

エージェントベースシミュレーションによる JIT 生産システムのモデリング

野 村 淳 一

I. はじめに

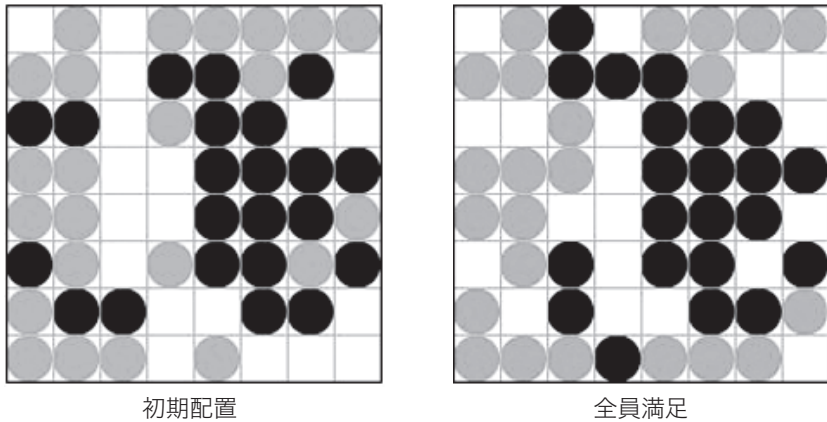
エージェントベースシミュレーション (agent-based simulation ; ABS) は 1990 年代から本格的に使用されるようになった比較的新しいシミュレーション手法である (出口 2009)。ABS は社会科学における諸システムの分析に対する適用が盛んであり、社会学・経済学・政治学など、様々な分野での応用が進んでいる。しかし、経営システムへの応用に関しては、顧客をエージェントとするシステムの分析や企業間の交渉が主であり、生産システムの中でも特に生産プロセスに関する適用例はあまりなく、有望な研究フロンティアであると指摘されている (出口 2004)。

本稿では、ABS の特徴やモデリングの特性などを考察し、プル型生産システム、特に JIT (just-in-time) 生産システムに対する ABS の適用可能性を検討する。

II. エージェントベースシミュレーション

ABS は社会科学におけるモデリング手法として、近年注目を集めている。個々のエージェントとそれらの相互作用を直接表現するモデルを構築することができる所以である。システム全体の振る舞いが、個々のエージェントの主

(図表 1) 分居現象のモデルの例



体的な行動の集積、つまり自立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 (Gilbert 2008)。

ABS の誕生は、1970 年代のトマス・シェリングの地域社会の分居現象のモデル化にさかのぼる (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。図表 1 のように、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、近くと同じ人種の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。従来、別の人種に対する差別意識から多数派になろうとする心理により分居が進むと考えられてきたが、シェリングの実験では自らのグループが 30% 程度の少数派であっても分居が発生することが示され、大きく注目された (Schelling 1971)。

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、特に 1990 年代以降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、社会現象を分析・理解するための方法として、

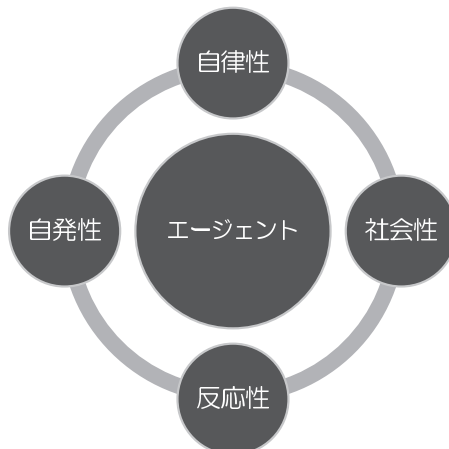
経済学・社会学・政治学など、様々な分野での応用が進んでいる（山影 2002）。

ABSの中心をなすのはエージェントである。エージェントは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では「主体性を有したオブジェクト」とみなされる（薦田ら 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、行動できる主体として定義される。

したがって、エージェントは、図表 2 に示すとおり、次の 4 つの特性を備えている必要がある（Wooldridge & Jennings 1995）。

1. 自律性 (Autonomy) : エージェントの行動を指示するグローバルコントローラが存在しない。エージェントには、現時点の状況に応じていかに行動するかが規定されているだけである。
2. 社会性 (Social Ability) : 他のエージェントと相互作用することができる。
3. 反応性 (Reactivity) : 環境からもたらされる刺激に適切に反応することができる。

(図表 2) エージェントの特性



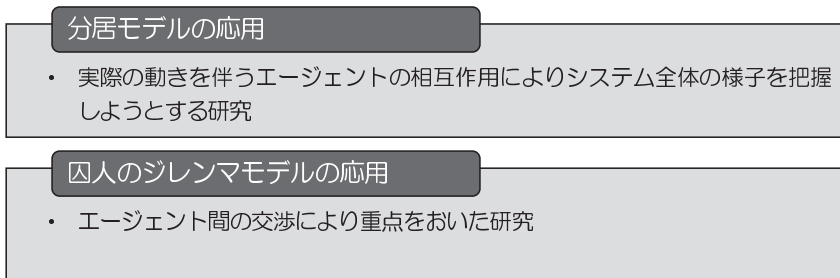
4. 自発性 (Proactivity): 独自に設定する 1 つあるいは複数の目標を持つ。

すなわち、エージェントは外部からの働きかけがなくとも自律的に行動し、他のエージェントと相互作用しながら、環境に適切に反応することができる。さらに、自らの目標を達成するために自発的に行動することができる主体であるといえる。

III. 経営システム分析における ABS の適用例

ABS を用いて経営システムを分析する研究は大きく 2 つに分けられる (図表 3 参照)。すなわち、前述のシェリングの分居モデルに代表される研究を端緒とするものと、ゲーム理論の繰り返し囚人のジレンマゲームにおける最良の戦略を実験から解明したアクセルロッドの研究を出発点とするものである (Axelrod 1984)。前者はエージェントのシステム内での動きに着目した研究であり、後者はエージェント間の交渉により重点をおいた研究である。ここでは、それぞれの代表例として、システム内の顧客流動とサプライチェーンマネジメントを挙げる。

(図表 3) 既存研究の分類



(1) システム内の顧客流動

実際の動きを伴うエージェントの相互作用によりシステム全体の様子を把握しようとする研究は、交通渋滞の発生状況や災害時の避難行動など、社会システムに関する事例が豊富である（たとえば、西成 2006、2008）。

経営システムに対する適用例としては、増田ら（2009）などがある。彼らは、小売店舗内の顧客動線上への購買誘引の配置効果を、来店客をエージェントとする ABS により分析している。個々の消費者の特性は様々であり、来店前に購入商品を決めている者もあれば、店内の商品配置により意図しない商品を購入したり、POP 広告などの誘引から影響を受けて商品を購入する場合もある。小売店舗のレイアウトと来店客の店内購買行動の関連に着目し、購買意欲を向上させる店舗レイアウトを検討している。

(2) サプライチェーンマネジメント

貝原（2004）は、サプライチェーン上のプレイヤーとして、生産・消費・仲介のエージェント 3 種を人工市場内に配置し、互いに自己の効用を高めるように交渉させることにより、チェーンの全体最適を目指す方法を示した。ここでは、系列のような固定化したプレイヤー同士ではなく、状況に応じて取引相手も変わるような、流動的なサプライチェーン自体の効率的な形成過程の分析に、ABS が特に有効であることが指摘されている。

(3) ABS を用いた経営システム分析の特徴

ここまで、既存研究を 2 つに分類して検討してきた。2 つに共通するのは、多数の参加者が関与するシステムを対象としていることであり、またそこには監督者や管理者が存在しないことである。経営システムのうち、生産システムは計画により統制がとられていることがほとんどであり、プッシュ型生産システムではそれが特に顕著である。エージェントが自律的に判断して行動する余

地が少ないプッシュ型の生産システムには、ABS はあまり適していないと考えられる。

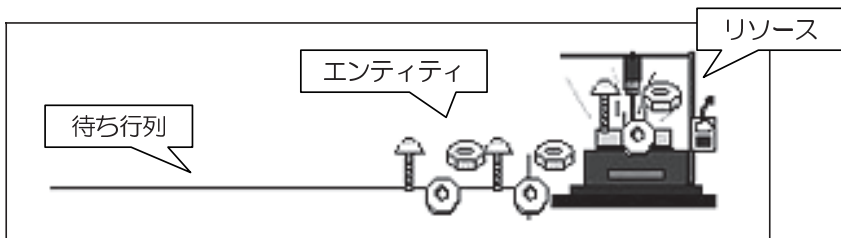
そこで、概念上は管理者がいなくとも顧客からの需要に応じて生産が行われるプル型生産システムに着目する。以下では、ABS を実際に構築するモデリング環境を検討し、特に JIT 生産システムについてその適用可能性を考える。

IV. 生産システム分析に対する ABS の適用

(1) 生産システムのシミュレーション

生産システムのシミュレーションモデルは一般に、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（図表 4 参照）。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。

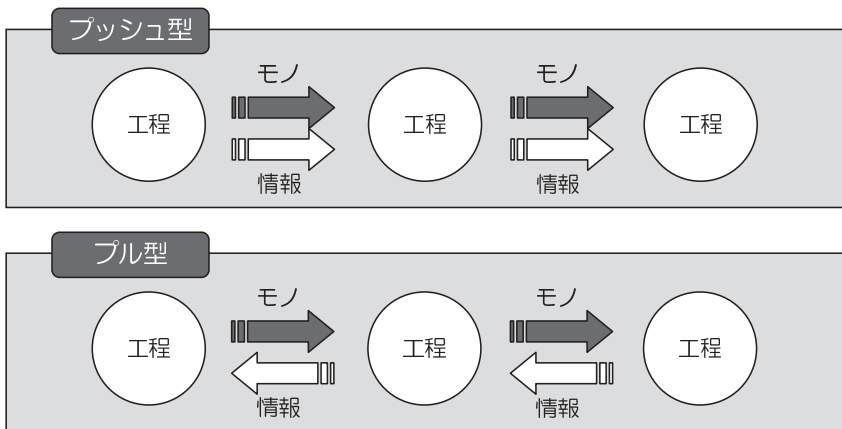
（図表 4）生産システムのシミュレーションモデルの概念



また一般に、生産システムのシミュレーションモデル構築は、SIMAN や SLAM など、離散型シミュレーション言語で行われる（Kelton, *et al.* 2007、森戸ら 1998）。これらの言語はプロセス指向のモデリング環境を採用してい

る。エンティティ、すなわちモノや情報の処理プロセスを上流から順次記述することにより、システム全体をモデル化する。したがって、プロセス指向のモデリングを用いると、モノと情報が一体となって流れるプッシュ型生産システムは非常に簡潔に表現できる（図表5上参照）。しかし、図表5下のように、プル型の生産システム、特にモノと情報が分離して工程間を行き来する、かんばん方式に代表されるJIT生産システムを表現するには、モデル構築上の工夫が必要であることが指摘されている（Carson 2002）。

（図表5）プッシュ型とプル型の生産システムの比較

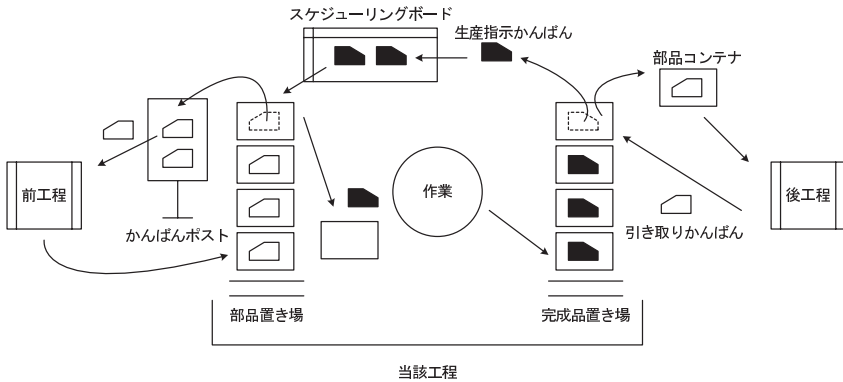


（2）JIT生産システムのシミュレーション

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（門田 2006）。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型の生産システムに分類される。JIT生産システム、特にかんばん方式の作業指示の概念図を図表6に示す。

JIT生産システムは、かんばん方式、水すまし方式、セル生産など、さまざま

(図表 6) JIT 生産システム (かんぱん方式)



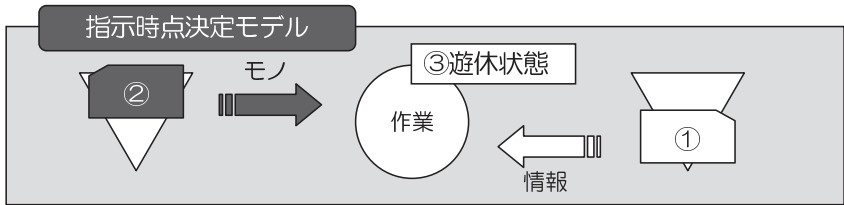
な要素から構成されるが、モデリングの観点からは、特にかんばんによる生産・運搬の指示に注目する必要がある。高橋（2004）は、かんぱん方式のモデルを指示量決定モデルと指示時点決定モデルに分類している。指示量決定モデルは、一定の時間間隔ごとに後工程で使用された量から外されるかんぱん枚数が計算され、任意のリードタイム経過後に前工程での指示に用いられる。前工程では、指示されたかんぱんと、在庫量・処理能力を基に処理量が決定され、処理リードタイム経過後に当該工程での処理が完了し、必要な在庫量が完成される。

指示時点決定モデルは、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ぱんが存在する）、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（図表7参照）。

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、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ミュレーションによって解くことが適している。

JIT 生産システムをシミュレートするモデルを作成しようとする場合、特に

(図表 7) 指示時点決定モデル

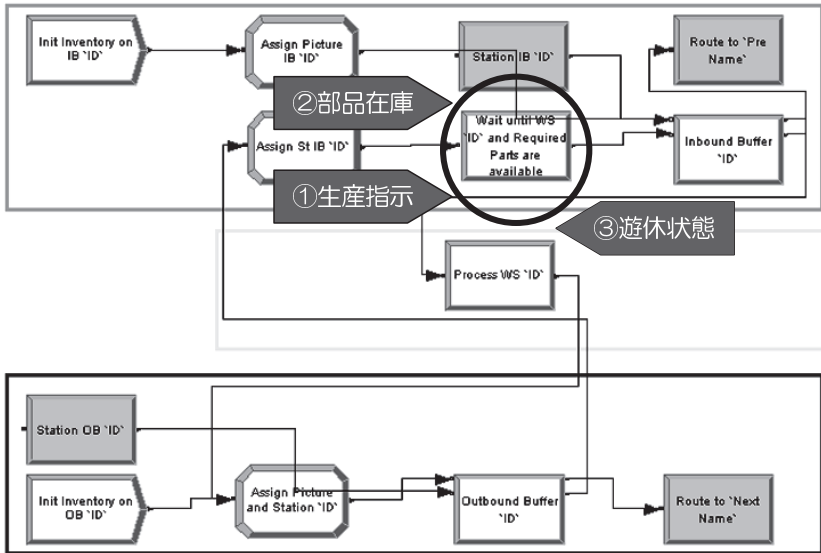


かんばんを用いた生産・運搬指示に注目すると、指示時点決定モデルを実現しなければならない。工程での処理（生産または運搬）に必要な品目エンティティとは別に、工程での処理を指示するかんばん、すなわち情報をエンティティとして表現し、リソースでの処理を開始する前に、これら2種類のエンティティを対応付ける必要がある。しかし、離散型シミュレーション言語では、このようなエンティティの対応付け、すなわちプロセス同士の結合をモデル化する場合、モデルが複雑になる傾向が指摘されている（梅田 2002）。

(3) JIT 生産システムに対する ABS の適用

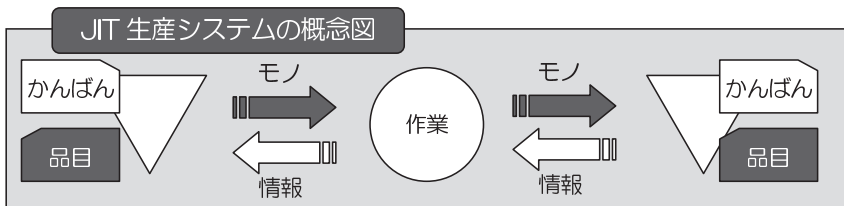
JIT 生産システムの処理プロセスをモデル化する場合、離散型シミュレーション言語では、「かんばん」「品目」をエンティティとして、工程に必要な処理を行う「機械または作業者」をリソースとしてモデリングする。リソースの利用権を得るために、かんばんおよび品目エンティティが待ち行列に並び、双方のエンティティが対応付けられ（開始条件①②）、リソースが遊休状態になって（開始条件③）はじめて工程での処理が行われる（Nomura & Takakuwa 2004）。図表 8 に、離散型シミュレーション言語により、JIT 生産システムをモデル化した例を示す。

(図表 8) 離散型シミュレーション言語による JIT 生産システムモデル



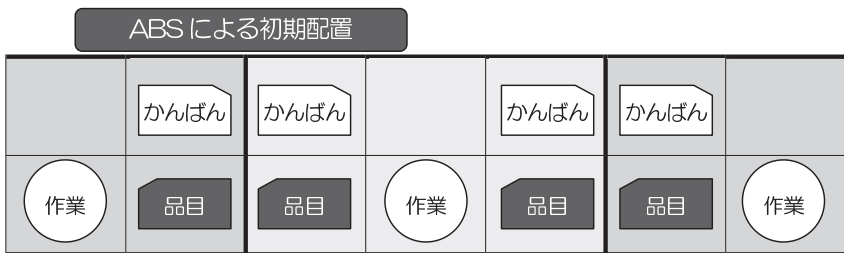
ABSでJIT生産システムを表現する場合は、「機械または作業者」と「かんぱん」「品目」の関係に注目し、それぞれの相互作用により工程での処理が行われるようモデル化しなければならない(野村 2010)。すなわち、図表 9 に示す JIT 生産システムの概念をエージェント間の相互作用として表現する必要がある。

(図表 9) JIT 生産システムの概念図



まず、初期配置として、機械・作業者エージェントの近傍に、処理を指示するかんばんエージェント、および処理に必要な品目エージェントを配置すればよいだろう。図表 10 においては、太枠で囲んだ 2×3 のセルが一つの工程を表している。右隣が後工程、左隣が前工程である（図表 10 ではそれぞれ一部が図示されている）。工程の中心には作業、すなわち機械・作業者エージェントがあり、右側には完成品としての品目エージェントおよび [生産指示] かんばんエージェントが配置される。また、左側には部品在庫としての品目エージェントおよび [引き取り] かんばんエージェントが配される。

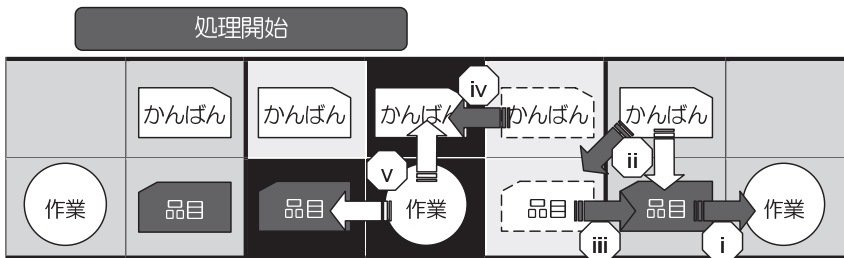
(図表 10) JIT 生産システムの ABS によるモデル化



シミュレーションのステップごとにかんばんおよび品目エージェントの存在を機械・作業者エージェントが確認し、双方が共に存在する場合に機械・作業者エージェントは工程での処理を始める。図表 11 に工程で処理が始まるまでのエージェントの相互作用を示す。なお、図表中で白抜き矢印はチェック・指示等の情報の流れを表し、塗りつぶしの矢印はかんばんや品目等のモノの移動を表している。後工程で品目が生産などの処理に使用されることから相互作用がスタートする（図表 11 中 i。以下同様）。部品置き場から品目がなくなったことを [引き取り] かんばんエージェントが探知し、前工程に運搬を指示する (ii)。指示を受け、必要な品目が後工程に送られ (iii)、当該品目に付けれ

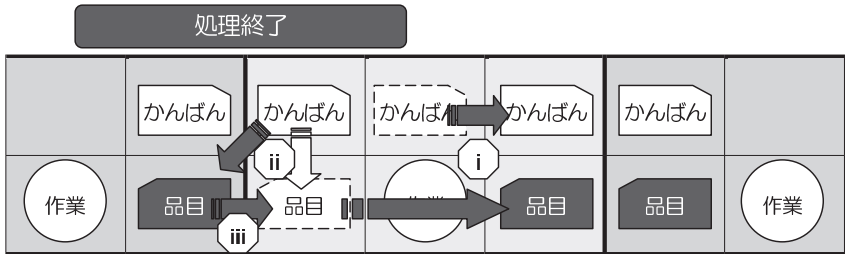
れていた [生産指示] かんばんエージェントがスケジューリングボード (図表 11 中、作業の上のセル) に移動する (iv)。機械・作業員エージェントは、自らが遊休状態になるとかんばんおよび品目エージェントの存在をチェックし、処理を開始することになる (v)。

(図表 11) 処理開始までのエージェントの相互作用



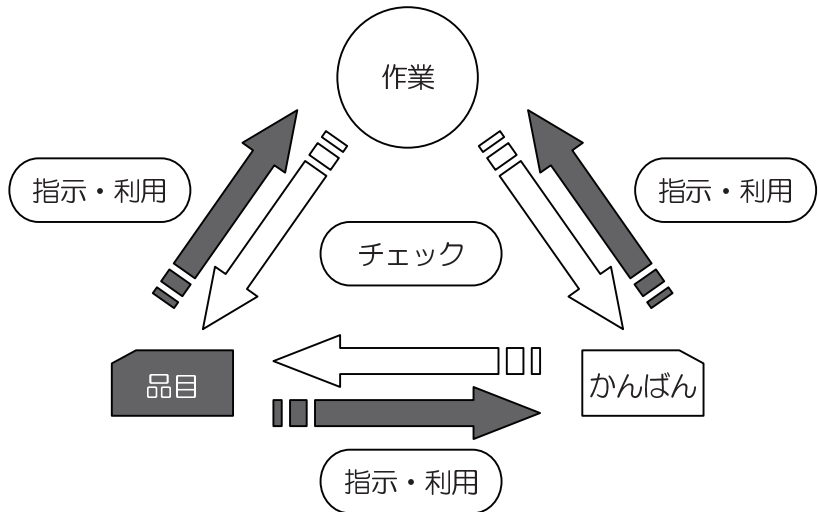
処理に使用された品目エージェントは工程での処理時間を経過した後、当該工程における完成品としての品目エージェントに変化する。図表 12 では、品目エージェントの変化と [生産指示] かんばんの完成品置き場への移動が示されている (i)。また、かんばんエージェントは、部品在庫としての品目エージェント (図表 12 の作業の左のセル) が規定量より少ないかどうかをチェックし、必要であれば前工程に補充処理を指示する (ii)。なお、相互作用の順序を表すローマ数字は、図表 11 および図表 12 の双方において同一の手順を示している。つまり、図表 12 の処理終了時の品目およびかんばんエージェントの相互作用は、前工程に対する処理開始の合図となり、各々の相互作用がもっとも上流の工程まで伝播する。これらにより、各工程に中央から指示を出さなくても、各工程間のかんばんの相互作用により生産が行われる JIT 生産システムの仕組みが ABS でモデル化されている様子が示されている。

(図表 12) 処理終了時のエージェントの相互作用



このように、ABSを用いると JIT 生産システムの振る舞いは、品目、かんぱん、機械・作業員エージェントの自律的な活動の相互作用として記述できるため、離散型シミュレーション言語でのモデリングにおいて指摘された困難を克服し、非常にシンプルなモデルとして記述できるだろう (図表 13 参照)。

(図表 13) 各エージェントの相互作用



V. おわりに

本稿では、社会システムの分析に威力を発揮している ABS の経営システム、特にプル生産システムの代表例である JIT 生産システムへの適用可能性を検討し、モデリングのコンセプトを提示した。ABS はエージェントの主体的な行動の集積として、システム全体の振る舞いを観察できる。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り、かんばんを用いた JIT 生産システムのように、中央にすべての工程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いシステムの分析にフィットする可能性を指摘した。

ただし、JIT 生産システムの ABS によるモデル化のコンセプトの提示は行えたが、実際のプログラム言語による実装が課題として残されている。

謝辞

本研究は、星城大学高度ネットワーク社会研究所の委嘱研究として、星城大学特別研究奨励費を受けて遂行した研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 梅田茂樹 (2002) 「離散系シミュレーションの実際」『インターフェース』28 (9)、pp. 103-114。
- 3) 貝原俊也 (2004) 「サプライチェーンにおける企業間交渉戦略へのマルチエージェント技術の適用」『人工知能学会誌』19 (5)、pp. 579-586。
- 4) 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。
- 5) 高橋勝彦 (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、pp. 262-283。

- 6) 出口弘 (2004) 「エージェントベースモデリングによる問題解決－エージェントベース社会システム科学としての ABM－」『オペレーションズ・リサーチ』49 (3), pp. 161-167。
- 7) 出口弘 (2009) 「エージェントベース社会システム科学の胎動：社会経済システム論の再構築の試み」出口弘、木嶋恭一 編著『エージェントベースの社会システム科学宣言』勁草書房、pp. 3-20。
- 8) 西成活裕 (2006) 『渋滞学』新潮社。
- 9) 西成活裕 (2008) 「渋滞学を防災に活かす」『科学』78 (10)、pp. 1130-1133。
- 10) 野村淳一 (2010) 「エージェントベースシミュレーションのビジネスシステムに対する適用可能性」『日本情報経営学会第 60 回全国大会予稿集』 pp. 65-68。
- 11) 増田浩道、菊池晋矢、新井健 (2009) 「エージェントベースシミュレーションによる小売店舗レイアウトの効果分析」『日本経営工学会論文誌』60 (3)、pp. 128-144。
- 12) 森戸晋、相澤りえ子、貝原俊也 (1998) 『Visual SLAM によるシステムシミュレーション』共立出版。
- 13) 門田安弘 (2006) 『トヨタプロダクションシステム－その理論と体系』ダイヤモンド社。
- 14) 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『コンピュータのなかの人工社会』共立出版、pp. 2-23。
- 15) Axelrod, R. (1984) *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (松田裕之 訳 (1988) 『つきあい方の科学－バクテリアから国際関係まで』ミネルヴァ書房)。
- 16) Carson, S. (2002) “Model verification and validation” *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp. 52-58.
- 17) Gilbert, N. (2008) *Agent-based Models*, Sage Publications.
- 18) Kelton, W. D., Sadowski, R. P. & Sturrock, D. T. (2007) *Simulation with Arena 4th. Ed.*, McGraw-Hill (野村淳一 訳 (2007) 『シミュレーション－Arena を活用した総合的アプローチ－第 4 版』コロナ社)。

- 19) Nomura, J. & Takakuwa, S. (2004) “Module-based modeling of flow-type multistage manufacturing systems adopting dual-card Kanban system” , *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, pp. 1065-1072.
- 20) Schelling, T. C. (1971) “Dynamic models of segregation” , *Journal of Mathematical Sociology*, 1, pp. 143-186.
- 21) Wooldridge, M. & Jennings, N. R. (1995) “Intelligent agents: Theory and practice” , *Knowledge Engineering Review*, 10 (2) , pp. 115-152.