

生産指示機能をもつ

生産システム・シミュレータ

梅田 茂樹

1. はじめに

今日の製造業は、競争の激化するなか多様化したニーズに応えるため、多品種少量生産体制に入りつつある。また、工業製品のライフサイクルは短くなる傾向にあり、その一方でFMSやNC機械などの普及により、設備投資額は増大する傾向にある。これらに対処しようとビジネス・スピードを向上させるためにCIMの導入を図ろうとしている。CIMにおける生産システム・シミュレーションの狙いは、効果的な設備設計案や効率のよい運営方式を決めるための事前評価を行なうことにある。[1]

シミュレーション・モデルの開発には、多くの場合GPSS等の離散系シミュレーション言語が用いられる。シミュレーション言語では、EVENT, TRANSACTION, ENTITYなどの抽象度の高い概念でモデルを記述するので、使いこなすのにかなりの習熟が要求され、モデル開発には人手と時間を要することが多い。[2]

筆者らは、生産システム専用のシミュレーション・パッケージMANMOSS (MANufacturing MODELing and Simulation System)を開発した[3-9]。MANMOSSは、加工機械や搬送具などの生産設備や作業員、さらにはオペレーションなどのモデルをあらかじめ内蔵して、モデル作成作業の負担軽減を図っている。なかでも、『押し型』、『引き型』などの生産指示方式のシミュレーションモデルは、ジャストインタイム(JIT)生産システムを構築・運営するうえで、非常に有用なものである。また、シミュレーション結果のデータ解析機能やユーザーインターフェイスをもっており、生産システムの総合的解析ツールをめざしている。

本稿では、MANMOSSの紹介とともに、CIM環境

うめだ しげき 日本アイ・ビー・エム(株) 東京基礎研究所

〒102 千代田区三番町5-19

1991年3月号

下での生産システムシミュレーション技術のあり方を議論する。

2. 生産システム・ネットワークモデル

2.1 ネットワークモデルとモデリング・ディスクリプター

生産システムの数や種類は膨大で、それらに共通項を見出すのは不可能であるが、生産システムのモデル、すなわち抽象化されたシステムの基本的な構成要素は、機械、加工組立の対象物、運搬設備、バッファ、JOB、およびその実行に必要な段取り、作業員等、ごく少数に限定できる。これらの構成要素を記述する記述要素を用意し、それを用いてモデルを作成すれば、シミュレーションモデルの開発作業は大いに軽減できる。

この記述要素をモデリング・ディスクリプターという。工程を表現するものとしてCELL、搬送を表現するものとしてTRANS、および作業員を表現するものとしてOPERATORSがある。CELL, TRANS, OPERATORSの各ディスクリプターは、フレーム形式[10]と呼ばれる属性(スロット)とその値(ファセット、データからなる表形式で表現される(図1)。生産システムの構成に合わせてスロット構造を決め、生産技術者にとってなじみやすい用語で記述する形式なので、モデル作成作業はかなり容易で理解しやすい。また、値が未定義の時は、あらかじめ用意された欠測値が使われるので、おおまかなモデルを作成する時には都合がよい。

2.2 工程モデル

工程を表現するモデルをPRODUCTION CELLという。PRODUCTION CELLのフレームは、システム資源に関するスロット、オペレーションに関するスロット、初期値設定に関するスロットの3つのスロットからなる。

システム資源には、機械、およびバッファがある。性能の等しい複数の機械が設定できる。個々の機械の属性として、機械名、機械の型、機械故障属性、初期段取

```

CELL : cell1;
MACHINE LIST: m1,m2;
MACHINE TYPE: automatic;
BUFFER SIZE: p1=40,p2=30;
BUFFER CRITERIA : p1=18,p2=13;
DEFINE SETUP: s1;
    TIME: minimum=2;
    OPERATORS: 1;
    END;
DEFINE SETUP: s2;
    TIME: minimum=2.5,average=3;
    OPERATORS: 2;
    END;
DEFINE WORK: WT1;
    SETUP: s1;
    TIME: minimum=3,average=4;
    INPUT TYPE: p1=3;
    OUTPUT TYPE: p2=6;
    END;
DEFINE WORK: WT2;
    SETUP: s2;
    TIME: minimum=2,average=2.2;
    INPUT TYPE: p3=1;
    OUTPUT TYPE: p4=1;
    END;
DEFINE JOB: J1;
    WORK TYPE : WT1;
    REPEAT : 5;
    END;
DEFINE JOB: J2;
    WORK TYPE : WT2;
    REPEAT : 7;
    END;
INIT BUFFER: p1=20,p2=15;
INIT SETUP : m1=s1,m2=s2;
END

```

図 1 モデリング・ディスクリプターの記述例

りがある。機械の型には、運転時にオペレータを要する手動運転型と、オペレータを必要としない自動運転型がある。手動運転型の場合、必要なオペレータの人数を定義する。機械故障属性としては、故障確率、修理時間分布のパラメータ、修復に要する作業員数がある。

バッファには、入力用と出力用がある。その容量の決め方により固有バッファと共有バッファの2種類がある。固有バッファとは個々の仕掛品ごとにその容量が決まるもので、共有バッファとは数種の仕掛品が1つのバッファを共有するものである。これらを使い分ければ、複数種の仕掛品を同じバッファに格納したり個々のバッファに仕分する現場のオペレーションが記述できる。

オペレーションには、段取り情報、作業情報、JOBの定義、JOB列の定義がある。段取り情報には、段取り名、段取り時間の分布パラメータ、段取り作業員数がある。作業情報には、作業名、作業時間の分布パラメータ、入力品名、出力品名およびその個数がある。出力対象の部品名として、確率的にその部品名が決まるように定義することもでき、不良品生成等のオペレーションの記述が可能になっている。CELLの中にある複数の機械は、各々独立に作業を行なう。

多品種生産システムを表現するためにロットの概念が組み込まれている。具体的には、ロットの概念はJOBの定義という形でシミュレーションモデルに反映される。1つのJOBは数回分の作業のサイクルとする。この定義によれば、生産システムのロット単位を容易に表現できる。また、実行順のJOBの並びをJOB列として定義すれば、JOBの実行順序を指定できる。

その他、必要ならば、機械の初期段取りやバッファの初期在庫量等の初期値を設定できる。

2.3 搬送モデル

TRANSは、搬送系を表現するモデリング・ディスクリプターで、基本的には2つのCELLを連結する要素である。具体的に仕掛品を搬送するシステム資源として、カート(台車)もしくはコンベアを所有する。オペレーションとして5つの型を用意している。PUSH型は、仕掛品を搬送ロットごとに上流から下流に運搬するだけであるが、PULL型には、『工程間かんばん』を設定することができ、必要に応じてこれを運搬し、上流側のCELLでJOBを依頼できる。いわゆる『かんばん』方式で『生産かんばん』を外す動作をモデル化している。またWAKE型は、投入された部品の属性に応じて各工程がオペレーションを行なうジョブショップ型の動作モデルである。

その他、バッファサイズが有限であるために上流の工程でブロッキングを起こした時に、一時的に別の工程に運搬してこれを解消するESCAPE型、上流からの流れが止まって下流の工程が入力待ちになった時に、一時的に別の工程から間に合わせるREQUEST型などがある。これらは、工場内の現実的な実流オペレーションのモデル化である。

2.4 作業者モデル

OPERATORSは、PRODUCTION CELLで、機械操作、故障修復作業、段取り作業を行なう作業者である。OPERATORSは、作業班を表現するディスクリプ

ターで班に属する作業者と、班で受け持つ作業域、作業時間帯を規定できるので、作業員の配置やその作業内容、さらには作業ソフト時間等をシミュレーションのパラメータとして設定できる。PRODUCTION CELLが必要な時、これをサポートするためのシステム資源である。

3. 生産指示方式 [11] のモデル

TRANSの型とPRODUCTION CELLのJOB定義を組み合わせるとMRP方式、かんばん方式、およびその混合方式の生産指示方式や発注方式などの、実務的なオペレーションをシミュレーションできる。

3.1 押し型生産指示方式

押し型生産指示方式とは、各工程が事前に指示された生産計画にもとづいて計画を行ない、終了した仕掛品を順次工程に『押し出して』いく方式をいう。この方式は各工程に与えられた生産計画が、システム全体を駆動させていくので、生産計画駆動型とも言える。MRP方式は、この典型例である。

押し型生産指示方式をシミュレーションするには、各々の工程ごとに与えられた生産指示の内容（何を、いくつ生産するか）と、その実行順序が明示されていることが必要かつ十分である。MANMOSSでは、JOB列がこれに該当する。すべてのCELLにスケジューラから生産計画が与えられたものとして、それをCELL中のJOB列で表現すればよい。また、各CELLを連結するTRANSはPUSH型に設定する(図2)。JOB列で定義されたJOBの並びは、その順に実行される。下流のTRANSがPUSH型であれば、処理終了後、順に次工程に送られる。すなわち、PRODUCTION CELLは、与えられた計画にしたがって生産を行ない、仕掛品を下流の工程に送り出すことになる。

3.2 引き型生産指示方式 [12]

引き型生産指示方式とは、後工程が前工程から仕掛品を『引き取る』方式である。各工程が前工程から仕掛り

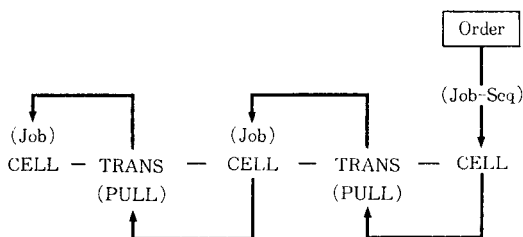


図3 引き型生産指示方式のモデリング

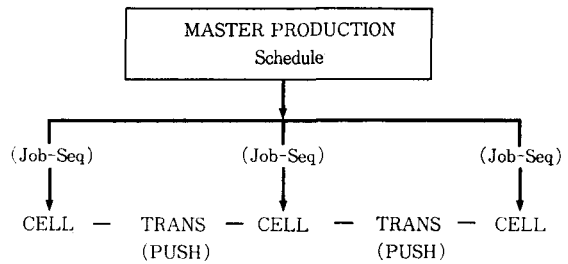


図2 押し型生産指示方式のモデリング

および原材料を『必要に応じて』引き取るという形で、順次前工程へと連鎖をさかのぼらせていく。この時、前工程に引き取り情報を伝達する手段として用いられるのが『かんばん』である。『かんばん』には、工程内を巡回する生産かんばんや、工程間を巡回する運搬かんばん、もしくは三角かんばんといわれるものまで、多種多様のもがあるが、本質的には後工程がいつ何を引き取りにきたかを前工程が知り、必要に応じて前工程が仕事をするというサイクルが記述できればよい。したがって、かんばん方式をシミュレーションするためのモデル記述の条件としては、

- (1) 後工程が前工程に送る生産指示の内容を記述できること。
- (2) 後工程が生産指示を送るタイミングを記述できること。
- (3) 後工程から生産指示がきた時の、前工程の処置を記述できること。

この3つが用意されていればよい。

MANMOSSでは次のように考える。PULL型のTRANSのカードは、通常後工程で待機していて、『かんばん』がはずれるとそれを持って前工程に向かう。前工程に到着して、該当仕掛品を積み出そうとする。同時に『かんばん』にあるPART名に該当するJOBを前工程に指示する。この時、運搬ロット分だけの仕掛品がなければ、そのまま待つ。前工程のCELLは、後工程からのカンバンに該当するJOBを順に実行する。TRANSとその前後の工程とTRANSがこのように連携して動作するので、(1)(2)(3)の要求が満たされる。

引き型生産指示方式をシミュレーションするには、最終工程(SINK CELLでもよい)だけに、出荷計画に該当するスケジュールを設定し、残りのCELLでは特にJOB列を設定せず、各CELLを連結するTRANSはすべてPULL型にしておく(図3)。最終工程で必要とされる仕掛品が在庫基準量を下回るとかんばんがはず

れ、その前工程と連結している TRANSを励気する。TRANS は、前工程に到着して仕掛品を引き取るが、この時、仕掛品の在庫量が基準量以下ならば、CELL に JOB を要求する。この連鎖が、前工程にくりかえされて、工程全体が稼働する。

3.3 押し／引き混合型生産指示方式

引き型生産指示方式の現実的な実施方法ともいえる。全体的に押し型つまり計画主導型で生産指示を行ない、ローカルに『かんばん』で微調整するというのが Just In Time (JIT) 方式である [13] [14]。週単位にはMRPで生産指示を出し、日単位では『かんばん』をまわすもの、重点管理する工程だけMRPからの生産指示にしたがい、その前後の工程は『かんばん』をまわして臨機応変に対応するもの、協力工場への生産指示だけ『かんばん』を使うもの等、生産現場での生産指示方式はさまざまな形態をとっている。

押し引き混合型の生産指示方式をシミュレーションするには、生産指示が与えられる工程 (CELL) についてだけ JOB 列を定義し、工程間で『かんばん』を回す時には該当する TRANS を PULL 型にすればよい(図 4)。

3.4 発注方式／投入方式

発注方式／投入方式のモデルは、SOURCE CELL、SINK CELL で表現する。ベンダー (前工程)、あるいは顧客(後工程)のモデルともいえる。納入業者や顧客との間で取り決める搬入／搬出の日程計画や作業指示計画などがモデルに反映できる。PRODUCTION CELL と同型のバッファーを設定できるので、『倉庫が満杯のため納入業者が待たされる』といった現実的な問題をシミュレーションできる。SINK/SOURCE すなわち出口と入口の CELL は、全く同等の型式で記述する。生産システムの現状を考慮して、顧客 (後工程) への搬出作業もしくはベンダー (前工程) からの搬入作業を、計画型、周期型、発注型、分布型の 4 つの型に分類している。

計画型は、あらかじめ与えられた搬出／搬入計画リストにもとづき、決められた時刻に、決められた内容の品目の完成品／原材料を搬出／搬入する。日程計画、週計画等にもとづいて、製品の搬出および原材料の納品等の搬出／搬入作業が指示される場合である。

周期型は、決められた品目の完成品／原材料が、決められた量だけ一定の時間間隔で、搬出／搬入する作業を記述する。たとえば、毎日定時刻に倉庫からものを搬入するような場合、その搬出／搬入サイクル、品目、搬入

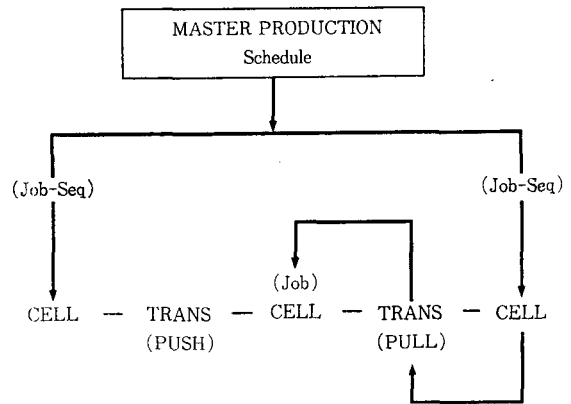


図 4 押し型／引き型混合生産指示方式のモデリング

／搬出量等の決定に有効である。

発注型はリードタイム、決められた量の搬出／搬入作業を、指示が出されるとリードタイムだけ時間が経過した後、その作業が行なわれるものである。定量発注方式をとる場合、その発注リードタイム、発注量の適正値の決定に有効である。

分布型は、搬出／搬入における仕掛品の品目と量は、周期型同様一定であるが、時間間隔が決められた確率分布にしたがうものである。比較長時間のシミュレーションで、生産システムの平均的な性能評価を行なう時に有効である。品目数が 1 で搬入の時は、待ち行列モデルのオープン型ネットワークで定義されるもの(指数到着)と等価になる。

4. CIM 環境下での生産システム・シミュレーション

4.1 オフライン・シミュレーション

オフライン・シミュレーションとは、日々の生産ラインのオペレーションと切り離れたシミュレーションである。ライン新設のさい工程能力評価／設備評価、ラインの生産性向上のための改善案の検討、あるいは自動化の推進案の検討といった生産準備のオペレーションの支援が目的となる。

効果的なオフライン・シミュレーションには、詳細な出力データ解析が不可欠である。MANMOSS では、たとえば PRODUCTION CELL の機械であれば、稼働中の時間、入力待ちの時間、出力待ちの時間、故障修復時間、段取り時間、および修復、段取り時間のための作業待ち時間等の個々の項目に分類した詳細な時間分布を計算する。また、各 CELL での仕掛品の在庫量、生産

高等の時系列推移データは、機械故障、在庫切れ等の不慮の事故が起きたとき等のシステムへの影響や、在庫量の変動傾向（増加／減少）を知るうえで有用であり、システム診断の基礎データになる。

オフライン・シミュレーションの例として、その対象の自動化検査ライン（図5）シミュレーション結果（図6）を上げる。このラインは扱う品種は数十程度であるが、処理量はかなり大きく、自動化工程や手動の工程が混在し、作業時間帯のシフトがあり、確率分岐を伴う物流を有する生産ラインである。この他にも工程能力評価を目的にしたシミュレーションを、いくつかのケースについて行なった。その結果、モデルの表現力は十分であることが実証できた。[8] [9]

一方、効率よいシミュレーションの実行を工夫する必要もある。FMSにみられるように、生産機械自体が高い自由度をもちシステムの構成が複雑な場合、シミュレーション実行時のパラメータの数、それに付随するランの数は膨大になる。この場合、直交表などの実験計画法の手法を積極的に活用すれば、きわめて少ないランで精度を保証した感度解析を行なうことができる。[6]では、生産ラインでの機械の品質管理を効率よく行なう問題に適用した。

オフライン・シミュレーションは、生産システム設計のための診断システムに発展させる方向があろう。また、最適化すべき生産システムの目的変数が複数ある場

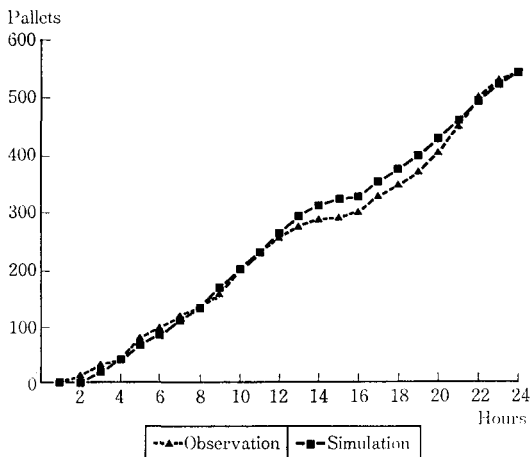


図6 シミュレーション結果

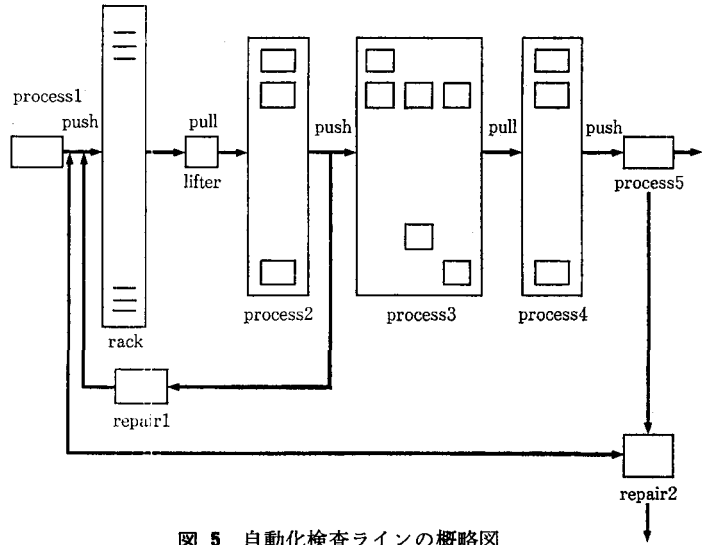


図5 自動化検査ラインの概略図

合には、多目的最適化などの手法との統合化も考えられる。プロダクションルール等を用いて交互作用の考慮等を自動化し、システムの総合的な診断に必要なヒューリスティクスをAIの技法により知識ベース化する方向もある。

4.2 オンライン・シミュレーション

オンライン・シミュレーションとは、日々の生産管理のオペレーションと何らかの形で連動して行なうシミュレーションをいう。リアルタイム・シミュレーションといってもよい。入力パラメータが時々刻々と更新されて、シミュレーションを行ない、システムの状態を予測する。

たとえば、パラメータにランダムな要因を含まないシミュレーション（確定シミュレーション）を実行することにより、生産スケジュールを生成できる。個々の機械の制約や有限バッファなどをモデルに組み込めば、現実の生産システムの能力を考慮した生産／投入スケジュールが得られる。部品の所要量をベースに作成するMSP/MRPによる生産計画と補完し合えば、現実的な生産スケジューリングが可能になる。

生産計画（MSP）は、週計画、日程計画等、タイムフェーズに合わせて作成され、それにもとづいてMRPにより部品展開され生産現場に生産指示がくだる。生産現場では、そのときのラインの状態に応じて進捗状況を管理する。ところが、現場ではベンダーの納期遅れ、機械故障、割り込み特急ジョブ、オーダーの変更など、計画時には予期しない事態がしばしば発生する。現実の生

産ラインの制約を考慮して再スケジューリングをシミュレーションにより求める。さらに、それを入力パラメータとして、スケジュール・シミュレーションを行えば、再スケジューリングによるシステムの状態推移を予測できる。

オンライン・シミュレーションを実現するには、シミュレーション自体の高速化や、生産管理データベースや工程管理データベース等のデータベースの充実が前提となる。生産現場の状況に合わせてシミュレーションを行わない、その結果を逐次解析して次のオペレーションを決めていくので、シミュレーションおよび通信ネットワークのパフォーマンスが実現のキーになる。工場内LANや投入/出荷実績データベースなどの生産管理データベースとのリンクも必要とされる。ハードウェアが向上し、データベースが完備され、シミュレーションもラインごと高性能ワークステーション上で分散処理すれば、工場全体のリアルタイム・シミュレーションも実現できることになろう。

5. おわりに

オフラインにせよオンラインにせよ、シミュレーションからそのシステムの特性を直感的に知るには、おそらくアニメーションによるのが最も効果的であろう。アニメーションには、プレゼンテーション・ツールの機能だけでなく、モデルのデバッグ・ツールとしても大いに威力があることを、実験システムのデモパッケージの作成を通して実感した [3]。また、人間とコンピュータとの協調型システムをめざすのであれば、AIのようなインターフェイスが必須になる。

コンピュータの計算速度の向上、記憶容量の拡大が進み、価格性能比が飛躍的に向上した。また、ビットマップ・ディスプレイ付きのワークステーションなどの登場により、シミュレーションの結果をアニメーション表示するソフトもいくつかある。オンライン、オフラインのいずれにしても、他のシステムとの統合化をいかに図るかが、CIMの枠組みの中でシミュレーションの活用を考えるさいの課題であることに間違いはない。

謝辞：日頃、ともにシステム開発にたずさわっている吉川博文氏に感謝の意を表す次第である。

参考文献

- [1] Carrie, A. *Simulation of Manufacturing System*, John Willy & Sons, 1989.
- [2] 梅田, 離散系シミュレーション言語とその周辺, システムと制御, Vol.30, No.2, 1991, 2, 掲載予定
- [3] 梅田, 生産システムの設計/運営とシミュレーション, IEレビュー160, pp.26-33, 1989, 5
- [4] Umeda, S. et al., *The Manufacturing-Oriented Simulation Package-MANMOSS*, IBM Interdivisional Technical Liason, 1989, 5
- [5] Umeda, S. et al., *Simulation Analysis of PUSH/PULL-based Manufacturing System*, SICE, SICE'89 International Section, 1989, 7
- [6] Umeda, S. et al., *The Performance Evaluation of Production System by Simulation*, TIMS Conference XXIX, 1989, 7
- [7] 梅田, 吉川, 実験計画法による生産システムの感度解析, 第9回シミュレーションテクノロジー・コンファレンス, 1990, 6
- [8] Umeda, S. and H. Yoshikawa, *The Manufacturing-Oriented Simulation for Performance Evaluation Proc. of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation*, pp.855-859, 1990, 7
- [9] 梅田, 吉川, 生産指示方式を考慮した生産システムシミュレーション, シミュレーション, Vol.9, No.3, pp.224-231, 1990, 9
- [10] Minsky, M., *A Framework for representing knowledge*, *The Psychology of Computer Vision*, (ed. Winston, P.H.), 1975
- [11] 村松, 新版—生産管理の基礎, 国元書房, 1984
- [12] Kimura, O., and Terada, H., *Design and Analysis of Pull System*, *Int. J. Prod. Res.*, Vol.19, No.3, pp.241-253, 1981
- [13] 門田, トヨタシステム, 講談社, 1985
- [14] 大野, 門田, トヨタ生産方式の新展開, 日本能率協会, 1985