

# サプライチェーンにおける定量的分析

—シミュレーションを中心に—

王 曉 華

## 1 はじめに

経済のグローバル化が進んでいる今日では、サプライチェーンネットワークが複雑になり、不確実性によるリスク要因が増加し、サプライチェーンを分析する重要性が次第に高まってきている。本論文の目的は、サプライチェーンに関する定量的分析の動向を、シミュレーション手法を中心に考察し、なおサプライチェーンシミュレーションモデルを構築する方法論を提案することである。

本論文の構成は以下のとおりである。2章ではサプライチェーンにおける定量的分析の動向を考察する。3章ではエージェントベースシミュレーションがサプライチェーン分析への適用を論述する。4章ではエージェントベースによるサプライチェーンシミュレーションモデルを構築する際に、注意すべき点を検討し、そして5章では結論をまとめる。

## 2 サプライチェーンにおける定量的分析

### 2.1 不確実性における定量的分析

サプライチェーンとは原材料の調達から、生産・流通を経て、製品を最終消費者に納入するまで、すべてのプロセスからなるネットワークである。このネットワークに供給業者や生産メーカー、流通業者、小売業者など多くの参加者があり、これらの参加者間で注文に伴う情報の流れ、納入に伴う物流活動、そして組織内部では生産活動や在庫管理、需要予測などが行われている。

サプライチェーンを分析する定量的分析の手法として、オペレーションズリサーチ（OR）における多くの技法が利用できる。ここで、不確実性をもつサプライチェーンに対しての定量的分析の先行研究をまとめる。

Peidro et al. [1]では、不確実性のソース、問題のタイプ、およびモデリング手法の3つの側面から1988年から2007年まで、計103本の論文に対する先行研究がなされている。文献調査の分類方法を図1に示す。そして、サプライチェーンモデリングの手法を次の4つに分類している。

- (1) 解析的モデル (A, analytical models) : 確率的計画法, 線形計画法など。
- (2) 人工知能モデル (AI, artificial intelligence) : マルチエージェントシステム (MAS, multi-agent system), ファジィ推論, 遺伝的アルゴリズム (GA, genetic algorithm)。
- (3) シミュレーションモデル (S, simulation models) : 離散事象シミュレーション (DES, discrete event simulation), システムダイナミクス (SD, system dynamics)。
- (4) ハイブリッドモデル (H, hybrid models) : 上記モデルの混合モデル, 中では離散事象シミュレーションと整数計画の混合モデルが多い。

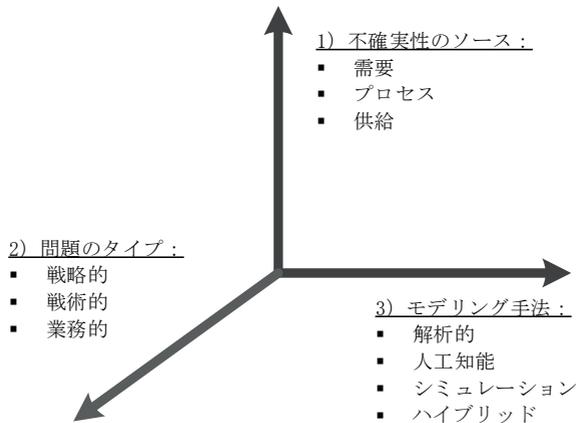


図1 不確実性をもつサプライチェーンの分析方法

(出所: Peidro et al. [1]より筆者作成)

モデリング手法と公表時間による文献数の変化を図2に示す。図2から、1998年から2007年までの文献数は前の10年間より、大幅に増加し、なお人工知能モデルの増加数が著しい。Peidro et al. [1]は今後の研究方向の1つとして、ファジィ集合とシミュレーションのハイブリッドモデルを開発できると示唆している。

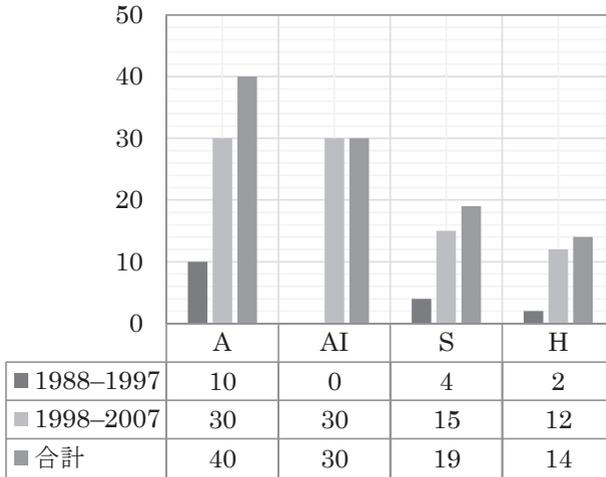


図2 モデリング手法と論文数の変化

(出所：Peidro et al. [1]より筆者作成)

Fahimnia et al. [2]では、サプライチェーンリスクを分析する定量的モデルの先行研究が行われている。主流となる学会誌に対し、サプライチェーン、リスクと不確実性に関するキーワード、および定量的分析モデルに関するキーワードで検索した論文を用いて、文献研究がなされている。リスクおよび定量的分析モデルに関するキーワードは次のとおりである。

- (1) リスクと不確実性：リスク、不確実性、寸断、俊敏性、回復性、脆弱性など。
- (2) 定量的分析モデル：最適化、意思決定モデル、シミュレーション、

離散事象，メタ探索，線形計画法，整数計画法，多目標など。

1978年から2013年までのサプライチェーンリスクモデルリングに関する論文数の変動を図3に示す。図3から，2000年頃から論文数の増加が著しいということがわかる。

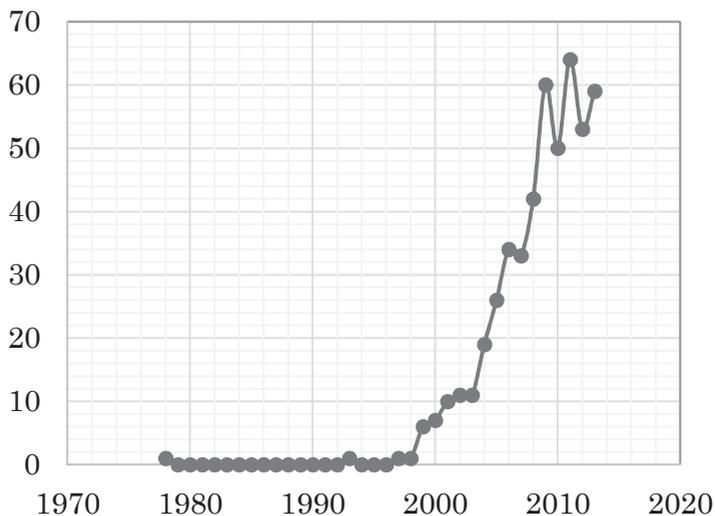


図3 サプライチェーンリスクモデリングにおける論文数の変化

(出所：Fahimnia et al. [2]より筆者作成)

## 2.2 WSCから見たサプライチェーンシミュレーションの変化

本節では，Winter Simulation Conference（WSC）で設けるサプライチェーンおよびエージェントベースシミュレーション（ABS）に関するセッションの変化を分析し，サプライチェーンシミュレーションの動向を考察する。

WSCは世界中でシミュレーションに関するもっとも重要な国際会議であり，毎年12月に開催される。公式サイトでは，1968年から2015年までの論文および各回のセッションの情報が掲載されている[3]。ここで，1996年度

までさかのぼって、各年度のサプライチェーンに関するセッションの設置を調べる。その結果を表1に示す。

表1から、サプライチェーンというキーワードを含むセッションは、2007年にはじめて設置され、2008年と2009年に2006年のセッション名に戻り、そして2010年から2015年まで、2012年以外各年度のセッションに出ている。特筆なのは2012年にドイツで開催したため、セッションの設置が前後の年度と比べてやや違うと考えられる。

セッション名を見てみると、1996年と1997年はGeneral Applications、そのセッションにTransportationのサブセッションがあった。1999年から2009年まで、2007年を除いてセッション名はLogistics, Transportation and Distributionが含まれている。2010年から2013年まで、SCMとLogisticsかTransportationのいずれ、あるいは2つともに出ている。最近の2年間、Logistics, SCM and Transportationに定着している。このセッション設置の変化から、サプライチェーンシミュレーションの重要性が見られる。

表1 WSCにおけるサプライチェーンセッションの変化

年度	セッション名	備考
2015	Logistics, SCM and Transportation	
2014	Logistics, SCM and Transportation	
2013	Supply Chain Management and Transportation	
2012	New Methods in Transport and Logistics Simulation	ドイツで開催
2011	Logistics, Transportation & SCM	
2010	Logistics and Supply Chain Management	
2009	Applications - Logistics, Transportation and Distribution	
2008	Logistics, Transportation and Distribution	
2007	Transportation and Supply Chain Applications	
2006	Logistics, Transportation, and Distribution	
2005	Logistics, Transportation, and Distribution	
2004	Logistics, Transportation, and Distribution	

2003 Logistics, Transportation, and Distribution  
 2002 Applications in Logistics, Transportation, and  
 Distribution  
 2001 Logistics, Transportation, and Distribution  
 2000 Logistics, Transportation & Distribution Applications  
 1999 Logistics, Transportation & Distribution Applications  
 1998 Transportation Applications  
 1997 General Applications  
 1996 General Applications

---

(出所：参考文献 [3] より筆者作成)

続いて、WSCにおけるエージェントベースシミュレーション (ABS) のセッションの変化を考察する。エージェントベースシミュレーションあるいはエージェントベースモデリング (ABM) は、自律的なエージェントを有する動的なプロセスに対するモデリングの枠組みである[4]。WSCでは、2005年にはじめてAgent Based Modelingセッションが設置され、2006年から2010年までなくなり、2012年を除いて2011年から2015年までAgent Based Simulationというセッションの設置が定着している。そして、2015年にはじめて、Agent Based Simulationセッションでは、Supply Chain Management というサブセッションが設置され、3つの論文が掲載されているが、その中の1つはサプライチェーンへの関連性が低いと見られる。変化の結果を表2に示す。

**表2 WSCにおけるABS/ABMセッションの変化**

年度	セッション名	サブセッション
2015	Agent Based Simulation	Supply Chain Management
2014	Agent Based Simulation	
2013	Agent Based Simulation	
2011	Agent Based Simulation	
2005	Agent Based Modeling	

---

(出所：参考文献 [3] より筆者作成)

本節ではWSCにおけるセッションの設置からサプライチェーンシミュレーションの動向を考察した。近年シミュレーション手法によるサプライチェーン分析が増えており、なおエージェントベースシミュレーションも増加の傾向が見られる。

### 3 エージェントベースシミュレーションとサプライチェーン

本章では、エージェントベースシミュレーションを中心にサプライチェーンシミュレーションの手法を考察する。

#### 3.1 シミュレーションモデルの概要

サプライチェーンシミュレーションについて、Kleijnen and Smits [5]では4つのタイプに分類している。それは、スプレッドシートシミュレーション、システムダイナミクス、離散事象シミュレーション、およびビジネスゲームである。スプレッドシートシミュレーションは簡単なモデルに適用するのに対して、動的かつ複雑なサプライチェーンを分析するには、システムダイナミクスと離散事象シミュレーションは主流である。この分類にはエージェントベースシミュレーションがまだ含まれていない。そして、Peidro et al. [1]における分類もシミュレーションモデルには、離散事象シミュレーションとシステムダイナミクスしかない。

WSCのセッションおよび掲載の論文から、エージェントベースシミュレーションの応用が増えつつあることがわかる。そして、代表的な汎用シミュレーションソフトウェアの1つであるAnyLogicは、離散事象シミュレーション、エージェントベースシミュレーション、システムダイナミクスの3つの方法論をベースとしている[6, 7]。これらの方法論の関係を図4に示す。図4におけるABはエージェントベースモデリング、DEは離散事象モデリング、SDはシステムダイナミクスをそれぞれ指す。この枠組みは比較的に理解しやすいと筆者は考える。また、Law [8]は、シミュレーションモデリングに関する専門書であり、最新の第5版にエージェントベースシミュレーションとシステムダイナミクスに関する章を加えている。

離散事象シミュレーションとシステムダイナミクスは50年以上の歴史

を有しているのに対して、エージェントベースモデリングが応用されるのはまだ20年未満である[7, 9]。今後シミュレーションモデリングの方法論の分類はこの3種に定着していくかどうか注目していきたい。しかしながら、現在ではエージェントに対する理解もまだ統一されていない。次節でこれについて詳細に述べる。

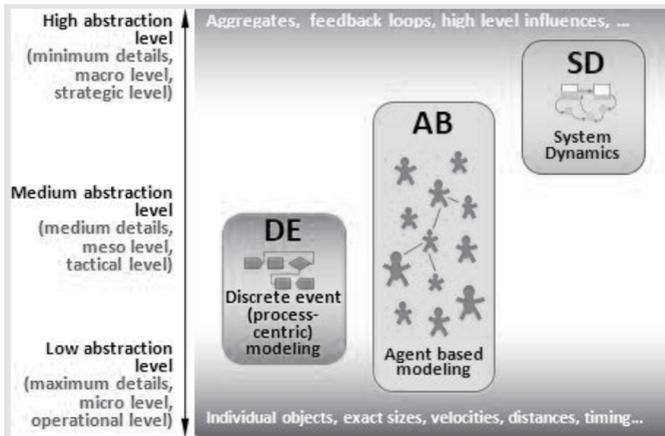


図4 エージェントベースシミュレーションの位置づけ

(出所：Grigoryev [7]より)

### 3.2 エージェントベースシミュレーション

前章ではエージェントベースシミュレーションはWSCにおいて注目されてきていること、そして前節ではシステムダイナミクスおよび離散事象シミュレーションに加えて、主要なシミュレーションモデリングの方法論として利用されている動きを述べている。しかしながら、エージェントまたはエージェントベースシミュレーションの定義について、一般的に認められるのがまだ存在しない[4, 8, 10]。Law [8, pp. 694-695]では、エージェントはほかのエージェントと環境を感知できる自律的なエンティティであり、そしてこの情報を利用して意思決定を行うと述べている。なお、状態の変化が離散的であるため、エージェントベースシミュレーションは離散事象

シミュレーションのバリエーション (Variation) であると主張している。

Macal and North [4]によると、一般的なエージェントベースモデルには、エージェント、エージェント間の関係と相互作用のメソッド、およびエージェントの環境という3つの構成要素がある。なお、エージェントは自律性 (Autonomy) やモジュール性 (Modularity)、社会性 (Sociality)、コンディショナリティ (Conditionality) などの属性を有する。典型的なエージェントを図5に示す。

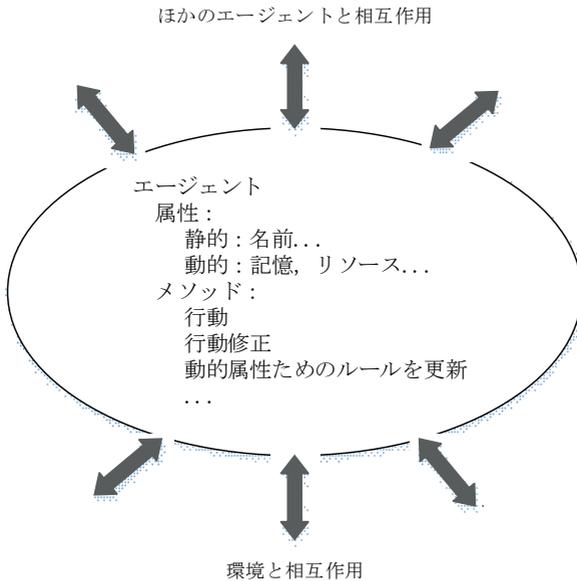


図5 典型的なエージェント

(出所：Macal and North [4]より筆者作成)

現在では、エージェントベースシミュレーションが経済学や社会学、教育、農業など、さまざまな分野に利用されている。人間をエージェントとして定義するのが一般的であるが、組織や車、機械、プロジェクト、アイデアなどをエージェントとすることも可能である[7]。例えば、計画やコントロールの機能を持つエージェントが挙げられる[11, 12]。

### 3.3 サプライチェーンとエージェントベースシミュレーションの相性

上述したように、サプライチェーンネットワークは供給業者やメーカー、流通業者、小売業者、最終顧客などの参加者からなっている。強靱なサプライチェーンを構築するために、各参加者が互いに協働する必要があるが、自分の政策に基づいて意思決定を行うのが一般的である。例えば、小売業者は最終顧客に販売し、自社の在庫政策（ルール）に基づいて流通業者に注文する。流通業者は下流の小売業者からの注文を供給し、また自分の在庫政策に基づき、上流側に注文する。

エージェントベースシミュレーションモデルを構築する際に、最終顧客や小売業者、流通業者、メーカー、流通業者などをエージェントとし、各エージェントが在庫政策などのルールで意思決定をし、なお発注情報や納入などを通じてほかのエージェントと相互作用する[13]。サプライチェーンにおける多数の参加者、分散した意思決定、ネットワークの柔軟性、およびシステムのダイナミックな特徴から見て、サプライチェーンネットワークとエージェントベースシステムの相性が非常に良いといえる[14]。

## 4 サプライチェーンシミュレーションモデルの構築

本章では、エージェントベースによるサプライチェーンシミュレーションモデリングの方法論を検討し、そしてモデルを構築する際に注意すべき点を考察する。

### 4.1 モデリングの方法論

シミュレーションモデルを構築するため、まずモデリング方法論を選ぶ[10]。図6は各応用分野とシミュレーションモデリングの抽象レベルを示したものである。図6からサプライチェーンは中レベルにある。Borshchev and Filippov [9]によると、サプライチェーンは中レベルから高レベルまでのどこでもモデル化が可能である。また、前章で考察したサプライチェーンとエージェントベースシミュレーションの相性から見ると、エージェントベースシミュレーションを方法論として適切である。

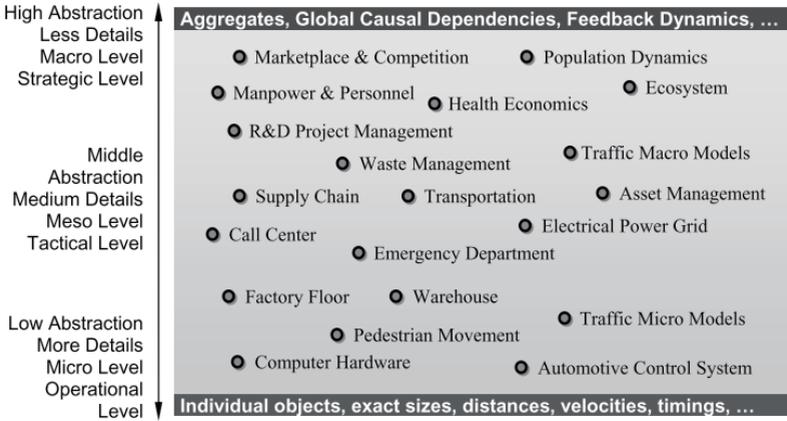


図6 シミュレーションモデリングの抽象度レベル  
(出所：Borshchev and Filippov [9]より)

一般的に、エージェントベースのサプライチェーンシミュレーションモデルを構築する際に、調達や発注、在庫管理、輸送などに関する意思決定を行う会社をエージェントとする[4]。通常、会社内部、つまりエージェント内で意思決定を行うためのプロセスが必要となる。したがって、離散事象シミュレーション手法で構築したプロセスをエージェントに組み入れるハイブリッド方法論はサプライチェーンシミュレーション分析に適切であるといえる。Borshchev [6]によると、この方法論はサプライチェーンモデリングにおいて、広く利用されている。

Wang [15]では、Manufacturer, Warehouse, Retailerの3つのエージェントを汎用シミュレーションソフトウェアSimio[16]を用いて構築している。各エージェントにはオーダー処理プロセスや発注プロセス、生産プロセスなどが含まれている。この3つのエージェントを用いてさまざまなモデルを構築できる。応用例として1つのManufacturer, 2つのWarehouse, 5つのRetailerからなるサプライチェーンモデルが構築されている。このモデルおよびWarehouseエージェント内部における一部のプロセスを図7に示す。

こうしたエージェント内にプロセスを取り入れる方法論のメリットは、

いくつかある。例えば、①サプライチェーンとマルチエージェントの相性の良さが明らかになること、②同類のエージェントを重複利用できること、そしてそれによりモデリングの時間を短縮できること、③エージェント内側のプロセスをモデリングできない方もモデルを構築できること、などが挙げられる。

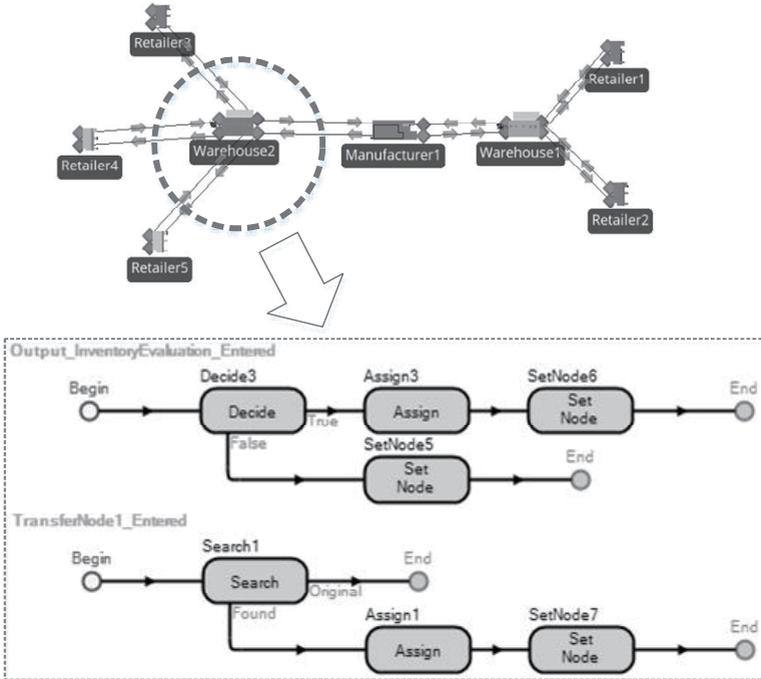


図7 エージェントとプロセスの例

(出所：Wang [15]より加筆作成)

### 4.2 シミュレーションモデルの構築

モデリングの方法論が決まったら、次に概念モデルの構築である。これは現実システムをシミュレーションモデルに抽象化する過程であり、それによりシミュレーションモデルの構成要素や境界、詳細レベルなどが決まる[10, 17]。Arvitrida et al. [18]によると、構築した概念モデルでは、パラ

メーターや変数、評価指標、モデルのコンテンツ、仮定条件などが含まれる。さらに、モデルのコンテンツでは、エージェントおよびその環境、エージェント間の相互作用、行動ルールが記述される。エージェントに関する記述は、エージェントベースモデルと一般的なシミュレーションモデルの相異点である[4]

サプライチェーンとエージェントベースシステムの相性から、サプライチェーンにおける参加者（メーカーや流通センター、小売業者など）をエージェントとするのが一般的である。例えば、Arvitrida et al. [18]では、顧客 (Customers) , 製造業者 (Manufacturers) , 供給業者 (Suppliers) , Tan and Li [19]では供給業者、流通センター、小売業者をそれぞれエージェントとして仮定している。また、エージェント間における相互作用は発注情報やオーダーの納入などにより実現するのが多い[13, 15, 19]。そのほかにサプライチェーン上の拠点以外、計画あるいはコントロールとしてのエージェントも導入可能である。

個々のエージェントの行動ルールを記述するのがもっとも難しいと考えられる。上述したように多くの場合、エージェントはサプライチェーンにおける参加者である。個々の参加者はどのような政策に基づいて意思決定を行うかについてさまざまな可能性があり、そしてモデリングの抽象度により意思決定のプロセスの詳細さも異なる。

在庫管理はサプライチェーンマネジメントにおけるもっとも重要な内容の1つであり、基本的な管理方式には定期発注方式と定量発注方式がある。在庫を有するエージェントの行動ルールを考えると、在庫補充のための意思決定のルールを1つの発注方式で決定すれば良いと考えられる。例えば、発注点方式を採用するなら、在庫水準が事前に決めた発注点になったら、上流側に発注を行うことになる。エージェントの学習機能を強化する視点から、発注点を事前に決めずに、タイムリーに環境を感知し、その都度計算して発注するかどうかを決定すれば良いであろう。近年遺伝的アルゴリズムやファジィ推論などの手法をシミュレーションに応用する研究が多く見られ、どのようなアルゴリズムを選ぶかが重要な課題であると考えられる。

## 5 おわりに

本論文では、不確実な状況下におけるサプライチェーンの分析手法を、シミュレーションを中心に論述した。まず、不確実性をもつサプライチェーン分析手法の動向を分析し、さらにその分析手法の1つであるシミュレーションの動向を考察した。次に、エージェントベースシステムとサプライチェーンの相性を分析し、最後にエージェントベースシミュレーション手法を用いてサプライチェーンをモデリングする際に、注意すべき点を検討した。

上述の分析から、以下のことがわかる。まず、不確実性をもつサプライチェーンに対し、シミュレーション分析がほかの定量的分析とともに、十数年前から増加する傾向にある。そして、エージェントベースシステムとサプライチェーンの相性が良いので、エージェントベースシミュレーションによるサプライチェーンの分析が注目を集めている。

提案として、エージェント内にプロセスを取り入れる方法論はサプライチェーンシミュレーション分析に適用できる。シミュレーションモデルを構築する際に、概念モデルを真剣に分析する必要がある。特にサプライチェーンにおいて、何をエージェントとするか、エージェントがどのような行動ルールをもつのか、それから環境およびほかのエージェントとどのように相互作用するのかが重要なポイントである。

エージェントベースシミュレーションの応用はまだ20年未満であり、また利用される分野もかなり広いため、エージェントに対しての定義はまだ定着していない。今後エージェントシミュレーションの発展に注目しつつ、サプライチェーンリスク分析などに応用していく。

## 参考文献

1. Peidro, D., et al., *Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. 43(3-4): pp. 400-420.
2. Fahimnia, B., et al., *Quantitative models for managing supply chain*

- risks: a review*. European Journal of Operational Research, 2015. 247(1): pp. 1-15.
3. *Winter Simulation Conference*. <http://informs-sim.org/>. 2016年5月3日.
  4. Macal, C. and M. North, *Introductory tutorial: agent-based modeling and simulation*, in Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, A. Tolk, et al., Editors. 2014, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 6-20.
  5. Kleijnen, J.P.C. and M.T. Smits, *Performance metrics in supply chain management*. Journal of the Operational Research Society, 2003. 54(5): pp. 507-514.
  6. Borshchev, A., *Multi-method modeling*, in *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, R. Pasupathy, et al., Editors. 2013, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 4089-4100.
  7. Grigoryev, I., *AnyLogic 7 in three days: a quick course in simulation modeling*. 3rd ed. 2014: Ilya Grigoryev.
  8. Law, A.M., *Simulation modeling and analysis*. 5th ed. 2015, New York: McGraw-Hill.
  9. Borshchev, A. and A. Filippov, *From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools*, in *The 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. 2004, Oxford, England: Systems Dynamics Society.
  10. Kasaie, P. and W.D. Kelton, *Guidelines for design and analysis in agent-based simulation studies*, in *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, L. Yilmaz, et al., Editors. 2015, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 183-193.
  11. Datta, P.P. and M.G. Christopher, *Information sharing and coordination mechanisms for managing uncertainty in supply chains: a simulation study*. International Journal of Production

- Research, 2011. 49(3): pp. 765-803.
12. Ferreira, L. and D. Borenstein, *Normative agent-based simulation for supply chain planning*. Journal of the Operational Research Society, 2010. 62(3): pp. 501-514.
  13. Swaminathan, J.M., S.F. Smith, and N.M. Sadeh, *Modeling supply chain dynamics: a multiagent approach*. Decision Sciences, 1998. 29(3): pp. 607-632.
  14. Monteiro, T., et al., *The interest of agents for supply chain simulation, in Simulation for supply chain management*, C. Thierry, A. Thomas, and G. Bel, Editors. 2008, Wiley. pp. 159-188.
  15. Wang, X., *Simulation modeling for performance analysis of multi-stage supply chain, in The 2nd International & 42nd National Conference of The Japan Society for Production Management*. 2015. pp. 142-145.
  16. Kelton, W.D., J.S. Smith, and D.T. Sturrock, *Simio and simulation: modeling, analysis, applications*. 2nd ed. 2011: McGraw-Hill Learning Solutions.
  17. Robinson, S., *Conceptual modeling for simulation, in Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, R. Pasupathy, et al., Editors. 2013, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 377-388.
  18. Arvitrida, N.I., S. Robinson, and A.A. Tako, *How do competition and collaboration affect supply chain performance? an agent based modeling approach, in Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, L. Yilmaz, et al., Editors. 2015, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 218-229.
  19. Tan, W.J. and Z. Li, *Design of supply chain topology to mitigate demand and supply risks, in Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, L. Yilmaz, et al., Editors. 2015, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. pp. 230-241.