

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510167

研究課題名(和文)大規模人工市場シミュレーションによる金融市場のシステムリスク分析

研究課題名(英文)The analysis of the systemic risk in the financial markets with large-scale artificial market simulation

研究代表者

松井 啓之(MATSUI, HIROYUKI)

京都大学・経営学研究科・教授

研究者番号：90272682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、金融市場におけるシステムリスクに対して、人工市場システムを活用して、その特性を明らかにすることを目指し、1)現実の市場システムおよび金融制度を実装した多銘柄に対応したU-Mart Ver.4システムを開発し、2)金融市場におけるシステムリスクの構造について分析を行い、人工市場において実装を行ない実験プラットフォームを整備した。3)理論的な最適発注行動について人工市場によるシミュレーション分析を実施し、その特性を明らかにした、等の成果を挙げた。

しかしながら、当初予定していた大規模なシミュレーション実験については十分な成果をだすことが出来ず、今後の課題となった。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to clarify the characteristics of the systemic risk in the financial markets through the use of an artificial market system. Their results are as follows. (1) We have developed the U-Mart system Ver.4 that implements the financial system and market system of reality. (2) We have analyzed the structure of systemic risk in the financial markets, then have developed an experimental platform of artificial market. (3) By performing a simulation analysis using artificial market, and were characterized as theoretically optimal order

However, it was not possible to give a satisfactory results for the large-scale simulation experiments that had been planned. The large-scale simulation experiments are an issue in the future.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：U-Mart 仮想市場 マルチエージェント シミュレーション 金融市場 システムリスク

1. 研究開始当初の背景

サブプライムローン問題に端を発し、米国の証券会社リーマンブラザーズの破綻から「リーマンショック」とも呼ばれる2008年後半以降の全世界的金融危機はその進展の速度、規模において1987年の世界的な証券価格の暴落、いわゆる「ブラックマンデー」をも凌駕するものであった。さらに2010年に発生した「ギリシャ財政危機」は世界の金融市場に大きなインパクトを与え、その影響は現在も続いている。その背景には各国の金融市場が世界規模で利用されるグローバル化、高速かつ自動的な取引を可能にする電子化、そして、金融工学的手法によりリスクとリターンを分解して金融商品構成する商品高度化が挙げられよう。

しかしながら、このような高い自由度の中で個々の取引者が自身の要求のために取引行動を行う金融市場が持つ大規模な価格暴落などのシステム全体としてのリスク(システムミックリスク)については、市場制度と取引戦略から構成されるシステムが持つ複雑性から、そのメカニズムや生起シナリオなどの解明・理解は十分にはなされていない。先に見たように世界規模の金融危機が実際に生じ、さらにそれが深刻化している現状で、このようなシステムミックリスクの解明は喫緊の課題である。

市場についてのエージェントを用いたシミュレーションは、米国 Santa Fe 研究所の Arther らの研究(Physica D,75, 264-274, 1994)を嚆矢として、東京外国為替市場でのバブル発生などを再現した和泉らの研究(和泉,『人工市場』, 森北出版 2003)など、初期段階において比較的単純な市場モデルを用いて金融市場が持つ特徴的な価格変動などの説明に成功してきた。

これらの先行研究を背景としつつ、申請者らは、情報系の研究者と経済学系の研究者の学際研究により金融市場の制度面での分析などを視野に入れ、より実市場の制度などを詳細にモデル化した人工市場システム U-Mart の開発とそれを用いた研究を1999年から進めてきた(塩沢ほか,『人工市場で学ぶマーケットメカニズム U-Mart 経済学編』, 共立出版,2006, 喜多ほか,『人工市場で学ぶマーケットメカニズム U-Mart 工学編』, 共立出版,2009)。

実際に金融工学においては、実マーケットデータに基づく様々な分析が実施されているが、これらのデータが、市場の取引制度やシステム実装要件の影響をどの程度を受けているかについては、十分に検討されていない。U-Mart では、このような制度やシステム上の実装要件についても配慮しており、それらの影響を踏まえた上で、証券市場における価格形成や取引戦略という視点から、現実の市場制度を忠実にモデル化したもので、本格的な市場制度の分析評価を可能にしている。

2. 研究の目的

本課題は、金融市場のこのようなシステムミックリスクに対して、仮想の市場を計算機上で構成し、取引戦略を持つエージェントを用いたエージェントベースドシミュレーション(ABS)と人がプレイするゲーミングシミュレーション(GS)を併用しながら、構成的・ボトムアップに分析を行う。

特に、行動経済学や実験経済の知見から、実際の取引において、人は必ずしも合理的な行動をとらないことが示されており、ABSを補完する上で、GSによるヒューマン実験は重要な役割を担う。

具体的には、金融市場のシステムミックリスクの要因・シナリオとして、複数の証券への分散投資ポートフォリオ運用と、利益追求とリスク回避の階層的な意思決定構造を持つ投資戦略により特定銘柄でのインパクトが市場全体に波及してしまう構造と、特定銘柄でのインパクトが、取引者の多くの一方向的な売買行動を誘発し、これを契機に市場における取引機会と価格発見機能が失われることによる市場の不安定化、との結合を想定している。このような制度や取引戦略の複雑さを要因としてリスクを分析することは理論研究では困難であり、シミュレーションによる構成的な研究手法を取るしかない。

このため、本課題では、以下の研究を展開する。

a)ストップ安、ストップ高、更新値幅制限、サーキットブレーカーなど現実の市場で導入されている市場安定化の枠組みを考慮した複数の銘柄を扱う人工市場システムを構築する。

b)複数の証券によるポートフォリオ運用を行い、利益追求のための売買機会の利用とリスクに対する利益確定や損切りなど回避戦略を持つ多様な取引戦略を遺伝的プログラミングなどの進化的手法を用いて構成する

c)このような人工市場システムと取引戦略を用いて、市場制度、取引エージェントの構成内訳、市場への外生的インパクトの大きさなどのパラメータ空間内での市場の動きを大規模並列シミュレーションにより分析する。

d)さらに、ABSと並行してGSによる多銘柄市場の取引実験を行い、人間の行動を観察することで実際に人間が取引を行う際に生起する問題を洗い出しABSの分析を補完する

3. 研究の方法

本課題は、金融市場がシステムとして持つ大規模な価格暴落などのリスク(システムミックリスク)について、実際の証券市場の取引制度やそこでの取引者の取引戦略などを考慮した人工市場システムを構築し、大規模なシミュレーションにより、ボトムアップに分析するものである。

具体的には、a)人工市場システムとして証

券市場の制度を詳細にモデル化した U-Mart を多銘柄市場用に拡張し、b)多銘柄取引環境での個々の取引者のポートフォリオ運用とリスク管理を考慮した取引戦略を、遺伝的プログラミングなど進化的手法を用いて構成するとともに、c)市場の挙動についての膨大なパラメータ探索を伴う分析を大規模 PC クラスタ環境で実施するとともに、d)ゲーミングを用いて実際に人間がプレイした状況とも比較・考察し、金融市場のシステミックリスクのメカニズムを明らかにしようとするものである。

4. 研究成果

(1)東京証券市場の取引システムの開発者へのヒアリング調査に基づき、現実の市場システムおよび金融制度を実装し多銘柄に対応した人工市場システム U-Mart Ver.4 を開発した。

U-Mart システムは、Ver.2 および Ver.3 において、既存の現物市場に対して仮想の先物市場を構成することにより市場の外生的要因の複雑さを考慮しつつ内生的な価格形成を可能にしたこと、そして ABS と GS の混在が可能なシステム構成とし、通常のパーソナルコンピュータを用いて 100 人規模でのゲーミングによる取引実験に耐える実装を行っていること、先物市場の注文形態や決済などの取引制度を比較的忠実にモデル化したことなど、人工市場システムとして先行研究とは一線を画す類を見ないシステムとして、人工市場分野におけるさまざまな研究のプラットフォームとして活用されてきた。

本研究課題では、人工市場が現実市場における制度分析を可能とするための条件として、忠実性(市場制度を正確に再現すること。現実の市場について検証可能な制度を組込めること。全パラメータを変化でき、影響分析が可能であること。現実の市場の出来事を正確に再現すること)、透過性(ヒューマンエージェント、マシンエージェント双方に対して過不足なく情報を与えることで、加速実験で得られた結果をヒューマンエージェントによる実験で検証可能となる。)、再現性(同一条件で実験した場合に、同一の結果が得られることを保証。これにより、誰もが結果を再現し検証する手段が与えられる。)、追跡性(エージェントや市場の状態がすべてデータとして保存できること。これにより、様々な現象を追跡し、原因を探ることが可能となる。)を挙げ、それらを高い水準で満たした上で、現実の市場の様々な取引を再現できる仮想市場システムとして U-Mart Ver.4 として再設計・実装を行った。

特に、市場制度をモジュール化することで、様々な市場制度を組合せて実行することが可能となっている。現状においては、詳細な情報を得られた東京証券市場の取引制度を実装している。さらにスーパーコンピュータを用いた大規模な加速シミュレーション実

験への対応も行った。

(2)金融市場におけるシステミックリスクの構造について、ネットワーク分析等の知見を踏まえ分析を行ない、人工市場において実装を行った。

システミックリスクに関する ABS では、単一市場において連鎖倒産が起こることをモデル化した研究(Thurner, S., Systemic financial risk: agent based models to understand the leverage cycle on national scales and its consequences, OCDE, 2011. (Multi-disciplinary Issues International Futures Programme. IFP/WKP/FGS(2011)1))をベースにその解析と再実装を行った。本モデルでは、単一市場において、個々のトレーダーエージェントが過度のレベレッジ(投機的な投資のための追加資本)が脆弱性の主要な源であり、クラッシュする際の触媒の作用として働くことを明らかにしている。つまり、トレーダーの資金源としての金融機関がリターンの大きいトレーダー(ハイリスク・ハイリターンの投資行動を行う)へレベレッジの効いた追加資金を継続的に提供することによって、トレーダーが取引に失敗した時に破綻する可能性が高まること、そのような市場においては、個々のトレーダーが利益獲得のため、結果的にハイリスク・ハイリターンの取引行動を志向するため、多くのトレーダーが連鎖的に破綻することを ABS によって明らかにしている。

そこで、このような単一市場におけるトレーダーの連鎖倒産のモデルに基づき、トレーダーが複数市場へ取引している多市場・多銘柄市場エージェントモデルへの拡張を図ることで、特定の市場のクラッシュの影響が複数の市場へ連鎖的に波及する大規模なシステミックリスクが発生するモデルの構築を行った。これは、大口トレーダーが複数市場で取引を行っているという仮定に基づき、特定市場での損出を他の市場や他の銘柄から補填することで、特定市場の影響が他の市場へも波及することを組み込んだシミュレーションモデルである。

また、トレーダーへ資金提供している金融機関に関しては、システミックリスクに関する ABS 研究では、ネットワーク理論に基づき、金融機関をエージェントとし、金融取引関係のネットワーク構造に着目したシミュレーションが主流である(Stefano Battiston 他、DebtRank: Too Central to Fail? Financial Networks, the FED and Systemic Risk, Scientific Reports 2, Article number: 541 doi:10.1038/srep00541、座間味良太、Artisoc を用いたシステミックリスクに関するシミュレーション研究、第 13 回 MAS コンペティション他)。

金融機関はさまざまな相互取引を通じて繋がりがあい、金融取引のネットワークをつくっている。そのネットワーク構造に着目する

と、金融危機の初期では、金融機関のネットワークは比較的自律した構造を示しているが、金融危機がピークに達する頃には、つながりの密度が著しく高まり、多くの金融機関が金融ネットワークにおける相互依存の密度の高い中心に移動している。そして、多くの金融機関の間でリンクの密度が高まり、相互依存が高まるにつれて、そこに内在するシステムリスクは増大し、金融システムは不安定性を増していく。その結果、ちょっとしたショックでもリンクをたどってシステム全体に波及し、金融危機は簡単に起きることになる。

これは、パラバシ = アルバートモデル (Barabási, A.-L., and Albert, R., "Emergence of scaling in random networks", *Science* 286, pp. 509-512) が提案したスケールフリーネットワークの数学モデルと類似の構造からも明らかとなる。スケールフリーネットワークは、高い頑健性を有しており、ショックの伝達がネットワーク全体に広がりやすいという特徴と特定の重要なハブをピンポイントで狙った攻撃に対しては脆弱であるという弱点も併せ持っている。金融取引のネットワークにおいては、密度の高まった集中したハブへの打撃が、金融ネットワーク全体に大きな影響を与える構造を内在していると考えられる。

複数の市場に参加する取引トレーダーと金融機関ネットワークにおける相互取引を組み合わせることによって、より現実に近い問題状況を想定したモデルへの拡張を図ることが出来る。

今後は、EU の支援の元、J. D. Farmer, D. Delli Gatti, M. Gallegati といった複雑性科学や経済の研究者が中心となっている CRISIS (Complexity research initiative for systemic instabilities) で行われている、家計や政府も含めた経済全般のエージェント・シミュレーション等との比較・検討を踏まえ、GS による検証を踏まえ、本モデルの改良と大規模な加速シミュレーション実験を行っていく必要がある。

(3) 理論的な最適発注行動について、人工市場によるシミュレーション分析を実施することで、その特性を明らかにした。

具体的には、Bertsimas and Lo ("Optimal control of execution costs," *Journal of Financial Markets*, 1(1), pp.1-50) モデルと Obizhaeva and Wang ("Optimal trading strategy and supply/demand dynamics," *Journal of Financial Markets*, 16(1), pp.1-32) モデルという、目的が同じにも拘わらず、市場に関する仮定が異なるために導出される戦略が異なる最適投資戦略問題を取り上げた。市場に関する仮定はより現実的な方が望ましいが、観察不可能な要素に関しては何らかの形で外生的に与えるしかない。しかし、そうした仮定に理論的・実証的な裏

付けがないならば、導出される戦略にも疑問符が付く。その1つが本研究で取り上げた、復元性という概念である。

金融市場における資産価格の変動が投資家行動によってもたらされると考えるならば、復元性も何らかの投資家行動によって生じるはずである。その目論見の下で、そうした機能を果たし得る投資家をモデル化し、シミュレーションによって改めて2つの最適投資戦略を比較することを試みた。そこで大きな役割を果たしたのが人工市場シミュレーションというシミュレーション環境である。金融市場のような複雑に要因が絡み合う一方で、その一つ一つを紐解けば、投資家の投資行動に帰着する、というマイクロ・マクロループを再現するためのツールとして、人工市場は非常に有用である。

本研究ではまず、復元性をモデル化した投資家を人工市場上でシミュレーションし、XLM という指標を用いてその復元性としての妥当性を検証した。そこで、Full Intelligence と Low Intelligence という2つのモデルが復元性の原理となり得ることを確認し、更にトレーダーの数が復元性の強さを表現していることも発見した。最後に、2つの最適投資戦略を2種類の復元性モデルの下でシミュレーションし、最適投資戦略と復元性の関係性について考察した。

考察として得られたのは、まず、Obizhaeva and Wang において数値例として与えられていた復元性は本研究のモデルに比べてより弱いもの想定しており、その想定が正しい限りにおいて、Obizhaeva and Wang モデルの最適投資戦略が妥当性を持つということである。また逆に、市場における復元性を正しく評価しなかった場合、例えば本研究で見たように過小評価していた場合、分割回数を増やすほどに Bertsimas and Lo モデルと比べて総執行コストが大きくなる危険性も孕んでいる。更に、2つの復元性モデルは XLM という評価で見た場合には同質のものと考えられることができるが、最適投資戦略という文脈においては、2つのモデルには差異が見られた。このことから、最適背投資戦略において想定されている復元性には、Low Intelligence モデル以上の投資家の知性が想定されている可能性があることがわかった。

さらに、理論的な最適発注行動に関しては、Bertsimas and Lo モデルでは、取引期間中一定の取引を行う (全資産 S 円、取引回数 n 回のとき、全ての取引で S/n 円ずつ注文する) Obizhaeva and Wang モデルにおいては、最初と最後に全資産の $1/4$ を注文し後は一定 (全資産 S 円、取引回数 n 回のとき、第1回に $S/4$ 円、第 n 回に $S/4$ 円、残り $2 \sim n-1$ 回の取引では、 $S/(2(n-2))$ 円ずつ注文する) のが最適であることが示されている。しかしながら、近畿大学におけるヒューマン実験によれば、実際に注文の金額は、最初と最後が少なく、真ん中ほど多いことが分かった。つまり、人

間は、理論的な最適発注とは逆の発注行動をとっていることが明らかとなった。

以上が、本課題で得られた主な知見である。目的に挙げた(a)、(b)、(d)については概ね達成することが出来たが、システム開発とシステミックリスクの構造分析、実装に手間取ったため、当初予定していた(c)のシステミックリスクに関する大規模なシミュレーション実験については十分な成果を出すことが出来なかった。しかしながら、必要とされる実験プラットフォームの開発を終えていることから、今後はスーパーコンピュータを中心とした加速実験お続けることで、当初の目的を達してしていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

秋元圭人、森直樹、小野功、中島義裕、喜多一、松本裕之亮、複数銘柄および複数市場に対応したU-Martの開発、計測自動制御学会論文集、Vol.47、No.11、pp.541-548

秋元圭人、森直樹、松本裕之亮、U-Martを用いた実市場における板ダイナミクスの解析、日本シミュレーション&ゲーミング学会誌、22巻1号、pp.137-145

〔学会発表〕(計5件)

松井啓之、人工市場システムU-Martの開発とその応用、日本シミュレーション&ゲーミング学会2011年度秋季全国大会、2011年10月23日、北海道大学

三浦秀之、西村智貴、森直樹、松本裕之亮、SVMノードを導入した遺伝的プログラミングによる投資、第57回システム制御情報学会研究発表講演会、2013年5月15日~17日、兵庫県民会館

三浦秀之、森直樹、松本裕之亮、Web情報を利用した(株)取引エージェントの進化、平成25年度計測自動制御学会関西支部研究発表会、2014年1月17日、学校法人常翔学園大阪センター

大山遼、松井啓之、人工市場シミュレーションによる最適投資戦略における復元性の影響分析、第5回計測自動制御学会社会システム部会、2014年3月5日~6日、大濱信泉記念館

谷口和久、経済進化と裁定行動の観察 - U-Mart人工市場実験から -、第18回進化経済学会、2014年3月15日~16日、金沢大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.u-mart.org/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松井啓之(MATSUYU, Hiroyuki)

京都大学・大学院経営管理研究部・教授

研究者番号：90272682

(2)研究分担者

小野功(ONO, Isao)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：00304551

(3)研究分担者

森直樹(MORI, Naoki)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90295717

(4)連携研究者

喜多一(KITA, Hajime)

京都大学・学術メディアセンター・教授

研究者番号：20195241

(5)連携研究者

中島義裕(NAKAJIMA, Yoshihiro)

大阪市立大学・大学院経済学研究科・教授

研究者番号：40336798

(6)連携研究者

谷口和久(TANIGUCHI, Kazuhisa)

近畿大学・経済学部・教授

研究者番号：80268242