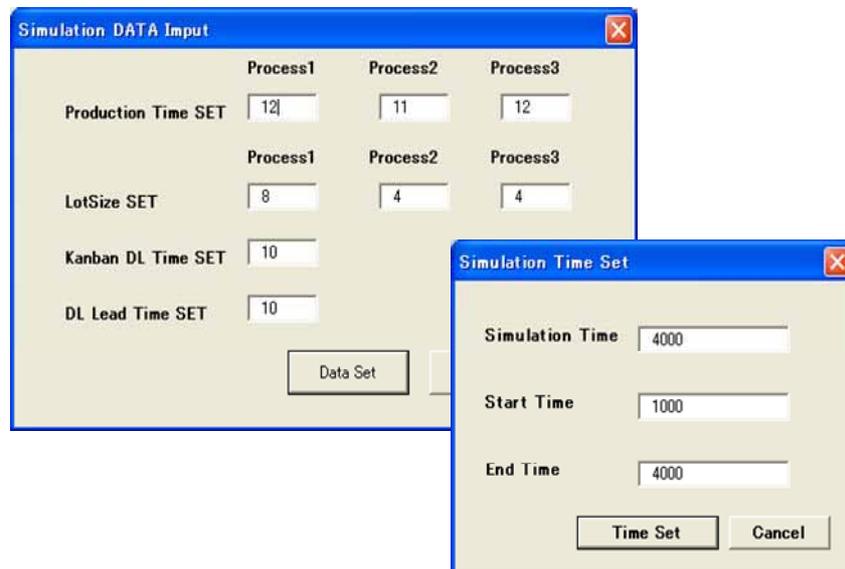


図 3-13 . 入力画面

シミュレータ画面上部がシミュレーション条件の設定部分である。この箇所に工程数やかんばんデータや生産データ等を入力されシミュレーションを実行する。そしてシミュレータの画面下部が実行状況を表示しており、この画面においてシミュレーション状況が視覚的に確認することが可能となっている。工程、および出荷は稼動状況が色（生産中：緑，出荷中：黄色，停止中：青，需要待ち中：赤）で表現される。また、各工程のかんばんの枚数や在庫数、そしてシミュレーション評価時間内の平均、最小在庫数等を実行状況に合わせ確認ができ、シミュレーションの実行状況が視覚的に確認可能となっている。

第4章 実験

本章では提案するモデルを検討するため、開発したシミュレータを用いて、数値実験を行う。

4.1 実験環境

本シミュレータは以下のような環境で実験を行った。

- ・ Microsoft Windows XP Professional
- ・ Microsoft Office Excel 2003
- ・ Microsoft Visual Basic.NET

4.2 実験モデル

本実験では図 4-1 に示すように、直列 3 段階連続工程を対象モデルとする。図では対角線つき四角形は在庫口ケを表現し、四角形は工程を表現している。また、長方形は看板ポストを表現している。このモデルの条件を下記に示す。

条件

- (1) 生産可能製品は単一品種とする。
- (2) 生産工程は上流工程（図左側）より工程 1，工程 2，工程 3 とする。
- (3) 在庫口ケは上流の口ケより在庫口ケ 1，在庫口ケ 2，在庫口ケ 3，在庫口ケ 4 とする。
- (4) 生産時間は各工程単位にて固定される。
- (5) 工程から在庫口ケへの運搬時間は，前工程の生産時間に含まれる。
- (6) 製品需要は確定需要を用いる。
- (7) 看板は通常のかんばん方式のかんばんと，電子看板としての情報を両方同時に取り扱うことができる。

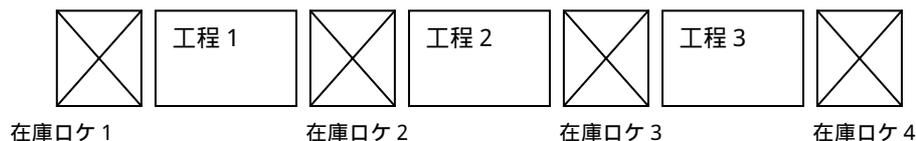


図 4-1 . 実験対象モデル

上記工程にて評価するに当たり、実験では図 4-2、図 4-3 に示すように通常の単一ループのかんばんのみで制御されるかんばん方式、また、多重のループとかんばんによって制御される階層型かんばん方式の二種を評価対象とした。

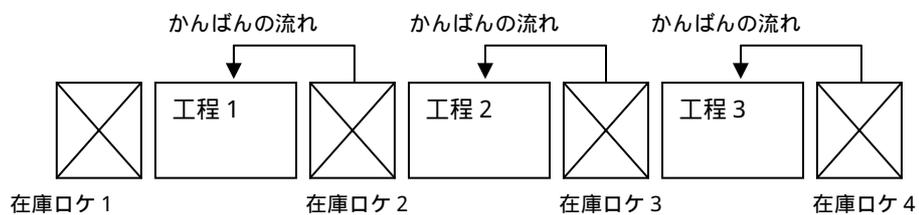


図 4-2 . かんばん方式の実験対象モデル

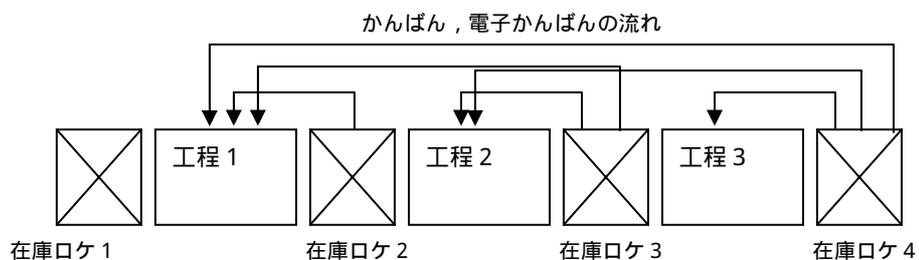


図 4-3 . 階層型かんばん方式の実験対象モデル

4.3 評価指標

評価指標としてシステム内の各在庫点の平均在庫量 (S_n) の総計である総在庫スペース (S) とし、式 (4-1) を用いる。(ただし、最前在庫口ケである S_1 は評価から除くこととする。)

$$S = \sum_{n=2}^4 \{ Ave(S_n) \} \quad (4-1)$$

また、システム内の総仕掛在庫量の最大値として $W(\max)$ とし、かんばん方式を式(4-2)、階層型かんばん方式を式(4-3)とする。K はかんばん枚数、n は各ループの値。

$$W(\max) = \sum_{n=1}^3 (K_n) \quad (4-2)$$

$$W(\max) = K_{123} \quad (4-3)$$

各工程の稼働率を P_n とし、工程全体の稼働率 P を式 (4-4) にあかわす。T はシミュレーション時間。

$$P = \frac{P_n}{T} \times 100 \quad (4-4)$$

また実験では、これらに挙げたかんばん方式と階層型かんばん方式の特性を比較する指標とは別に、本シミュレータの特徴である多重のループ制御によって、生産指示の遅延がどの様に起こっていくのかを検証していく。

4.4 実験条件

本実験の条件は以下の通りである。

かんばん方式

- (1) 需要：需要は正規分布の確率変数に従う。到着間隔は 200 秒
- (2) シミュレーション時間：5000 秒（ただし，評価対象時間外となる前後 500 秒は除く）
- (3) 生産能力：第 1 工程 12（秒/個），第 2 工程 11（秒/個），第 3 工程 11（秒/個）
- (4) 生産ロットサイズ：第 1 工程 8（個），第 2 工程 4（個），第 3 工程 4（個）
- (5) 初期在庫数：在庫口ケ 16（個），在庫口ケ 8（個），在庫口ケ 8（個），在庫口ケ 20（個）
- (6) 初期かんばん枚数：第 1 工程 8（枚），第 2 工程 4（枚），第 3 工程 4（枚）
- (7) かんばんループ：通常の単一ループ
- (8) かんばん運搬時間：各工程 10 秒

階層型かんばん方式

- (1) 需要：需要は正規分布の確率変数に従う。到着間隔は 200 秒
- (2) シミュレーション時間：5000 秒（ただし，評価対象時間外となる前後 500 秒は除く）
- (3) 生産能力：第 1 工程 12（秒/個），第 2 工程 11（秒/個），第 3 工程 11（秒/個）
- (4) 生産ロットサイズ：第 1 工程 8（個），第 2 工程 4（個），第 3 工程 4（個）
- (5) 初期在庫数：在庫口ケ 16（個），在庫口ケ 8（個），在庫口ケ 8（個），在庫口ケ 20（個）
- (6) 初期かんばん枚数：第 1 工程 8（枚），第 2 工程 4（枚），第 3 工程 4（枚），電子かんばんは 0 枚
- (7) かんばんループ：多重のループ
- (8) かんばん運搬時間：通常のかんばんは 10 秒（自工程の直前工程振り出し分），それ以外の電子かんばんは 1 秒

条件(1)の需要に関しては、条件に合わせ事前に準備した需要データを用いてシミュレーションを行った。(2)のシミュレーション時間に関しては、初期、末期削除時間として500秒をシミュレーション時間の前後から削除している。(4)の生産ロットサイズに合わせてその2倍の数を初期在庫として(5)に計上している。初期かんばん枚数は生産ロットサイズに合わせて(6)のようになっている。(8)のかんばんの運搬時間は通常のかんばんに比べ電子かんばんははるかに早いということで1秒としている。情報のやり取りの時間を表す。

4.5 実験

前述した実験条件に基づいて、対象となる生産システムであるかんばん方式及び階層型かんばん方式について、同一の需要情報を用いて生産を行う場合を想定して実験を行った。実験ではなるべく需要の待ち時間がないように最終在庫口には 20 個の初期在庫を持たせている。また多重のループによる生産指示の遅延がより顕著に現れるように、電子かんばんの初期値は 0 枚としている。この実験で得られた両生産方式の実行結果の一覧を表 4-1、表 4-2 に示す。

表 4-1．かんばん方式の実行結果一覧

| | S1 | P1 | S2 | P2 | S3 | P3 | S4 |
|-----------|----|--------|-----|--------|-----|--------|------|
| 生産能力 | | 12 | | 11 | | 11 | |
| ロットサイズ | | 8 | | 4 | | 4 | |
| 初期かんばん枚数 | | 8 | | 4 | | 4 | |
| 初期在庫 | | 16 | | 8 | | 8 | 20 |
| 稼働率 | | 99.00% | | 90.80% | | 91.20% | |
| 在庫最小値 | | | 0 | | 0 | | 3 |
| 在庫最大値 | | | 8 | | 19 | | 24 |
| 在庫平均値 | | | 2.0 | | 0.8 | | 11.0 |
| かんばん枚数最大値 | | 8 | | 8 | | 19 | |

表 4-2 . 階層型かんぱん方式の実行結果一覧

| | S1 | P1 | S2 | P2 | S3 | P3 | S4 |
|-----------------|----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| 生産能力 | | 12 | | 11 | | 11 | |
| ロットサイズ | | 8 | | 4 | | 4 | |
| 初期かんぱん枚数 | | 8 | | 4 | | 4 | |
| 初期在庫 | | 16 | | 8 | | 8 | 20 |
| 稼働率 | | 98.00% | | 89.80% | | 89.80% | |
| 在庫最小値 | | | 0 | | 0 | | 0 |
| 在庫最大値 | | | 8 | | 8 | | 19 |
| 在庫平均値 | | | 1.9 | | 0.1 | | 8.2 |
| かんぱん枚数最大値 | | 12 | | 12 | | 19 | |
| 電子かんぱん(2重)枚数最大値 | | 8 | | 24 | | | |
| 電子かんぱん(3重)枚数最大値 | | 24 | | | | | |

次に表 4-1,4-2 に示された実行結果の一覧から両方式を比較する際の指標として前述した，各工程の稼働率，システム内の総仕掛在庫量の最大値，システム内の各在庫点の平均在庫量の総計である総在庫スペースを順に検証していく。まず各工程の稼働率は表 4-3 に示すとおり，階層型かんばん方式のほうが，かんばん方式に比べ若干悪くなっているのがわかる。

表 4-3 . 各工程の稼働率の比較

| | P1 | P2 | P3 |
|-----------|--------|--------|--------|
| かんばん方式 | 99.00% | 90.80% | 91.20% |
| 階層型かんばん方式 | 98.00% | 89.80% | 89.80% |

これは多重のループにより生産指示に制限がかかっているため，後工程の処理が終わらないと生産が開始できず，途中で生産待ち状態が起こっているためである。このことにより階層型かんばん方式は，かんばん方式に比べより指示の遅延が起こっていることがわかる。しかし，この稼働率の減少はかんばん方式に比べ非常に小さいもので，この後検証する在庫数やかんばん枚数に，より特徴的な数字が出れば，システムとして非常に優れていることがいえる。

次にシステム内の総仕掛在庫の最大値だが、これは一番外側をループするかんぱんの枚数に依存することは先に述べたとおりである。したがってこれらと比較するにはかんぱん方式においては、かんぱん枚数の総和、階層型かんぱん方式においては一番外側の電子かんぱんの枚数、すなわち S1 の 3 重ループの電子かんぱん枚数を比較することからわかる。その表を 4-4 に示す。

表 4-5-4 . かんぱん枚数の比較

| | | P1 | P2 | P3 |
|-----------|-------------|----|----|----|
| かんぱん方式 | かんぱん枚数 | 8 | 8 | 19 |
| 階層型かんぱん方式 | かんぱん枚数 | 12 | 12 | 19 |
| | 電子かんぱん2重ループ | 8 | 24 | |
| | 電子かんぱん3重ループ | 24 | | |

この表からわかるかんぱん方式の各かんぱん枚数の最大値は、先頭工程から 8 枚,8 枚,19 枚であり、これはシミュレーションの結果、時を同じくして最大値を迎えている。そのためシステム内でかんぱん枚数が最大になるのは $8+8+19=35$ 枚であることがわかる。そのためかんぱん方式でのシステム内の最大総仕掛在庫量は 35 個になっている。階層型かんぱん方式においては一番外側のループの最大値 24 枚がシステム内の最大総仕掛在庫を制御しているため、この最大値は 24 個となり、仕掛在庫においてかんぱん方式に比べ低在庫状態でシステムが動いていることがわかる。

次に在庫スペースに関して検証するために両方式の在庫に着目し、表 4-5 に在庫の比較を示す。

表 4-5 . 在庫の比較

| | | S1 | S2 | S3 |
|-----------|-----|-----|-----|------|
| かんばん方式 | 最小値 | 0 | 0 | 3 |
| | 最大値 | 8 | 19 | 24 |
| | 平均値 | 2.0 | 0.8 | 11.0 |
| 階層型かんばん方式 | 最小値 | 0 | 0 | 0 |
| | 最大値 | 8 | 8 | 19 |
| | 平均値 | 1.9 | 0.1 | 8.2 |

まず各在庫点の在庫量の平均値に着目してみると、各点とも階層型かんばん方式のほうが低在庫状態でシステムが稼働していることがわかる。これは先ほどの稼働率の原因と同じことが考えられ、多重のループによって生産指示に遅延が起きているためだと考えられる。また各点の在庫の最大値に着目してみても、階層型かんばん方式はかんばん方式に比べより少ない最大値で稼働していることがわかる。工程を設計する際に各在庫点の最大値分を在庫スペースとして確保しなくてはならないことから、この数字を小さくできることは極めて重要であると考えられ、ここに階層型かんばん方式の優れた点がはっきりと結果としてあらわすことができたと考えられる。しかし、各点の在庫量の最小値に着目してみると、S2,S3 は変わりはないのだが、S4 すなわち最終在庫口ケにおいて階層型かんばん方式は 0 となっている。これは生産指示の遅延によって需要の待ち時間を作ってしまったからである。低在庫状態でシステムが推移しているので、需要が到着しても製品がまだ出来上がっていない状態が何回か現れてしまうことが本実験でも何度か確認された。しかし、これをなくすためには初期在庫を多めに持たせることや、初期かんばん枚数を増やすことで対応できる。しかしこれは、低在庫状態でのシステム運用と、納期確保のトレードオフの問題となってしまうためここではこの最適化を求めることはしない。しかし、本シミュレータを用いればユーザーが独自に数値を入れ検証することで、よりニーズにあったかんばん方式の運用方法を検討できることがこの結果よりわかった。

次にかんばん枚数推移，在庫推移からかんばん方式と，階層型かんばん方式の指示の遅延がシステムにどのような影響を及ぼしていくのかを検証していく。図 4-4 は階層型かんばん方式における第 1 工程 P1 におけるかんばん枚数，電子かんばん枚数の状態推移をグラフに表したものである。X 軸に経過時間を，Y 軸にかんばん枚数をとっている。

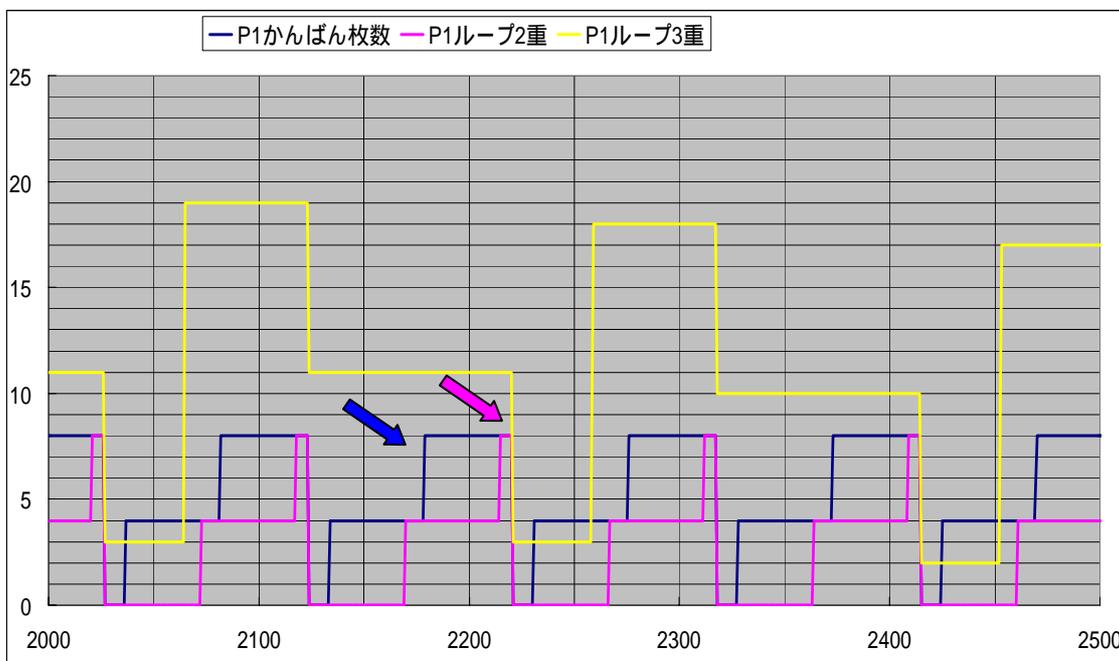


図 4-4 . 階層型かんばん方式第 1 工程のかんばん推移

本実験において，第 1 工程の生産ロットサイズは 8 なので，従来のかんばん方式の場合は青い線のかんばん枚数が 8 になった時点で生産指示が行われ（図中青矢印），生産が開始するはずである（自工程が生産処理可能の場合）。しかし，階層型かんばん方式は黄色とピンクの線の多重のループによって制御されているためこれらが揃わない限り生産が開始されない（図中ピンク矢印）。このグラフの状態ではピンクのループのかんばんが到着し次第生産開始の処理がされている様子が見られる。このように階層型かんばん方式では 3 つのループのかんばんが同時に処理されている様子もわかる。

次に同じ状態での在庫推移を図 4-5 に示す。

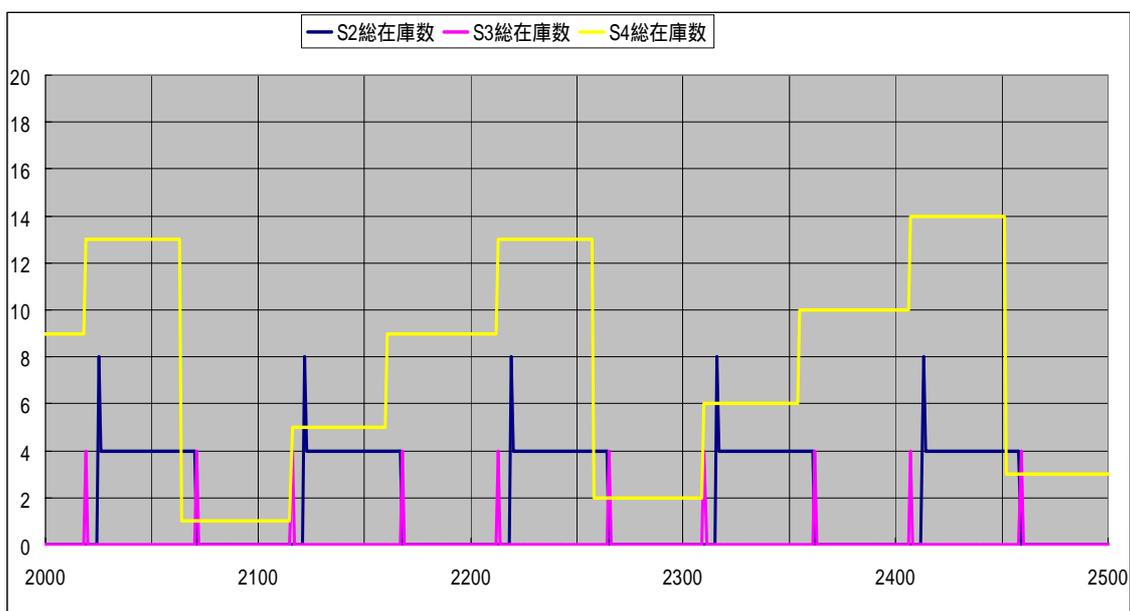


図 4-5 . 階層型かんばん方式の在庫推移

多重のループによって工程全体が低在庫状態で連携するように生産が行われているため、後工程の処理が終わり次第、すぐに前工程が処理に移っている様子が見られる。このように階層型かんばん方式では工程同士が連携する動きが特徴であるといえる。後工程の状態を前工程はかんばん、電子かんばんによって自律的に把握することになり、後工程で故障や停滞があったときなどは、かんばん方式よりも早く前工程は状況を把握することになり、 unnecessaryな生産を行わなくなる。ここが階層型かんばん方式のもう一つの利点であるといえる。

第5章 結論

本研究では、多重のかんばんループを有効に利用して、低在庫状態でシステムを運用できる階層型かんばん方式の解析及びかんばん方式との特性の違いを表現した。本研究のモデルは非常にシンプルなものを使用しているため、複雑化した生産システムへの適応も大変容易である。またこのモデルを実用する際の手助けとなるツールとして基本的なシミュレータの構築を行った。本シミュレータは需要ファイルの読み込みや、各オブジェクトのもつ属性値、結果データ等の出力機能を充実させているため、様々な生産環境で生産システムの決定が可能となり、またシミュレーションという環境で試行するためユーザーのニーズが多様化している現場でも意思決定を行うことができるものとなった。本研究においては Windows 上での表現に留まったが、このシミュレータの構築をベースにしてオブジェクト指向や、プラットフォームに依存しない言語を使用することで、より汎用的に、さらに精度、機能の高いシミュレータの構築ができることが考えられる。

参考文献

- [1]高橋勝彦，中村信人：かんぱん方式における指示遅延の効果，日本経営工学会誌，vol.46,No5,1995
- [2]高橋勝彦，中村信人：かんぱん枚数決定問題へのシミュレーションアプローチ，日本経営工学会誌 vol.47,No.6,1997
- [3]村木考彰，平川保博：階層型かんぱん制御生産システムの性能，日本経営工学会誌，vol.49,No1,1998
- [4]K.Mitsuyuki,F.Kojima, H.Douba, Y.Fukuda, E.Arai : Simulation to design and improve Kanban system, Proc. The 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 2002
- [5]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
- [6]添田幸洋：モジュール型生産システムシミュレータに関する研究，法政大学大学院修士論文，2001
- [7]飯田剛士：シミュレーションを用いた仕掛在庫の補充戦略に関する研究，法政大学大学院修士論文，2003

謝辞

本研究全般にご指導くださり、3年間に渡りご教授頂いた福田好朗教授に、心より深く感謝いたします。また、研究の副査を担当して頂いた若山邦紘教授に深く感謝いたします。そして、研究を進めるにあたり、適切な助言を頂きました生産システム研究室の先輩、同輩、後輩の諸氏に深く感謝いたします。最後に、6年間に渡って研究と学生生活を支えてくれ、励ましてくれた両親に深く感謝いたします。