

データ解析とシミュレーションの統合による経済市場制度設計

和泉 潔^{†1} 松島 裕康^{†1} 坂地 泰紀^{†1}

概要: 本稿では、データ解析とシミュレーションの統合による経済市場制度設計に関する研究成果を紹介する。最初に、人工市場シミュレーションにより株価の変動に対して適正なティックサイズ(最小価格単位)の閾値を求めた研究と裁定取引戦略が株式市場の安定性に与える影響を調べた研究を紹介する。次に、銀行間ネットワークと金融市場の統合シミュレーションにより、ネットワーク構造とシステムック・リスクの関係を調べた研究を紹介する。最後に、バリューチェーン上の交渉をモデル化し、交渉制度と交渉戦略の組み合わせが制度全体に与える影響をシミュレーションにより分析するプロジェクトを紹介する。

キーワード: エージェントシミュレーション, 制度設計, 金融市場, バリューチェーン

Economic Rule Design by the Integration of Data Analysis and Agent-based Simulation

KIYOSHI IZUMI^{†1} HIROYASU MATSUSHIMA^{†1}
HIROKI SAKAJI^{†1}

Abstract: In this paper, we introduce the results of researches on economic market system design by integration of data analysis and simulation. The first is a study to find a threshold value of an appropriate tick size (minimum price unit) for stock price fluctuation by artificial market simulation. We introduce a study on the influence of arbitrage trading strategy on stock market stability. Next, we introduce studies on the relationship between network structure and systemic risk by integrated simulation of interbank network and financial market. Finally, we introduce a project to model negotiations on the value chain and analyze the impact of the combination of the negotiation system and negotiation strategy on the overall system by simulation.

Keywords: Agent-based Simulation; Rule Design; Financial Market; Value Chain

1. はじめに

社会経済現象のエージェントシミュレーション研究の多くは、現象をリアルに再現することだけを主な目的とするシミュレーションとは異なり、構成論的シミュレーションと呼ばれるアプローチをとっている。現実の社会現象は、個人行動に対応するマイクロレベルや社会経済全体を表すマクロレベルの様々な要素が複雑に絡み合っている。そのため、マクロな挙動の原因を、少数のマイクロな要素のみに還元することは多くの場合不可能である。そこで、対象となる社会現象をシミュレーションで再現できるような、個人の行動・相互作用ルール・外部環境などの要素の条件を発見する。現象を生成できたマイクロな要素やその相互作用が、実際のマクロな社会現象の原因となっている可能性が高いと考えるのである。このようにして、社会経済システムにおける構造変化のメカニズムを、マイクロ・マクロ関係を観点から理解するのである。本稿では、データ解析とシミュレーションの統合による経済市場制度設計に関する研究成果を紹介する。

2. 東京証券市場のティックサイズ変更の方針

決定

基本モデルとして1銘柄を1000体の取引エージェントが参加する人工市場モデルを用いて約100通りのパラメータスタディを行った(図1)。

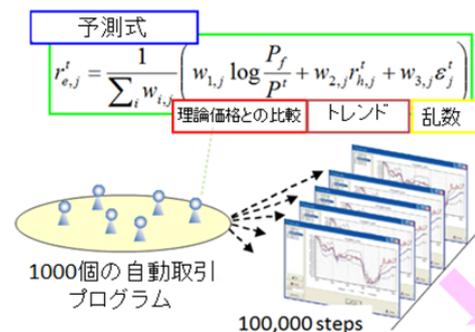


図1 人工市場の基本モデルの枠組み
Fig. 1: Framework of our artificial market model

シミュレーション結果と実際の東京証券取引所での実データと比較して、株価の変動に対して適正なティックサイズ(最小価格単位)の閾値を求めた[1](図2)。本結果が、2014年から実施された東京証券取引所のティックサイズ変更において銘柄の絞り込みの方針に反映された。

^{†1} 東京大学大学院 工学系研究科
School of Engineering, the University of Tokyo

Fig. 4: Conditions of Shock Transfer

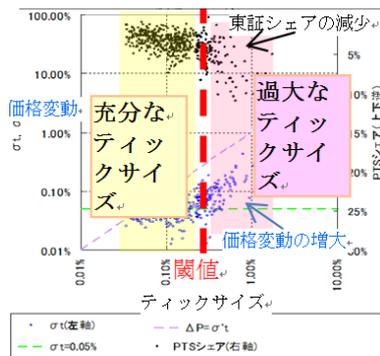


図2 ティックサイズと変動の実証分析
 Fig. 2: Tick sizes and volatility

3. フラッシュクラッシュ(瞬間大暴落)の再現

並列処理言語 X10[2]を用いて、複数の株式銘柄と平均株価に連動する指数銘柄の市場シミュレーションへと拡張したモデルを構築した(図3)。

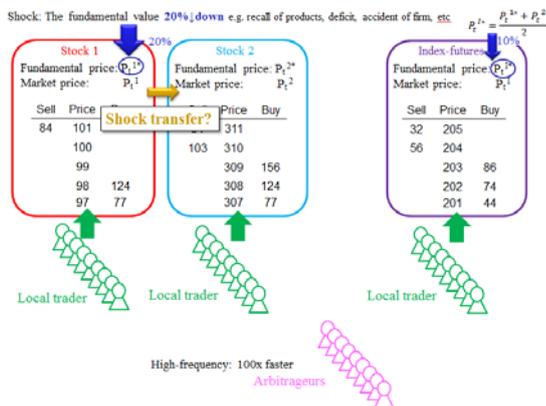


図3 株価下落ショック伝播のモデル
 Fig. 3: Artificial market model of shock transfer.

本モデルを用いて、裁定取引と呼ばれる高速な自動取引でよく用いられる取引戦略が、急激な価格変化を他の銘柄まで影響を与えてしまうことが起こりうる条件を調べた[3,4]. 社会シミュレーション管理モジュール OACIS [5]を用いた約 5000 通りのパラメータ分析を行い、他の銘柄へ価格下落の伝播し瞬間大暴落(フラッシュクラッシュ)が生じうる、取引戦略の組み合わせを特定した(図4)。

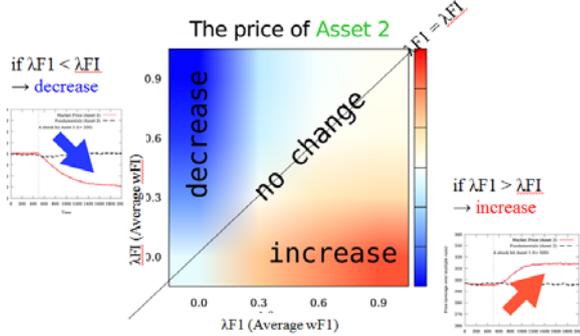


図4 価格変動伝播の起きる条件の分析

4. 金融市場と銀行間ネットワークの統合

ある企業の倒産が原因となり、その他の企業まで倒産し、ドミノ倒しのように倒産が続くことを連鎖倒産と呼ぶ。連鎖倒産のように金融機関の破綻が金融システム全体に波及するリスクのことを「システムック・リスク」と言い、近年注目が集まっている。エージェントシミュレーションを用いて、「銀行の保有する市場性資産の価格変動」と「銀行間の貸借ネットワーク形状」を変化させた時の銀行の連鎖倒産への影響を調べた研究[6]を紹介する。

TOPIX100 構成銘柄等の大型銘柄の金融シミュレーションと百行の銀行の銀行間ネットワークの統合シミュレーションを実行した結果、銀行間ネットワークと金融市場の相互作用、特に大銀行と小銀行の間の貸借リンクの存在確率および倒産を開始する銀行の規模がシステムック・リスクに与える影響の存在を確認した。

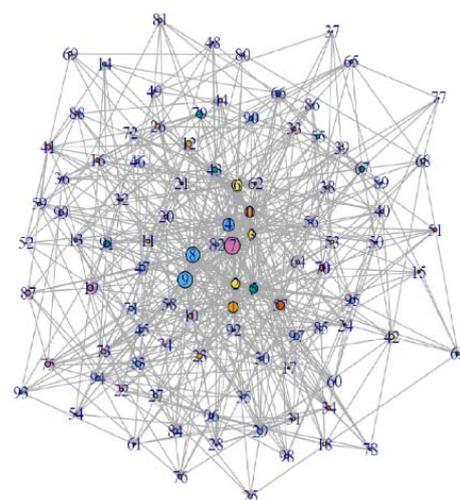


図5 100行の銀行間ネットワークの例
 Figure 5. An example of a network with 100 banks.

最初に倒産した銀行の規模が大きい場合は、金融市場の価格変動が大きくなるにつれて、倒産数は単調減少した。これは、価格変動の増加により、倒産した大銀行が借入している小銀行が少なく連鎖倒産が起きにくくなっていた。一方、最初に倒産した銀行が小規模の場合は市場変動が大きくなるにつれて、倒産数は単調増加した。これらの「銀行間の貸借関係の非対称性」と「銀行の保有する市場性資産の価格変化」に関する要素のシステムック・リスク評価における重要性を明らかにした。

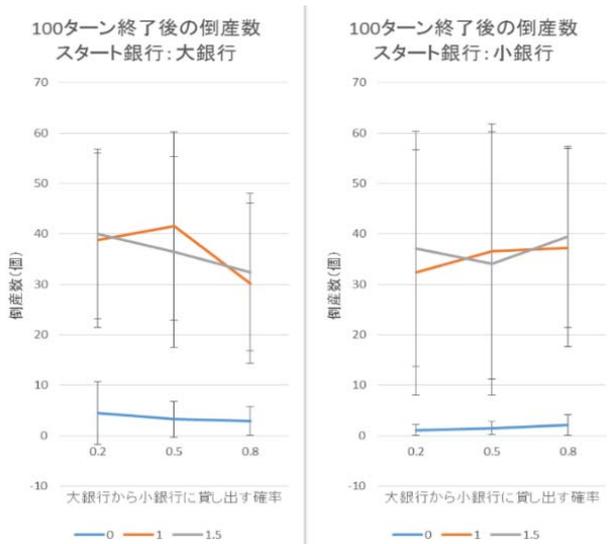


図 6 価格変動による倒産数の変化
 Figure 6. Changes in bankruptcies due to price fluctuations

5. バリューチェーン・マーケットプレイスの安定性・安全性

バリューチェーン上で製造システムや物流システムを稼働させている各企業がそれぞれエージェントとなる AI を持ち、これらの AI が協調・連携動作を行うことで、発注者と受注者の双方にとってメリットとなる取引相手・取引条件がすみやかに発見できるための交渉プラットフォームを開発する研究開発プロジェクトが 2018 年 12 月より開始した[7].

このプロジェクトの中で、市場原理に基づく交渉の場であるマーケットプレイスでの交渉制度を設計するためのエージェントシミュレーション研究テーマを紹介する.

5.1 マーケットプレイスの安定性

AI 間交渉や連携を効率的かつ安定的に実行するために、想定されるケースごとの条件で必要となる要件項目を、システム工学等による簡易モデルでの解析やエージェントシミュレーションによる分析を用いて特定を行う。導出された条件を達成するために必要となる、ユースケース個別のルール体系や制度を評価する。現状の法制度上の条件と比較し整備が必要となる内容の提案や挙動分析も行う(図 7).

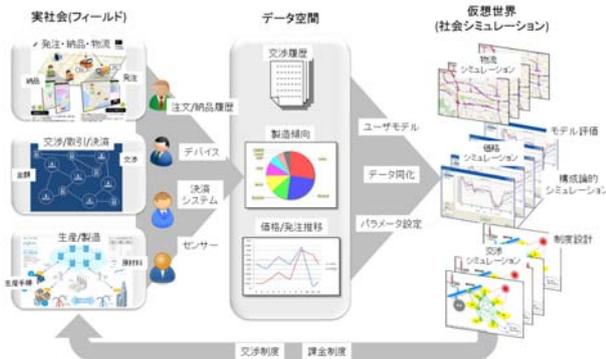


図 7 交渉制度の評価シミュレーション
 Figure 7 Evaluation simulation of negotiation system

これまで、シミュレーションによる交渉制度の解析では、過度に理想化/単純化されたモデルに基づく数理的な最適化を行う研究、もしくは個別の事例に特化した交渉技術の開発を行う研究の両極端なアプローチが多かった。しかし、近年の大規模データ活用により、環境や状況に応じて複雑に変化する実ケースに有効な交渉制度を目指したシミュレーションモデル構築とその解析に関する研究の実現性が高まったが、まだ実用化には不十分である。

現実的な制度評価シミュレーション解析のための解決方針として、構成論的シミュレーションによる調整制度の評価を想定している。実データとの適合を評価されたモデルを基に、交渉の場面に説いて発生頻度が低いかもしれないが制度の安定性や効率に甚大な影響をもたらす状況をシミュレーションにより構成する。構成された状況を解析し、頑強で信頼性の高い制度を事前に評価し設計する(図 8).

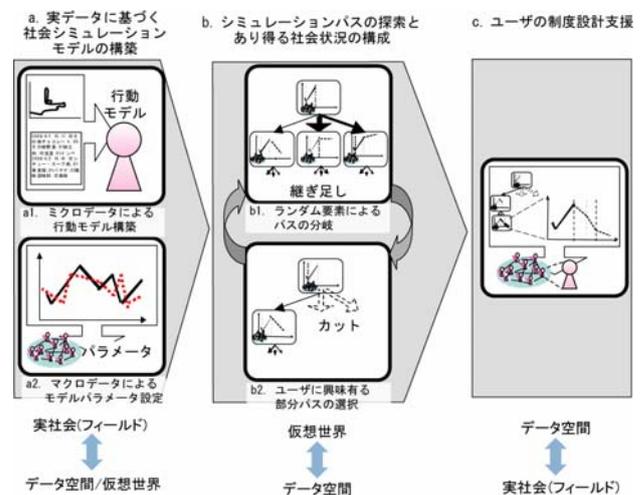


図 8 構成論的シミュレーションによる制度評価
 Figure 8. Institutional evaluation by constructive simulation

交渉ルールの設計を反映したシミュレーションモデル構築のために、交渉エージェントモデルの基本設計とシミュレーション解析手法の検討を行う。製造ユースケースの簡易的なシミュレーションモデルを用いて、構成論的シミュレーションによる調整制度の評価・設計手法を開発する。具体的には、100 社以上の交渉エージェントが参加する市場において、金融市場での不正取引を参考にした事前定義されている悪意行為や不正行為を行うエージェントの存在が、市場全体に異常状態を引き起こす可能性などの調整制度にどのような影響を与えるか、様々なケースをシミュレーションにより検証構成する。また、不正行為の悪影響を防ぐための新たな規制や制度を導入することによる、マーケットプレイス全体での効率性や安定性への影響も評価する手法を開発する。

5.2 マーケットプレイスの安全性

安心して市場に参加でき、安全に交渉動作を行うために、詐欺や談合・循環取引等の悪意をもった交渉エージェント

のリアルタイム検出や、疑わしいエージェントの事後的な詳細分析のアルゴリズムを開発する。悪意の定義は、調整制度の研究成果によるものとし、開発したアルゴリズムの評価・チューニング・改良は、エージェントシミュレーションによる分析を用いて行う。悪意ある取引によるマーケットプレース全体への影響評価と、見逃しによる安全性の毀損と誤検出による効率性の毀損の両方を考慮した、悪意検出アルゴリズムの評価手法の開発を行う。

金融市場での自動取引については、取引や注文履歴データから相場操縦や循環取引等の不正取引を発見する研究が行われており、研究や実応用でも一定の成果を挙げている。しかし、バリューチェーンでの自動交渉における悪意ある行為の検出については、世界的にもまだ研究事例はほとんどない。

自動交渉における悪意ある行為について、まだ実務でのログデータがほとんど存在していないので、既の実績のある金融市場での不正取引の事例を参考に、まず起こりうる悪意行為の例を検討する。その際に、「特定の交渉動作」として具体的に定義できるものは、ルールベースでの検出技術を開発する。「特定の交渉動作」としては具体的に定義されていないものは、シミュレーション中でマーケットプレースの挙動に特異性が見られた場合のデータを分析し、結果的に悪意行為となった取引行動を含むケースの特徴を教師あり学習により抽出する。それ以外に、多様なパラメータでシミュレーションを網羅的に行い、教師なし学習により「異常な交渉動作」をするエージェントのパターンを検出する手法を開発する。また、マルチエージェント・シミュレーションに、大勢の通常エージェントのなかに悪意行為を行うエージェントを少数参加させ、その交渉動作ログから上記の検出アルゴリズムで検出するという評価を多数回行うことで、悪意行為検出アルゴリズムを評価する手法も開発する(図9)。

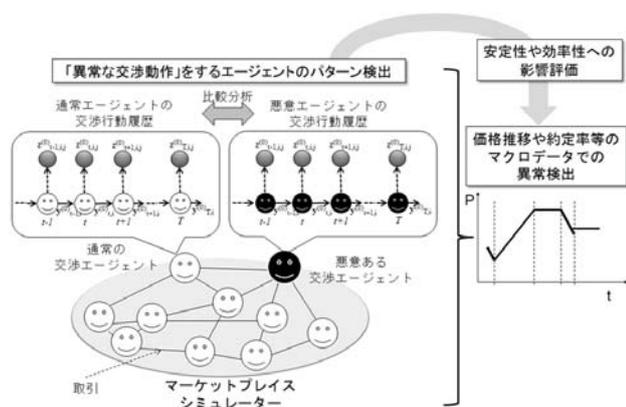


図9 悪意行為の検出とマーケットプレースへの影響評価
 Figure 9 Detection of Inappropriate Behavior and Evaluation of Impact on Market Place

金融市場での不正取引を参考にした悪意行為ルールの

検討を行う。交渉ルールの設計を反映した、「特定の交渉動作」として具体的に定義できる悪意行為の検出アルゴリズムの開発を行う。制度評価シミュレーターでの悪意エージェントの設計および開発を行う。上述の100社以上が参加する市場シミュレーションにおいて、悪意行為を行うエージェントを少数参加させたシミュレーターの交渉動作ログの分析と悪意行為検出アルゴリズムの性能評価を行う。また、未知の悪意行為や異常事態の事後分析の可能性を、その方式とカバー範囲等の観点からまとめる。特定の悪意行為のマーケットプレース全体への安定性・効率性への影響評価を行う。

6. まとめ

本稿では、データ解析とシミュレーションの統合による経済市場制度設計に関する研究成果を紹介した。エージェントシミュレーションによる経済制度設計は、これからも応用の場面は広がり、実務での適用に関する方法論の確立が学界だけでなく実務の現場からも望まれている。

謝辞 本研究の一部は NEDO 公募事業「AI 間連携によるバリューチェーンの効率化・柔軟化」の助成を受けたものです。また本論文の結果の一部は、文部科学省 ポスト京萌芽課題「多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発」の助成を受け、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです。

参考文献

- [1] 水田 孝信, 早川 聡, 和泉 潔, 吉村 忍, “人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析,” JPX ワーキングペーパー, vol.2 <http://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/>, 2013.
- [2] <http://x10-lang.org/>
- [3] Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, Shock transfer by arbitrage trading and the role of circuit breakers, The 21st International Conference on Computing in Economics and Finance 2015 (CEF2015), 2015.
- [4] Kiyoshi Izumi, Whole Tokyo Stock Exchange Market Simulation Project: Design of Financial Market Regulations using Agent-based Simulation, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, 2014.
- [5] Murase, Y., Uchitane, T., Ito, N. 2014. A tool for parameter-space explorations. Proceedings of 27th Workshop on Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics, <https://www.csp.uga.edu/Workshop/2014/>, 2014.
- [6] Ryo Hamawaki; Kiyoshi Izumi; Hiroki Sakaji; Takashi Shimada; Hiroyasu Matsushima, Chain Bankruptcy Size in Inter-bank Network: the Effects of Asset Price Volatility and the Network Structure, Journal of Computational Social Science, Springer (to be appeared).
- [7] 日本電気株式会社 他: 「AI 間連携基盤技術」の NEDO 事業に採択～製造・物流現場での AI による交渉で業務効率を向上～, https://jpn.nec.com/press/201812/20181205_01.html (2018 年 12 月 5 日).