

環境配慮型生産システムの設計・分析に対する モデリングモジュールの開発

Development of modeling modules for design and analysis of an environmentally friendly production system

野村 淳一

Junichi Nomura

Abstract

In recent years, severe environmental and energy issues have become apparent. Addressing these issues caused by manufacturing in economic activity is now more critical than ever. It is critical to develop an environmentally friendly production system that considers the entirety of the product life-cycle, a fundamental activity in manufacturing, known as supply chain. This dissertation examines and assesses the development of an environmentally friendly production system by modeling a system via simulation language and implementing the simulation analysis.

Although production consists of a series of activities such as the supply and collection of resources, manufacturing, distribution, selling, after-service and disposal, the primary focal point of this dissertation is on manufacturing activities. This paper presents an analysis of the model design and simulation of an environmentally friendly production system that reduces redundant low added value activities in the manufacturing stage, implemented with a Just-in-time (JIT) manufacturing policy that reduces energy expenses.

The majority of the existing production system models adhere to economic rationalism. The environmentally friendly system presented in this dissertation not only provides a solution for the trade-off between Economy and Environment, but also proposes an effective model from the perspective of environmental management.

Keywords: Environmentally friendly production system, Just-in-time manufacturing, Simulation, Modelling module

1. はじめに

近年、環境やエネルギーに関して、深刻な問題が顕在化している。生産活動を含む経済活動の結果として環境・エネルギー問題が引き起こされていると考えられ、喫緊の取組みが不可欠である。特に、生産活動を中心とする製品ライフサイクルの全体を考慮して、環境配慮型の生産システム、言い換えればサプライチェーンを構築する必要がある。

生産活動は、資源採取・調達、製造、流通、販売、アフターサービス、廃棄の一連の活動で構成されるが、本研究では、特に製造段階の無駄な（付加価値の低い）活動を低減し、エネルギー消費を抑えられる生産方式として、ジャストインタイム（Just-in-time ; JIT）生産方式に着目する。そして、同生産方式を適用した生産システムのパフォーマンスを評価・検討するための第一段階として、シミュレーション言語を用いてモデリングモジュールを設計・構築する。

II. ジャストインタイム生産方式

(1) ジャストインタイム生産とムダ

ジャストインタイム（JIT）生産方式は、徹底的なムダの排除によるコスト低減を目指した生産システムであり、その基本理念は平準化を基礎とするジャストインタイムと自働化である¹⁾。JIT 生産方式は、トヨタ自動車で戦後まもなくより考案されてきた生産技法の体系であり、トヨタ生産方式と呼ばれることもある。ただし、本研究では、トヨタ自動車以外の企業・産業においても適用できる生産方式として JIT 生産方式を定義する。

ここで、JIT 生産方式におけるムダの概念について整理しておく。ムダとは、付加価値を高めないで、原価のみを高めるすべての活動や設備のことを指す。すなわち、顧客にとって価値を生み出さないのに、資源を消費しているものや状態のことである。

門田（2004）は次のように、ムダの種類を体系化している²⁾。第一次的なムダは、過剰な人員・設備・在庫であり、過剰な生産能力が存在することである。第二次的なムダは、特に過剰な人員により本来不必要なものが生産されてしまう、作り過ぎのムダである。これは、工程間の中間製品や完成製品に関して余分な在庫を抱えることになり、第三次的なムダとして過剰な在庫のムダにつながる。さらに、過剰な在庫が存在することにより、余分な倉庫・運搬担当者・運搬設備・在庫および品質管理担当者・コンピュータ利用が発生し、第四次的なムダが発生する（表 1）。これらのムダにより発生するコストは、最終的に製品原価に賦課されるため、顧客に対する付加価値を高めない活動であるムダは徹底的に排除しなければならない。

表 1 JIT 生産方式におけるムダの体系

分類	内容
第一次的なムダ	過剰な人員・設備・在庫
第二次的なムダ	作り過ぎのムダ
第三次的なムダ	過剰な在庫
第四次的なムダ	余分な倉庫・運搬担当者・運搬設備・在庫 および品質管理担当者・コンピュータ利用

この中でも、特に第二次的なムダである作り過ぎのムダは、第三次および第四次のムダの原因とされるが、生産の工夫により発生を抑制することができる。この生産上の工夫にはさまざまな方策が考えられるが、JIT 生産方式の基本理念である「売れるものを売れる速度で生産する」ことにより、不必要な資源やエネルギーの消費を抑えつつ、余分な製品在庫の発生を避けることができ、環境配慮型の生産システムとして評価することができるだろう。

(2) かんばん方式とみずすまし方式

JIT 生産方式とは、「必要なものを、必要な数量だけ、必要な時に、後工程が前工程に引き取りに来る仕組み」であり、プル生産方式の代表例といえる。これを実現する技法として、かんばん方式やみずすまし方式などがある。

かんばん方式は、通常、生産指示かんばんと引き取りかんばんの2種類のかんばん¹を用いて、生産・運搬の指示を行う（図1）。後工程から需要、すなわち引き取りかんばんが前工程に到着すると、前工程の完成品置き場にある引き取り対象の部品コンテナに付けられた生産指示かんばんが外され、後工程からの引き取りかんばんと交換される。部品コンテナは引き取りかんばんとともに後工程に運搬される。

外された生産指示かんばんは、スケジューリングボードに置かれる。工程で処理中の作業が終わると、工程の作業者はスケジューリングボードの先頭に置かれた生産指示かんばんを取り、そこに書かれた製品の生産に必要な部品を部品置き場から取って、生産を開始する。同時に、部品コンテナに付けられた引き取りかんばんを外して、引き取りかんばんポストに入れておく。

このポストのかんばんは、運搬担当者（みずすまし（後述））により、一定の間隔で前工程に運ばれ、多段階で構成される多工程の生産システム内で、同様の手順が繰り返される。

後工程からの引き取りかんばんの到着が生産のトリガーとなるため、最終の後工程、すなわち顧客需要に基づいて生産が行われることとなり、ムダな生産活動が抑制される。

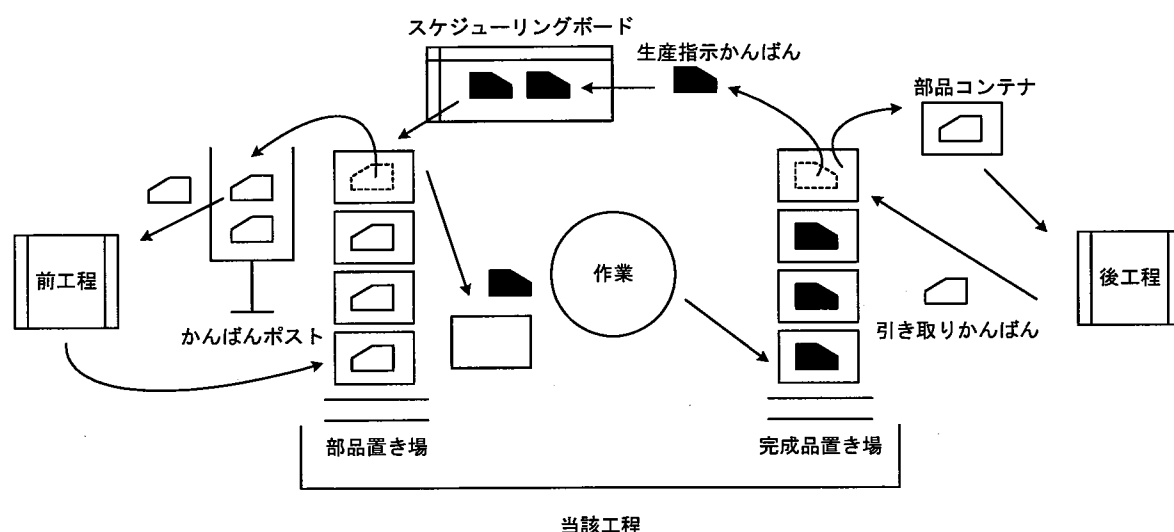


図1 かんばん方式の概念図³⁾

一方、みずすまし方式は、工程間の資材運搬に関して専門に行う作業者（これを、みずすまし作業者、あるいはたんにみずすましと呼ぶ）を配置する技法であり、後工程引き取りを実現するために重要な役割を果たしている。みずすましは、後工程の要求に応じて、あるいは定期的に工程間を巡回して、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、水面を軽やかに移動する昆虫のミズスマシに似ていることから、みずすましと呼ばれるようになった。

工程内における生産活動を直接作業として捉えた場合、みずすましが間接作業である運

¹ かんばんとは、品目名や数量、保管場所、製造場所、サプライヤ名などが書かれている作業指示書である。JIT生産方式において、工程間の作業指示に標準的に用いられる技法として知られている。

搬活動を一手に引き受けるため、工程の作業者は自身の生産活動、つまり製品に付加価値を与える活動に集中できる。また、みずすましは複数の工程を巡回しているため、全体の作業状況を把握でき、工程の作業者に対して作業の遅れや進み具合を指摘することもできる。かんばん方式により、工程間の作業指示は（プッシュ生産方式で典型的に行われる中央からの管理によらず）自律的に管理されているが、みずすまし方式を併用することによって、さらに詳細な指示を工程に与えることができるといえるだろう。

(3) かんばん枚数の決定方法

前項のとおり、かんばん方式におけるかんばんは、生産・運搬を指示するものとして工程内および工程間を循環する。各工程で生産した完成品や、部品置き場に配置された部品には、かんばんが付けられており、後工程から訪れたみずすましが完成品を引き取る際、あるいは工程で部品を使用する際に、かんばんが外されて、対応する製品の生産・運搬のトリガーとして機能する。つまり、工程内および工程間に循環するかんばんの総数が、全体の在庫数量と一致することになるため、生産の進捗を滞らせない程度にかんばん枚数を最小化していくことにより、ムダな在庫の発生を抑制することができる。

ここで、多くの製造業において一般的な、工程で使用される部品（のすべて、あるいは一部）を外部のサプライヤからの納入によっている生産システムを考える。このような場合、かんばん方式においては、引き取りかんばんから派生した外注かんばんを用いる。外注かんばんは、外部サプライヤとの間での部品搬送に用いられるため、通常の引き取りかんばんに記載される情報に加え、品目の供給間隔が明記される。これには、 $a \cdot b \cdot c$ という記号が用いられ、 a 日に b 回の納入が行われ、外注かんばんを引き取ってから c 回後のサイクルで納入されることを意味している。たとえば、 $1 \cdot 8 \cdot 2$ は、1日8便のトラックがサプライヤから到着し、今回発注した品目が2便後のトラックで納入されることを示している。1日の作業時間を8時間とすれば、 $1 \cdot 8 \cdot 2$ は1時間ごとに荷が届き、納入リードタイムは2時間である。 $1 \cdot 16 \cdot 2$ では、30分ごとに荷が届き、1時間の納入リードタイムで部品が供給されることを意味している。

また、このような形で外部サプライヤから部品の供給を受ける場合、組立ラインの各工程内の部品置き場に直接納入されるのではなく、工場の一角に部品を種類別に一時保管する部品ストアを設けることが多い。部品ストアと各工程の部品置き場との間の部品搬送をみずすましが担当することで、前述のとおり工程内の作業者は生産活動に集中でき、また複数の工程への搬送を効率的に行うこともできる。

さて、上述の生産システムにおいて、複数人のみずすましが部品の搬送を担当する場合、各品目に対する必要最小の外注かんばん枚数は次式で表される⁴⁾：

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

ここで、

- a : かんばんの納入単位 (日)
- b : かんばんの a 日における納入回数 (回)
- c : かんばんの納入リードタイム (回)

d_{ij} : みずすまし i が j 番目に訪問する部品置き場の消費速度 (秒/個)
 i : みずすまし番号 ($i=1, 2, \dots, R$)
 j : みずすましの訪問順序番号 ($j=1, 2, \dots, S_j$)
 P : 部品コンテナの容量 (個)
 R : みずすましの人数 (人)
 S_j : みずすまし i が当該部品に対して訪問する部品置き場の総数
 T : 1日の作業時間 (秒)

であり、 $\lceil \quad \rceil$ はカッコ内の実数を超えない最大の整数を返す、ガウス記号である。

ただし、上式で求められるかんばん枚数は確定的な状況下における理論的な数値であり、多数の部品種を活用する現実的な生産現場を想定すると、若干の安全在庫が必要となったり、あるいは逆に少ない枚数で運用が可能な場合もある。そのため、本研究では、このような生産システムの状況を簡便に表すことのできるモデリングモジュールを設計・開発し、モジュールの組み合わせによってシステムをコンピュータモデルとして表現し、シミュレーション実験により実行可能なかんばん枚数を見出すためのツールとする。この実験により導出されたかんばん枚数は、現実的な最小限度のかんばん枚数となるため、環境配慮型生産システムの実現に資することになる。

III. モデリングモジュールの設計・構築

前述の JIT 生産システムを導入した生産システムを設計すると、メーカーとサプライヤ間の部品のやり取りを表す 3 つのセクションと、部品を消費する組立ラインを表す 1 つのセクションから構成される²。前者 3 つのセクションは、(1) みずすましがラックから必要な部品をピックアップする「部品ストア (Parts Store)」セクション、(2) サプライヤへの部品発注と受け取りを行う「荷受け場 (Shipping Area)」セクション、(3) メーカーに部品を供給する「サプライヤ (Supplier Center)」セクションである。そして、それらはシミュレーションソフトウェア Arena 14.7 のテンプレート構築機能を用いて、それぞれがモジュールにまとめられる³。これら 3 つのモジュールと組立ラインセクションは、Arena 標準モジュールである Route、Station、Hold、Signal モジュールによって緊密に連携して動作する。一般に、本研究で提案するモジュールを用いて JIT 生産システムのシミュレーションモデルを構築するためには、使用される部品種類と同数の Parts Store モジュール、それらを供給するサプライヤと同数の Supplier Center モジュール、および 1 つの Shipping Area モジュールが、最低限必要とされる。

ここで、各セクションの相互関係を図 2 に示すとともに、顧客の注文から始まる生産システムの流れを述べる：

- 1) 顧客からの注文が到着すると、組立ラインの完成品置き場に置かれた製品が引き取られる。その際、完成品に付けられた生産指示かんばん (Production kanban ; P-kanban) が外され、組立ラインに対して新しい製品の製造が指示される。

² 本節は Nomura and Takakuwa (2004) および Miwa et al. (2016) で開発したモデリングモジュールを、本研究に合わせて修正したものである^{5) 6)}。

³ シミュレーションソフトウェア Arena についての詳細は、高桑・野村 (2007) あるいは Kelton et al. (2016) を参照のこと^{7) 8)}。

The diagram illustrates the Kanban flow in a two-stage production system. The main process is enclosed in a large box, with the Customer and Suppliers outside.

- Customer (顧客):** Issues a **Customer Order (顧客注文)** to the Assembly Line and receives **Completed Products (完成品)** from it.
- Assembly Line (組立ライン):** Contains a **Parts Placement Area (部品置き場)**. It receives **Orders (注文)** from the Customer and sends **Completed Products (完成品)** back to the Customer.
- Parts Store (部品ストア):** Contains a sequence of bins labeled 1, 2, 3, and M. It receives **W-kanbans (みずすまし (W-kanban))** from the Assembly Line and sends **S-kanbans (みずすまし (S-kanban))** to the Shipping Area.
- Shipping Area (荷受け場):** Receives **S-kanbans (みずすまし (S-kanban))** from the Parts Store and sends **W-kanbans (みずすまし (W-kanban))** back to the Assembly Line.
- Suppliers (サプライヤ):** Suppliers 1, 2, 3, and N are shown at the bottom. They send **Trucks (トラック)** to the Shipping Area. Supplier 1's truck is labeled **(S-kanban)**, while the others are labeled **(部品コンテナ+S-kanban)**.

- 2) みずすましは、引き取りかんばんに対応する部品ストアを順番に訪問し、必要な部品をピックアップして保管箱に入れ、引き取りかんばんを取り付ける。また、各種部品が所与のサイズの部品コンテナから初めてピックアップされる際に、それに付けられていた外注かんばん（Supplier-kanban；S-kanban）が外される。みずすましは、引き取りかんばん付きの部品と、部品コンテナから外された外注かんばんを持って、次の部品ストアあるいは荷受け場に移動する。
- 3) 荷受け場において、みずすましは外注かんばんを所定の場所に置き、自らは組立ラインに戻り、部品置き場にピックアップした部品を補充する。
一方、部品ごとに設定された所与のかんばんサイクルに従って、サプライヤのトラックが巡回しており、外注かんばんを引き取ってサプライヤの工場に向かう。
- 4) トラックがサプライヤに到着すると、完成済みの部品が収納されたコンテナに、携えた外注かんばんを付けて積み込み、再度メーカーに向かう。

⁵ 図中、破線は情報のみの移動を、実線は情報とモノの移動を意味する。

5) 荷受け場にサプライヤからのトラックが到着すると、外注かんばんが付けられた部品コンテナが納品される。その部品コンテナは、部品ストアの所定の位置に運搬される。

(1) 部品ストアセクション

これは、工場で用いられる部品を一時保管する部品ストアを表すセクションである。このセクションは、大きく2つのサブセクションに分けられる。1つでは、組立ラインに部品を供給するみずすましが、ラインで保管箱から外された引き取りかんばんで指示される必要な種類の部品を、必要な数量だけピッキングする(図3)。もう1つは、サプライヤからの部品供給に関する指示を出す(図4)。

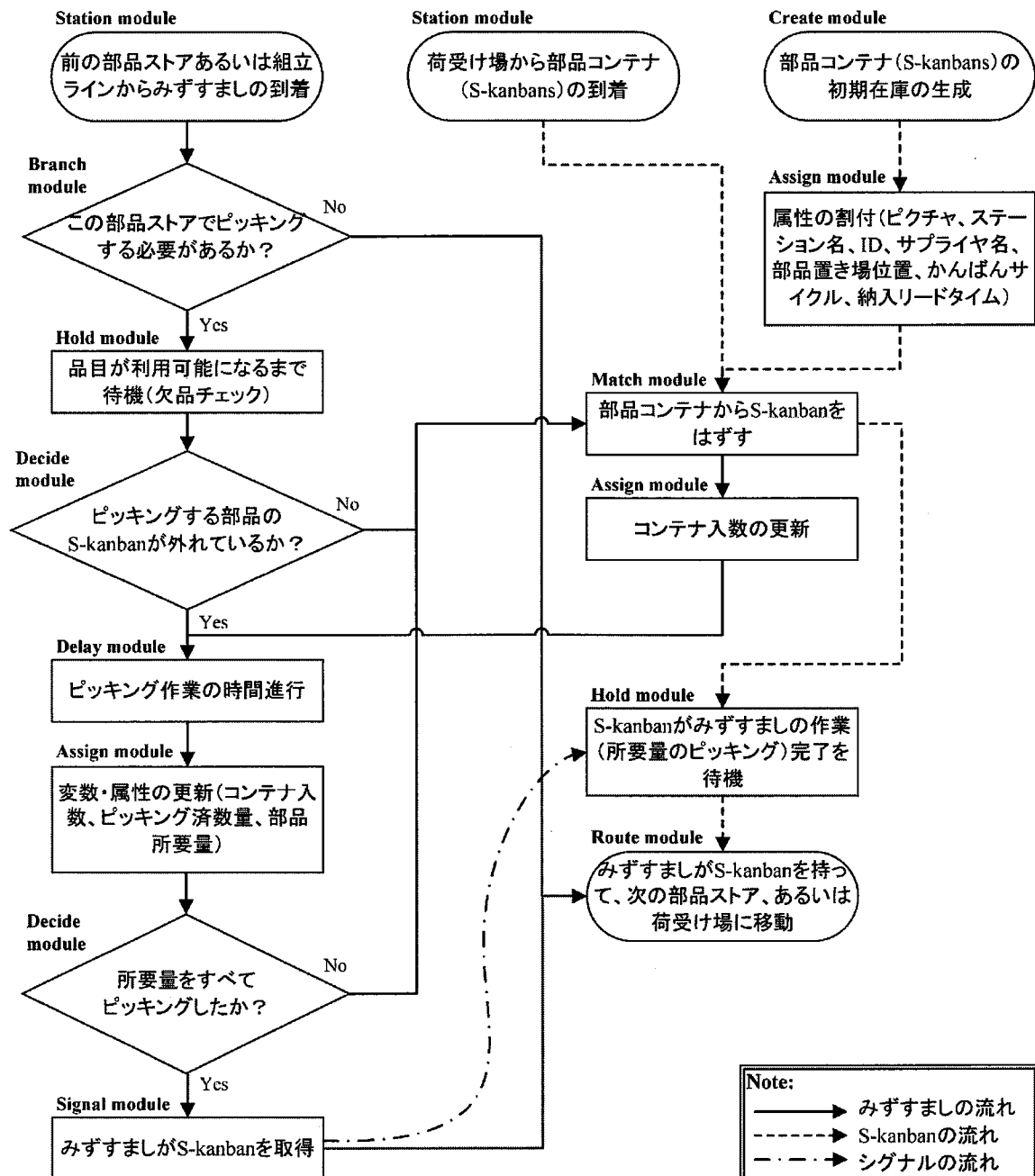


図3 部品ストアセクション (メイン部分)

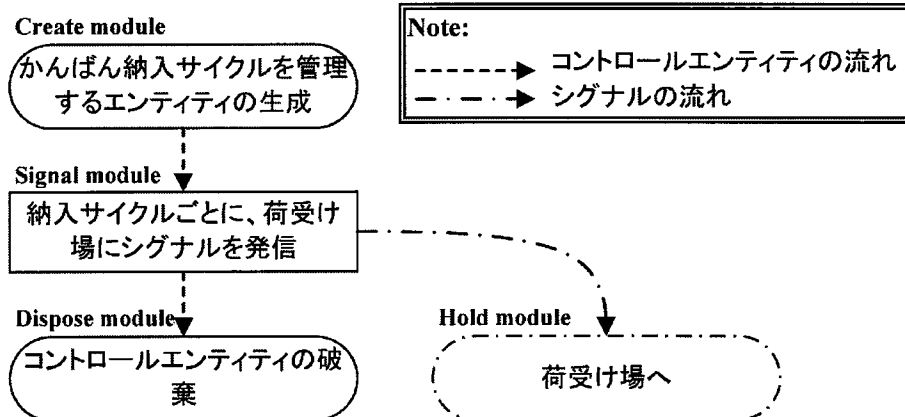


図 4 部品ストアセクション（かんばん納入サイクル部分）

各外注かんばんは、部品コンテナの初期在庫量として表現される。まず、みずすましが前の部品ストアあるいは組立ラインの部品置き場から Station モジュール（図 3 左上）に到着し、この部品ストアでのピッキングが必要かどうかを判断する。必要がなければ、右下の Route モジュールから次の部品ストア、もしくは荷受け場（Shipping Area）セクションに向かう。次に、部品のピッキングが必要なみずすま시는、部品ストアのラックに部品の在庫が存在するかを確認し、なければサプライヤから供給されるまで待機する。部品ストアのラックには、各部品がコンテナに収められて置かれており、みずすま시는コンテナから初めて部品のピッキングする際に、コンテナに付けられている外注かんばんを外してから必要な数量の部品のピッキングする。外された外注かんばんは、みずすましが部品を運ぶカート上の所定の位置に置かれ、最終的に荷受け場に運ばれて、サプライヤへの発注指示に用いられる。必要な部品数のピッキングが終わったら、みずすま시는右下の Route モジュールから次の部品置き場、もしくは荷受け場に向かう。

サプライヤからの部品供給については、部品ごとに設定されたかんばんサイクル ($a \cdot b \cdot c$) に基づいて、指定された時間間隔でコントロールエンティティを生成し、荷受け場セクションにシグナルを送る。

(2) 荷受け場セクション

ここは、サプライヤへの部品発注と受け取りを行うセクションである。このセクションの流れ図を図 5 に示す。部品ストアからみずすましが外注かんばんを携えて到着すると、みずすま시는外注かんばんをかんばん置き場に置き、自らは部品ストアでピッキングした部品が積まれたカートを押し、組立ラインに向かう。外注かんばんは、かんばんサイクルに基づいて訪れるサプライヤのトラックドライバーが引き取り、サプライヤまで運ばれる。

一方、サプライヤから到着した外注かんばん付きの部品コンテナは、対応する部品ストアへと（組立ラインへの部品補充を担当するみずすましとは別の運搬担当者により）運ばれ、ラックに保管される。

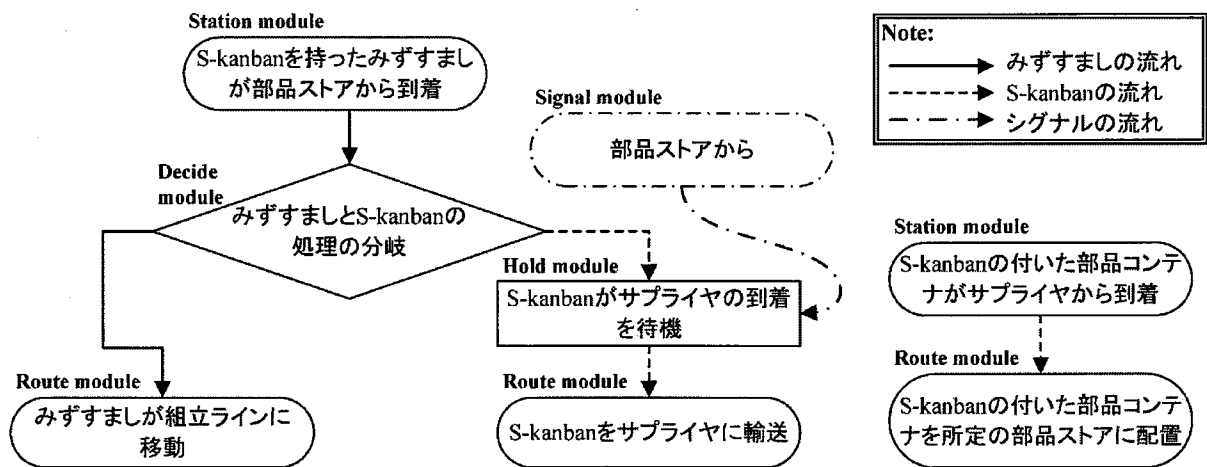


図 5 荷受け場セクション

(3) サプライヤセクション

ここは、メーカーに部品を供給するセクションである。このセクションの流れ図を図 6 に示す。サプライヤに外注かんぱんが到着すると、外注かんぱんで指示される部品コンテナが必要な数量だけトラックに積み込まれ、メーカーに供給される。

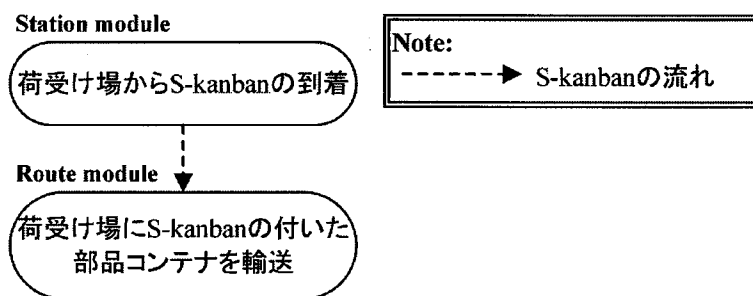


図 6 サプライヤセクション

(4) 組立ラインセクション

ここは、部品を消費する組立ラインを表すセクションである。このセクションの流れ図を図 7 に示す。生産指示あるいは顧客需要が **Create** モジュール (右上) によって、製品 1 つの完成に必要な時間間隔で生成され、続く **Assign** モジュールで使用した部品数を表す変数が更新される。

一方、みずすましは決められた時間間隔で、組立ラインで消費された部品数 (すなわち、ラインで保管箱から外された引き取りかんぱんの枚数) をチェックし、部品ストアに向かう。また、部品ストアでの一連のピッキング作業を終え、荷受け場に外注かんぱんを置いたみずすましは、このセクションに戻り、消費した部品を補充する。なお、本研究では、組立ラインにおけるみずすましの部品補充にかかる作業時間は省略している。

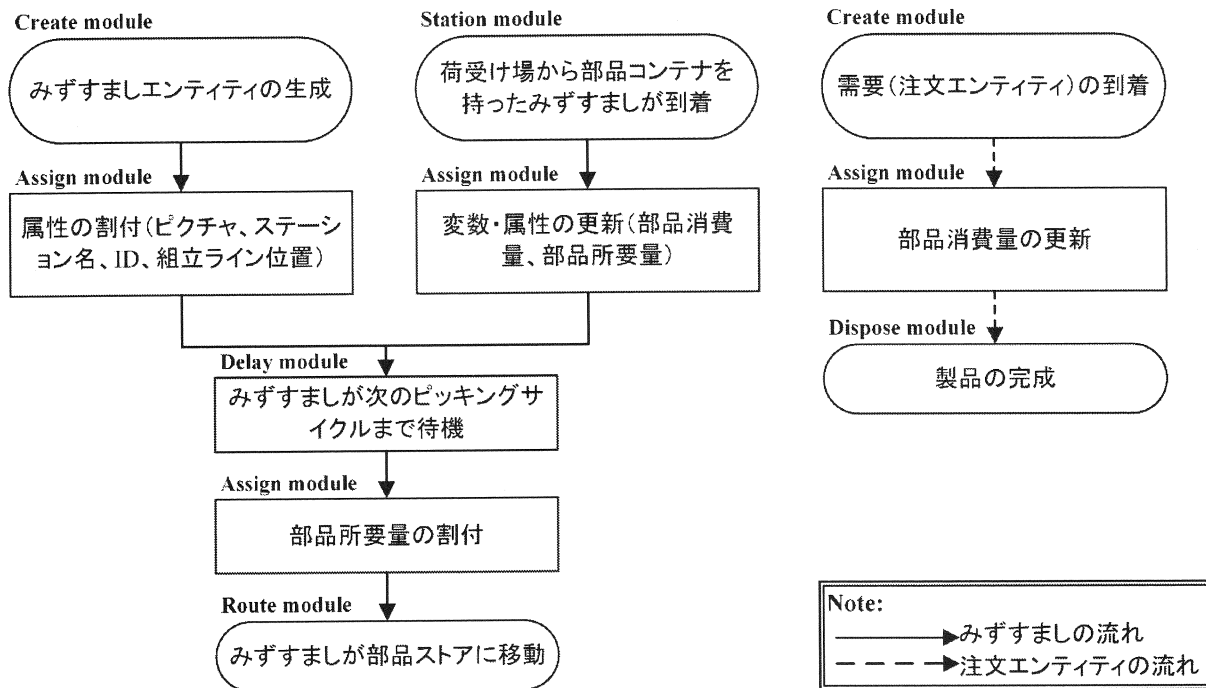


図 7 組立ラインセクション

(5) モデリングモジュールの構築

上述のセクション設計に基づき、Arena 14.7 のテンプレート構築機能を用いて、Parts Store モジュール、Shipping Area モジュール、および Supplier Center モジュールを構築した。完成したモジュールについて、Parts Store モジュールの入力画面を図 8 に示す。

図 8 Parts Store モジュールの入力画面

また、設計・構築したモデリングモジュールを活用して構築された、部品種 2、サプライヤ 2 の生産システムのシミュレーションモデルを図 9 に示す。図のとおり、シミュレー

シミュレーション実験の様子はアニメーションによって視覚的に確認できるほか、実験の結果は数値として出力されるため、統計的な分析に用いることができる。

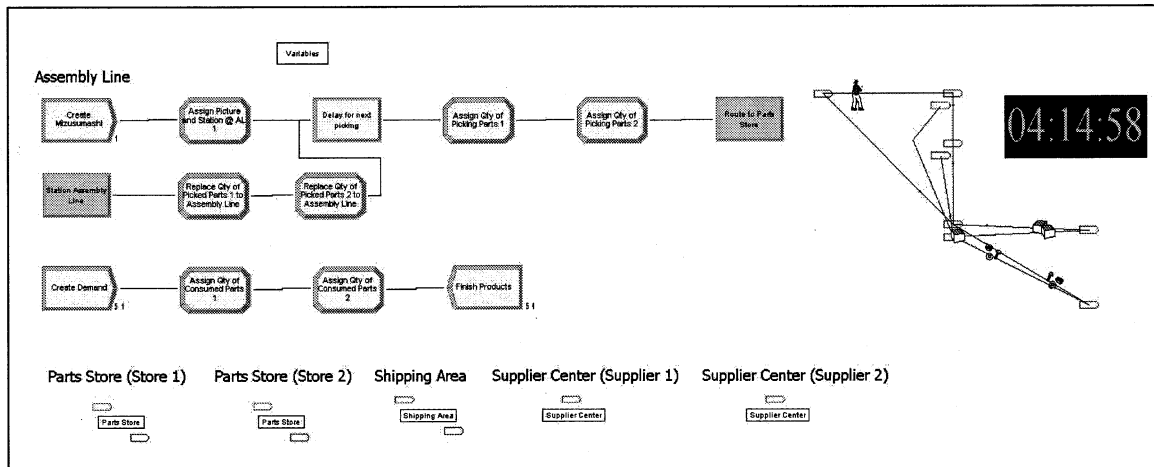


図 9 サンプルモデル

IV. おわりに

本研究では、環境配慮型の生産システムを設計するにあたって、特に製造段階の無駄な（付加価値の低い）活動を低減し、エネルギー消費を抑えられる生産方式として、JIT 生産方式に着目した。そして、JIT 生産方式を適用した生産システムのパフォーマンスを評価・検討するための第一段階として、シミュレーションモデルを構築するためのモデリングモジュールを設計し、シミュレーションソフトウェア Arena を用いて実際にモジュールを構築した。本研究は、モデリングモジュールの設計・開発の段階であるが、今後はこれらのモジュールを活用して、生産システムのシミュレーションモデルを構築し、種々の条件下で実験を行うことにより、環境配慮型生産システムの在り方を検討したい。

生産システムに関する既存のモデルは、経済合理性を追求するものが多い。本研究で検討した環境配慮型生産システムでは、経済と環境の両立というトレードオフを解決するために活用できるものとなり、生産性だけでなく、環境マネジメントの観点からも有効なモデルとなることが期待できる。

謝辞

本研究は、星城大学経営学部より、特別研究奨励費の助成を受けた研究成果の一部である。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 熊谷智徳：生産システムの成り立ちと JIT 生産システム。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、14-49。
- 2) 門田安弘：JIT 生産システムの原価管理。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、50-68。

- 3) 野村淳一：ジャストインタイム生産のマネジメント・システムに関するシミュレーション分析、名古屋大学大学院博士学位請求論文、2004。
- 4) 高桑宗右エ門、三輪冠奈：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。オペレーションズ・リサーチ、51(7)：445-453、2006。
- 5) Nomura, J. and S. Takakuwa: Module-based modeling of flow-type multistage manufacturing systems adopting dual-card Kanban system. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference: 1065-1072, 2004.
- 6) Miwa, K., J. Nomura, and S. Takakuwa: Module-based modeling and analysis of a manufacturing system adopting a dual-card Kanban system with a delivery cycle. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference: 2832-2843, 2016.
- 7) 高桑宗右エ門監訳、野村淳一訳：シミュレーションーArena を活用した総合的アプローチ。第4版、コロナ社、2007／Kelton, W., R. Sadowski, and D. Sturrock: Simulation with Arena. 4th ed., McGraw-Hill, 2007.
- 8) Kelton, W., R. Sadowski, and N. Zupick.: Simulation with Arena. 6th ed., McGraw-Hill, 2016.