

大規模生産システムにおける計画業務支援のための シミュレーションシステム LSIP—モデルとシミュレータ—†

冬 木 正 彦*・井 上 一 郎**

ABSTRACT For supporting a production planning in a large scale production system, a generalized simulation model and a simulation system, named LSIP, are proposed. The importance of and difficulties in a “global production planning”, that is, a planning with the view covering entire production facilities and sufficiently long planning horizon are first discussed. Then the discussion is centered on a material flow based simulation system which supports a global production planning activity. A generalized simulation model with which a large-scale system is capable to be handled is proposed, then a system realization concept and methodology is proposed for providing sufficient capability to execute a very large-scale simulation with high speed, which is essential requirements for a global production planning activity support. It is shown through an actual example using a real LSI production system data that the performance requirements of a realized simulator are fulfilled.

1. はじめに

生産システムはますます大規模化、複雑化の様相を強めている。生産システムの規模が大きくなればなる程、全体をみての計画、また先ゆき（長期）をみての計画立案（以下ではグローバル計画と呼ぶ）はその困難度を増す。一方、企業間競争の激化に伴い、生産システムの最適化運用の要求はますます強くなり、そのためにグローバル計画の必要性は一段と高まっている。

例えば、LSI 拡散生産システムにおいては、月間あたりの生産品目、生産量を設定し、そのための投入計画を立案するにあたっては、生産システム全体を対象として少なくとも製造リードタイム以上の期間について計画立案する必要がある。この場合には、計画期間1～数カ月の間に数1000オーダーのロットが投入され、それぞれのロットは投入から最終工程まで数百工程あるので、計画立案に際して取り扱わねばならない情報はきわめて大量である。

大規模生産システムにおいて特に重要となる投入計画においては、最大のアウトプット（産出）が得られるように投入品目ミックス、投入量、投入タイミングを決定するのであるが、投入量と産出の関係は一般には単純でない。投入量を多くすると産出が多くなる可能性は大きくなるものの、多すぎると生産システム内で混雑が生じ、仕掛りが増大し、リードタイムが長くなり結局は産出が低下する。一方、投入量を少なくすると、確実に将来の産出はそれに見合った量しか望めないことになる。従って投入計画の最適化は計画担当者の重要課題となっている。前述のLSI 拡散生産システムでは、ウエハ処理工程の特質により、リードタイムの短縮と仕掛りの削減が製品の歩留り向上にも関係するので先を見通した投入計画の立案がとりわけ重要となっている。

以上のように生産システムの大規模化にともないグローバル計画の重要性は増しているが、大規模化にともなう情報量の増大に対し、経験と勘に頼った従来の計画立案ではとても対応しきれず、コンピュータ活用の計画立案/評価支援は急務となっている。

シミュレーション技法は、計画立案/評価支援のツール/システムを構築する際の有力な手段となり得る。しかしながら生産システムが大規模であることから、シミュレーション技法に基づいて構築するシステム/ツールは次の要件を満たす必要があると考えられる。

LSIP: A simulation system for large-scale-production planning activity support—Model and simulator—. By Masahiko Fuyuki (Faculty of Engineering, Kansai Univ.) and Ichiro Inoue (Faculty of Management, Kyoto Sangyo Univ.).

*関西大学工学部

**京都産業大学経営学部

†1991年12月5日受付 1992年5月6日再受付

①現実規模の計画業務に必要な大規模なデータを扱えること。

②実用的な時間内で計算処理ができること。計画策定者が日常業務の中で使えるためには、高速に処理が行え、入力してから結果を得るまでの時間が短いこと。

③大量データを高速に処理した出力結果が、情報要約され、人間の判断しやすい形になっていること。

大規模生産システム、特にLSI拡散生産システムを対象として開発され、現実問題への適用が試みられているシステム/ツールが、これらの要件に関してどうであるか検討する。Miller¹⁾はシミュレーション言語SIMAN²⁾を用いたモデルにより、LSI拡散生産システムにおけるリードタイムとシステム内仕掛けジョブ数の関係を明確にし、シミュレーション結果に基づく運用改善例を示している。そこでは、モデル内にジョブのない‘空’の状態からシミュレーションを開始し、定常状態の結果を統計的に処理する方式が用いられる。そのため、結果の評価と設定パラメータの調整に多くの時間が必要となり、支援ツールとしては上記②の点で難点があると思われる。

シミュレーション言語を用いた他の試みでは、シミュレーションの準備に要する時間を縮めるために、生産管理データベースシステムの利用を前提として、シミュレーションの入力データ作成のプリプロセッサを開発したり³⁾、改善案策定の試行を効率的に行うため線形計画法の利用が試みられている⁴⁾。汎用シミュレーション言語を用いている場合には、その言語で記述されたモデルをいずれにしてもコンパイルする必要があり②の要件は問題として残る。さらに、モデル表現法にも言語による制約があり、データ規模に関する①の要件に関しても十分な対応が困難と思われる。

一方、AthertonはLSI生産の全工程を対象とした‘詳細化モデル’、すなわちFortranで書かれた基本モデルに詳細な記述を加える‘詳細化’により、特定の生産システムを記述する方式を提案し、実用レベルのシステムを構築/試行している⁵⁾。しかしながら、この方式はモデルの作成にあたって、正確にシステムを記述することに力点が置かれ、グローバル計画にとって効率の良いモデルは何かといった上記①の考慮およびシミュレーションの高速化の方策については明確な検討が十分になされていない。

本論文では、大規模生産システムにおけるグローバル計画業務の支援に焦点を合わせたシミュレーションモデルを提案し、大量データを考慮したシミュレー

ションの入出力の設計および高速シミュレータの具現化法を与えることにより、上述の要件を満たすことが可能であることを示す。

第2章では、まず上述の要件を満たすために基本的に重要であるモデル記述法について論じ、シミュレーションモデルを提案する。第3章では、このモデルを計算機上にインストールし、時間軸上で挙動させる（つまりシミュレーションを行う）方式を検討し、その方式の具体的システム化を論ずる。第4章では、大規模システムを対象としたシミュレータを具現化するときの条件となるメモリ領域の効率的利用と高速処理について論じ、具現化の具体的方策を与える。

本論文で提案した方式は、現実のツールとしてシステム化が計られ⁶⁾、大規模高速シミュレーションツールとして現実の場で計画立案/評価支援を行っており、その有効性が立証されている⁷⁾（なお、ここで具現化したシミュレーションツールは、LSIP (Large Scale Simulation Based Production Planning Tools-System) と名づけた.)。

2. LSIP シミュレーションモデル

2.1 大規模生産システム

生産活動が行われている場（生産システム）を観察すると、それはまず加工する場と加工される物とから成り立っていると見なしうる。加工する場はいわゆる作業場であり、加工される物は一般にジョブやロット、ワークと称されるもの（最終的に製品になる、材料や半製品の‘物’（の集合））である。材料が生産システムに投入され、生産システム内の作業場を渡り歩いていく過程で、各々の作業場でジョブは加工を受け、最終的に生産システムより産出される。この時点でこのジョブに関する生産活動が完了し製品となる。

一般には、大規模生産システムでは

- ①生産システム内に作業場が多数存在する。
- ②材料搬入より製品になるまでに經由する作業場の数が多い。（加工経路が長い。）
- ③ジョブの数や種類（品種）が多い。
- ④組立の部品数が多い。
- ⑤ ①～④の組み合わせ。

などにより、この生産システムを扱う際に関係する情報が大量になりこれを現実に取り扱う際、往々にして全体把握がしにくくなり、またデータとしての取扱いにも様々な困難が生じる。例えば計算機を利用してこの大量のデータを取り扱うとしても、データの格納方法、データの処理方法にかなりの工夫をすることなし

には実用上、使いものにならない。この論文では①～③の点で大規模であるシステム、具体的には LSI 拡散生産システムを想定し、考察を加えていく。

大規模生産システムの生産管理においては、考慮の対象になる要素の数が多いため、全体としてどうなるのか、また全体のバランスがどうなるのか、全体の中でいかなる要素が他と比べて特化するのか等の全体/部分関連の問題がまず取り上げられる。

生産計画レベルでの計画業務を例にとり考えると、まず全体をみての問題としては、

- (a) 将来需要を満たすためには材料投入をいかにすればよいのか。
- (b) 材料投入をあるパターンで行えば、いつ製品が出来上がるのであろうか。

等があり、全体と部分関連の問題としては、

- (c) 想定しえる材料投入パターンに対しては、将来的に作業場に対する負荷のバランスがどうなるだろうか。
- (d) ある時点で負荷バランスをある程度とりえていても、大規模ゆえにいつか必ずどこかに過負荷が生じることが避けられないとすれば、どこがボトルネックになるのか。

等があげられる。計画策定者はこれら全体/部分関連の問題を意識しつつ、具体的に生産計画の立案を行っている。

計画業務を遂行する視点から、大規模生産システム内でのいわば「ジョブの作業場の渡り歩き」をもう少し詳細に観察してみる。ジョブは材料投入に始まり、まず第 1 番目の作業場に到着する。他のジョブとの競合がなく、作業条件が整っていればその作業場にて作業が開始され加工を受ける。この作業場での加工が終了すれば、このジョブは、技術的な加工手順に従って次の加工が行える作業場へ「搬送」され、先程と同じ形で作業が進行する。作業場に到着した際加工の条件が整っていない場合は、その作業場の前で条件が整うまで待つこと（つまり「仕掛け」）となる。以上が「ジョブの作業場間の渡り歩き」の概観であるが、さらに詳細にこれを観察すると、作業場でのジョブの作業開始時のジョブの取扱いの違いが見える。例えばジョブを、個別に加工するか、数個まとめて一度に加工するか、また次々と一定のペースで連続的に設備に投入するか等の加工の仕方に依存してジョブの扱いが異なり、これが作業開始の条件を決している。このジョブの加工形態の違いは、ジョブ全体の生産システム内の流れを問題にしている際には、重要で無視できないこ

ともある。

上記のように実際の大规模生産システムを考えるに当たっては、詳細に見ればいくらでも詳細に観察・記述でき、また概観しようとするればそれに合わせた形で概観でき得るものである。

大規模生産システムにおいては、前述のとおり、システムに内包する要素数が多く複雑となるため、まず全体をみての計画、また先ゆき（長期）をみての計画（グローバル計画）が最大の関心事となっており、このグローバル計画問題すらも大きな困難をかかえている。

大規模生産システムにおけるグローバル計画支援に対し、シミュレーションはその有効性を発揮できる。そのためには、大規模生産システムにおけるグローバル計画支援の特性を十分に理解した上で、いかなるモデルを設定すればよいのか、またそのモデルにいかなる汎用性をもたせるのか、そして、そのモデルを計算機上でいかに高速に挙動（シミュレーション）させ、分析に必要なモデル挙動データを収集するかが鍵となる。次節では、まず大規模生産システムに関する汎用モデルを提案する。

2.2 LSIP モデル

大規模生産システムにおける生産計画レベルでの計画業務を遂行するにあたっては、材料投入と産出との時間的・量的関係が把握でき、さらに投入産出間の作業場への負荷、およびその偏在の結果としての仕掛りの分布状況特にボトルネック等に関する概略が算定あるいは推定されれば、このグローバル計画業務の質的向上が期待できる。

具体的方策としては、上記の算定あるいは推定が可能となるような生産システムの模型を作り、この模型にて想定できる材料投入パターンを実験し、この模型実験より得られるリードタイム、仕掛け、稼働率に関するデータを活用することが考えられる。グローバル計画業務を支援するために用意する生産システムの模型については、

- ・グローバル計画策定者の意思決定に有用なデータを提供すること。
- ・対象とする生産システムそのものが大規模であるので、現実これを模型にしたときの模型操作性を確保しておくこと。

の条件を満たさなければならない。

一般に、模型の精粗度とそれから得られうる情報の精粗度は正の相関をなすことから、模型を限りなく詳細化しようとする傾向がある。しかし、詳細化しすぎ

る模型は上記操作性に難点が生じると同時に、模型操作を行うにあたって詳細なデータを用意しなくてはならないという煩雑さが増し、さらに模型操作より得られるデータが目的に対して細かすぎ、かえって活用しにくくなるなどの問題が生じる。

従って、いかなる業務の中でいかなる目的に模型が使われるのかを明確にし、その目的に適切な精度を備えた模型を用意する必要がある。

前述のグローバル計画業務、つまり大規模生産システムにおける生産計画レベルでの全体/部分関連をリードタイム、負荷バランス、そして稼働率の観点で概観し次期計画期間を見通し意思決定する業務を支援する目的に対しては、以下の基本方針をとり、有用な情報を供しうる模型の設定を行う。

- ① ‘物の流れ’ に焦点を絞って模型を作る。すなわち、ジョブが技術的加工順序に従って作業場を渡り歩く有様の時間的推移を模擬する。
- ② ‘物’ の投入より産出までの時間を作業時間（加工時間や搬送時間など）と待ち時間の総和として把握する。個々のジョブが作業場において受ける加工の詳細については捨象する。例えばジョブの作業場における作業時間の内部構成、すなわち段取り時間と正味加工時間の区別などの詳細は考慮の対象としない。
- ③ ただし上記の時間的要素、特に待ち時間に全体として無視できない影響を与えると考えられる要因、例えば加工形態の違いなどは模型においても考慮する。

この基本方針に沿い、まず模型を形成するにあたって基本的な記述要素（モデル記述要素と呼ぶ）として、ジョブ、ワークセンタ、オペレーションを設け、現実世界におけるジョブ、作業場、作業に対応させる。技術的加工手順としては、まずは直列（直線）的手順を考え、モデル記述要素として、オペレーションを連結したオペレーションシーケンスを設ける。さらにワークセンタ要素にはジョブの仕掛け場所としてバッファを設ける。

これらのモデル記述要素を用いると、‘物の流れ’ は、ジョブがワークセンタでオペレーションを受け、オペレーションシーケンスに従ってワークセンタを順次移動することにより表現される。時間的要素については、ワークセンタでのオペレーションの遂行に要する時間（オペレーション時間と呼び、以下ではOP時間と記す）とバッファでの滞留時間のそれぞれの総和が、ジョブの投入から産出までの作業場間と待ち時間

となる。なお、作業場間のジョブの搬送については、搬送待ちと搬送作業が、所要時間の観点からは作業場での仕掛けと加工作業と同等に扱え、上記のモデル記述要素で記述可能である。

以上が模型の基本的な枠組みであるが、汎用性を持たせるため、合流や分岐のある物の流れの表現も考慮する。さらに、現実場の運用では‘物の流れ’の途中段階で、いくつかのジョブを一時的にまとめて加工を行うこともあるが、そのようなジョブの扱いは、時間的要因に無視できない影響を与えるので模型においても考慮する。これらの表現方法については2.6で述べる。

大規模生産システムのグローバル計画業務の支援を目的として設定した上述の模型を我々はLSIPモデルと名付ける。以下の節では、このLSIPモデルを詳細に記述する。

2.3 モデル記述要素と属性

LSIPモデルにて模型操作を行えるようにするには、生産システム内の作業場の特性や加工手順などの技術情報、投入予定のジョブ情報等に関し、‘物の流れ’を模擬するのに必要な範囲の情報を模型に取り込む枠組みが必要である。LSIPモデルでは、オブジェクト指向の考え方を採用し、それらの情報をモデル記述要素への関連に応じて分類し、できる限り直接関連するモデル記述要素にその要素に関する情報を持たせることにする。そのため、モデル記述要素に‘属性’と呼ぶ格納場所を設ける。特定の生産システムを表現するモデルを具体的に作るときは、ワークセンタなどのモデル要素を現実との対応に必要な数だけ用意し、それぞれの属性に適切な値を与えることになる。

以下では、モデル記述要素を定義し、それぞれの要素が持つ属性を説明する。

a) ジョブ

生産システムに材料として投入され加工を受けて最終製品になる‘物’を表す。ジョブはそれを規定する次の情報を持つ。

- ジョブの名称
- 品目名：製品の品種名
- ロットサイズ（ジョブとしてまとめられた製品の個数）
- リリース時刻（加工を開始する予定時刻で製造開始の指示を出す時刻に同じ）
- 納期
- 優先度（オペレーション毎に順次優先度を変えることもできる）

- ジョブの先行順序関係 (2.6参照)

b) ワークセンタ

加工などの作業を遂行できる同一機能を持つ機械や設備群が設置されている作業場を表す。ワークセンタには、機械・設備を表す‘マシン’と、バッファを設ける。

- ワークセンタの名称
- マシン台数
- オペレーション形態と OP 時間 (2.5参照)
- ジョブ選択規則 (ディスパッチングルール)

オペレーションを遂行するジョブを、バッファに仕掛っているジョブの中から選ぶための規則で、次の3種類を用意する。

① 先入れ先出し順 (FIFO)

② ジョブで指定された優先度の順

③ 特急クラス優先 (特急クラスのジョブを優先し、ジョブで指定された優先度の順に選ぶ。それ以外のジョブは先入れ先出し順)

- 当該ワークセンタで遂行可能なオペレーション
- ワークセンタカレンダー (稼動可能なマシン台数のスケジュール)

c) オペレーション

作業場にて行われる加工等の作業を表す。

- オペレーションの名称
- オペレーションを遂行できるワークセンタ

ワークセンタが複数あるときはワークセンタ選択規則も指定する。

- OP 時間

d) オペレーションシーケンス

ジョブに対する技術的加工手順を表し、オペレーションを直線的に並べて品目毎に定義する。ただし、その並びに、同一のオペレーションが何回も現れることや、同一のワークセンタで遂行されるオペレーションが現われてもよいとする。

- 品目名
- オペレーションの並びと OP 時間
- シーケンスの部分名
- ジョブの統合/分解オペレーション (2.6参照)

モデル記述要素は、各々の属性により相互に関係している。図1はそれらの関連を単純なモデルについて模式的に表現した例である。図の中で下の面上の大きな円がワークセンタを表し、その円に付加した箱はバッファ、小円はマシンを表す。上側の面内の円はオペレーションを、それらの連結はオペレーションシーケンスを表す。オペレーションとワークセンタの対応関

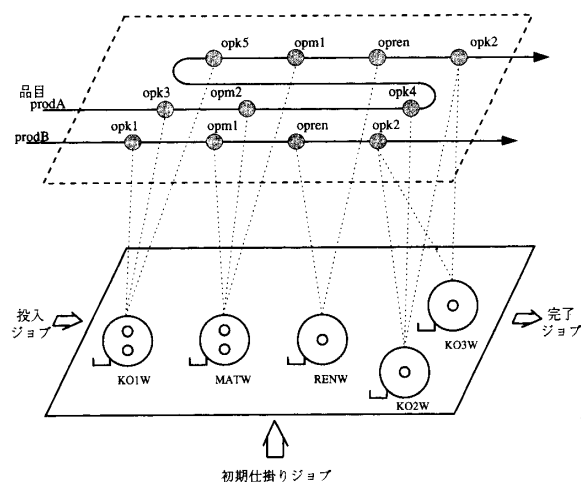


図1 LSIPモデルの模式図

係は点線で示している。

2.4 ‘物の流れ’の模型操作

この節では、ジョブをワークセンタ間で移動させる模型操作について述べる。

ジョブは次の手順によりワークセンタでオペレーションを受け、ワークセンタ間を移動する。

①シミュレーションの時刻を進め、そのジョブの加工を始めてもよい時刻 (リリース時刻と呼ぶ) になったジョブを、最初のオペレーションを遂行できるワークセンタのバッファに投入する。最初のオペレーションとは、そのジョブの製品毎に決まっているオペレーションシーケンスの先頭のオペレーションである。

②ワークセンタでのオペレーション開始の条件が整ったとき、ジョブはバッファから取り出され、オペレーションが始まる。OP時間は、次節で述べるように3種類の加工形態によって異なる決め方をする。

③ワークセンタでのオペレーションが終了すると、オペレーションシーケンスを参照し、次のオペレーションを遂行できるワークセンタのバッファにジョブを移す。

④オペレーションシーケンスの最終のオペレーションが終了するまで②, ③を繰り返す。最終のオペレーションが終了すれば、そのジョブの処理は完了したことになる。

上記の操作は1つのジョブに着目してその動きを記述したが、モデル全体については、まず初期仕掛け状態を設定する。即ち計画開始時点の現実の作業場でのジョブの仕掛りの有様を、対応するワークセンタでジョブが仕掛っている状態として設定する。シミュレー

ジョブ時間を進め、上記の①～④の操作を全てのジョブについて行なう（初期仕掛り状態にて仕掛けていたジョブについては②～④）。②の操作で、複数のジョブがバッファに仕掛っている場合には、ジョブ選択規則を適用してバッファから取り出すジョブを決める。

以上の操作により、ワークセンタ間でジョブを移動させ、現実世界での‘物の流れ’の時間的推移を表現することが可能となる。

2.5 オペレーション形態とオペレーション時間

生産システム内の作業場におけるジョブの取扱いは、2.1で述べたように、個別に加工する、数個まとめて一度に加工する、次々と一定のペースで連続的に設備に投入するなどの方式が現実に行われており、それらの違いは‘物の流れ’の時間的要素に関して無視できない。そこでLSIPモデルでもワークセンタにおけるオペレーション遂行の形態として、個別処理、まとめ処理、連続処理の3種類を用意する。ここでは、これらのオペレーション形態と、それぞれのオペレーションに要するOP時間の決め方について説明する。

a) 個別処理

ワークセンタ内のマシンでジョブを個別的に処理する形態を個別処理と呼ぶ。

この処理に要するOP時間は、ロットサイズと単位OP時間の積とし、単位OP時間は、品目、オペレーション、ワークセンタの組み合わせで決める。

b) まとめ処理

同一のオペレーションを行なう複数のジョブをまとめ、1台のマシンで同時に処理する形態をまとめ処理と呼ぶ。

オペレーション毎に異なるジョブのまとめ数とOP時間は、まとめ処理を行なうワークセンタの属性として指定する。それらの値はオペレーションとワークセンタの対で決め、ジョブのロットサイズには依らないものとする。

c) 連続処理

一定の時間間隔（OP開始間隔と呼ぶ）でジョブが次々にマシンに取り込まれ、ワークセンタで決められたOP時間の後にジョブのオペレーションが順次終了する形態を連続処理と呼ぶ。連続処理では、OP開始間隔とOP時間をワークセンタ毎に定める。

図2は、ジョブの処理がオペレーション形態によってどのように異なっているかを模式的に示している。図中の三角・四角・菱形はジョブを表し、矢印がジョブの動きを示唆している。破線の箱は、次のオペレーションが行われるワークセンタのバッファを示してい

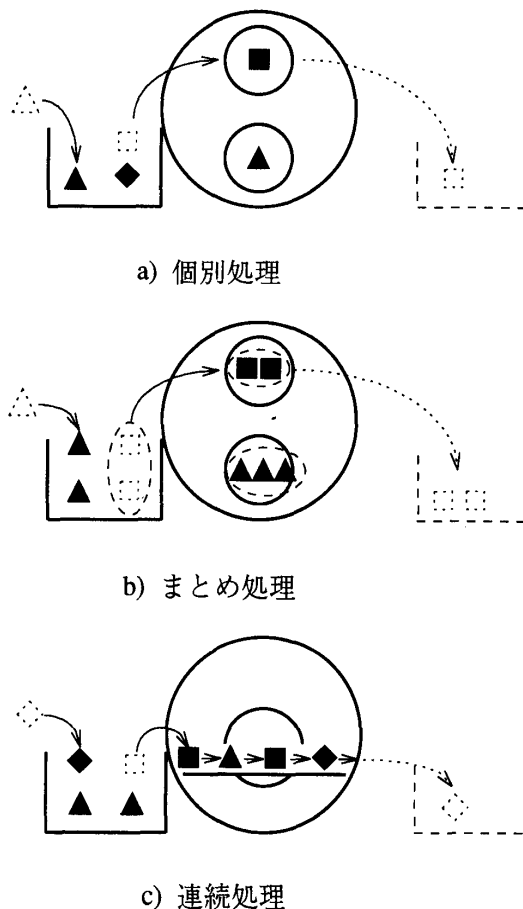


図2 オペレーション遂行の3形態

る。

LSI 拡散生産システムには、機械的処理と化学的処理が混在しているが、モデルに上述の3つのオペレーション形態を用意することにより全ての工程のモデル表現が可能となる。

なお、搬送作業の扱いは注意を要する。搬送段階で待ちが生じ、その大きさが全体の待ち時間からみて無視できない場合には搬送作業を陽に考慮する。その場合、搬送作業の形態に合わせ、上記の個別、まとめ、連続のいずれかのオペレーション形態をもつワークセンタを、搬送作業を遂行するワークセンタとしてモデル内に用意することになる。一方、搬送段階での所要時間が一定と見なせるときにはそれを直前の作業場での加工時間に含めることにより、搬送作業に関連するモデル要素の設定を省略でき、モデル規模の増大の抑制に役立つ。

2.6 ジョブの接続と統合

生産システム内の‘物の流れ’のパターンは、技術的な加工手順によって決まる。2.2ではこの加工手順

は直列的であるとして LSIP モデルのオペレーションシーケンスを定義した。LSI 拡散生産システムの場合、物（ウェア）の加工手順は直列的であるので現実のシステム内の物の流れは、模型内でジョブが1つのオペレーションシーケンスに従ってワークセンタを次々と移動する動きとして表現できる。しかし、一般の生産システムにおいては物の流れはしばしば合流・分岐が含まれる。この節の前半では、LSIP モデル中のジョブに「接続関係」表現を付加することにより、合流・分岐を含む物の流れも表現しうることを説明する。ここで「接続関係」とは、先行ジョブの最終オペレーションが終了すれば自動的に後続ジョブの先頭オペレーションが開始可能となるような複数のジョブ間の先行/後続の順序関係のことであるとする。

模型中のジョブ間に「接続関係」表現が付加されると、組立や分解の工程作業を表すことができる。例えば、モデル表現上複数の先行ジョブに対して1つの後続ジョブが存在する場合、先行ジョブの最終オペレーションがすべて終わった時点で後続ジョブの先頭オペレーションの開始が可能となるので、先行ジョブにより組立部品が用意されそれが後続ジョブの先頭オペレーションにより組み立てられることを表現できる。従って後続ジョブの先頭オペレーションが現実のシステム内での組立工程を表していると見なせる。図3は、合流を含む物の流れのモデルにおいて、オペレーションシーケンスおよびオペレーションとワークセンタの対応関係を示している。

分解工程も同様に、1つの先行ジョブに対して複数の後続ジョブを設定すると、先行ジョブの最終オペレ

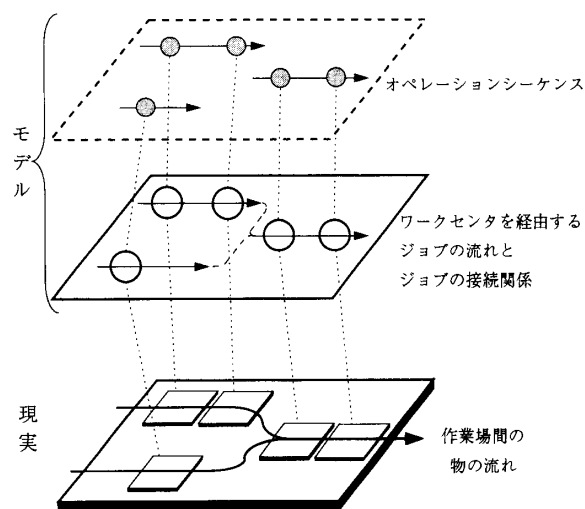


図3 合流のある物の流れの例と対応する LSIP モデルの表現

ーションを現実のシステムでの分解工程に対応させることが可能となる。例えば、鋼板を切断する工程（分解工程）を途中の工程として含み最終的に複数の異なる製品を作るといった分岐を含む物の流れは、切断工程までの作業を先行ジョブに、それ以降を製品毎に後続ジョブに対応させることで表現できる。以上より、現実の生産システムにて合流・分岐を含む物の流れを、LSIP モデルで表現するには、「接続関係」を設定したジョブの組み合わせを用意すればよいということになる。

次に、現実の「物の流れ」の途中段階で、数量の小さいジョブをいくつか一時的にまとめて1つのジョブとみなして加工を行う処理について考える。この処理は、「物の流れ」の時間的要素に無視できない影響を与えるのでモデルにおいても考慮する必要がある。そこでロットサイズの小さいいくつかのジョブを、モデルにおいて一時的にまとめて1個のジョブとみなし途中工程のオペレーションを行うことにする。この模型操作を可能とするため、オペレーションシーケンスの一定区間にて同一の製品を作るジョブをまとめて1つのジョブとみなす「ジョブの統合」と呼ぶ機能を設ける。

以上、この章で述べた LSIP モデルにより、現実の生産システム内の「物の流れ」をグローバル計画に必要なレベルに抽象化して表現する枠組みを与えた。次の章では、本 LSIP モデルを計算機上に展開し模型操作を行う方式について述べる。

3. モデルの計算機への実装

3.1 シミュレーション方式

LSIP モデルを計算機上で模型操作すなわちシミュレーションを実行する方式として、シミュレータを用いる方式をとる。つまりモデル要素とその属性値を入力データとして与えれば、シミュレータによりそれに対応した LSIP モデルが計算機のメモリ上に生成され模型操作が自動的に行われる方式である（以下これをシミュレータ方式と呼ぶ）。この方式の他に、対象とする生産システムを汎用シミュレーション言語を用いて記述し、コンパイルし、シミュレーションを実行する方式（以下、シミュレーション言語方式と呼ぶ）が考えられるが、大規模生産システムのシミュレーションを行うには問題がある。すなわち、この方式をとれば、一般にモデルを記述するのに要するプログラム量（従ってモデル作成工数）が多くなり、それに伴ってシミュレーションの実行時間も長くなる。特に生産

システムの規模が大きくなるときには、このシミュレーション言語方式ではプログラム量および実行時間が膨大となることから、この方式は実用に耐えられなくなるという現実がある。

なお、シミュレーション方式を検討するにあたってはその方式の汎用性も考慮する必要がある。一般にシミュレーション言語方式は“汎用シミュレーション言語”を用いて記述する方式だけに汎用性が高いと考えられている。一方、シミュレータ方式の場合は汎用シミュレータとして最初に予定し設計した範囲での汎用性は保証されるが、想定外の条件変更/追加にはプログラムレベルでの対応が求められることになることから、汎用性が限定されると考えられている。ただし、ここでいう“汎用性”とは計画策定者（ユーザ）が直接手を加えシミュレーションプログラムを変更するという意味での汎用性を意味するのであるが（プログラムが小さい間は、シミュレーション言語を修得している計画策定者にとっては確かに汎用的であっても）、シミュレーションモデルの規模が大きくなれば、現実には計画策定者では対応しきれず、また対応したとしても信頼性が保証されず、実際にはシステム部門のシミュレーション専門担当者の手に委ねているのが実状である。システム部門の手に委ねられているプログラムの汎用性については、（プログラミングに用いる言語の特性とシステム設計者の力量により汎用性は創出されるもので、）一般には、汎用シミュレーション言語を用いるよりもむしろ高級言語を用いる方がプログラム記述の汎用性は広がるといえよう。以上の考察より、大規模シミュレーションを実行する方式としてはシミュレータ方式が適切であると考えられる。

次に、シミュレーション実行時に生成されるデータの蓄積方式について論じる。シミュレーション実行時、その進行過程で生成されるモデルの挙動に関する諸データは、必要に応じ中間出力ファイルと呼ぶデータファイルに標準化したフォーマットで蓄積していく方式をとる。これは、出力結果分析用に体系的に各種ツールを用意（ツールズシステム方式⁸⁾）し、この蓄積されたデータを標準インタフェースを介して活用するためである。シミュレーション実行完了後、計画策定者がこの中間出力データをこれらツールを使って加工編集することによってシミュレーション結果を多角度から検討し、計画策定の効率化と質的向上を計ることができる。

3.2 入力データの記述

シミュレータの入力データファイルには、LSIP モ

デルのモデル要素および属性値を記述する。この記述を、簡潔かつ網羅的・効率的に行うため LSIP 入力データフォーマットを用意する。このフォーマットに従って、入力データファイルを具体的に記述することで、対象とする生産システムの LSIP モデルを作成できる。

入力データファイルに記述するモデル要素とその属性は2.3で説明しているの、以下ではそれらをシミュレーション実行にとって必須の項目とオプションに分けて示す。

a) 必須の項目として、

- ワークセンタおよびオペレーション

図4は、図1のモデルに対応した登録例を示している。そこでは KO1W, KO2W, KO3W を個別処理、MATW をまとめ処理、RENW を連続処理をおこなうワークセンタとしている。

- オペレーションシーケンス

- 計画対象となるジョブ

b) オプションとして、

- 初期仕掛け状態

ジョブの仕掛け状態としては、ワークセンタのバッファにてオペレーションを待っている仕掛けりと、マシンでオペレーションを遂行中の2種類の仕掛けりを考え、3種のオペレーション形態毎にワークセンタ単位で記述する。

- ワークセンタカレンダー（設備稼働スケジュール）

本来の稼働スケジュール指定の他に、完全稼働が期待できない作業場の表現に用いることができる。

例えば、調整などの必要から100%の稼働が見込まない設備（機械群）に対しては稼働率を予測し（設定

```

**** -個別処理を行うワークセンタの登録-
**** ルール
**** WC名 MC数 12345 OP名
**** *-----*-----*-----*-----*-----*-----*
WCD1 KO1W 2 a opk1 opk3 opk5
WCD1 KO2W 1 a opk2 opk4
WCD1 KO3W 1 a opk2
****.-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----
**** -まとめ処理を行うワークセンタの登録-
**** ルール ジョブ O P 時間 まとめ待ち
**** WC名 MC数 12345 OP名 まとめ数 時分秒 最長時間
**** *-----*-----*-----*-----*-----*-----*
WCD2 MATW 2 b opm1 2 40000 20000
WCD2 3 20000 10000
****.-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----
**** -連続処理を行うワークセンタの登録-
**** ルール O P 開始間隔 O P 時間
**** WC名 MC数 12345 OP名 時分秒
**** *-----*-----*-----*-----*-----*-----*
WCD3 RENW 1 a opren 30 23000
****.-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----

```

図4 ワークセンタとオペレーションの登録例

稼働率と呼ぶ), その作業場に対応するワークセンタの稼働可能なマシンの台数をワークセンタカレンダー指定により設定稼働率に一致するように調節することで表現できる。

- ジョブの優先度変更

オペレーションに依存して優先度を変更する。

- ジョブの接続関係

- ジョブの統合/分解点

以上の項目に加えて、シミュレーション実行条件、シミュレーション期間、中間出力の方式等、を指定することで入力データファイルができあがる。

3.3 シミュレータの出力情報

シミュレーション実行過程のモデルの状態遷移データは、中間出力ファイルに格納される。LSIP モデルがグローバル計画の業務支援を目的として簡潔に表現されていても、ジョブ数と工程数の多さからモデル状態の変化に関する情報はなお大量である。そこで、グローバル計画の立案/評価に必要な情報の大部分は、一定期間毎のシステムの状態やその期間中の変化に関する情報であることに着目し、入力データファイルで指定した間隔（モニタ間隔と呼ぶ）毎に、それらをモニタ情報として出力する方式を取る。もちろん、ジョブ情報やワークセンタの状態遷移に関する詳細情報を出力する機能も用意する。

モニター情報としては、

- ジョブに関して、リリースジョブ数、リリース数量、完了ジョブ数と完了数量のいずれも累積値を出力する。
- 各ワークセンタ単位に、マシンでオペレーション遂行中のジョブ数や、バッファで仕掛っているジョブ数、累積稼働時間や累積ジョブ待たせ時間、累積到着ジョブ数や累積オペレーション終了ジョブ数などを出力する。

このモニタ情報を用いることにより、ワークセンタ毎の稼働率、仕掛けジョブ数や負荷率の推移、さらにワークセンタへのジョブの入り・出（流動数）を知ることが出来る。

ジョブ情報としては、それぞれのジョブの完了時点で、そのジョブに関する累積 OP 時間等の情報を出力する。この情報からは、品種毎の生産リードタイムや理論工期にたいする倍率が分かる。

詳細情報としては、ワークセンタでジョブのオペレーションが始まる度に、ジョブ名、オペレーション名、ワークセンタ名、オペレーション開始時刻、OP 時間、オペレーション終了時刻等を出力する。シミュ

レーション終了時点まで得られるこの詳細情報からは、ワークセンタガントチャート、ジョブガントチャートを描くことができ、またこのデータを加工することでモニタ情報から得られるよりもきめの細かい評価情報を得ることが出来る。

出力情報を、モニタ情報とジョブ情報に限った場合の中間出力データファイルのサイズは、モニタ情報を出力する頻度に依存するが、詳細情報まで出力する場合に比べて10～数10分の1に小さくなる。この出力データのサイズは、シミュレータの実行時間にも大きな影響を及ぼし、モニタ情報とジョブ情報だけの場合には約数分の1になる。

中間出力データファイルにて、サイズの小さいモニタ情報とジョブ情報のみの出力と、サイズの大きい詳細情報出力を切り分けることができる機能は、シミュレーションに要する時間を実質的に減らす上で有効である。すなわち、何回か案改善の試行サイクルを繰り返すときも最終回のみ詳細情報を出力することにすれば、計画業務の中でシミュレーション実行に要する合計時間を少なくできる。

この章では、データサイズと情報要約を考慮したシミュレーション方式と入出力の仕様について述べた。これにより大規模生産システムの生産計画実務支援を目的としたシミュレーションを計算機上で実行する枠組みが与えられた。

4. LSIP シミュレータ

この章では、大規模システムを対象とする LSIP シミュレータを、ソフトウェアとして具現化する際に課せられる条件とその条件を満たすための具体的方策について述べる。

4.1 大規模システムシミュレータの条件

大規模生産システムにおいては、ある時点でみたときシステム内に滞留しているジョブの数が極めて多い。これに対応して、シミュレーション実行時に計算機のメモリ上に展開するモデルの状態に関するデータも大量にならざるを得ない。従って、この大量データを①領域的に効率よく扱えること、かつ②高速に処理できること、が大規模生産システムシミュレータ具現化にとって必須の条件となる。

この条件をさらにつぶさにみると、①領域の効率利用に関しては、単にそのサイズのみならず、シミュレーション実行時の動的特性も考慮する必要がある。すなわち、対象となるモデルの規模の大きさに加えて、シミュレーション実行時に動的に大きく変動する状態

を扱う必要がある。例えば、ネックになる工程が発生したときには、ワークセンタのバッファに非常に多くのジョブの待ちが生じ、ネックでない箇所との不均衡が極めて大きくなり、またその発現箇所もシミュレーションの進行とともに変化する、といった状態を効率的に扱う必要がある。②の高速処理は、計画立案業務の中でのシミュレータの使われ方を考えると必要となる。シミュレーションを用いてグローバル計画立案を行うにあたっては、「入力データ作成/変更→シミュレーション実行→結果評価」の案改善サイクルを何度か繰り返すことになる。従って実用的な時間内でこのサイクルを回せるには、まずシミュレーションの実行時間が短くなければならない。さらにこの時間は計画策定者が単に待つだけの時間であるので、案の試行改善の思考の流れを中断しないためにも短い方が望ましい。

4.2 シミュレータ具現化と性能評価

上記条件を満たすためのシミュレータ作成段階での具体策をここではC言語を例にとり説明する。

シミュレーションの時間進行は事象間隔方式を用いる。シミュレータ内部では、ジョブのオペレーション遂行に関する基本事象として、マシンでのジョブのオペレーション終了、連続処理ワークセンタでのOP開始間隔でのジョブのマシンへの取り込み、ジョブのリリース(ジョブの生産システムへの投入)を設定する。その他、ワークセンタでの稼動可能マシン台数の変更や、モニター情報出力などの事象を設定する。

上述の①と②の条件に対する具体策は次の通りである。

①領域の効率的利用：モデル要素や将来事象のイベントはC言語の構造体を用いて表現し、それらを必要に応じメモリ上に動的に割付ける。この方式では、モデル規模の最大値を想定する必要がなく、入力データを読み込みながら必要なだけ領域を確保できるので無駄が生じない。さらにシミュレーション時間の進行時にも必要に応じ割付けを行うが、他方で不用になった領域は解放する。また、構造体を利用することは、プログラムの可読性が高くなり、プログラムの保守性の点でも望ましい。

②高速性：内部処理を高速にするため、以下の事柄をデータ構造の定義と関数手続きの記述を行う際に実施する。

- 1) モデル要素間の値参照や更新の手続きの単純化。
構造体の間の値参照や更新はC言語のポインタを利用し、なるべく直接または短いステップで行える

ようにする。

- 2) ジョブやオペレーション等の名称検索の高速化。
ハッシュ法等の検索技法を用いる。
- 3) オペレーティングシステム(OS)によるメモリ領域の動的確保の頻度を減らすこと。領域を効率的に利用するためにはメモリ領域の動的確保は必須の機能であるが、これをすべてOSに委せると効率が良くない。そこで一度確保した領域はプログラムにて自己管理し、正味必要になるときのみOSによる領域確保を行うことにする。

以上の具体策に基づいて作成したLSIPシミュレータは、大規模生産システムの生産計画立案/評価のツールとして、十分な実行速度を達成できた。ちなみに、LSI拡散生産システムを対象として、ジョブ数約5000、ジョブあたりの工程数は200~500、計画期間2ヶ月のシミュレーションをサンマイクロシステムズ社のSPARC station 2(約28MIPS)で実行した場合の処理時間は、1~5分である。

5. おわりに

大規模生産システムにおけるグローバル計画の立案/評価をシミュレーション技法に基づいて支援するシステム/ツールについて、本論文では、生産システムを記述するLSIPモデルを提案し、モデルの計算機への実装方法、シミュレーション方式と入出力の仕様について述べ、大規模システムシミュレータ具現化の方策を示した。

グローバル計画業務支援のツールは、生産システムが大規模であることから、大規模データの扱い、処理時間、情報要約に関する情報処理要件を満たすことが求められる。LSIPモデルとそのシミュレータは、

- a) グローバル計画の業務目的に対応した簡潔かつ汎用的なモデル表現、
- b) モデル表現に即した入力データファイルフォーマットと評価目的に応じた出力データの切り分け、
- c) シミュレータの具現化にさいして、メモリ領域の効率的利用と処理の高速性を確保するための動的割付/自己管理等、

により上記の要件を満たしている。

LSIPシミュレータを核ツールとしたツールズシステムは、現実のいくつかの工場にてその有効性が確認され⁷⁾、その中でさらに新しい具体的ニーズを喚起し、ますますの発展が期待されている。

謝 辞

1989年本研究に着手して以来，システム開発では関西大学大学院生飯野員範君の協力を得，またケーススタディでは日本電気(株)および各地の日本電気グループの各部署の方々の様々な御支援御協力を頂いた．ここに深謝致します．

参 考 文 献

- 1) D. J. Miller: Simulation of a semiconductor manufacturing line, Commun. ACM, 33-10, 98/108 (1990)
- 2) C. D. Pegden: Introduction to SIMAN, Systems Modeling Corp. 1986/高桑(訳): FA・生産システムのシミュレーション, コロナ社, 1987
- 3) S. Pollak: Wafer Fabrication Factory Simulation Language, IEEE/SEMI International Semiconductor Manufacturing Science Symposium '89, 114/116 (1989)
- 4) R. D. Moore, Z. Apogon, B. J. Lee: Simulation for closed loop factory optimization, Proc. 1990 Summer Computer Simulation Conference, 237/242 (1990)
- 5) R. W. Atherton: Detailed Simulation for Semiconductor Manufacturing, Proc. 1990 Winter Simulation Conference, 659/663 (1990)
- 6) 冬木正彦, 井上一郎, 梶田和雄, 本間三知夫, “大規模生産システムにおける生産計画立案/評価/意思決定支援ツールズシステム LSIP”, 日本 OR 学会秋期研究発表会アブストラクト集, 60/61 (1991)
- 7) M. Homma, et al.: Line productivity Improvement Using Simulation System for VLSI Manufacturing, Proc. of International Symposium on Automated IC Manufacturing VII (Electrochem. Soc.), Phoenix, Oct. 13-18 (1991)
- 8) I. Inoue, Y. Yamada, T. Adachi: A Tools-system in Decentralized Production Management Systems, Computers in Industry, 6-6, 465/476 (1985)