

# JIT 生産システム分析へのエージェントベース シミュレーションの応用に関する一考察

野 村 淳 一

## Ⅰ. はじめに

ジャストインタイム (Just-in-time ; JIT) 生産の仕組みを導入した生産システムを分析する手段として、多くの研究でシミュレーションが活用されている。しかし、システムシミュレーション手法では、JIT 生産システムを表現するために複雑なロジックが要求される。一方、シミュレーションの手法に関して、1990 年代になりエージェントベースシミュレーション (Agent-Based Simulation ; ABS) がさまざまな分野で応用されるようになってきた。本稿では、比較的新しい手法である ABS を JIT 生産システムのシミュレーションに適用する可能性について検討する。

## Ⅱ. シミュレーション

### (1) シミュレーションとは

シミュレーションとは、実際のシステムの挙動をまねるための手法や応用の広範囲にわたる集合であり、模擬実験と呼ばれる (Kelton et. al (2007))。現実のシステムでは試行することのできない事柄、あるいは費用や実施期間の点から試行が難しい事柄を事前に検討するために、対象のシステムを適切に表現したモデルを作成し、模擬システム上での実験から得られた知見を現実のシステムに適用する研究手法である。たとえば、商業施設における災害発生時の避難経路が適切であるかを検討するために、顧客が多数来店している状況で実際

に火災を発生させることはできない。また、工場の生産ラインにおいて新しい生産方法を試行する場合、効果が明らかでない段階で稼働中の生産ラインで試してみることは、製品の品質や出来高に与える影響が事前にわからないため、通常は躊躇せざるを得ないだろう。このように、現実のシステムで直接実験するのが困難な場合、システムのすべて、あるいは部分を抽象化したモデル上で実験を行い、システムの挙動を観察する手法がシミュレーションである。

シミュレーションの手順を図1に示す。

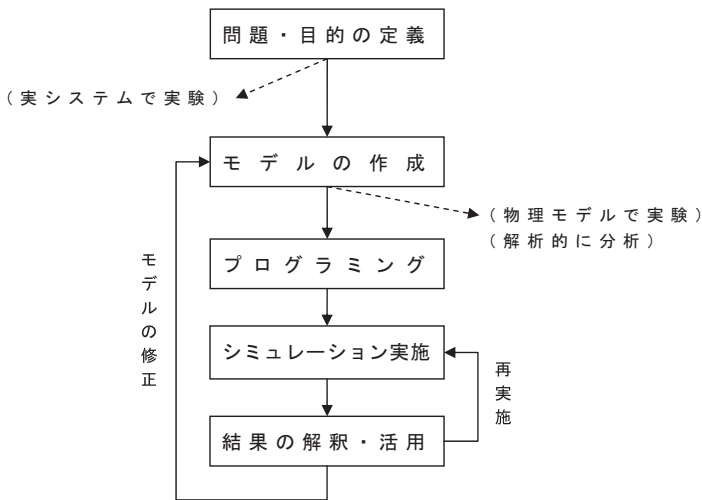


図1 シミュレーションの手順  
出典：薦田・大川 (1995) p.17 図1.11

システムにおいてシミュレーションを行う前に、まず現在のシステムにおける問題点を明らかにし、シミュレーションを行う目的をはっきりさせておく。この段階で、現実のシステムで実験可能であることが分かれば、シミュレーションによる実験を行う必要はない。

次いで、システムを抽象化しモデルを作成する。シミュレーションで利用されるモデルには色々な種類があるが（次項参照）、システムのレプリカを作成

できる場合や、あるいは数式でモデル化し解析的に解くことのできる場合もある。その他のモデルの場合は、通常コンピュータを用いて汎用言語やシミュレーション言語によりプログラミングを行い、作成したモデルをコンピュータ上に再現する。

それから、シミュレーションを実行して結果を分析し、現実のシステムに知見を活用する。一度のシミュレーションで有用な知見を得られることは少ないので、現実を活かせる確証が得られるまで何度も繰り返し実行する。また、シミュレーションにより新たな問題点や検討課題が見つかった場合、その問題・課題を解決するためにモデルを修正することもある。

## (2) シミュレーションモデルの分類

シミュレーションは、現実のシステムで直接実験するのではなくモデルを作成して模擬的に実験を行うのであるが、システム抽象化の仕方によりシミュレーションモデルはいくつかの種類に分類される (図2)。

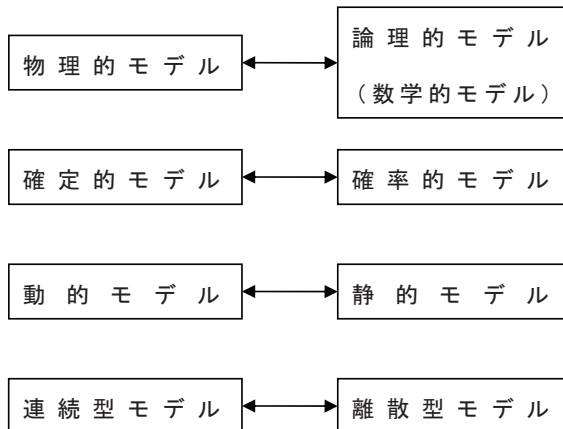


図2 シミュレーションのモデル

### ① 物理的モデルと論理的・数学的モデル

物理的モデルとは、システムの縮小モデルであり、実際の物を用いてモデルを構築するものである。代表例は自動車や航空機の風洞実験である。また、トレーニングのためのモデルとして、フライトシミュレータや原子炉の模擬オペレーティングルーム、ファーストフードレストランの模擬店舗などが存在する。

論理的モデルは、物ではなくシステムの挙動に関する前提条件の集合からモデルを構成するものである。コンピュータ上にシステムを再現して行うシミュレーションはこちらに分類される。論理的モデルに使用される前提条件が微分方程式などの数式で表現されている場合、特に数学的モデルという。

### ② 確定的モデルと確率的モデル

モデル内にランダムな要素を含むかどうかで確定的もしくは確率的モデルのどちらかに分類される。現実世界には不確実性が存在するため多くのモデルは確率的モデルとして分類されるが、システムを抽象化する過程で不確実性を取り払ったモデルを作成すれば確定的モデルとなる。

### ③ 動的モデルと静的モデル

静的モデルはモデル内に時間経過を取り入れないモデルであり、動的モデルはシステムの経時的な変化を観測するためのモデルである。たとえば、銀行のATMや小売店のレジスタにおける待ち行列の混雑状況を抽象化したモデルが動的モデルであり、分子や原子のモデルや経済的均衡モデルなどが静的モデルの範疇に入る。

### ④ 連続型モデルと離散型モデル

連続型モデルは、システムの状態が絶えず連続的に変化するもので、タンク内への液体の流入・流出の状態や気象予測のモデルなどがある。対して、離散型モデルは離散事象型モデルとも呼ばれ、ある事象（イベント）が生起する時点でのみ、断続的・離散的にシステムが変化するモデルである。連続型モデルは微分方程式や差分方程式などの数学的モデルを基にしている場合が多く、離

散型モデルは待ち行列システムに代表される。連続型・離散型の双方のモデルとも、通常は動的モデルとして扱われる。

本稿では、コンピュータによる JIT 生産システムのシミュレーションを対象とするため、ここで挙げた分類によれば、論理的・動的・離散型モデルを検討することになる<sup>1)</sup>。

### III. エージェントベースシミュレーション

#### (1) エージェントベースシミュレーションとは

エージェントベースシミュレーション (Agent-Based Simulation; ABS) は、1990 年代になり本格的に使用されるようになった比較的新しいシミュレーション手法である (山影 (2002))。

ABS の誕生は、1960 年代のトマス・シェリングの分居モデルにさかのぼる (伊藤・草薙 (2006))。シェリングはチェス盤を使って、アメリカの都市で人々が民族集団に分かれて生活する現象をシミュレーションにより明らかにした。チェス盤に人種に見立てた 2 種類のコインをランダムに配置し、近くに同じ人種の人間が一定数住んでいれば現状に満足し、そうでなければ移転するという操作を繰り返すことにより、民族ごとに居住地が分かれることを示した。シェリングはチェス盤とコインを用いて後に ABS と呼ばれるシミュレーションを行ったのであるが、近年ではコンピュータの普及とプログラミング言語の発展により、社会科学分野を中心に経済学・社会学・政治学など、さまざまな分野での応用が進んでいる。

#### (2) ABS の仕組み

ABS の中心となるのはエージェントである。エージェントは日本語に翻訳すれば「代理人」とされることが多いが、シミュレーションにおいては必ずしも人とは限らず、シミュレーションプログラム中では「主体性を有したオブジ

ェクト」とみなされる（薦田他（2007））。すなわち、エージェントは、周囲の環境に合わせて自ら判断し、行動できる実体として定義される。

このエージェントは自らの性質や状態を規定する属性を保持する。たとえば、人間というエージェントの場合、属性として「性別」や「年齢」「職業」などが考えられ、それぞれ「男性、女性」「50歳代、40歳代、30歳代、…」 「会社員、事業主、無職、…」などの値が割り当てられることにより、個々のエージェントの特質が決定される。この属性は、エージェントが環境に応じて主体的に行動する際の判断基準となり、また環境の変化により値が更新されることもある。

さらに、エージェントが行動する際のルールも必要である。これは、環境から得られる情報を自らの属性値を基準に判断し、行動を起こすかどうかを決めるものである。たとえば、人間エージェントの「商品購入」行動は、「商品の価格が所持金の属性値以下であれば購入する」というルールを設定することで表現できるだろう。一方で、エージェントが活動する環境におけるルールも存在する。たとえば、飲食店という環境において、「店内の顧客エージェント数が一定数に達したら入店を断る」などといったルールが考えられる。エージェントの立場からみると、前者のルールは自身が主体的に行動するためのエージェント固有のルールであるが、後者は環境からエージェントの行動を規制する外的なルールであるといえる。

このように ABS では、エージェント固有の属性および行動ルールを基準に、エージェントが存在する環境からの情報を読み取って、自らの行動を決定することになる。さらに、複数のエージェントが活動する状況においては、他エージェントの行動から直接影響を受けたり、他エージェントの行動による環境の変化から間接的に影響を及ぼされる。環境に存在する複数のエージェントが相互に作用した結果としてシステムの全体像が浮かび上がるのである。システム全体の振る舞いが、個々のエージェントの主体的な行動の集積、つまり自律的な相互作用の結果として観察できることが ABS の大きな特徴である。

#### IV. JIT 生産システム

JIT 生産システムは、必要なものを必要なときに必要なだけ生産・運搬することにより、生産システム内の仕掛品や部品・構成部品・製品などの在庫量を増加させずに、リードタイムの短縮を図る生産方式である。また、後工程が必要なだけ前工程から引き取ることからプル生産方式ともいう。

JIT 生産システムは、かんばん方式<sup>2)</sup>、水すまし方式<sup>3)</sup>、セル生産<sup>4)</sup>など、さまざまな要素から構成されるが、シミュレーションモデリングの観点からは、特にかんばんによる生産・運搬の指示に注目する必要がある。高橋・中村 (2004) は、かんばん方式のモデルを指示量決定モデルと指示時点決定モデルに分類している。指示量決定モデルは、Kimura and Terada (1981) により示されたもので、一定の時間間隔ごとに後工程で使用された量から外されるかんばん枚数が計算され、任意のリードタイム経過後に前工程での指示に用いられる。前工程では、指示されたかんばんと、在庫量・処理能力を基に処理量が決定され、処理リードタイム経過後に当該工程での処理が完了し、必要な在庫量が完成される。

指示時点決定モデルは、Spearman (1992) や高橋・中村 (1995) により示されたもので、ある工程で処理を開始する条件に着目したモデルである。その条件は、①当該工程の処理に対する指示がある (当該工程で処理すべきかんばんが存在する)、②当該工程の処理に必要な品目の在庫がある、③当該工程が処理可能な状態にある、の3つである。

指示量決定モデルは、時間について固定された期単位で表現しているため、線形計画法や整数計画法などの数理計画的な手法による解法が適している。一方、指示時点決定モデルは、処理の開始時点を条件の成立で表現するため、個々の条件の設定が容易なシステムシミュレーションによって解くことが適している。

#### V. JIT 生産システムと ABS

生産システムのシミュレーションモデルは、通常、システム内で生産される

品目を表すエンティティと、生産あるいは運搬を行う機械や作業員を表すリソース、そしてリソースの利用権を得るためにエンティティが並ぶ待ち行列から構成される。待ち行列の先頭に並んだエンティティは、リソースが遊休状態になるとそのリソースの利用権を獲得し、リソースを占有した後、必要なサービス（生産・運搬）を受ける。モデル化する生産システムが生産工程の上流から下流へと単純に流れるプッシュ型の場合、この仕組みで適切に表現できる。しかし、JIT生産システムに代表されるプル型の生産システムの場合、特にかんばんを用いた生産・運搬指示に注目すると前節で挙げた指示時点決定モデルを実現しなければならない。工程での処理に必要な品目エンティティとは別に、工程での処理を指示するかんばんをエンティティとして表現し、リソースでの処理を開始する前に、これら2種類のエンティティを対応付ける必要がある。このようなプル型に必要な仕組みは、従来のシステムシミュレーション手法では複雑なロジックが要求される<sup>5)</sup>。

そこで、JIT生産システムのシミュレーションモデリングにABSを適用することを考える。前節で示した通り、指示時点決定モデルの工程処理開始条件は、①当該工程の処理に対する指示がある（当該工程で処理すべきかんばんが存在する）、②当該工程の処理に必要な品目の在庫がある、③当該工程が処理可能な状態にある、の3つである。システムシミュレーションでは、「かんばん」「品目」をエンティティとして、工程で必要な処理を行う「機械または作業員」をリソースとしてモデリングする。リソースの利用権を得るために、かんばんおよび品目エンティティが待ち行列に並び、双方のエンティティが対応付けられ（開始条件①②）、リソースが遊休状態になって（開始条件③）はじめて工程での処理が行われる。

ABS手法で同じシステムを表現する場合、かんばんや機械・作業員をエージェントとすればよい。かんばんエージェントには、そのかんばんが管理している品目の数量、当該品目を生産するために必要な品目名や生産を担当する工程名を



属性として設定する。工程での処理を担当する機械・作業者エージェントでは、処理に必要な品目名や処理にかかる時間などが属性となろう。そして、かんばんエンティティには「管理している品目の数量が基準以下になったら、工程に生産を指示する」というルールを設定し、機械・作業者エージェントには「かんばんエージェントによる指示があり、かつ処理に必要な品目が存在し、自らが他の作業を行っていない場合、処理を開始する」指示時点決定モデルの開始条件をすべてルールとして設定することにより、システムの振る舞いはかんばんおよび機械・作業者エージェントの相互作用として記述できることになる。

このような ABS の仕組みは、極めてボトムアップ的なアプローチである。つまり、中央にすべての工程やかんばんを制御するコントロールセンタのような役割をするものがなくても、個々のかんばんや機械が自律的に主体的に状況を判断し、行動するのである。これは JIT 生産方式の概念とも合致する。伝統的なプッシュ型の生産方式では、生産に関する指示は基本的にすべての生産工程に出される。一方、プル型の生産方式では生産工程の中で、すべての工程のペースを作り出している工程（多くの場合、最終組立工程）にのみ生産指示を出し、他の工程へはかんばんを介して間接的に生産指示がなされる。生産管理面からみれば、プッシュ型＝集中管理、プル型＝分散管理の図式が成り立っており、ABS をプル型の生産システムである JIT 生産システムに適用することにより、シミュレーションモデルのロジックの面からだけでなく、概念の観点からもより理解しやすいモデルを作成することができるだろう。

## VI. おわりに

本稿では、JIT 生産システムの分析にシミュレーションを活用する場合、従前のシステムシミュレーション手法ではモデルのロジックが複雑になってしまうという問題意識から、新たな可能性として ABS を応用する可能性について検討した。

ABS のエージェントが主体的に判断・行動するという特徴は、かんぱんによる分散的な生産管理が行われる JIT 生産システムとかなり親和性が高いと考えられる。また、両者ともボトムアップ的なアプローチをとっており、JIT 生産の概念とシミュレーションモデルのロジックを一貫させることも可能となろう。

本稿では JIT 生産システムへの ABS 適用の可能性を論じたのみである。今後コンピュータ上で実際に ABS によるシミュレーションモデルを構築し、従来のモデルと比較・検討を行わなければならない。

## 注

- 1) ランダムな要素を含むかどうかは、検討する事柄によるので、確定的・確率的のどちらであるかは本稿では問わない。
- 2) かんぱんとは、生産・運搬指示票のことであり、品番や品名、コンテナ収容数、前工程・後工程名などが記載されている。
- 3) 水すましとは、工程間の資材運搬を専門に行う作業者のことである。名称は、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類似することによる。
- 4) セル生産とは、製品の製造工程の一部あるいはすべてを少人数のチーム（作業員一人で行う場合もある）で担当する生産技法である。
- 5) システムシミュレーションによる JIT 生産システムのモデリングロジックの詳細は、Mejabi and Wasserman (1992a, b)、野村 (2007) を参照されたい。

## 参考文献

- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. and Sturrock, D. T. (2007) *Simulation with Arena, Fourth Edition*, McGraw-Hill, New York (高桑宗右エ門監訳、野村淳一訳 (2007) 『シミュレーションー Arena を活用した総合的アプローチー第 4 版』 コロナ社)

- Kimura, O. and Terada, H. (1981) "Design and analysis of pull system, a method of multi-stage production control" , *International Journal of Production Research*, Vol.19, No.3, pp.241-253
- Mejabi, O. and Wasserman, G. (1992a) "Basic concepts of JIT modelling" *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.1, pp.141-149
- Mejabi, O. and Wasserman, G. (1992b) "Simulation constructs for JIT modelling" *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.5, pp.1119-1135
- Spearman, M. (1992) "Customer service in pull production systems" *Operations Research*, Vol.40, No.5, pp.948-958
- 伊藤俊秀、草薙信照 (2006) 『コンピュータシミュレーション』 オーム社
- 薦田憲久、大川剛直 (1995) 『システムのモデリングとシミュレーション』 計測自動制御学会
- 薦田憲久、大川剛直、秋吉政徳、大場みち子 (2007) 『ビジネスシステムのシミュレーション』 コロナ社
- 高橋勝彦、中村信人 (1995) 「かんばん方式における指示遅延の効果」 『日本経営工学会誌』 第 46 巻、第 5 号、467-476 ページ
- 高橋勝彦、中村信人 (2004) 「かんばん方式とシミュレーション」 ジャストインタイム生産システム研究会 『ジャストインタイム生産システム』 日刊工業新聞社、262-283 ページ
- 野村淳一 (2007) 「JIT 生産システムのシミュレーションモデリングに対するモジュール開発のフレームワーク」 『日本生産管理学会 e-生産管理と情報システム開発研究部会研究報告書』 Vol.2007、No.1、38-45 ページ
- 山影進 (2002) 「社会への新しい接近法—マルチエージェントシミュレーションへの誘い」 山影進、服部正太編 『コンピュータの中の人工社会—マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系』 共立出版、2-23 ページ