

# 汎用生産システム・シミュレータについて

黒田 充

## 1. はじめに

生産システムを対象とした本格的なシミュレーションの実施は、大型コンピュータが普及しはじめた60年代の前半まで遡る(たとえば、文献[6])。その頃はちょうど GPSS や SIMSCRIPT に代表されるシミュレーション言語がはじめて世に紹介された時代でもあり、それらがシミュレーションの発展に大きな役割をはたしたことは知られるところである。

60年代から70年代にかけて、これらのシミュレーション言語を用いて大型コンピュータでシミュレーションを実行するというパターンが続く一方、限定した範囲内で汎用性のある生産システム専用のシミュレータを開発する動きが出てきた。この背景にあったものは、生産現場の技術者が自分たちの望む生産システムのシミュレーションを必要なときに手軽に行ないたいという要望であった。いいかえれば、プログラミングを一切要しないさまざまな生産システムに対応できるデータ駆動型モデルの需要が生み出されてきた。

それらの汎用シミュレータは生産ラインやジョブ・ショップを対象としたものからはじまり(たとえば、文献[1],[4],[5])、近年においては、より複雑な生産システムであるFMS (Flexible

Manufacturing System)を対象としたものへと変わってきている。(たとえば、文献[2],[3])

FMSシミュレータでは、通常、生産システムの構成要素として加工設備、搬送設備、貯蔵設備さらにパレット等の付帯設備を取り扱うことができ、これはFMSシミュレータがFMS以外の生産システムのシミュレーションにも利用できることを示唆している。このため、近年においてはFMSに限らずさまざまな生産システムへの適用を考えた汎用生産システム・シミュレータと呼べるものを迎えるまでにおよんだ。

## 2. 汎用生産システム・シミュレータの設計思想

物を作るためのいくつかの方式の中に、部品中心製造方式と呼ばれるものがある。通常、最終製品はそれを構成する複数個の組立品に分解され、さらにそれぞれの組立品は半組立品に分解されるというように物にはトリー構造があるが、最終製品を注文によって作る場合、トリーの末端の単一部品から作るのではなく、製品間で共通性の高い組立品や半組立品の見込み生産をしておき、注文を受けたときに必要な組立品や半組立品を組み合わせることで最終製品を作るならば、製造期間は大幅に短縮されよう。

前述の部品中心製造方式とは、このような物の作り方を言い、この場合部品はトリーの中間ノードに相当する組立品や半組立品を指している。

コンピュータ・プログラムの開発にもこれと同様の考え方が使われる。種々のプログラムにおいてよく現われる処理機能を実行する副プログラム（モジュールと呼ばれる）を前もって準備しておき、そのシステムのユーザは自分が開発しようとしているプログラムにとって必要なモジュールをそのまま使用することによってプログラムの開発に要する労力の軽減ができる。このような方法は情報処理の分野では“抽象化”と呼ばれている。

コンピュータ・プログラムが生産システム・シミュレータというように対象を限定したものになると、この“抽象化”は効力を発揮しやすい。生産システム・シミュレータには加工、搬送、貯蔵というあらゆる生産システムに共通する基本的な処理があり、汎用シミュレータにおいてはそれらがモジュール化の対象になる。また、職場への加工対象物への投入、予定したスケジュールにもとづく設備の稼働や停止、確率的に予想される故障にもとづく設備の停止や不良品の発生等も同様にモジュール化の対象になる。もちろん、この場合それぞれのモジュールがかなり高い融通性をもっていることが条件になる。

たとえば、一口に加工と言っても1種類の加工対象物を変形したり変質させる場合、複数種の加工対象物を組み合わせる場合、さらに1種類の加工対象物を分解して複数種の物を作る場合もあり、そのような現実のさまざまな状況を表現できる能力をモジュールはもっていなければならない。また、1つのモジュールと他のモジュールとの関係をユーザの希望どおり自由に設定できることも“抽象化”の重要な条件である。

生産システム・シミュレータの汎用性は準備されているモジュールの種類の数とそれぞれのモジュールがもつ表現力の融通性に依存するが、この汎用性を追求することとシミュレータ開発の労力の軽減を計ることは本来矛盾するものである。モジュールの種類を増やすことはトリー構造のより低いレベルで標準部品をもつことになり、その

結果として最終製品を組み立てるための労力が増えるからである。

GPSSや近年よく使われるようになったSLAM II等はやはり“抽象化”を具体化した例であるが、狙っているところは、その汎用化にあって、必ずしも労力の最小化を考えたものでなく、まさにこの意味でそれらは言語なのである。これらに対し汎用生産システム・シミュレータは開発労力を要しないこと、つまりプログラミングレスを条件としているから、トリー構造のより高いレベル、つまり組立品あるいは半組立品のレベルで標準部品をもつことになる。このことは汎用性に関してある程度の後退が避けられないことを意味している。

そこで、要求される汎用性の意味を理解するために、汎用生産システム・シミュレータの需要がどのあたりにあるかを考える必要がある。短期間でシミュレータを開発し、なるべく早くシミュレーションを実行する必要があるという状況は、おそらく生産システムの設計段階において最も多く生じよう。この段階においては、予想されるプロダクト・ミックスのもとに必要な各種設備の能力や設備台数を推定し、さらにシステム全体に要する投資額を見積って生産システムの経済性を評価することがシミュレーションの目的になる。

明らかにこの状況では、現実システムにできる限り忠実なモデルを得ることや、モデルに高い精度を与えることはそれほど意味があるとは思えない。むしろ、技術者の直感を裏づけたり、直感の誤りを是正するための定量的資料をタイミングよく得ることが重要であり、このような状況こそ汎用生産システム・シミュレータのうってつけの利用環境であろう。1つのシミュレータを長期にわたって継続的に使用する制御を目的としたシミュレーションにおいては、事情は当然異なったものになり、汎用生産システム・シミュレータのニーズは小さくなるに違いない。

表 1 システムの構成要素

構成要素	
マシニング・センター(MC)	2 台
通り抜けシャトル	2 台
ロード・ステーション	1 台
アンロード・ステーション	1 台
搬送車(カート)	1 台
ストップ	6カ所
ワーク	2種類

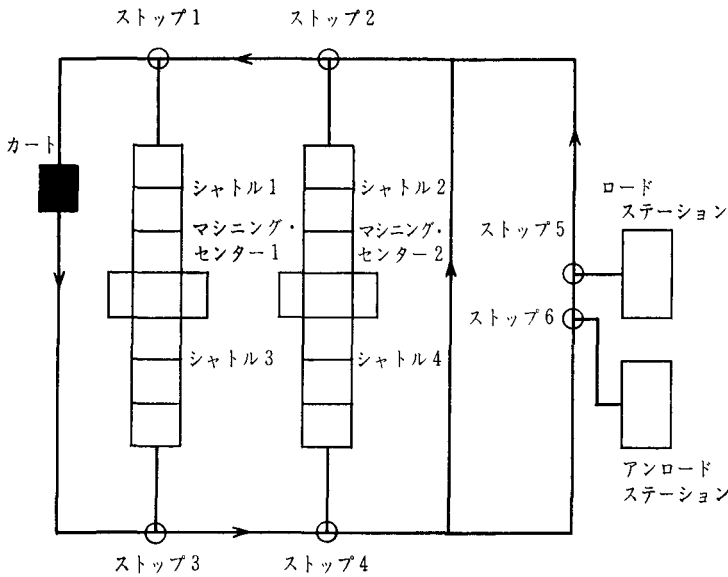


図 1 構成設備のレイアウト

### 3. 汎用生産システム・シミュレータを用いたある実験

#### 3.1 実験の内容

汎用生産システム・シミュレータの特質を具体的に説明するために、いま1つの実験を行なうことにしよう。それは、ある生産システムのモデルを設定し、同一のモデルを対象として汎用生産システム・シミュレータとシミュレーション言語のそれぞれを用いてシミュレーションを実行し、それらの特質を比較するというものである。汎用生産システム・シミュレータとしてはこの範疇に属するもので完成度の高いMAP/I[7], [8]を、シミュレーション言語としては広く知られている言語の代表としてGPSSを、新しい言語の代表としてSLAM II[9], [10]を用いることにする。

#### 3.2 生産システムのモデル

マシニングセンター2台、無人搬送車(カート)1台、ロード/アンロード・ステーションから構成される小さなFMSのモデルをとりあげる。図1にそのレイアウトを、表1には構成設備と加工対象物(ワーク)の一覧表を示す。

ワークはロードステーションからシステムにロ

ードされ、指定された加工順序にしたがってマシニングセンターのいずれかへカートによって運ばれる。各マシニングセンターには通り抜けシャトルと呼ばれる貯蔵スペースがあり、マシニングセンターが加工中である場合に入口側のシャトルでワークは待機する。マシニングセンターが空いている場合、ワークは所定の時間そこに留まって加工を受け、加工が終了すると出口側シャトルで次の搬送まで待機する。シャトルには容量が定まっているから、出口側シャトルがワークで満ちている場合に加工が終了すると、マシニングセンターでブロッキングが生じる。出口側シャトル中にあるワークは、カートによって次の加工を行なうマシニングセンターの入口側シャトルか、すべての加工を終っている場合は、アンロードステーションへ運ばれる。

カートは図中の6カ所のストップ間をワークの呼び出しに応じてあるストップから別のストップへと移動する。空のカートの移動時間とワークを乗せたカートの搬送時間(この場合、シャトルへのロード時間とシャトルからのアンロード時間を含む)は、2つのストップの位置によって決まる(表2, 表3)。カートは搬送が終ったストップで次

表 2 カートの移動時間

ストップ	1	2	3	4	5	6
1	—	—	10	15	20	20
2	—	—	15	20	25	25
3	—	—	0	5	10	10
4	—	—	20	0	10	10
5	—	—	20	25	0	0
6	—	—	20	25	0	0

表 3 カートの搬送時間

ストップ	1	2	3	4	5	6
1	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—
3	50	50	—	—	—	50
4	50	45	—	—	—	45
5	50	45	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—

表 4 ワークの処理時間

ワーク	ロード時間	加工時間		アンロード時間
		工程 1	工程 2	
1	70	200	150	30
2	80	220	160	40

の呼び出しがあるまで待機する。またカートに対して2つ以上の呼び出しが同時刻に起きた場合、次の優先順位にしたがって処理するものとする。

優先順位 1 出口側シャトル→アンロード・ステーション

優先順位 2 出口側シャトル→入口側シャトル

優先順位 3 ロード・ステーション→入口側シャトル

ワークを入口側シャトルあるいはアンロード・ステーションへ搬送する場合に、カートに乗せる前に搬送先に当たる入口側シャトルのスペースあるいはアンロード・ステーションを確保するようにする。この機能を“予約”と呼ぶが、これによってカートのブロッキングは生じず、システムのデッドロックは回避できる。

ワークは2種類あり、ワーク1は平均値が380の、ワーク2は平均値が400の指数分布にしたがってシステムに到着し、それぞれに対して次の加工順序が指定されている。

ワーク 1 マシニング・センター1→マシニング・センター2

ワーク 2 マシニング・センター2→マシニング・センター1

それぞれのマシニングセンターにおける処理についての優先規則は先着順を用いるものとする。加工時間およびシステムへのロード時間、システムからのアンロード時間を表4のように定めておく。

### 3.3 シミュレータの比較

MAP/1を用いてシミュレータを構築する場合、マシニングセンタ、シャトル、ロード/アン

ロードステーションはMAP/1の“部品”であるSTATIONによって、カートは同様にTRANSPORTERを用いて表わすことができ、FMSの加工系と搬送系およびそれらの関係のモデル化がユーザの若干の配慮をとまらうだけで実現する。

GPSSによる場合、システムを構成する設備はFACILITYあるいはSTORAGEを用いて表わされるが、ブロック・ダイアグラムにおいては加工系を表わすブロックと搬送系を表わすブロックがまざり合い、モデル化に当たってある程度込み入ったユーザの配慮を要する。SLAM IIの場合もその拡張バージョン(搬送の処理機能を有する)を使用しない限り、GPSSと事情は似ている。加工系も搬送系も設備をすべてRESOURCEを用いて定義し、それぞれにおける時間遅延をACTIVITYを用いて表わすので、ネットワーク中それらのACTIVITYは事象が生起する順序にしたがって配置される必要がある。また設備(RESOURCE)の占有可否の判定をユーザ記述のFORTRAN副プログラムを用いて行なわねばならず、量は限定されるけれどもいわゆるプログラミングの作業が必要である。

以上のとおりMAP/1によるモデル化は容易であるけれども、前節で述べた“予約”の機能に関してはMAP/1で用意されているSTATIONとTRANSPORTER間の関係の与え方では取り扱いは不可能であり、MAP/1モデルにおいてはこの機能は除去されている。

また、前節で述べた搬送の優先処理に関しても3つのモデル間での一致は得られていない。GP-

表 5 入力ステートメント数(行数)

MAP/1 モデル	43
GPSS モデル	104
SLAMII モデル	175
(その中のユーザ記述の FORTRAN プログラム)	(50)

表 6 設備の稼働率

設 備	MAP/1	GPSS	SLAMII
ロード・ステーション (busy)	.37	—	—
(blocked)	.44	—	—
(total)	.81	.82	.94
アンロード・ステーション	.17	.47	.49
マシニング・センター 1	.89	.88	.91
マシニング・センター 2	.90	.88	.93
カート	.88	.92	.95

SS ではワークを表わしている TRANSACTION はカレントイベントチェーンにおいて高いプライオリティをもつものから処理されるため、ワークの状態に応じてプライオリティを変えていけば自動的に搬送の優先処理が可能になる。

一方、SLAMII では RESOURCE 毎にファイルが構成され、ワークを表わす ENTITY はそれぞれのファイルの中でプライオリティの高いものから優先的に処理されるようになっている。

したがって、システム内のワークをすべて対象とした優先処理はユーザが FORTRAN 副プログラムを記述しない限り不可能であり、作成した SLAM/II モデルは搬送の優先処理の機能を取り除いたものになっている。また MAP/1 モデルの場合は、ワークを表わす PART に対しその状態に応じてプライオリティを変えることができ、MAP/1 プログラムはプライオリティの高いものからワークを処理するため、搬送の優先処理は容易に行なえる。

表 5 は 3 種類のモデルの入力ステートメント数を比較したものである。

### 3.4 シミュレーション結果の比較

シミュレーションは 1 回のランにつき 50000 単位時間実行し、ワークの到着に影響する乱数系列の取り替えを各回毎にくりかえし、計 5 回のランを行なった。表 6, 7, 8 は設備の稼働率、ワークの生産個数、ワークのシステム滞在時間について 3 つのモデルを比較したものである。稼働率としてアンロード・ステーションを除き大変に高い数値が求まっているが、これはこの数値に本当に

表 7 ワークの生産量(平均個数)

ワ ー ク	MAP/1	GPSS	SLAMII
1	127.4	129.4	128.6
2	114.4	108.6	122.2
合 計	241.8	238.0	250.6

表 8 ワークのシステム滞在時間

ワ ー ク	MAP/1	GPSS	SLAMII
1	2158	2187	2872
2	2157	2362	3042

稼働している状態 (busy) とブロックされている状態 (blocked) の両方が含まれているためである。(このことを示すために、ロード・ステーションについて MAP/1 の busy, blocked, total の各集計結果を掲げておく。なお、GPSS, SLAMII の場合は busy と blocked を区別することはできない)

アンロード・ステーションについて、MAP/1 の値が GPSS と SLAMII に比べていちじるしく小さいが、これは前節で述べた“予約”の機能が MAP/1 モデルにおいて欠けているためである。したがって、GPSS と SLAMII の稼働率は、“予約”による仮想的な占有によって実際以上に大きくなっているといえる。

全体的に見て、集計結果の数値は MAP/1 と GPSS が互いに似通っており、SLAMII は前二者と隔たる傾向がある。これは前節に説明したとおり、GPSS がシステムを忠実に表現しているのに対し、MAP/1 が“予約”の機能を SLAMII が搬送の優先処理の機能を欠き、このシミュレー

ションに関しては後者の機能の欠如が前者のそれよりシミュレーション結果に大きく影響したことを意味している。SLAM II モデルに搬送の優先処理を取り扱うユーザ記述の FORTRAN 副プログラムを加えることにより、その集計結果が MAP/1 や GPSS のそれに接近することは予想できる。

### 3.5 総合的な評価

この実験に関しては、汎用生産システム・シミュレータはその機能をいかんなく発揮したといえる。表から推定されるとおりの比較にならないほど小さい労力で、シミュレーション言語による場合とほとんど変わらないシミュレーション結果が得られている。もっとも、“予約”機能の欠如を原因とするシステムのデッドロックが生じなかったのは幸運であったが、仮にデッドロックが生じたとしてもシミュレーションが停止するから、そのために生産システムの解析を誤るようなことが起きたとは思えない。

以上において触れなかったけれども、この実験において、生産システムの変更すなわちワークの種類、マシニング・センタの台数、カートの台数の増大に対してこの汎用生産システム・シミュレータ MAP/1 がシミュレーション言語を用いる場合に比べて際立って優れた適応性を示したことを付け加えておく。

## 4. おわりに

前述の実験が示唆するとおり、生産システムのシミュレーションにおいて“抽象化”にもとづくプログラムの作成は大変有効である。その具体的な姿である汎用生産システム・シミュレータは生産システム設計という重要な問題領域での OR 的接近を容易にする今後大いに期待できる技術であると言えよう。

## 参考文献

- [1] 秋葉 博, 人見勝人, 西川仙之: ジョブ・ショップのためのオンライン工程管理, 日本経営出版会, 1972.
- [2] 藤井 進, FMS 設計とシステム・シミュレータ, 日本機械学会誌, 86, 779 (1983).
- [3] Hutchinson, G.K. and Hughes: A Generalized Model of Flexible Manufacturing Systems, *PB Report*, PB 281109 (1977).
- [4] IIT Research Institute: *Generalized Assembly Line Simulator*, 1972.
- [5] IIT Research Institute: *Machine Loading*, 1971.
- [6] 黒田 充, 十代田三知男: 量産型機械職場におけるディスパッチング方式の研究, *IE*, 7, 10 (1965).
- [7] 黒田 充: 生産システム解析のための新手法—MAP/1, *IE* レビュー, 28, 1 (1987).
- [8] Miner R.J. and Rolston L.J.: *MAP/1 User's Manual Version 3.0*, Pritsker & Associates, 1986.
- [9] 森戸 晋, 相沢りえ子, *SLAM II によるシステム・シミュレーション入門*, 構造計画研究所, 1986.
- [10] Pritsker, A.A.B., *Introduction to Simulation and SLAM II*, 3rd ed., Halsted Press, 1986.

### OR 誌 今後の特集予定

- 6月号 OR の凶解 (創立30周年記念特集)
- 7月号 交通・運輸 (仮題)
- 8月号 本四架橋 (仮題)
- 9月号 AI の基礎技術 (仮題)
- 10月号 北海道の開発 (仮題)