

人工市場：金融市場のコンピュータ・シミュレーション

水田 孝信 | スパークス・アセット・マネジメント株式会社 上席研究員



水田 孝信

スパークス・アセット・マネジメント株式会社 上席研究員
2002年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、2004年スパークス・アセット・マネジメント株式会社入社。2014年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。2020年度人工知能学会全国大会優秀賞受賞など受賞多数。

要約

人工市場とは、コンピュータで金融市場をシミュレーションするものだ。実際にレバレッジ規制や空売り規制などの規制設計に活用されている。例えば2014年に東京証券取引所で行われた10銭刻みで注文できるようになる呼値変更でも重要な役割を果たした。人工市場に注文生成AIを導入し、アルゴリズム取引の事前試験を行う研究も現れた。一方、人工市場で訓練されたAIトレーダーが真っ先に学習した投資戦略が相場操縦であったという研究もあり、懸念も浮上している。市場参加者間・市場間の相互作用など「複雑系」が重要な役割を果たした2008年の金融危機時には既存の経済学はそれをうまく取り扱うことができず批判をあげ、複雑系を扱える人工市場への期待が高まった。しかし、人工市場の研究者はまだまだ少ないこともあり発展途上である。今後人工市場の研究者が増え発展し、社会に大きな恩恵をもたらすことに期待したい。

1. 金融市場はうまく設計されたときのみ機能する

ゲーム理論・オークション理論の大家であるMcMillan(2002)は古代ギリシャの市場から、現代の電子商取引まで有史以来存在したさまざまな市場の成功・失敗を丁寧に分析し、

- ・市場は、古代から現在まで唯一自然な経済として存在する
- ・市場は、自然発生し、人為的に消し去ることは不可能である
- ・市場は、うまく設計されたときのみ機能する
- ・市場は、物理学者や生物学者が研究してきたシステムと同じくらい複雑で高度である
- ・市場は、細部の設計変更が全体に思わぬ大きな悪影響を与えることがある

と述べた。つまり、人類が社会的な活動をするとき必ず市場は発生し、それを為政者が消し去ることもできないので、市場を取り入れない政治体制は必ず失敗する。一方で、市場はいつでも人類を発展させるわけではなく、うまく設計をしないと害にもなりうる。そして、市場は非常に複雑なシステムであるため、そのうまい設計は簡単ではない。細部の設計変更が全体に思わぬ悪影響をおよぼすこともあり、細部の設計こそ重要であるとも述べている。市場においても「神は細部に宿る」のである。

金融市場は、事業を始めるのに必要な資金を集めその後利益を分配するなど、時

間を超えた交換という人類のみが獲得した行為を行う場であり、人類の発展に不可欠な市場である。金融市場は市場の中でも最も高度なものであり、極めて複雑なシステムである。そのような複雑なシステムの動きを数式だけを用いてきれいに表すなど、不可能であることは明らかである。金融市場をうまく設計することは非常に難しい作業であるが、この難しい作業次第で今後の人類の発展が大きく左右されると言っても大げさではないだろう。

金融市場に対してしばしば、「規制は少ないほどよく、自由な取引こそもっとも機能する」という意見と、「お金目当てで道徳のない人たちの集まりであり、社会を破壊するもの」という全く逆の意見が対立することがあるが、いずれも誤りである。金融市場は人類発展に不可欠で、消し去ることができない道具であり、うまく設計された時のみ人類発展に寄与するのである。

金融市場のような複雑なシステムであり、細部の変化が全体に予想しがたい大きな変化をもたらすシステムを複雑系とよぶ¹。同じく複雑系である気象システムでは、バタフライ効果という言葉が示すように、蝶が羽ばたくという極めて小さな動きが全体にどのような影響を与えるかを正確に予想することは難しい。その小さな羽ばたきが遠く離れた場所で台風を生み出すことさえ完全には否定できないのである。

1：複雑系に関しては Mitchell (2009) が詳しい。

2. 既存の経済学：複雑系をうまく取り扱えなかった

それにも関わらず、既存の経済学やファイナンス理論は金融市場の動きをきれいな数式だけで表現しようとした。複雑な金融システムを理解するために強い仮定をおいてシンプルなモデル化を行うことで、限られた範囲内の、複雑系が重要とはならない平時においては、高い説明力や予測精度を出すことに成功した。しかし既存の体系では、はじめに置いた強い仮定があたかも事実であるかのように錯覚し、きれいな数式で金融市場が常に説明できると誤解してしまった。複雑系である金融市場に対して、複雑系の動きは完全には理解できない、あるいは仮定に基づく近似アプローチには限界があるという謙虚さを持たず、自分たちは金融市場をすべて理解できるという傲慢な姿勢がこの失敗を生んだのであろう。

その結果、既存の経済学やファイナンス理論は、2008年に発生した世界的な金融危機の発生を事前に予想できなかったことはもちろん、金融危機が起きた後も、複雑系が重要な役割を果たした金融危機という現象をうまく表現することができなかった。こうした現実とのギャップについて、「経済学ではありえない現象です」と、あたかも既存の経済学が正しくて現実が間違っているとでも言いたいかのような発言すら聞かれることがある。そのような経済学は現実とは関係ない架空の世界の話に止まってしまう。

そもそも金融市場は複雑系であり、きれいな数式だけで表現できるシステムではないのだ。既存の経済学は、きれいな数式で理路整然と「正しく間違った」と言えるだろう。そして、後述する人工市場(エージェント・ベースド・モデルによる金融市場のコンピュータ・シミュレーション)は、複雑系を複雑なまま取り扱い、きれいではないしすべてを理解できるわけではないが、複雑系の本質を理解できる可能性を持つものとして期待が高まった。既存の経済学と人工市場との比較を図表1にまとめた。

図表1

	既存の経済学	人工市場
複雑系	扱えない	扱える
モデル	きれいで複雑な数式	シンプルな行動モデル
仮定	合理的な投資家、最適化など非現実的	メカニズムの理解に重点を置くため行動を簡素化
精度	複雑系が重要でない範囲内では高い ただし複雑系が重要な危機時は何も説明できない	複雑系が重要な危機時でも本質を説明できる ただし定量的な精度は高くない
正しい使い方	強い仮定のもとで作られたモデルであることを理解し、その仮定が成立する範囲内のみで用いる 目的に応じてモデルを使い分ける	過度な現実の再現を目指さずメカニズムの理解に使用し、あり得る副作用、あり得るメカニズムを議論する 目的に応じてモデルを使い分ける
誤った使い方	全ての経済現象を説明できると誤解して使用 複雑系が重要となる危機時の説明に使用	定量的に高い精度があると誤解して予測に使用 過度な現実との対応付け

出所) 著者作成

このような既存の経済学への批判と人工市場への期待は、残念なことに経済学の内側からではなく、他の分野や実務家など外側からなされた。例えば、科学系の学術論文誌の最高峰である Nature にグローバル金融危機後に掲載された Farmer & Foley(2009) では、「人工市場により、さまざまなシナリオのもとで政府の政策がどのような影響を与えうるかを議論できるはずだ」と述べられている。また、当時の欧州中央銀行総裁の Trichet(2010) がスピーチで「人工市場は、既存の経済学が仮定している最適化を用いなくてもより複雑な相互作用を取り扱えるため、注目すべき手法である」とその可能性に言及した。金融危機を予言したと話題になった邦題『市場リスク - 暴落は必然か』を執筆した Bookstaber は、『経済理論の終焉』という邦題の書籍で「既存の経済学では金融危機に対応できないが人工市場であれば対応できる可能性がある」と持論を展開した。

このように、既存の経済学への批判と人工市場への期待は経済学の外では多くなされている。

3. 他分野ではすでに活躍しているエージェント・ベースド・モデル

人工市場は、金融市場をエージェント・ベースド・モデルで表現したものであるが、金融以外の分野ではすでに活躍している。エージェント・ベースド・モデルとは、比較的単純なルールで行動するエージェント(人間や自動車などをモデル化したもの)をコンピュータ上に作成し、複数のエージェント間の相互作用を通じて全体としては複雑な現象を出力するコンピュータ・シミュレーションである。個々のエージェントは単純なルールで動いていたとしても、全体としては複雑な現象を見せる、まさに複雑系システムを表現できる手法となっている。

例えば鳥の集団は、一匹一匹は隣の鳥にぶつからないように間隔をあけて飛んでいるだけだが、全体としては複雑できれいな模様に見えることもある。この現象も以前は個々の鳥が高度な行動をしていると考えられていたようだが、エージェント・ベースド・モデルを用いることにより、個々の鳥の単純な反応(マイクロプロ

セス)が集まれば、高度な集団行動(マクロ現象)を産み出しうることが解明された²。このような鳥の集団が全体として見せる変幻自在な複雑な模様も複雑系による産物であり、きれいな数式だけでは決して説明できない。

エージェント・ベースド・モデルは多くの分野で活躍している。例えば、岡山市(2018)は、岡山駅前に路面電車の乗り入れを検討した際に、エージェント・ベースド・モデルによる交通シミュレーションを行っている。国土交通省(2014)は、地下街の有事の際の避難計画の策定に、やはりエージェント・ベースド・モデルによる避難シミュレーションを行っている。新築のビルを建てたときに避難経路をシミュレーションで検討することは今や当然のこととして行われている³。NHKでは2015年に、南海トラフ地震が起きた場合34メートルもの巨大津波に襲われる恐れのある高知県黒潮町で避難計画を作る番組を作成しており、やはりエージェント・ベースド・モデルによる避難シミュレーションが活躍している⁴。34メートルもの巨大津波という想定に絶望感が漂っていた町民たちも、避難シミュレーションの結果をいくつか見るうちに、助かる方法もあると勇気づけられる様子が映し出されていた。また、倉橋(2020)は、新型コロナウイルスの感染拡大予防策をエージェント・ベースド・モデルで検討している。

2: 例えば、以下のサイトが参考になる。<https://mas.kke.co.jp/model/boid-model/>

3: 例えば、株式会社構造計画研究所では、避難シミュレーションをサービスとして提供している。https://iit.kke.co.jp/solutions/bousai_solution.html

4: この番組の内容は島川(2017)の第2章に記載されている。

4. 良いモデルは目的によって異なる

4.1 Schellingによる分離モデル

ノーベル経済学賞を受賞した Schelling(2006) はエージェント・ベースド・モデルを用いて、人種ごとに住む地域が自然と分離する理由を説明した。自身の家が他の人種の家に取り囲まれてしまうことを避けようとするだけで居住地域が自然と分離することを示し、大きな衝撃を与えた。

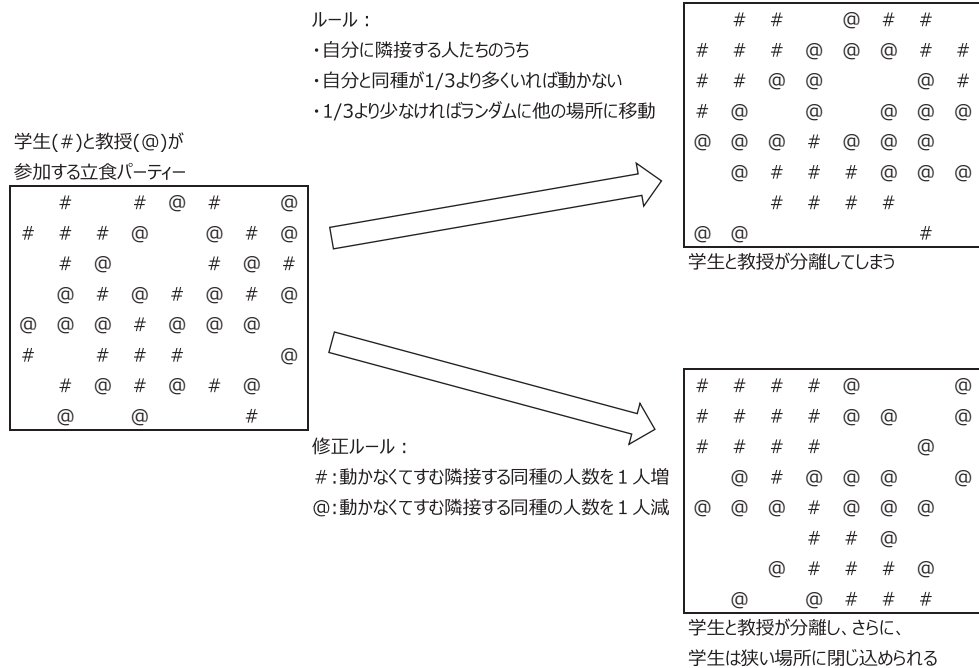
Schelling は教授と学生が参加する立食パーティーも同じ理由で教授と学生が分かれてしまうと述べており、これを例に具体的に説明する⁵。このモデルは非常にシンプルであり、コインを使って手作業でもできる(Schelling もぜひ手作業でやってほしいと述べている)。今、図表2のように、

- マス目上に教授(@)と学生(#)がいる
- 自分に隣接する人たちのうち自分と同種が1/3より多くいれば動かない
- 1/3より少なければランダムに他の場所に移動する

というルールで教授と学生が移動するだけで、学生と教授は分離されてしまうのである。学生は教授が嫌いではなく、しかし、自分の周りに教授が2/3以上となり、取り囲まれてしまった時のみ、居心地が悪く移動し、教授も学生が嫌いではないが、学生に取り囲まれた時のみ移動するだけで、両者は分離してしまう。結果だけ見ると、一見、教授と学生は仲が悪く見えるが、このシミュレーションのおかげで、仲が悪くなくてもこのようなことは起こりえるということが理解できる。

5: 「多角形のたとえ話」という下記のサイトで同様のシミュレーションを試すことができる。解説も秀逸である。<https://ncase.me/polygons-ja/>

図表2



出所) Schelling(2006)より著者作成

さらに、学生は教授より構成比率に敏感という効果をモデルに入れると驚く結果が出る。学生は上記条件よりも教授が1人少なくても移動し、教授は上記条件よりも学生が1人多くても移動しないという、僅かな修正を行う。すると、単に両者が分離するだけではなく、学生は狭い場所に閉じ込められ、教授は広々とした場所に陣取ってしまう。この結果だけを見ると教授が学生を迫害しているようにも見えてしまうのだ。もちろん学生のほうが教授より少し恥ずかしがり屋というだけであり、教授が学生を迫害するような意図は全くない。このように複雑系では、非常に小さな行動の違いが全体に大きな違いを生み出しうるのだが、エージェント・ベースド・モデルはそれを表現できる優れた手法なのである。

前節ではエージェント・ベースド・モデルが将来を精密に予測することに用いられている事例を紹介したが、ここで紹介したように現実には生じている複雑な現象の解釈や発生原因の解明にも利用されている。Schellingの立食パーティーのモデルでは、准教授も出てこなければ、テーブルもなく、居心地が悪ければどこにでも瞬間移動できるという現実離れしたモデルとなっている。しかし、分離してしまう原因を理解するという目的においては、必要な要素がモデルに組み込まれており、目的を達成している。むしろ、理解に必要なではない准教授やテーブル、移動速度などをモデルに組み込めば、分離メカニズムの理解とは関係のない要素が多くなってしまい、むしろ理解を妨げてしまうであろう。エージェント・ベースド・モデルは、目的に応じて、現実のどこを再現すべきか、どこまで複雑なモデルにすべきかが変わってくる。単純なモデルのほうが良いことも多いというのは、伝統的な経済学のモデルと同じである。

4.2 目的によって異なるモデルの最適な複雑さ

Gilbert(2008)は、エージェント・ベースド・モデルを目的に応じて、abstractモデル、middle-rangeモデル、facsimileモデルの3種に分けた。Gilbertは「abstractモデルの目的は社会でおきている現象の背後にある、ありえる基礎的なメカニズムを示すことである」とモデルの目的を定義している。abstractモデルが示すメカニズムを理解するためには、abstractモデルは可能な限りシンプルであるべきであり、不必要なモデルの複雑さはメカニズムの理解の妨げになると指摘した。これと対極にあるfacsimileモデルは、実際のデータに可能な限りフィットさせ、精密なモデルを作り上げ、今後起こる現象を高精度に定量的に予測しようとするものである。middle-rangeモデルはabstractモデルとfacsimileモデルの中間的なモデルである。つまり、メカニズムを理解することを目的とするabstractモデルと、今後起こる現象を高精度に定量的に予測することを目的とするfacsimileモデルでは、どのようなモデルが良いかが全く異なる。

実は、エージェント・ベースド・モデルのみならず、数式を用いてさまざまな現象を説明しようとする数理モデルや、実際の地形の何分の1かの模型を作ってそこでさまざまな実験を行う実物モデル、その他さまざまなモデル一般でも同様に、用途に応じた使い分けが意識されている。そもそもモデルとは何なのか、その目的は何か、そして、モデルはどう作られるべきかを研究しているWeisberg(2012)は、もっと単純な例として地図をあげている。言うまでもなく、地図は目的地までの道順を理解するためのものであり、そのために実際の地形をモデル化した図形であると言える。地図はその目的のために簡潔に書かれていて、道順が理解しやすい。一方、衛星写真は実際の地形を非常によく再現しているが、道順は理解しがたい。Weisberg(2012)の扉のページにおいて、1960年代の世界的なラテンアメリカ文学ブームをけん引した作家Borgesの短編小説『学問の厳密さについて』⁶の一篇が訓話的に示されている。

⁶: Borges(1954)に掲載されている。

「しばらくするとこの膨大な地図でもまだ不完全だと考えられ、地図学院は帝国と同じ大きさで、一点一点が正確に照応しあう帝国地図を作り上げた。」という寓話であり、精密にするために現実とまったく同じ大きさになってしまった役に立たない地図の話が引用されている。これはどのような分野においても、モデルを作る・使う上で、もっとも気を付けなければならない教訓を示している。

5. 人工市場：金融市場をシミュレーションするエージェント・ベースド・モデル

前出のように人工市場とは、エージェント・ベースド・モデルを用いてコンピュータ上に金融市場をシミュレーションするものだ。コンピュータ上で架空の投資家の行動をシンプルにモデル化し、エージェントと価格の相互作用により、複雑な価格変動を出力する。

人工市場においても、どれくらい複雑なモデルが良いかはその目的によって異なる。制度やルール、規制の設計を行うのであれば、設計意図は効率的に達成されているか、どのような副作用があり得るのか、それはどのようなメカニズムなのかを発見することが重要なので、abstractモデルが良い。不要な複雑さは邪魔にな

るだけであり、現実の再現を目指す facsimile モデルであってはならない。しばしば、制度設計を目的とした人工市場は、モデルが現実的ではないとか、現実を再現していないと批判されることがあるが、facsimile モデルのように現実的にしたり、現実の詳細を再現したりしてはならない。目的を超えて過度に作り込み過ぎてしまうと、適切な制度設計の探求において必要なメカニズムの理解、知識獲得ができない。

後ほど述べるように、最近、アルゴリズム取引を実験する場としての人工市場の研究が現れた。この場合は、facsimile モデルでなければならない。つまり、理由は分からないが、今試しているアルゴリズム取引の性能の良し悪しがある程度正確に出力されるものでなければならない。どういう人工市場が良いかは、目的によって全く異なるのである。

先述の McMillan は、細部の規制やルールが市場全体に大きな影響を及ぼすとして、市場においても「神は細部に宿る」と述べた。1920年代の世界恐慌は米国の個人投資家が借金をして元手の10倍の額の株式を買うという、いわゆるレバレッジ10倍で投資していたことが恐慌を大きくしたことが、最近の研究である Borowiecki et al.(2023) で示された。もし、3倍程度の規制が導入されていたら、世界恐慌はもっと緩やかなものであったかもしれないし、これが遠因となった全体主義も台頭せず、悲惨な戦争が回避できた可能性もあったかもしれない。これは大げさな話ではなく、金融市場の細部のルールが人類に甚大な影響を与える社会規模での複雑系の一例といえよう。そして、既存の経済学では複雑系を議論できない。人工市場だけが複雑系を効果的に議論・検証できる手法となっている。

タイタニック号の沈没時に救命ボートが足りなかったことを反省し、乗客分の救命ボートを義務付ける規制を作ったところ、五大湖の遊覧船イーストランド号が救命ボートの重みで沈没し多くの犠牲者が出たという逸話を忘れてはならない⁷。細部であっても考察や検証が不足した規制や制度が思わぬ悪影響をおよぼすことがある。制度設計に終わりはない。常に制度は改善され、副作用のメカニズムを理解し、よりよい制度設計を追求し続けなければならない。そのために人工市場を活用した分析は必要不可欠である。

7：2015年、当時の森信親金融庁長官が国際金融規制を強化しようとする欧米当局を批判する講演を行った際にもこのたとえ話が用いられた。永見野(2018)に詳しい。

6. 活躍し始めた人工市場

これまで人工市場を用いた研究により、

- ・金融市場の基本的な性質を巡る議論
- ・金融市場の規制やルール、制度の設計
- ・適切な財政・金融政策の在り方
- ・注文生成 AI によるアルゴリズム取引の試験

などが行われてきた。本節では、この順にそって具体的にどのような研究があったのか簡単に紹介していく。世界的な学術ジャーナルの査読を通過した研究が数多く存在しているが、査読のありなしに関わらずなるべく無料で、日本語で読めるものを引用する。

6.1 金融市場の基本的な性質を巡る議論

人工市場を用いた研究は1990年代から始まった⁸。金融市場では、リターンの

8：1990年代の人工市場研究については、和泉(2003)が詳しい。

分布がランダムウォークの場合に形成される正規分布とは異なっていたり、一度ボラティリティが大きくなると大きい状態がしばらく続いたりといった特徴があることが知られている。Takayasu et al.(1992) や Lux & Marchesi(1999) は、このような特徴が生じるメカニズムを分析した。これらを再現するにはエージェントが投資対象の本源的な価値と関係ない、過去の価格変動や売買数量から行動を決める必要があり、既存の経済学で仮定される合理的な投資家だけでは再現されないことを示した。

また Izumi & Okatsu(1996) や Arthur et al.(1997) はバブルや金融危機のメカニズムの分析を行った。エージェントがよりよい取引行動を学習することによりバブルが起こることを示し、やはり合理的な投資家だけではバブルが再現されないことを示唆した。

人工市場の妥当性は実験市場によっても確認された。被験者を使った実験市場を行った結果と人工市場の結果がよくあうことが報告されている⁹。

9：優れたレビューとして西野・花木(2021)がある。

6.2 金融市場の規制やルール、制度の設計

金融市場の設計に人工市場を用いることは、学术界よりも、差し迫った課題を議論しなければならない実務家に浸透している。例えば、規制当局、中央銀行および取引所などである。日本では、東京証券取引所の親会社である日本取引所グループが、JPX ワーキングペーパー¹⁰を公開しているが、ここには人工市場を活用した研究が多く含まれていて、2023 年末現在 41 本中 12 本が人工市場を用いた研究である。中でも東京証券取引所と東京大学の共同研究である水田他(2013)では、注文価格の最小単位である呼値の縮小を検討し、大きすぎる呼値は価格変動を大きくしてしまうことを示している。実際に 2014 年に東京証券取引所が呼値の縮小を行った際には、この研究も参考にされたと考えられる。

10：<https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>

日本銀行でも人工市場研究の黎明期から取り組みがなされてきた。清水・村永(1999)は、サーキットブレイカーが有効である条件を調べた。サーキットブレイカーを終了させるのは、投資家の予想価格の下落速度が十分に小さくなってからでなければならないことを示した。副島(2001)は、1998年に日本国債先物市場で導入された注文付け合わせの即時執行が価格変動を大きくしたことを示した。

日本の金融庁では、大井(2012)が、株式を借りずに空売りする、いわゆるネイキッドショートセルを禁止した場合、下落したファンダメンタル価格よりもさらに株価が下落してしまうオーバーシュートを防ぐことができる一方、平時の市場価格がファンダメンタル価格より少し高くなってしまったことを示した。

その他の代表的な研究も含め、図表 3 にまとめた¹¹。

11：人工市場による金融市場の設計の優れたレビューとして、高安他(2020)の第5章、水田・八木(2021)、水田(2021)がある。

図表3

調査対象	文献	人工市場研究が示唆したこと
サーキットブレイカー	清水・村永(1999)	サーキットブレイカーを終了させるのは、投資家の予想価格の下落速度が十分に小さくなってからでなければならない
注文付け合わせの即時執行	副島(2001)	価格変動を大きくする恐れ
ネイキッドショートセル	大井(2012)	オーバーシュートを防ぐことができる一方、平時は割高に
呼値	水田他(2013)	短期のボラティリティより小さい呼値でなければボラティリティを引き上げる
空売り規制	水田(2014)	空売りが完全に禁止された場合だけでなく、価格規制だけでも、市場を非効率なものとし、価格を引き上げ、場合によってはバブルを誘発する
値幅制限	水田(2014)	下落の時間スケールはさまざまなので、複数の時間スケールのものを用意すべき
高速取引	草田他(2015)	高速取引の多くはマーケットメイク戦略であり、この戦略が存在する取引所のほうが取引が多い
取引所の高速化	水田他(2015)	取引所は平均的な注文の到着間隔よりも低遅延(高速)であるべき
ダークプール	水田他(2016)	市場を安定化させ、マーケットインパクトを低減させる効果をもつ しかし、普及しすぎると市場の価格発見機能が著しく低下
バッチオークション	水田・和泉(2016)	ザラバよりも取引は少なくなる
取引時間延長	三輪・植田(2016)	延長された時間帯の取引参加者が少ないと市場効率性が低下
レバレッジETF	八木・水田(2017)	リバランス取引がボラティリティよりも大きいマーケットインパクトを与えると市場を荒らす
アクティブ運用	水田・堀江(2017)	忍耐強いアクティブ運用は市場がさらに非効率になりそうなきのみ多く売出し市場を効率化
水平株式保有	水田(2018)	競合企業をいずれも持つファンドが増えると企業間競争を阻害する
分散投資規制	丸山他(2019)	時価の上昇で上限を越えないように売る必要が生じファンダメンタル価格への収束を妨げる場合がある
流動性の種類	益田他(2019)	取引量と板の厚さは関係のない指標であり、流動性の量を示す取引量、質を示す板の厚さなど、流動性にもいくつか種類がある
取引手数料のリベート制	星野他(2021)	中途半端なリベートはかえって執行コストを上昇させる
値幅制限とサーキットブレイカー	水田・八木(2023)	値幅制限は制限価格付近に指値注文がたまり、反発を防ぐことがある ただし、サーキットブレイカーには取引を焦らせる副作用が報告されているがこれはまだ未調査

出所) 著者作成

6.3 適切な財政・金融政策の在り方

財政・金融政策の重要性は言うまでもない。先に述べたように経済や金融市場は複雑系システムであり、既存の経済学ではこれらの政策の細かい違いが全体に与える影響を分析できない。それが唯一できる人工市場であるが、人工市場による事前の検証はほぼ行われておらず、思わぬ副作用に見舞われたり、目標とはまったく異

なる結果を招いたりを繰り返している。人工市場が最も使われなければならない分野であり、多くの研究者が参入することが期待される。

少しずつではあるが、経済全体をモデル化した人工市場も研究され始めている。例えば、高島(2013)は政府や企業、銀行などの各経済主体の財務諸表の動きを簿記の仕訳から実装した研究を行っている。

これらの研究の発展により、例えば、国政選挙で各政党が金融・財政政策のシミュレーション結果を出し合って論争したりする日も近いかもしれない。

6.4 注文生成AIによるアルゴリズム取引の試験

最近、数秒以下といった短時間に出される注文を人工市場内で再現し、高速取引やアルゴリズム取引の実験場として使おうという研究が出てきた。これはまさに注文生成AIとよべるもので、現実でありそうな次の注文を予想するというものだ。予想に基づく注文が次々と生成される中で、検証したい高速取引の戦略やアルゴリズム取引を試してみるという使い方が考えられる。

金融市場の価格時系列変動は内在する法則が不安定で、長期間にわたって再現性のあるパターンを見出すのは難しい。しかし、秒以下の短い時間スケールであれば、膨大な投資家すべての注文の状況のデータを分析すればパターンが見つかる場合があることが知られている。このような短い時間スケールでは人間の手では注文を行えないので、すべて機械によって自動的に注文が行われていると考えられるため、パターンが発生するのかもしれない。

まだ実用化には至っていないが、JP Morgan Chase がスポンサーとなり 2020 年に始まった国際学会 ACM International Conference on AI in Finance¹² でこの分野の研究が毎年発表されているなど、研究の進展は速く、実用化される日も近いかもしれない。2023 年 11 月には最新の研究として Coletta et al.(2023) および Nagy et al.(2023) が発表された。

12 : <https://ai-finance.org/>

6.5 AIの普及に追いついていない法律

水田(2020)は、AIトレーダーが人工市場で十分な訓練を行い、自身の取引が価格に与えるインパクトを学習すれば、最適な投資戦略として相場操縦を選択する可能性を示した。AIトレーダーの作成者・使用者が相場操縦を全く意図していなくても相場操縦を行う可能性があり、その場合、作成者・使用者の責任はどうか議論されている。この事象に関しては、日本のみならず多くの先進国で現在の金融法では対応できず、不正取引を行ったものがその責任をAIに押し付けてしまうことができる状況にある。規制の議論が必要であろう。

7. 人工市場へかかる期待と難しさ

人工市場は大きな期待がかかる一方、まだまだ研究者が少ない。その要因として、金融・経済分野の他手法の研究者からの理解を得られにくいことがある。経済学やファイナンスを研究する人たちの中には、シミュレーションというだけで受け入れない人がいる。経済学ではかつて、ゲーム理論ですら受け入れるのに相当な時間がかかったらしく、同分野の文化的な側面もあるかもしれない。また、金融・経済分野以外のエージェント・ベースド・モデルの研究者たちからも理解を得られに

くい。投資家は常に他の投資家を出し抜こうと考えており、振る舞いのモデル化に使える安定した行動パターンがない。例えば、自動車エージェントの安全運転のような、全体効率化に繋がる行動様式が存在しない可能性がある。そのため、モデルを複雑にしても妥当性の面で高い確度をもって分かることはほとんどなく、きわめて包括的でシンプルな行動だけを含んだエージェントにならざるを得ない。つまり、abstract モデルの研究が多くならざるを得ない。そのようなモデルは重要なメカニズムの知見を得るのに最適であるが、facsimile モデルが目指す現実世界の網羅的な説明は達成できない。金融・経済分野以外では、facsimile モデルの研究が多く成果を生み出しているため、これらに比べ金融市場の予測や適切な制度設計ができないことに物足りなさを感じているものと思われる。

こうした事情から、金融・経済研究と工学的研究の両方から本流でないと思われがちで、どこの学会、研究会に属したらいいかわからない、よりどころがない状況となっている。これらの困難を克服するためには、少しずつ地道な普及活動をするしかないと考えている。金融・経済分野の他手法の研究者には人工市場が複雑システムである金融・経済のメカニズム解明にいかに関与するか、金融・経済分野以外の研究者には、この分野の社会的貢献が非常に高いことを訴えていくしかない。

人工市場は、複雑系を複雑なまま取り扱い、きれいではないが正しく理解しようとする。泥臭いが、きれいに正しく間違ったりはしない。2008年の金融危機以降、期待が高まっている人工市場であるが、研究者がまだまだ少ないこともあり発展途上にある。人工市場の研究者が増え発展し、細部の議論を積み重ねて社会規模での複雑系効果を生み、社会に大きな恩恵をもたらすことに期待したい。

付記

本稿は著者の所属組織の公式見解を表すものではありません。すべては個人的見解であります。

参考文献

- Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Palmer, R., & Tayler, P. (1997). Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. In W. B. Arthur (Eds.), *The economy as an evolving complex system II* (15-44). Addison-Wesley Reading, MA.
- Bookstaber, R. (2017). *The End of Theory: Financial Crises, the Failure of Economics, and the Sweep of Human Interaction*. Princeton University press. (リチャード・ブックステーバー『経済理論の終焉 金融危機はこうして起こる』長尾慎太郎・井田京子訳 Pan Rolling 2019年)
- Borges, J. L. (1954). *Historia universal de la infamia*. Emece. (ホルヘ・ルイス・ボルヘス『汚辱の世界史』中村健二訳 岩波書店 2012年)
- Borowiecki, K. J., Dzieliński, M., & Tepper, A. (2023). The great margin call: The role of leverage in the 1929 Wall Street crash. *Economic History Review*, 76(3), 807-826.
- Coletta, A., Jerome, J., Savani, R., & Vyetenko, S. (2023). *Conditional Generators for Limit Order Book Environments: Explainability, Challenges, and Robustness*. arXiv.
- Farmer, J. D., & Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460(7256), 685-686.

- Gilbert, N. (2008). Agent-based models. Sage Publications.
- Izumi, K., & Okatsu, T. (1996). An artificial market analysis of exchange rate dynamics. In P. J. Angeline (Eds.), *Evolutionary Programming V* (27-36). MIT Press.
- Lux, T., & Marchesi, M. (1999). Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market. *Nature*, 397, 498-500.
- McMilan, J. (2002). *Reinventing the Bazaar, A Natural History of Markets*. WW Norton & Company. (ジョン・マクミラン『新版 市場を創る - バザールからネット取引まで』瀧澤弘和・木村友二訳 慶応義塾大学出版会 2021年)
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press. (メラニー・ミッチェル『ガイドツアー 複雑系の世界：サンタフェ研究所講義ノートから』高橋洋訳 紀伊國屋書店 2011年)
- Nagy, P., et. Al. (2023). Generative AI for End-to-End Limit Order Book Modelling: A Token-Level Autoregressive Generative Model of Message Flow Using a Deep State Space Network. arXiv.
- Schelling, T. C. (2006). *Micromotives and Macrobehavior*. W. W. Norton & Company. (トーマス・シェリング『ミクロ動機とマクロ行動』村井章子訳 勁草書房 2016年)
- Takayasu, H., Miura, H., Hirabayashi, T., & Hamada, K. (1992). Statistical properties of deterministic threshold elements - the case of market price. *Physica A*, 184(1-2), 127-134.
- Trichet, J. (2010, November 8). Reflections on the nature of monetary policy non-standard measures and finance theory, Opening address at the ECB Central Banking Conference Frankfurt. European Central Bank. <https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2010/html/sp101118.en.html>
- Weisberg, M. (2012). *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*. Oxford Studies in the Philosophy of Science (マイケル・ワイズバーク『科学とモデル - シミュレーションの哲学入門 -』松王政浩訳 名古屋大学出版会 2017年)
- 和泉潔 (2003)『人工市場』森北出版.
- 大井朋子 (2012)「エージェントシミュレーションを用いた「価格規制」と「ネイキッド・ショート・セリングの禁止」の有効性の検証」FSA Institute Discussion Paper Series, DP 2012-5.
- 岡山市 (2018)「第4回 路面電車乗り入れを含めた岡山駅前広場のあり方検討会」岡山市. 2018年2月26日 <https://www.city.okayama.jp/0000006104.html>
- 草田裕紀・水田孝信・早川聡・和泉潔 (2015)「保有資産を考慮したマーケットメイク戦略が取引所間競争に与える影響：人工市場アプローチによる分析」『人工知能学会論文誌』30, 5, pp.675-682.
- 倉橋節也 (2020)「新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策の推定」『人工知能学会論文誌』33(3), D-K28, pp.1-8.
- 国土交通省 (2014)「第4回地下街安心避難対策検討委員会」国土交通省. 2014年1月17日 https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo_tk_000052.html
- 島川英介 (2017)『大避難 何が生死を分けるのか』NHK出版.
- 清水季子・村永淳 (1999)「取引停止措置が市場機能に及ぼす影響：人為的シャットダウンを備えた市場の挙動に関するシミュレーション分析」IMES Discussion Paper Series, 99-J-1.
- 副島豊 (2001)「JGB先物市場における即時執行制度とボラティリティ - 戦略的注文行動の分析に基づく人工証券市場を用いた検証 -」『現代ファイナンス』, 10, pp.3-33.
- 高島幸成 (2013)「ABMによるマクロ経済基本挙動再現の為のモデル構造に関する研究」博士論文 千葉工業大学大学院社会システム科学研究科.
- 高安美佐子・和泉潔・山田健太・水田孝信 (2020)『マルチエージェントによる金融市場のシミュレーション』コロナ社.
- 永見野良蔵 (2018)「金融規制の国際交渉」日本金融学会. 2018年5月26日 <https://www.fsa.go.jp/common/conference/danwa/2018/20180526.pdf>

- 西野成昭・花木伸行 (2021)『マルチエージェントのための行動科学：実験経済学からのアプローチ』コロナ社。
- 星野真広・水田孝信・八木勲 (2021)「人工市場を用いたメイカー・テイカー制が市場間取引シェア獲得に与える影響調査」『JFX ワーキングペーパー』37.
- 益田裕司・水田孝信・八木勲 (2019)「人工市場を用いた金融市場流動性に影響を与える要因の調査」『JFX ワーキングペーパー』29.
- 丸山隼矢・水田孝信・八木勲 (2019)「人工市場を用いた分散投資規制が市場に与える影響分析 - ファンダメンタル価格急落時と急騰時における比較」『情報処理学会論文誌』60,10, pp.1694-1703.
- 水田孝信 (2014)「人工市場シミュレーションを用いた金融市場の規制・制度の分析」博士論文 東京大学大学院工学系研究科。
- (2018)「水平株式保有するパッシブファンドの増加が企業間競争と市場価格へ与える影響 - 人工市場によるシミュレーション分析 -」『人工知能学会 金融情報学研究会』21, pp.1-7.
- (2020)「人工知能は相場操縦という不正な取引を勝手に行うか? - 遺伝的アルゴリズムが人工市場シミュレーションで学習する場合 -」『人工知能学会 全国大会論文集』34.
- (2021)「金融市場の制度設計に使われ始めた人工市場」『スパークス・アセット・マネジメント スペシャルレポート』. 23. 2021年11月15日 <https://www.sparx.co.jp/report/detail/305.html>
- ・和泉潔 (2016)「人工市場シミュレーションを用いたバッチオークションの分析」『JFX ワーキングペーパー』17.
- ・小杉信太郎・楠本拓矢・松本渉・和泉潔 (2016)「ダーク・プールが市場効率性と価格発見メカニズムに与える影響 ~人工市場モデルと数式モデルを用いたメカニズムの分析~」『人工知能学会 金融情報学研究会』16, pp.16-23.
- ・早川聡・和泉潔・吉村忍 (2013)「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」『JFX ワーキングペーパー』2.
- ・堀江貞之 (2017)「忍耐強い (Patient) アクティブ投資は市場を効率的にするのか? - 人工市場によるシミュレーション分析 -」『人工知能学会 金融情報学研究会』19, pp.1-8.
- ・則武誉人・早川聡・和泉潔 (2015)「人工市場シミュレーションを用いた取引システムの高速化が価格形成に与える影響の分析」『JFX ワーキングペーパー』9.
- ・八木勲 (2021)「人工市場による金融市場の設計と広がる活用分野」『人工知能』36,3, pp.262-269.
- ・八木勲 (2023)「人工市場シミュレーションによる値幅制限とサーキットブレイカーの効果比較」『人工知能学会 金融情報学研究会』31, pp.9-15.
- 三輪宏太郎・植田一博 (2016)「効果的な取引時間延長の検証」『人工知能学会 金融情報学研究会』17, pp.5-11.
- 八木勲・水田孝信 (2017)「人工市場シミュレーションを用いたレバレッジドETFが原資産価格変動に与える影響分析」『人工知能学会 金融情報学研究会』18, pp. 9-15.