

2024年4月18日

2024年度 金融レジリエンス情報学 第2回

# 人工市場による市場制度の設計



スパークス・アセット・マネジメント株式会社  
運用調査本部 ファンドマネージャー 兼 上席研究員  
水田孝信

mizutata[at]gmail.com  
@takanobu\_mizuta (twitter)  
<https://mizutatakanobu.com>

本発表資料はスパークス・アセット・マネジメント株式会社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。

この資料はこちらにあります: <https://mizutatakanobu.com/2024r.pdf>

## 自己紹介

2000年 気象大学卒業

2002年 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修士課程修了

研究内容：宇宙空間プラズマのコンピュータシミュレーション

2004年 同専攻博士課程を中退

同年 スパークス・アセット・マネジメントに入社

2006年 クオンツ・アナリスト → 2010年より ファンド・マネージャー

2009年 人工知能学会などで研究発表を始める

2011年 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻博士課程 社会人をしながら在籍

指導教官：和泉潔先生 研究内容：人工市場を用いた金融規制のシミュレーション

2014年9月修了：博士（工学）

2017年度より 上席研究員兼務

現在：上記の学術研究、資産運用業界全般の調査・レポート、ファンドの管理的なマネージャー、株式市場やポートフォリの定量的分析(のためのシステム開発・運用)

2007年 日本証券アナリスト協会検定会員

2014年度から2022年度まで 東京大学公共政策大学院 非常勤講師

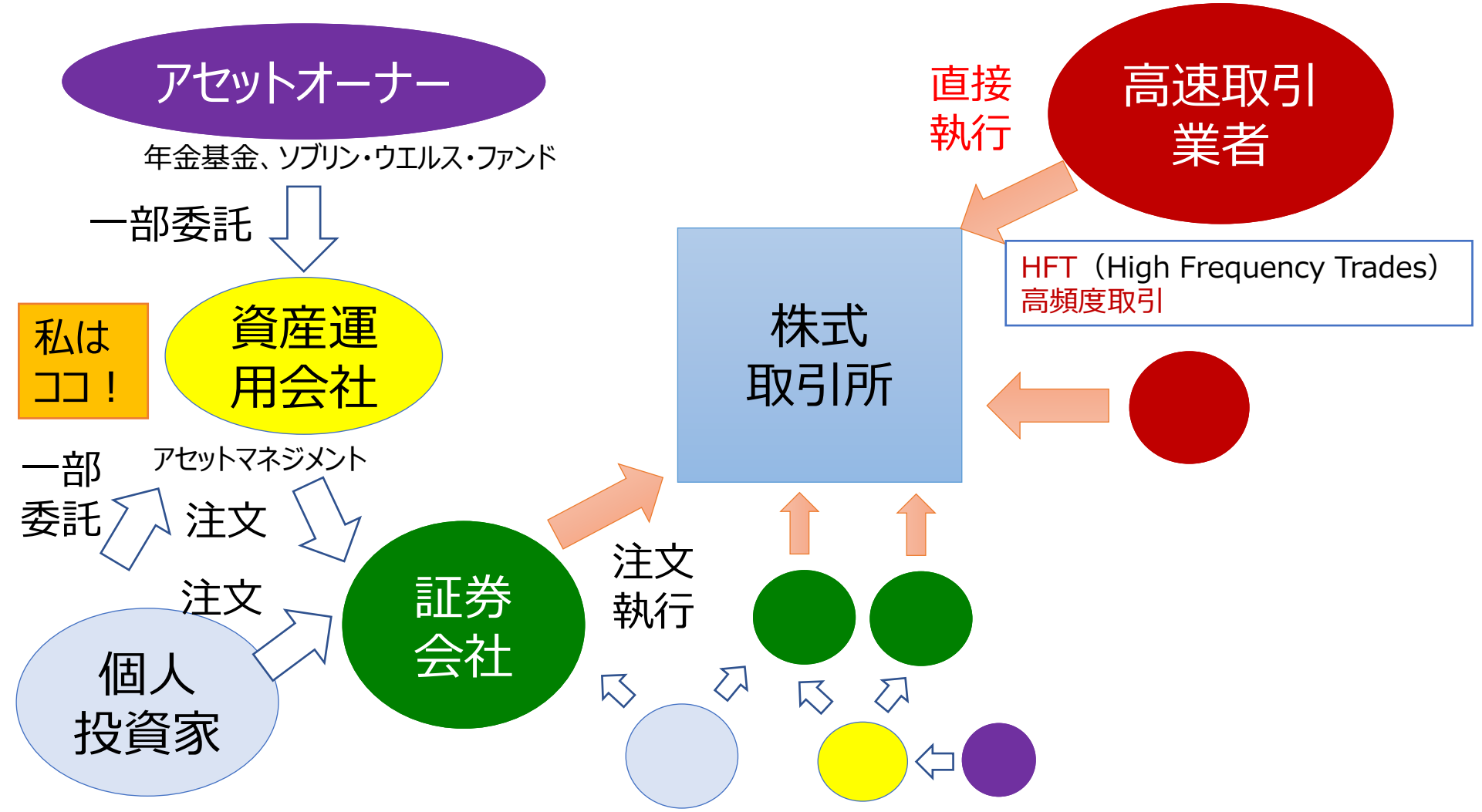
2016年度より 人工知能学会 金融情報学研究会幹事 2022・2023年度は主査

2019年より IEEE CIS Computational Finance and Economics Technical Committee メンバー

2024・2025年 Chair

# 株式市場は様々な参加者がいることで成立

## 株式の高速取引と取引所の高速化



# 著作物や資料：もしご興味あればご覧下さい

本業の調査：AIや高速取引や資産運用業界についてのレポート

<https://www.sparx.co.jp/report/special/>



(主なレポート)

2023/10/23 株式投資で気候変動を考慮することに賛否があるのはなぜか？ [概要編]

2023/8/3 投資の世界における生成AI

2023/6/6 関東大震災から100年～今同じことが起きたら株式取引は継続されるか？

2022/12/15 新技術の悪い影響とそれを乗り越えてきた金融市場

2022/10/7 学術研究力に直結する大学の資産運用

2022/6/28 ROEと資本コスト：その企業の価値はいくらか

2022/4/7 世界的な株式の決済期間短縮化：T+1への統一が進むか？

2021/11/15 金融市場の制度設計に使われ始めた人工市場

<https://www.sparx.co.jp/report/detail/305.html>

2021/9/8 金融市場で使われている人工知能

2021/8/16 続・市場は効率的なのか？ 実験市場や人工市場での検討

2021/4/12 "フラッシュ・クラッシュ・トレーダー"と呼ばれた男はフラッシュ・クラッシュとは

あまり関係なかった：高頻度取引との知られざる戦い

2020/12/22 市場は効率的なのか？ 検証できない仮説の検証に費やした50年

2020/9/15 なぜそれらは不公正取引として禁止されたのか？

2020/8/4 人工知能が不公正取引を行ったら誰の責任か？

2020/7/3 お金とは何か？ -古代の石貨から暗号資産まで-

2020/1/24 国際資本の舵を取ってしまったグローバルインデックス算出会社

2019/9/18 アセット・オーナーが行っている投資：

"悪環境期に耐える"と"ユニバーサル・オーナー"

2019/7/8 社会の役にたっている"空売り"

2019/4/3 高頻度取引（3回シリーズ第1回）：高頻度取引とは何か？

2018/5/21 なぜ株式市場は存在するのか？

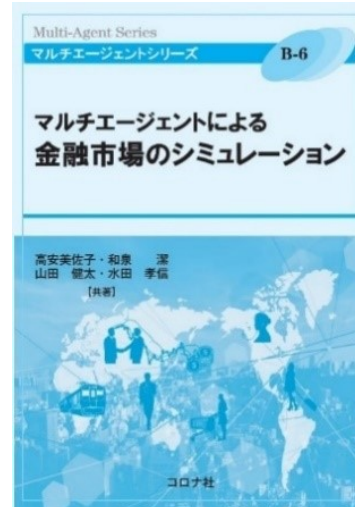
2018/3/2 パッシブファンドの新たなる論点「水平株式保有」

2018/2/16 アクティブファンドが超えてはいけない規模

2016/12/2 良いアクティブ運用とは？ -対ベンチマーク運用の衰退と

ハイリーアクティブ運用の再起-

学術研究：人工市場による市場制度の設計



一般向け記事(SBI金融経済研究所への寄稿)

人工市場：金融市場のコンピュータ・シミュレーション

[https://sbiferi.co.jp/review/report\\_review\\_2024Mar.html](https://sbiferi.co.jp/review/report_review_2024Mar.html)

.pdf [https://sbiferi.co.jp/assets/pdf/review/review\\_202403\\_vol5\\_06.pdf](https://sbiferi.co.jp/assets/pdf/review/review_202403_vol5_06.pdf)

教科書的な本

高安美佐子ほか、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, 2020, 和泉潔, 水田孝信, 第5章「エージェントモデルによる金融市場の制度設計」

<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339028225/>

私がよくお話を依頼されるテーマの包括的な資料

金融業界における人工知能、高速取引、人工市場による市場制度の設計

説明資料 <https://mizutakanobu.com/2024.pdf>

Youtube <https://youtu.be/iw35IKAMicQ>

## 人工市場による市場制度の設計：学術的に詳細なもの

博士論文(モデル構築の詳細などが書かれています)

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,  
東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻  
2014年9月26日 博士 (工学) (博工 第8404号)

<https://mizutakanobu.com/jphd.htm>

レビュー論文英語版

Mizuta (2019) An agent-based model for designing a financial market that works well,  
査読付き国際会議論文 <https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308376>

arXiv <https://arxiv.org/abs/1906.06000>

Slide: <https://mizutakanobu.com/2021kyushu.pdf>

YouTube: <https://youtu.be/rmlb72ykmlE>

先行研究をひたすら紹介した英文レビュー論文

Mizuta (2016) A Brief Review of Recent Artificial Market Simulation Studies  
for Financial Market Regulations And/Or Rules, SSRN Working Paper Series

<https://ssrn.com/abstract=2710495>



**SIG-FIN**  
JSAI Special Interest Group on  
Financial Informatics

<https://sigfin.org>

年2回（10月ごろと3月ごろ）東京都内&オンラインで開催  
誰でも聴講可 ← 人工知能学会の会員でなくてもよい  
参加費：1,000円

聴講：学者よりも実務家が多い

メーリングリスト登録ページ

<https://groups.google.com/g/jsai-fin/about>

- ✓ 機械学習やテキストマイニングの技術を金融実務に応用する研究多い
- ✓ 人工市場シミュレーションの研究もよく発表されている



和泉先生のブックマーク(人工知能学会誌)：人工知能の金融応用に関する研究会、国際的な学会、ツール類やデータなど  
[https://www.ai-gakkai.or.jp/resource/my-bookmark/my-bookmark\\_vol37-no1/](https://www.ai-gakkai.or.jp/resource/my-bookmark/my-bookmark_vol37-no1/)

2008年の金融危機以降、伝統的な経済学では複雑系であったこの金融危機を分析できていないと批判し、金融・経済分野におけるエージェントシミュレーションである人工市場や人工経済などの複雑系科学をもっと活用すべきだという主張があらわれた。人工市場をもっと活用し伝統的な経済学の弱点を補完すべきであることは確かだと思われる。

今回は、人工市場研究を簡単にレビューしたあと、人工市場による市場制度の設計の研究を呼値変更という実際に行われた制度変更の事例を交えながら紹介する。金融市場は人類の発展に必要な不可欠な道具である。McMillan[2002]が述べたように、「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なもの」であるうえに、「うまく設計されたときのみ、うまく機能する」、まさに複雑系である。人工市場は、これまでにない制度によってどういうことが“起こりえるか”を調べ“あり得る”メカニズムを見つけておく、“あり得る”副作用を見つけておく、という貢献ができる。特に、喫緊の課題として規制やルールを議論している実務家からの注目が高い。

人工市場の貢献はまだ始まったばかりで、研究者が全然足りていない。この分野は社会への重要な貢献ができることは間違いないので、啓蒙活動を続けていきたい。今後、もっと多くの金融市場の規制やルールが人工市場や人工社会で扱えるようになり、うまく金融市場を設計することに貢献し、社会の発展につながっていけばと願っています。

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル



## (1) エージェントシミュレーションとは？

### (2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

### (3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

### (4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# 既存の経済学は金融危機を取り扱えなかった！

金融市場は数式だけできれいに表されるような単純なシステムではない  
バタフライ効果：蝶が羽ばたくという小さい動きがどのような影響を与えるかを正確に述べることは難しく、  
台風を生み出すことさえ完全には否定できない

それにも関わらず、既存の経済学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。  
その結果、2008年の金融危機では何が起きているか表現できなかったと多くの批判を浴びた。

## 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) に大きな期待！！：複雑系システムを複雑なまま取り扱える

### NATUREやSCIENCEに、人工市場に期待をかける記事

これまでの経済学ではリーマンショックを分析・対応できなかったという批判  
→ 人工市場（エージェント・ベースド・モデル）ならできるとある・期待

Farmer and Foley (2009), Nature <https://www.nature.com/articles/460685a>

Battiston et al. (2016), Science <https://science.sciencemag.org/content/351/6275/818>

標準的な経済学を否定し、  
人工市場を絶賛

金融危機は人工市場でしか扱えない！  
という勢いだが、ちょっと言いすぎ

### ECB総裁講演でも取り上げられる

ヨーロッパ中央銀行(ECB)総裁だったトリシェが効率的市場仮説に基づく  
金融理論が、金融危機中の政策決定に関してほとんど役に立たなかったと述べ、  
エージェントシミュレーション(広い意味で人工市場)などが金融政策に  
貢献することを期待していると述べた講演

<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2010/html/sp101118.en.html>

リチャード・ブックステーバー  
投資銀行や大手ヘッジファンドでリスク管理の責任  
者を務めたのち、米国財務省を経て、現在はカリ  
フォルニア大学で教鞭をとっている。『市場リスク  
——暴落は必然か』の著者。

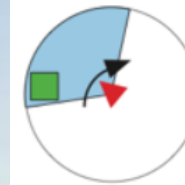


経済理論の終焉 金融危機はこうして起こる, 2019/1  
<https://www.panrolling.com/books/wb/wb273.html>

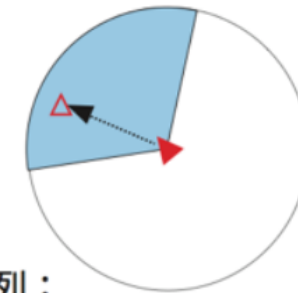
# 鳥の集団行動を解き明かしたエージェント・ベースド・モデル



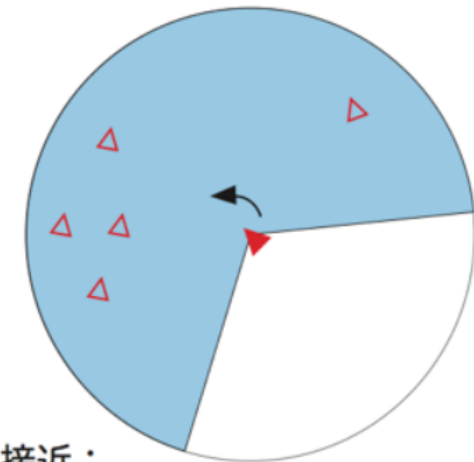
1匹 1匹は単純な行動ルール



衝突回避：  
障害物や他の鳥から離れる



整列：  
近くの鳥と動きを同じにする



接近：  
周囲の群れに近づくようにする

<https://mas.kke.co.jp/model/boid-model/>

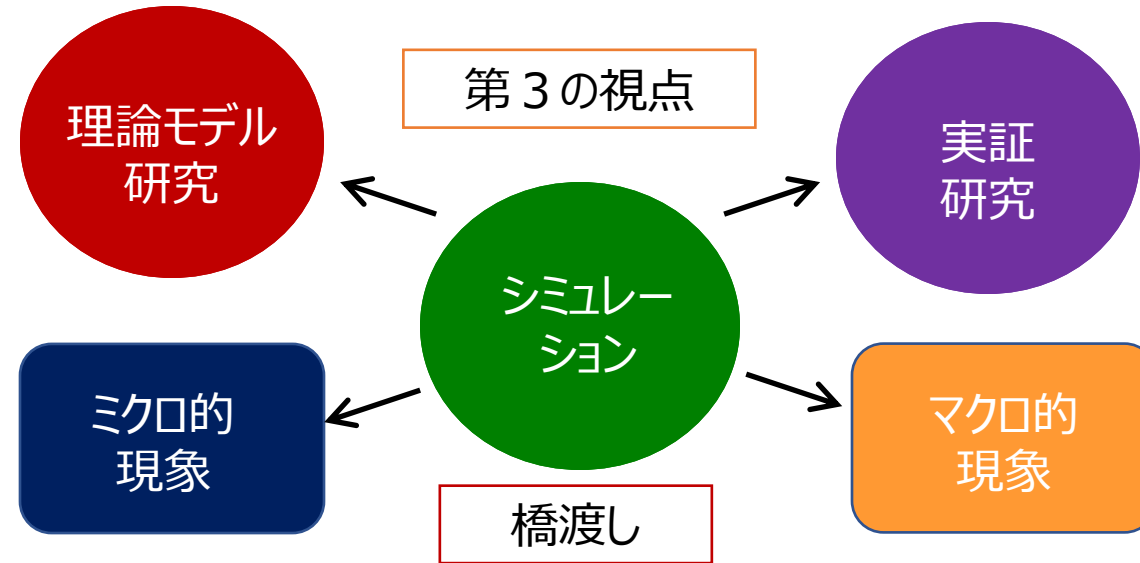
1匹 1匹は単純な行動ルールだが、全体としては複雑できれいな模様

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、そうではないことが解明

この模様は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

# さまざまな分野で活躍するエージェント・シミュレーション

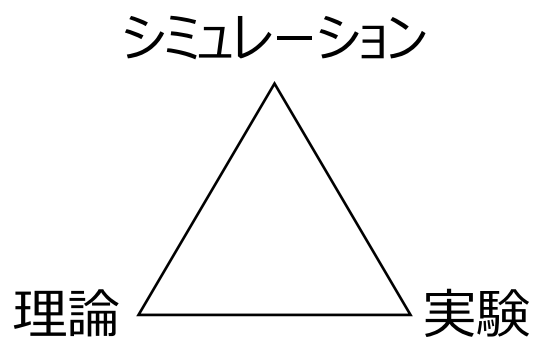
コンピュータの中に仮想の社会を構築。マイクロなエージェント（人間）を多数投入。  
エージェントは比較的シンプルなモデルでお互いに相互作用する。それらが集積して複雑なマクロの挙動がみれる。



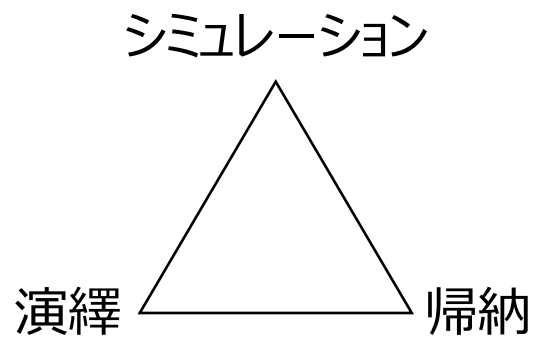
- 複雑系である社会において、制度・規制の変更が与える副作用や想定外の効果を  
コロンブスのたまご的に発見
- 理論や実証で調べるべきテーマの発見、メカニズムの知識発見
- 既存の手法を補完する手法として他分野では定着

自動車道の整備が交通渋滞へ与える影響分析、  
テロや火災・伝染病が発生した場合の避難の方法、など

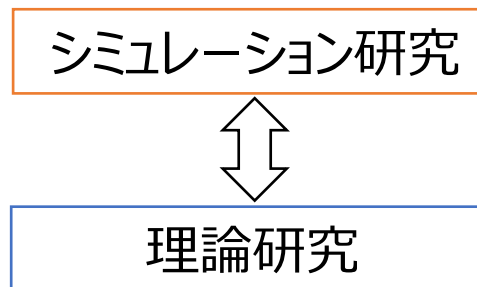
# エージェント・シミュレーション(社会シミュレーション)の類型



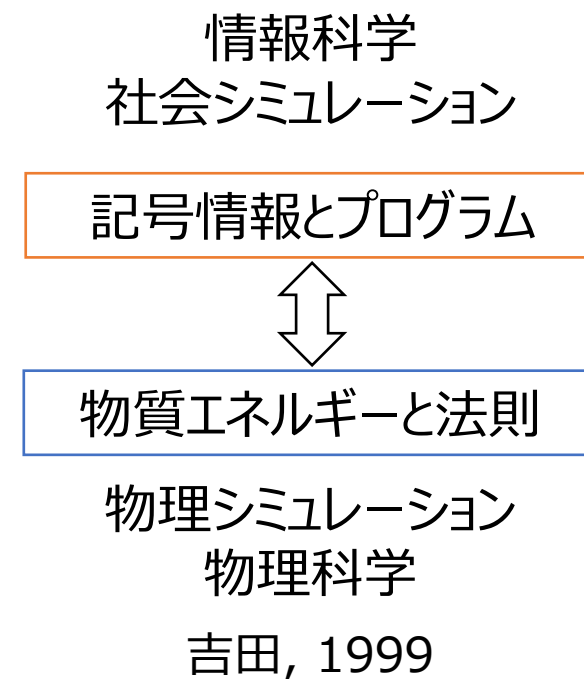
塩沢, 2006



Axelrod, 1997



Axtell, 2000



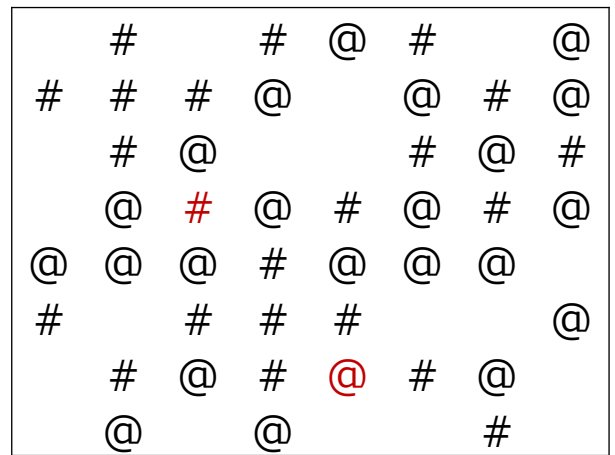
寺野隆雄, 「社会シミュレーションの類型」, 数理社会学事典, 2022  
[https://www.maruzen-publishing.co.jp/item/?book\\_no=304405](https://www.maruzen-publishing.co.jp/item/?book_no=304405)

寺野隆雄, 「なぜ社会システム分析にエージェント・ベース・モデリングが必要か」, 2010  
[https://doi.org/10.11487/trafst.4.2\\_56](https://doi.org/10.11487/trafst.4.2_56)

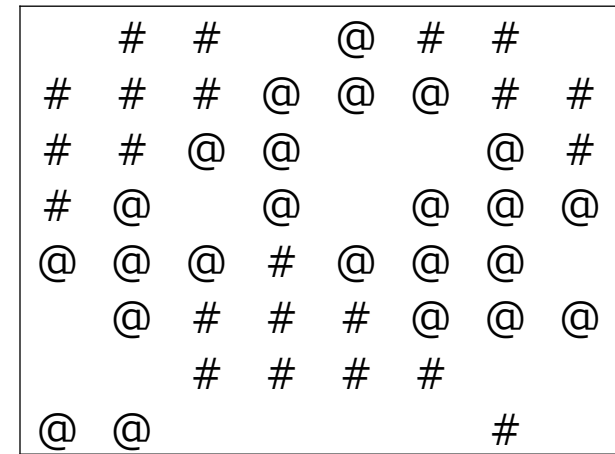
エージェント・シミュレーションの類型、位置づけはいろいろ提案されている

## 学生(#)と教授(@)が参加する立食パーティー

解説記事「多角形のたとえ話」  
<https://ncase.me/polygons-ja/>



- ルール：
- 自分の周り(8マス)に自分の同類が1/3より多ければよい
  - 他方に囲まれた場合 どこかに移動
- 繰り返していくと、...

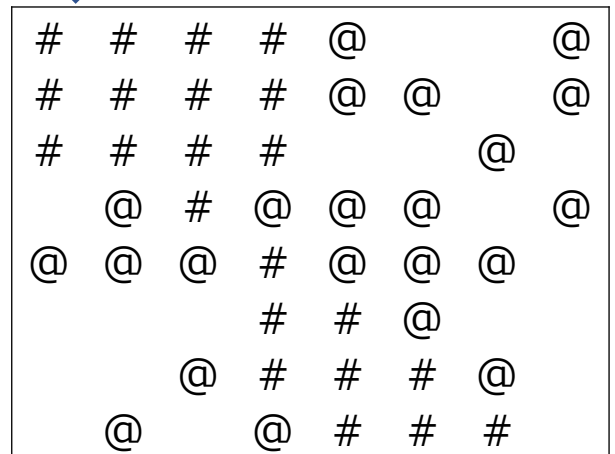


分離されてしまう

修正ルール：

# : 要求同類の人数 1 人増

@ : 1 人減、繰り返していくと、...



「自分があまりにも少数派になりたくない」だけで分離が起きる。積極的に「嫌い」なわけじゃない

この理由が分かることがシミュレーションの目的  
現実の会場の最終配置を予測することは目的でない

配膳テーブルの位置とか、個々人の食べる量の違いとか、准教授は？とか、現実にこんな会場ないとか、こんな単純な人いないとか、「この調査目的において」はどうでもよい。むしろ「理由の理解」には邪魔になるだけ。

#の場所が狭くなる

「知りたいこと」に応じてモデルを簡略化・複雑化することが大事



# 活躍するエージェントシミュレーション

役所の意思決定にも使われている



J R岡山駅東口広場に電停を 路面電車乗り入れに着手 環状化も ...

毎日新聞 - 2018/04/01

岡山市は今年度、J R岡山駅東口広場への路面電車乗り入れ事業に着手する。... だが、東京大に依頼した交通シミュレーションで車の信号待ちの回数は大きく変わらないとの結果が出たため、「著しい渋滞は生じない」と事業の着手に踏み切る ...

<https://mainichi.jp/articles/20180402/ddl/k33/010/298000c>

<https://www.city.okayama.jp/0000006104.html>

## 国土交通省

第4回地下街安心避難対策検討委員会(平成26年1月17日)

議事次第(PDFファイル)

資料1 実地調査の報告(PDFファイル)

資料2-1 避難シミュレーション報告(PDFファイル)

動画 避難シミュレーション Case A 階段閉塞なし(8倍速)(WMVファイル)

動画 避難シミュレーション Case A 階段閉塞なし(1倍速)(WMVファイル)

動画 避難シミュレーション Case B 階段閉塞あり(8倍速)(WMVファイル)

動画 避難シミュレーション Case B 階段閉塞あり(1倍速)(WMVファイル)

資料2-2 対策の検討と実施(案)(PDFファイル)

資料3 安心避難対策ガイドラインの骨子(素案)(PDFファイル)

[http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_gairo tk\\_000052.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo tk_000052.html)



核戦争危機から50年  
ケネディ、ニクソンが自ら核戦争等に仕掛けたテロ分析を駆使し、  
実際に起こった現実だけでなく、起こらなかったはずの現実を  
も説明できる新モデルを開発。  
歴史のけいに教えてくれる。

[https://jww.iss.u-tokyo.ac.jp/publishments/books/2012/hoshiro\\_2012\\_03.html](https://jww.iss.u-tokyo.ac.jp/publishments/books/2012/hoshiro_2012_03.html)

キューバ危機時の米政府の会議をシミュレーション  
出欠状況次第で結論が変わりえたことを示す

## COVID-19対応でも

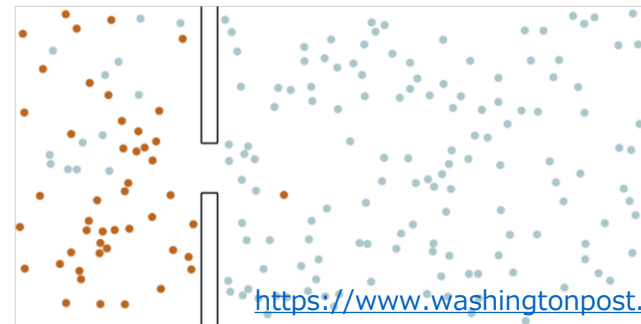


<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200220/k10012294081000.html>

<https://archive.md/uUuwa>

(和文速報論文) <https://doi.org/10.1527/tjsai.D-K28>

NHKにも取り上げられる注目度(筑波大 倉橋先生)



<https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/world/corona-simulator/>

(日本語版) <https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/health/corona-simulation-japanese/>

注: COVID-19ではエージェントではないシミュレーションのほうが多い  
例) 西浦モデル、東京大学藤井・仲田モデル

(内閣官房新型コロナウイルス感染症等対策推進室の資料↓に詳しい)

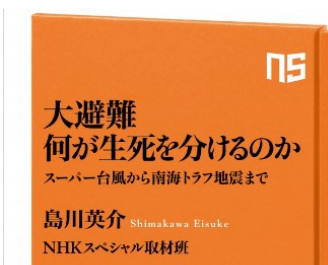
<https://www.covid19-ai.jp/ja-jp/presentation/advisory-board/covid-19-ai/>

# 想定された津波からの避難：シミュレーションを見て議論、避難をあきらめていた人をやる気に



<https://news.yahoo.co.jp/articles/07955a2e9dbae92849c8c43b9f1b56e0bd10c529>

(論文) <http://id.nii.ac.jp/1001/00101155/>



予測精度を追求するのではなく、  
プロセスを見せて議論を提供する

第2章に住民たちとシミュレーションを使った  
議論の推移などが書かれています

<https://www.nhk-book.co.jp/detail/000000885122017.html>

シミュレーションのプロセスを見ることにより  
議論が深まり、新たな助かる方法を生み出す

高知県黒潮町は予想される南海トラフの地震で  
最も高い津波が想定されている (34.4m)  
これが発表された2012年当時、多くのメディアが殺到  
当時の住民のアンケートからシミュレーションした結果、多  
くの人が助からないことが分かった  
しかし、ある交差点で地震発生から10分経っていなければ  
山へ、経っていればタワーに逃げると多くの人が助かるこ  
とが分かった → 住民はあきらめなくなった  
山に行く途中の道が危険であるという発見  
(今では避難タワーが増えたようなのもっと良い避難計  
画になっていると思います)

(2017年完成のタワー) <http://yama-ken.jp/日本一の津波避難タワー完成!/>

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

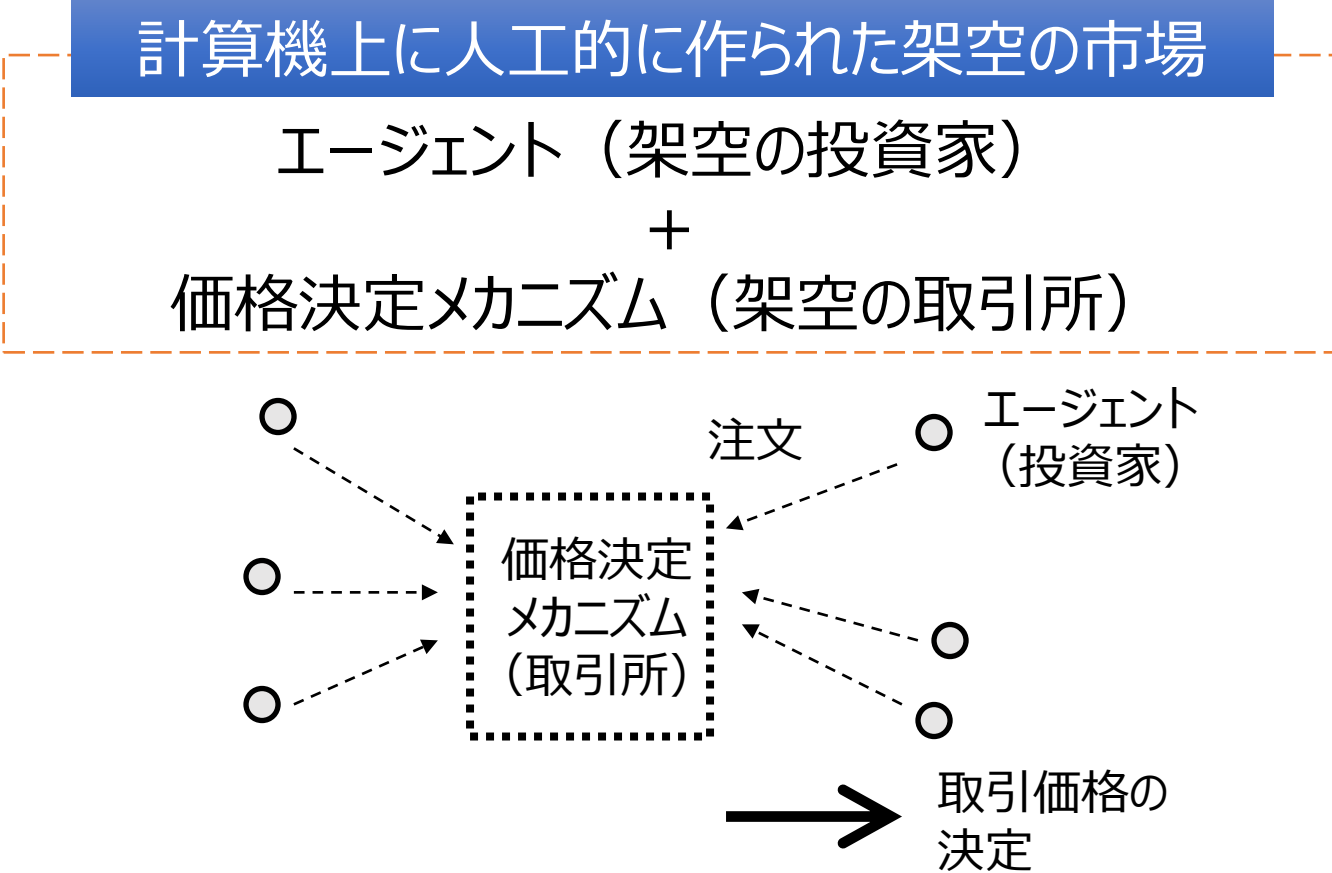
(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# 人工市場モデルを用いたシミュレーションとは？ (金融市場のエージェントシミュレーション)



実データが全く必要ない完全なコンピュータシミュレーション

これまでに導入されたことがない金融市場の制度やルールも議論できる  
その純粋な影響を抽出できる



各種言葉が表す領域（人によってけっこう使い方が違うが、）

Agent-Based Model, Multi-Agent Simulation, Artificial Market

**Agent-Based Model (エージェント・ベースド・モデル)**

⇒ Agentが数個程度でhomogeneousの場合も含む

→ 英語論文を探するときはこの単語が一番よさそう

**Multi-Agent Simulation (マルチ・エージェント・シミュレーション)**

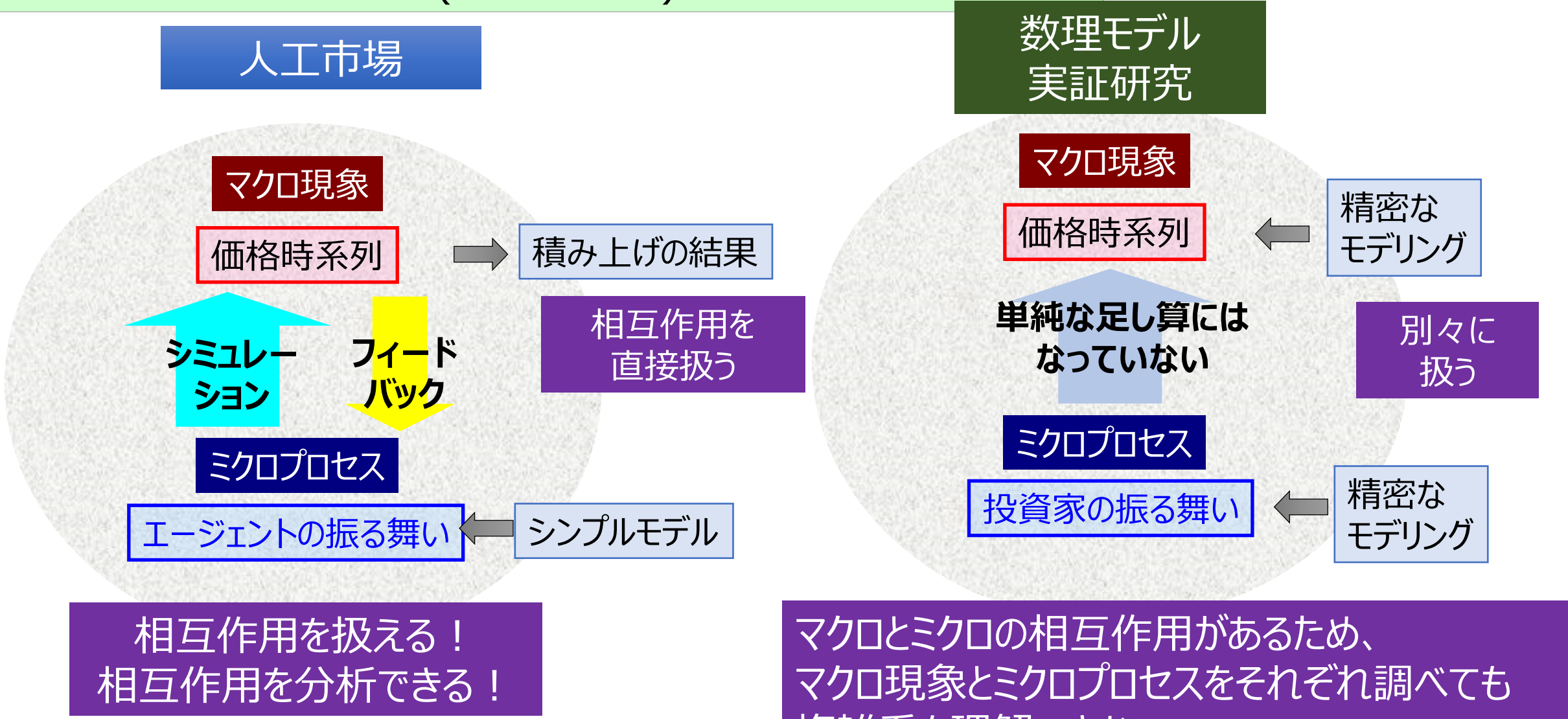
⇒ Agentがとても多くheterogeneous

**Artificial Market: 人工市場**

⇒ Agent-Based Modelで金融市場をシミュレーション

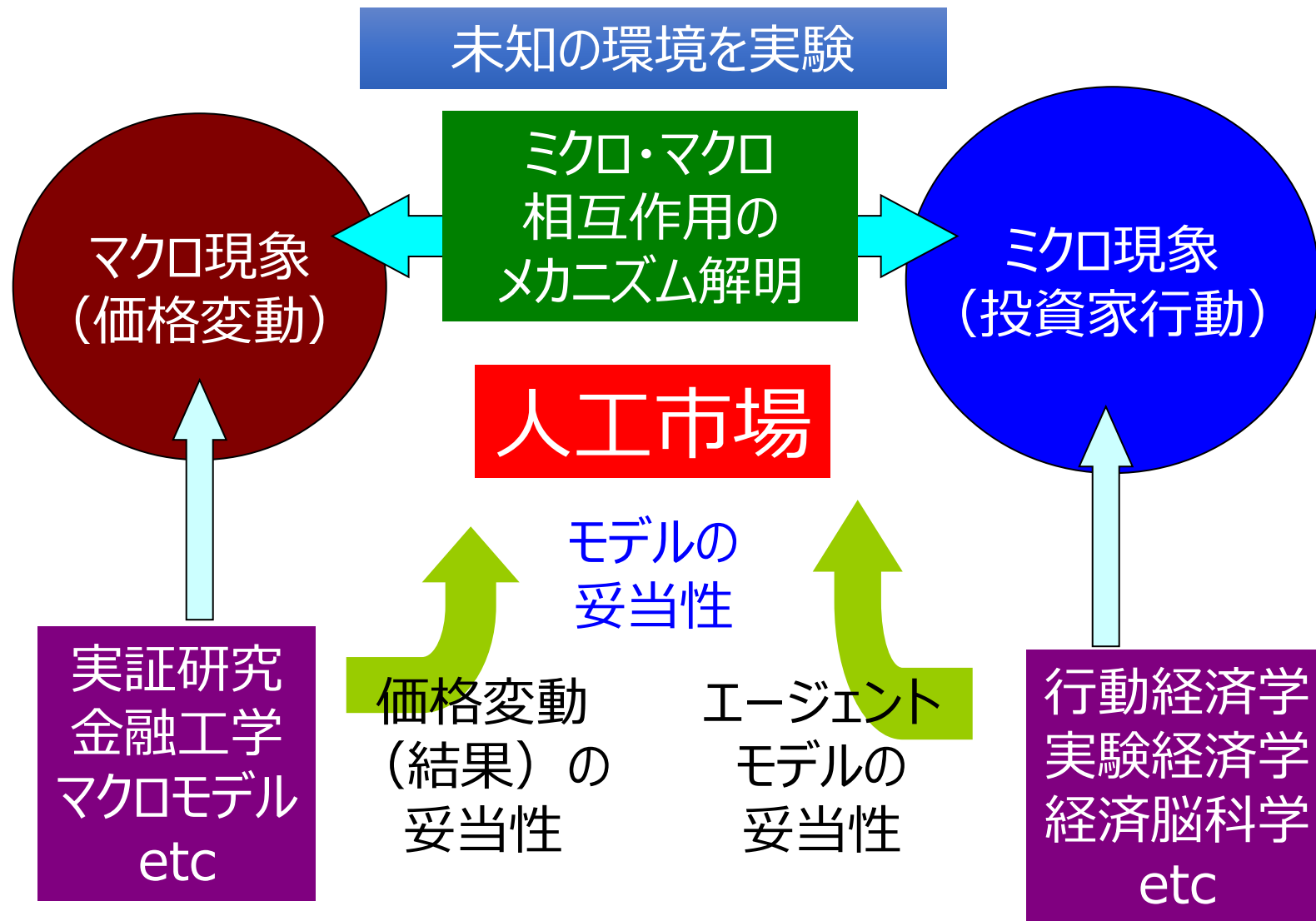
# 複雑系を扱える強み

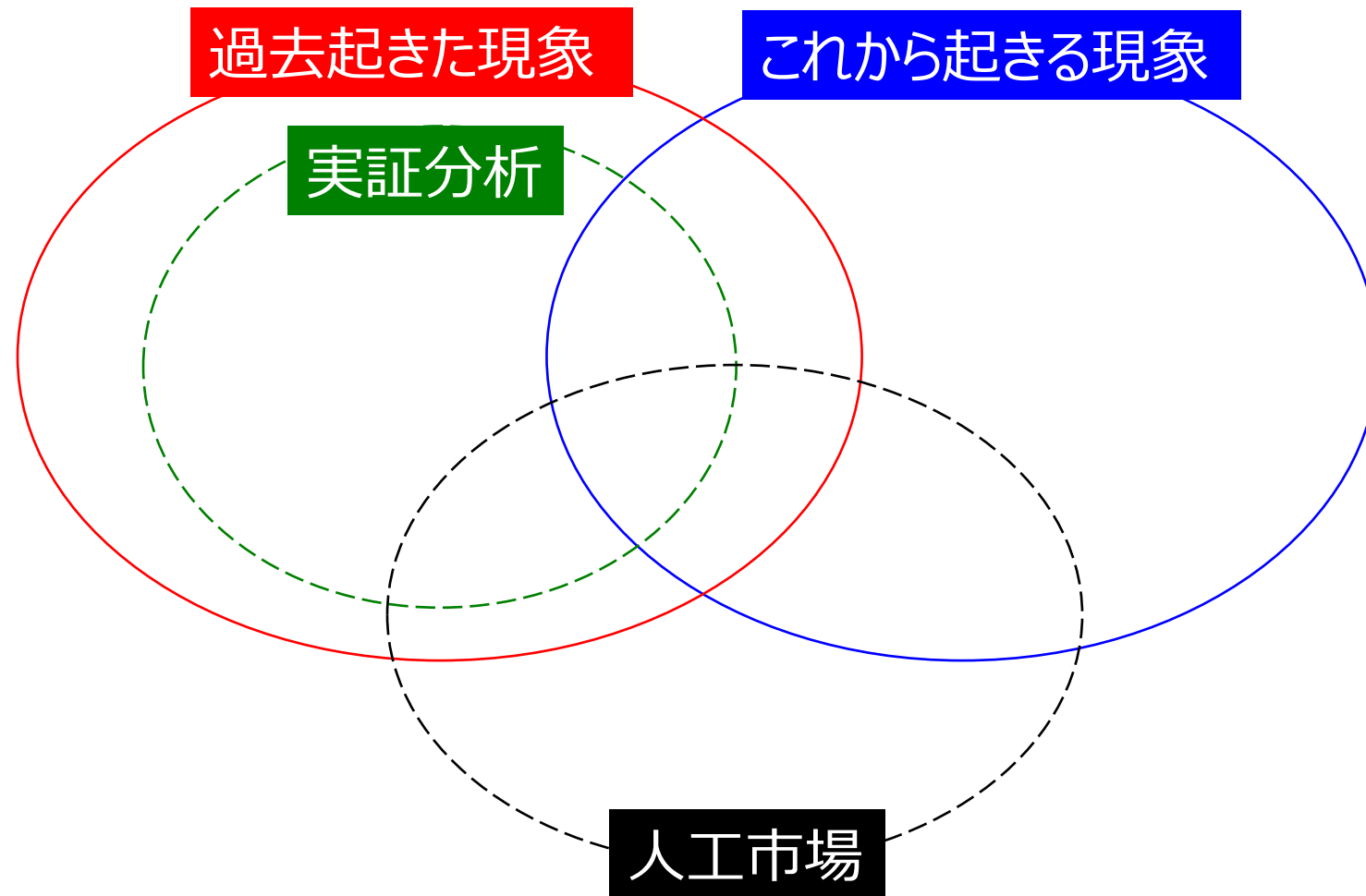
金融市場は非常に複雑系のため、ミクロプロセス(投資家の行動)の単純な足し算がマクロ現象(価格時系列)にならない





# 人工市場の得意とすること： ミクロ・マクロ相互作用





これから起きる現象を取り扱えるのが長所だが、  
これからも起こらない現象を取り扱ってしまう可能性があるのが短所

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# 複雑系の勃興時に研究が始まった

恐らく1990年代から行われている

## スタイライズドファクトを再現

価格の騰落(リターン)の頻度分布は正規分布をしたおらず、裾が厚い  
リターンの2乗の自己相関はゼロではない、ラグが大きくなるとゼロに近づく

Takayasu, H., Miura, H., Hirabayashi, T., and Hamada, K.: Statistical properties of deterministic threshold elements - the case of market price, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 184, No. 1, pp. 127, 1992

Lux, T. and Marchesi, M.: Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market, *Nature*, Vol. 397, No. February, pp. 498, 1999

実証研究で知られているスタイライズドファクトを再現するための最小限の  
エージェント(投資家)の特徴は何か？ 追求する

## バブルの発生メカニズム

どういうときにバブルが発生するのか？ メカニズム、エージェントの特徴

Izumi, K. and Okatsu, T.: An artificial market analysis of exchange rate dynamics, *Evolutionary Programming V*, pp. 27, 1996

Arthur, W., Durlauf, S., Lane, D., and Program, S. E.: Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market, *The economy as an evolving complex system II*, pp. 15, Addison-Wesley Reading, MA, 1997

## プラットフォームモデル

例えば、

U-Mart: Kita, et al. : *Realistic Simulation of Financial Markets*, Springer, 2016

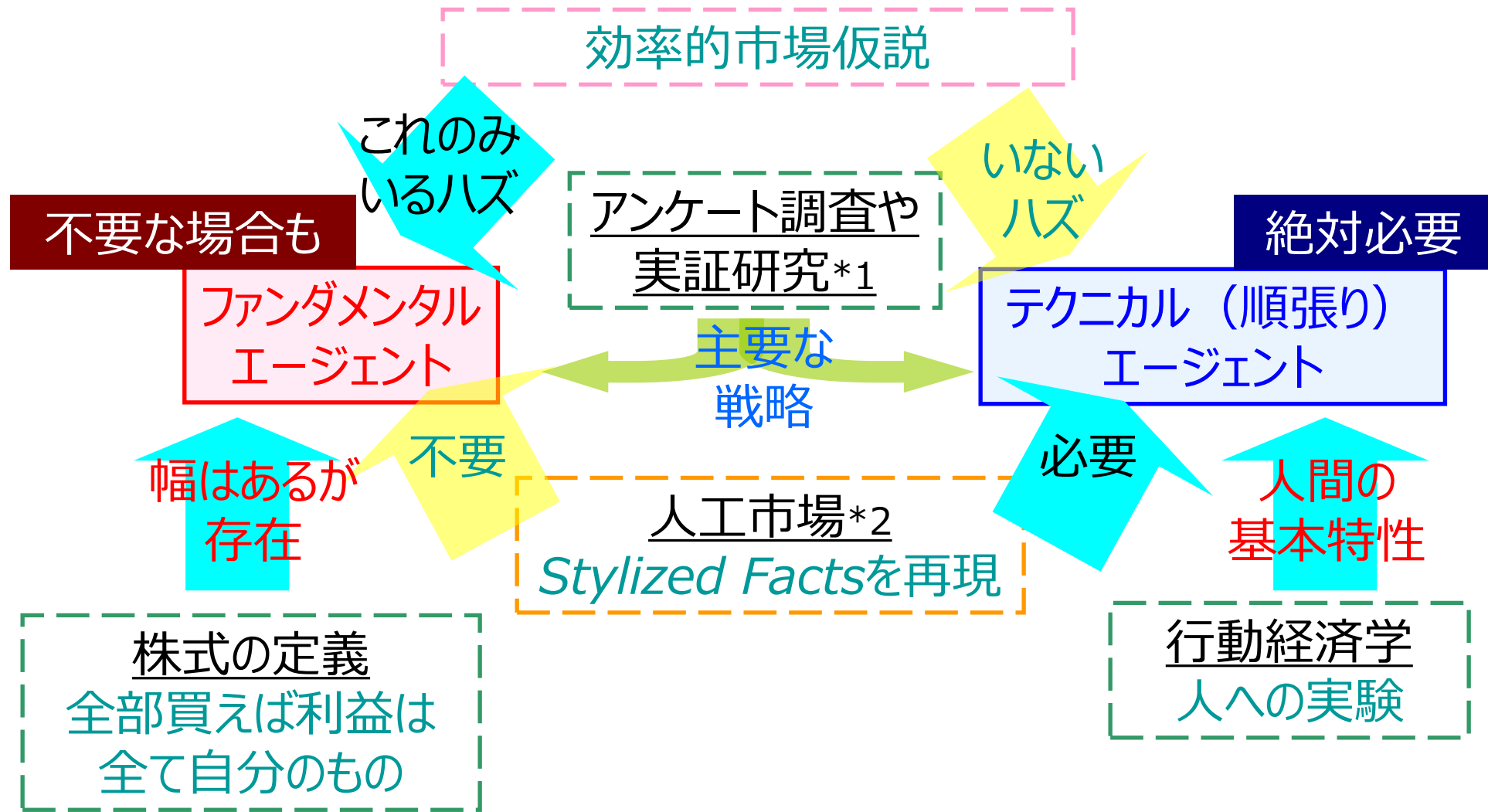
PlhamJ: 和泉研作成 : <https://github.com/plham/plhamJ>

いずれも、効率的市場仮説が否定するテクニカル戦略のエージェントが必要との結論

歴史あるテーマだが、これらは今でも重要なテーマ

いずれも、予測や細かい再現を目的としていない

# ファンダメンタル戦略・テクニカル戦略の2つに集約された

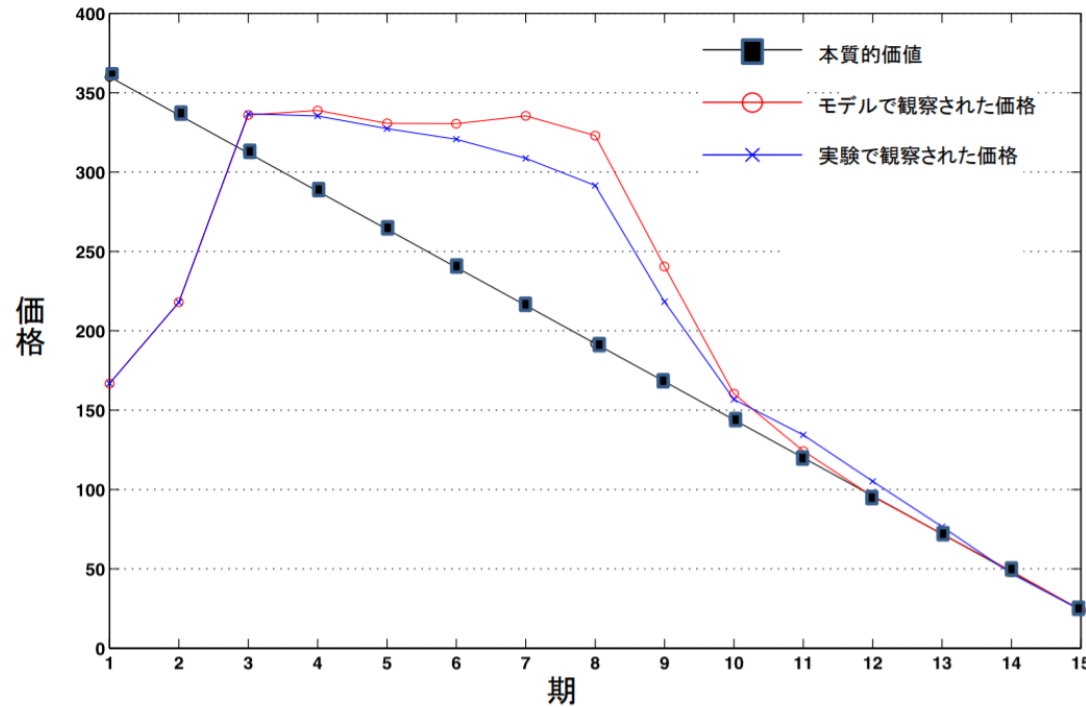


\*1 Menkhoff, L. and Taylor, M. P. (2007): The Obstinate Passion of Foreign Exchange Professionals: Technical Analysis, Journal of Economic Literature  
Yamamoto, R. (2021): Predictor Choice, Investor Types, and the Price Impact of Trades on the Tokyo Stock Exchange, Computational Economics  
<https://arxiv.org/abs/1906.06000>

\*2 Lux, T. and Marchesi, M.(1999) Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market, Nature

# 被験者を使った実験市場でもエージェントモデルの妥当性が確認されている

## 実験結果とモデルシミュレーションの結果の対比



Source: Haruvy and Noussair (2006)  
のモデルと実験データを基に作成

被験者を使った実験市場の結果にあうような人工市場シミュレーションを試みた  
ファンダメンタル戦略、順張り戦略をモデルに用いて、パラメータ調整すると、  
実験市場の結果とよくあった





★金融市場においてどのような状況でも存在

(Sewell 2011) ⇒

値には幅あり

<http://finance.martinsewell.com/stylized-facts/>

(1) ファットテール (Mandelbrot 1963等多数)

価格の騰落率の分布が正規分布に比べ裾が厚い  
→ 暴騰・暴落が正規分布で予想されるより多い

尖度：1～100程度と値には幅がある

(2) ボラティリティ・クラスタリング (Mandelbrot 1972等多数)

価格の騰落率の2乗が大きなラグでも自己相関をもつ  
→ 市場が荒れだすと持続する

短いラグで0.1～0.2程度、ラグが長くなると急激に減少  
ゼロに近づくもののマイナスにはならない (プラスを維持)

特定の法則が維持される“斉一性原理”(せいいつせい)が、  
長い時間スケールであるほど成り立っていない

上記は数少ない常に成立するもの  
ただし、定量的には時により差がある

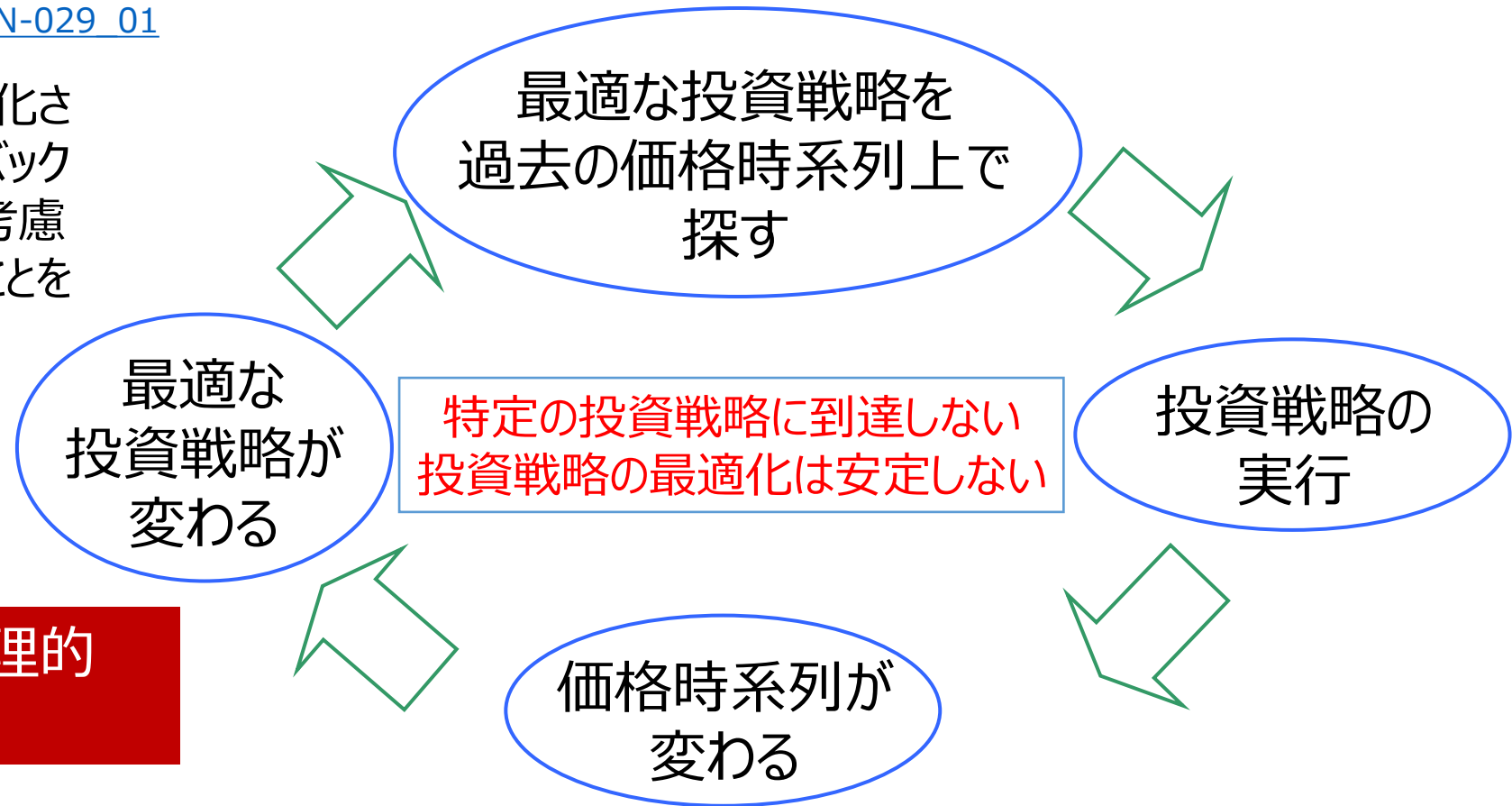
これ以上あわせに行っても意味がない

<https://doi.org/10.11517/jsaisigtwo.2022.FIN-029> 01

投資家自身の売買によって価格を変化させてしまうこと(マーケットインパクト)をバックテストを用いたパラメータ最適化時に考慮できないため、パラメータが定まらないことを議論

→ 自身の売買のインパクトのせいで自身の最適な戦略が定まらない

**金融市場は投資家が全員合理的だったとしても本質的に不安定**



金融市場は本質的に、合理的に投資戦略を選定する場合でも、特定の投資戦略のパラメータには達することができない性質をもっている。そのときは合理的な投資戦略を選択したとしても、その投資戦略が価格時系列を変更し、合理的な投資戦略が変わり、と繰り返されるから。

このような予測不能な動きとなるパラメータに基づいた投資戦略によって生み出された市場価格の時系列が、予測可能であったり規則性が安定的に存在したりするとは考えにくい。規則性の不安定性は、価格時系列を数理モデル化する際の大前提である斉一性原理をも疑わせ、価格時系列の数理モデル化の難しさを示すものであると考えられる。

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# 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

規制当局(金融庁)、中央銀行(日本銀行)、証券取引所(東証, JPX)



日本取引所グループ  
東京証券取引所  
大阪取引所  
日本取引所自主規制法人  
日本証券クリアリング機構

## JPXワーキングペーパー

東京証券取引所の親会社、日本取引所グループ(JPX)が発行

**41本中、実に12本が人工市場を用いた研究(2023年末現在)**

**呼値(後ほど紹介)**、高速取引の影響、取引所の高速化、バッチオークション、自己資本規制やVaRの影響など

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

その他にも、空売り規制、値幅制限、ダークプール、信用分散規制、水平株式保有、などが調べられている(次,次々ページ参照)

予測や細かい再現を目的としていない

これまでにない制度によってどういうことが“起こりえるか”を調べる  
“あり得る”メカニズムを見つけておく、“あり得る”副作用を見つけておく

私の専門分野  
呼値の事例を後ほど紹介

## 空売り規制と値幅制限

空売りが完全に禁止された場合だけでなく、日本では2013年に廃止になった空売りの際の価格規制も、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ことが分かりました。

## ダークプール

ダークプールは市場を安定化させ、マーケットインパクトを低減させる効果をもつことが示唆されました。しかし、ダークプールでの取引が多くなりすぎると、つまり普及しすぎると市場の効率性が著しく低下することを示しました。

## 暴落後の反発やボラティリティクラスタリングのメカニズムの解明

ファンダメンタルが急激に悪化してその企業の株価が暴落した直後に、反発がよくあることが知られています。これはオーバリアクションのためだと考えられていることもありますが、人工市場で分析すると、投資家の予想株価にばらつきがあり、需給に偏りがあれば、この反発は起こることが分かりました。

## 高速取引の影響

高速取引の多くはマーケットメイク戦略と言われていますが、このマーケットメイク戦略が存在する取引所と存在しない取引所を人工市場内に用意して取引量の変化を調べました。その結果、この戦略が存在する取引所の取引が増えました。

## 取引所の高速化

どれくらいレイテンシーが短ければ良いのかを人工市場を用いて調べました。その結果、平均的な注文の到着間隔よりもレイテンシーが短ければ、市場効率性やボラティリティなどに影響を与えないことが分かりました。

## バッチオークション

ザラバとバッチオークションのどちらが売買量が多くなるか調べたところ、ザラバの方が売買量が多くなりました。

## 忍耐強いアクティブ運用の市場効率化への貢献

忍耐強いアクティブ運用はまれに起こる、市場価格が企業価値に即した適正な価格から大きく乖離して市場が不安定になり、市場がさらに非効率になりそうなきのみに多く売買を行い、市場を効率化することに寄与していることが示されました。

## 水平株式保有

パッシブ運用の増加が企業間競争と市場価格へ与える影響を分析しました。その結果、パッシブ運用の割合がさほど大きくなくても、競争を阻害する可能性を示しました。

## 見せ玉

板上に平均的に存在する最良気配付近の指値注文数より多くの株数の見せ玉を見せれば、不公正な利益が得られるだけでなく、価格形成に悪影響を与え、株価変動が大きくなり、市場が非効率となることが分かりました。

## 新しい投資戦略が既存の投資戦略の利益を奪い取るか？

CTA・短期順張りともに、お互いがいたほうが戦略を実行するチャンスが多くなり、むしろ利益を獲得していることが分かりました。

## 分散投資規制

何らかの理由でファンダメンタル価格が急上昇した銘柄を投資信託が上限近くまで持っていた場合に、時価の上昇で上限を越さ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ことを示しました。

## レバレッジETF

リバランス取引の市場価格へ与える影響を調べました。その結果、レバレッジETFの規模が大きいほど影響は大きく、通常時の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までになると、市場価格への影響が特に顕著になることが分かりました。

## 流動性への影響

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、質を示す板の厚さといった、流動性にもいくつか種類があることが示されました。

## 取引手数料のメイカー・テイカー制(リベート制)

メイカーとなるマーケットメイク戦略が注文する指値の売り買い価格差が、平均的な最良売り・買い気配の差より小さくできるくらいリベートを提供すれば、テイカーの執行コストは低下する一方、それ以下のリベートの場合はかえって執行コストは上昇してしまうことが分かりました。



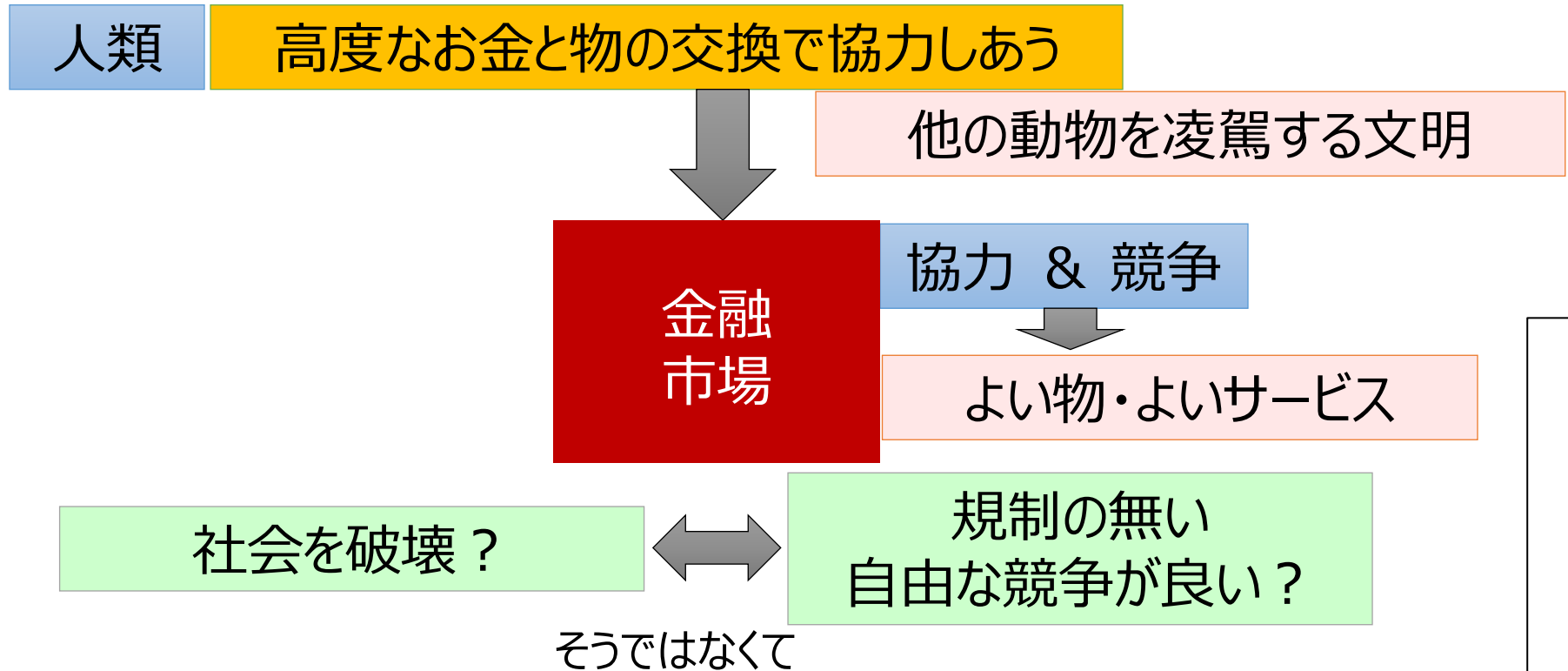
人工市場研究が示唆したこと

調査対象	文献	人工市場研究が示唆したこと
サーキットブレーカー	清水・村永(1999)	サーキットブレー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呼値	大井(2012) 水田他(2013)	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ときのみ多く売買し市場を効率化
水平株式保有	水田(2018)	競争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ーカー	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、サーキットブレー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



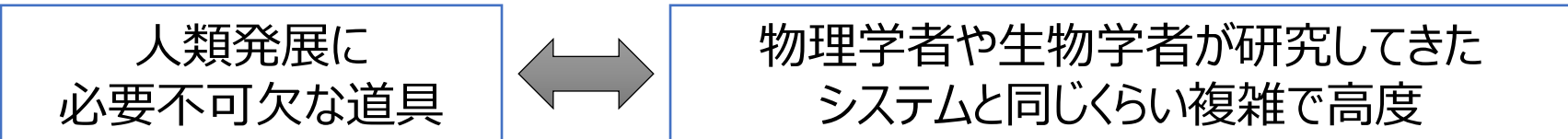


# 金融市場の制度設計の重要性



うまく設計されたときのみ、うまく機能する

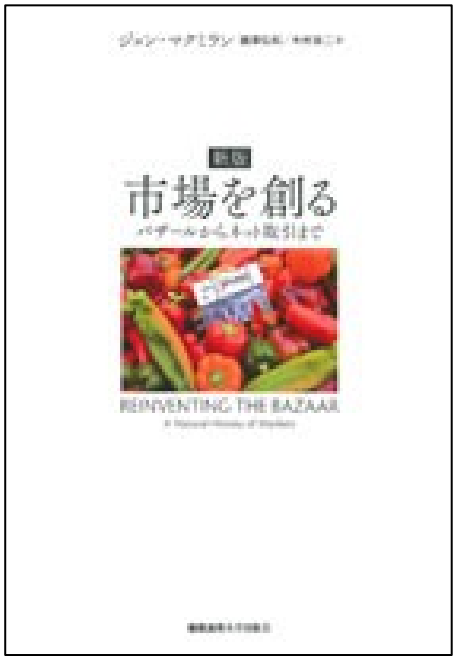
ジョン・マクミラン「市場を創る」, 2002年(原著) <https://www.keio-up.co.jp/np/isbn/9784766427837/>



市場の設計をうまく行う = 難しいけど社会発展に非常に重要

複雑系をなす、まさにシミュレーションを必要とする分野

神は細部に宿る



# 複雑系である金融市場の制度設計の難しさを示す例え話

森信親 金融庁長官(当時), 2015, "Rethinking Regulatory Reforms", the 6th Annual Pan Asian Regulatory Summit, Hong Kong  
<https://www.fsa.go.jp/common/conference/danwa/20151013/01.pdf>

和訳の参照: 永見野良蔵 金融国際審議官(当時), 2018, 日本金融学会  
<https://www.fsa.go.jp/common/conference/danwa/2018/20180526.pdf>

森信親 金融庁長官(当時), 2015年、香港での講演より  
(金融規制を強化する欧米を批判)

タイタニック号沈没の3年後\*、乗客分の救命ボートを備えることを求める国際海洋救命条約が成立して、米国は同基準を国内航路にも適用したが、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

規制を作った当初、予想していなかった副作用

\*水田修正

複雑系：予期せぬ結果を招く

140名の医者が患者を取り囲み、症状ごとに別の強い薬を注射したら、患者はどうなるだろうか

金融安定理事会など国際機関に計140の部会が設けられ、それぞれ新規制を設計したり、実施状況を監視したりしていることの比喩

部分最適でも全体にどういう影響を及ぼすか分からない

複雑系：部分の単純な足し算が全体とはならない

神は細部に宿る



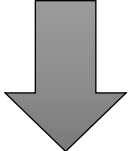
(当会の他の方の講演の様様)



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eastland\\_disaster\\_port\\_side.jpg#/media/File:Eastland\\_disaster\\_port\\_side.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eastland_disaster_port_side.jpg#/media/File:Eastland_disaster_port_side.jpg)

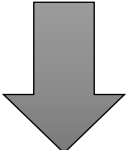
うまくない設計

レバレッジ10倍  
(借金して元手の10倍の株を買う)の  
個人投資家の取引



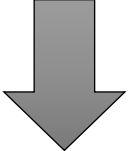
遠因・根本原因

1929年 世界大恐慌



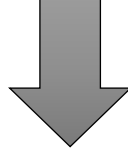
遠因・根本原因

1939年 第二次世界大戦



もし禁止していたら？

?????



もし恐慌がもっと弱かったら

?????

神は細部に宿る

金融の失敗は実社会に大きな影響を与える  
金融危機は、財政危機、実経済の危機などよりも深刻  
金融市場のうまい設計こそが世界を救うという気持ちで研究してます

# 世界を救うかもしれない金融市場のうまい設計：値幅制限

うまくない設計？

ヨーロッパのA銀行  
信用不安が広がる

現実：値幅制限(ストップ安)なし

もし値幅制限(ストップ安)があれば

よく分からないので  
とりあえず売却  
30%超の下落

売りたくても売れない  
10%程度で済む

政府より救済の用意があるとアナウンス

もう売っちゃったし  
買い戻すほどでもない

ならば売らないという判断  
何事もなく信用不安が回復

株価下落による信用不安の拡散

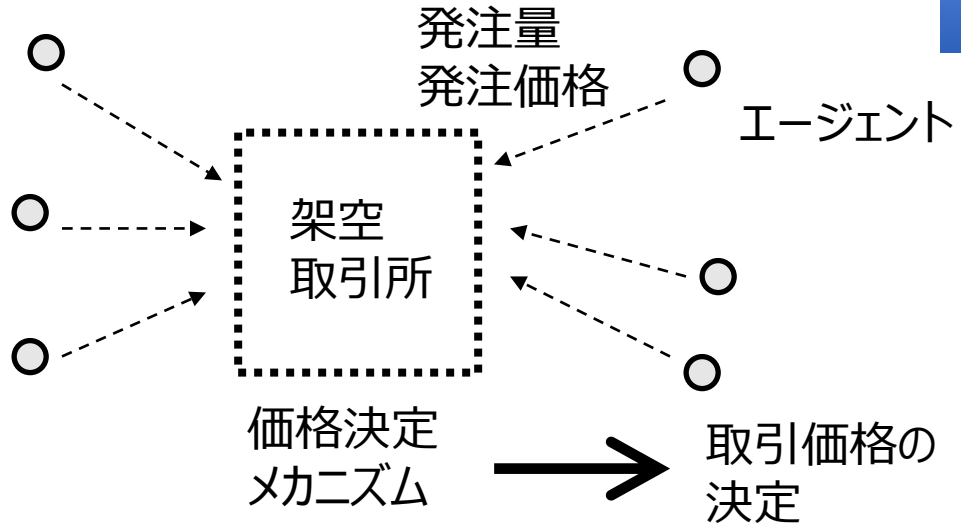
神は細部に宿る

金融危機の始まりを防げるかもしれない

エージェント

ごく一般的な投資家を再現  
特定環境のみに存在する特殊な投資家は再現しない  
↑ 過去の特定事象の再現でなく、  
規制・制度の一般的なメカニズムの理解が目的

一般的な投資家をモデル化



調査対象の制度を正確にモデル化

価格決定メカニズム

調査対象の制度・ルールを再現する必要がある

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル



# 自動取引の実験場：AIが注文データを生成(Synthetic Data for AI in Finance)

世界的な銀行大手 JP Morganがスポンサーの国際学術会議 <https://ai-finance.org/>  
ACM International Conference on AI in Finance(ICAIF) で多く発表されている

2022年からは“Synthetic Data for AI in Finance”というワークショップも  
<https://sites.google.com/view/icaif-synthetic/home>

World Agent : データの学習を行い現実的な注文データを生成  
Experimental Agent : 実験したい投資戦略をのせる  
この2体だけ : Experimentalがどのような成績になるか実験する

アルゴリズム取引の戦略評価に使おうとしている  
短い時間スケール(秒以下)なら注文状況(板の状況)に再現性ある

- ↑ 人間の手で行えないので機械化されている時間スケール
- ・ 高速取引 : 高速であることを生かして利益を狙う(高速化のため戦略は単純化)
- ・ 執行アルゴリズム取引 : 手の内を知られないように注文を自動的に小口に分ける

現在の注文環境であり得そうな注文を生成する  
→ 全く経験のない環境は不得 → 制度設計には向かない  
→ 投資家種別ごとの相互作用によるメカニズムなどは分析できない

良くも悪くもエージェントに全く前提を置かず  
大量のデータから現実的な注文を推定して生成

まだまだ実用化までは遠い感じも進歩は早い

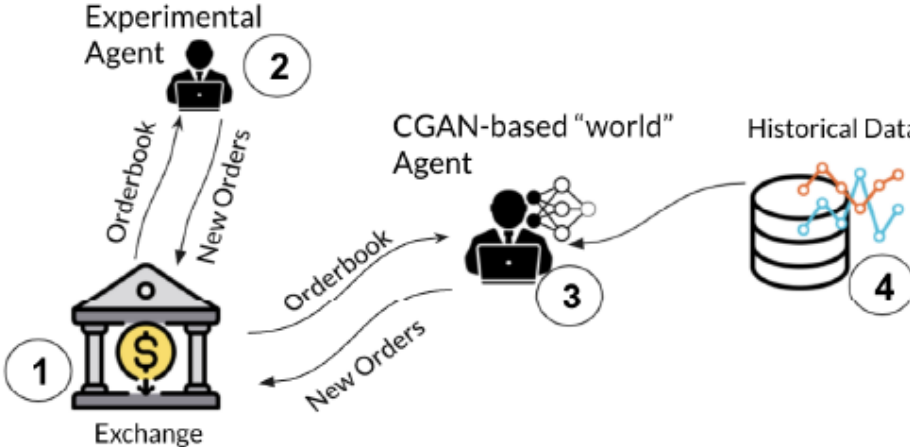


Figure 2: CGAN-Based Simulation Framework. Coletta 2021 <https://doi.org/10.1145/3490354.3494411>

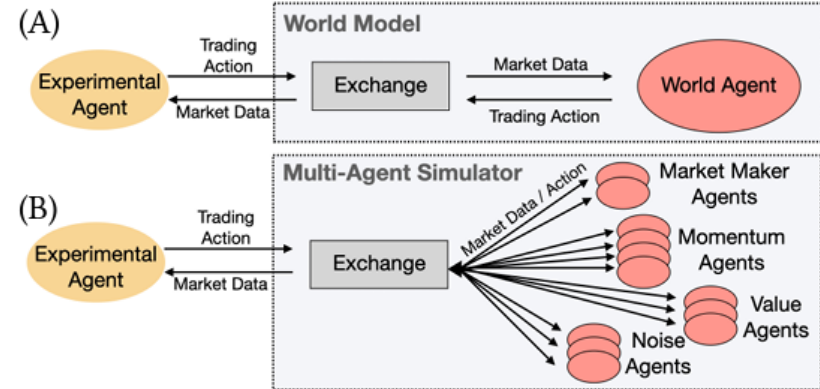


Figure 1: World Model (A) vs Multi-Agent (B) Simulator. Coletta 2022 <https://doi.org/10.1145/3533271.3561753> 39

# 執行アルゴリズム取引を実験する

ICAIF 2023(2023年11月にニューヨークとオンラインで開催)で発表された最新の研究

執行アルゴリズム(大口の注文を自動的に小分けにして発注)のシミュレーション：灰色の部分買い注文を出した領域

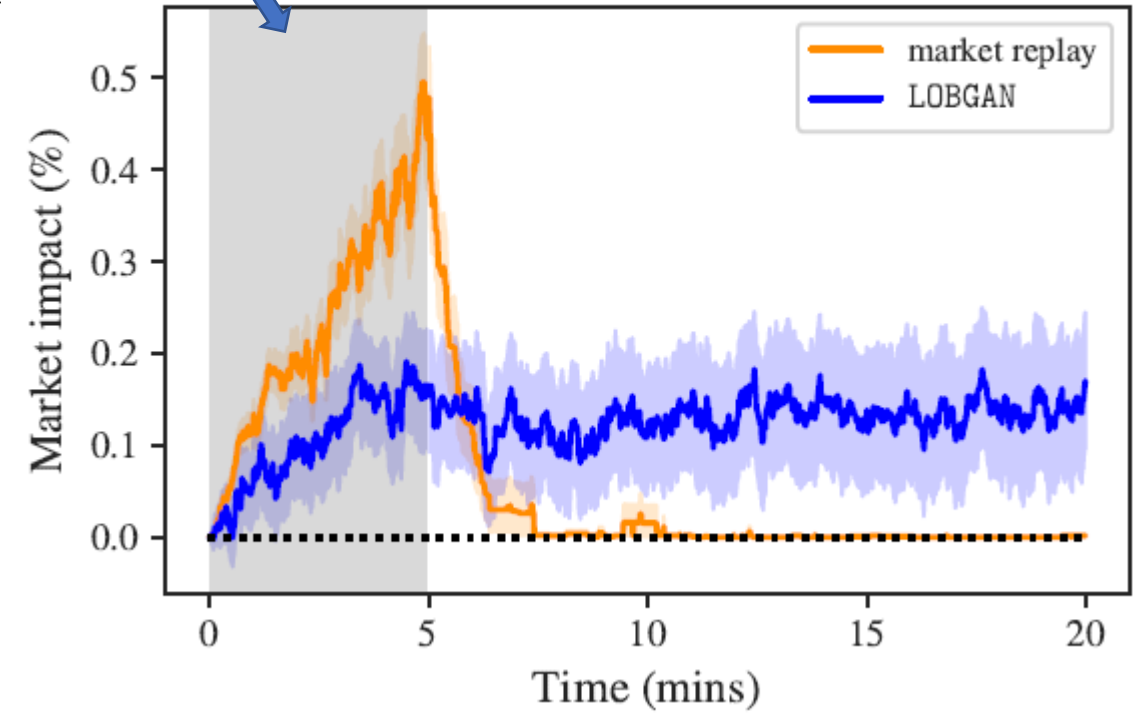
2022よりも格段に慎重で精密な検証をしている  
恒久的に残るインパクトを再現  
指値注文もインパクトがあることを示唆

とはいえ何が正解かわからない問題のため  
モデルの精度評価は簡単ではない

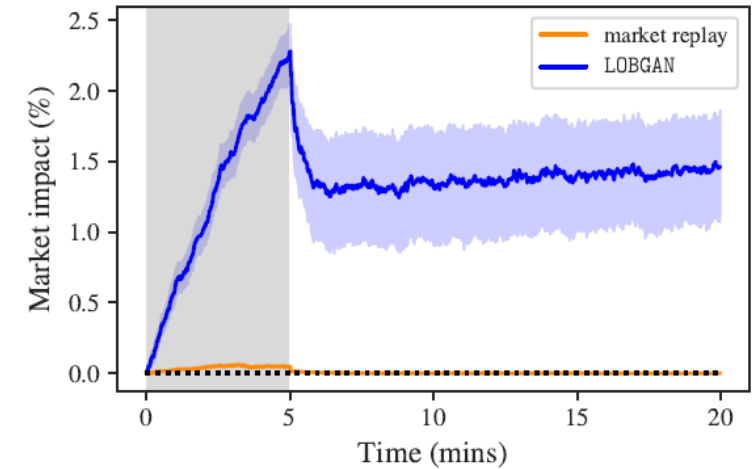
金融における合成(生成)データのレビュー論文

Potluru et al. 2023 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00081>

執行アルゴ(買い) 成行注文の場合 青(LOBGAN)が提案手法  
発動期間 The price impact of market orders



The price impact of limit orders



指値注文の場合

# AIが勝手に不正取引をしたら法的責任は？

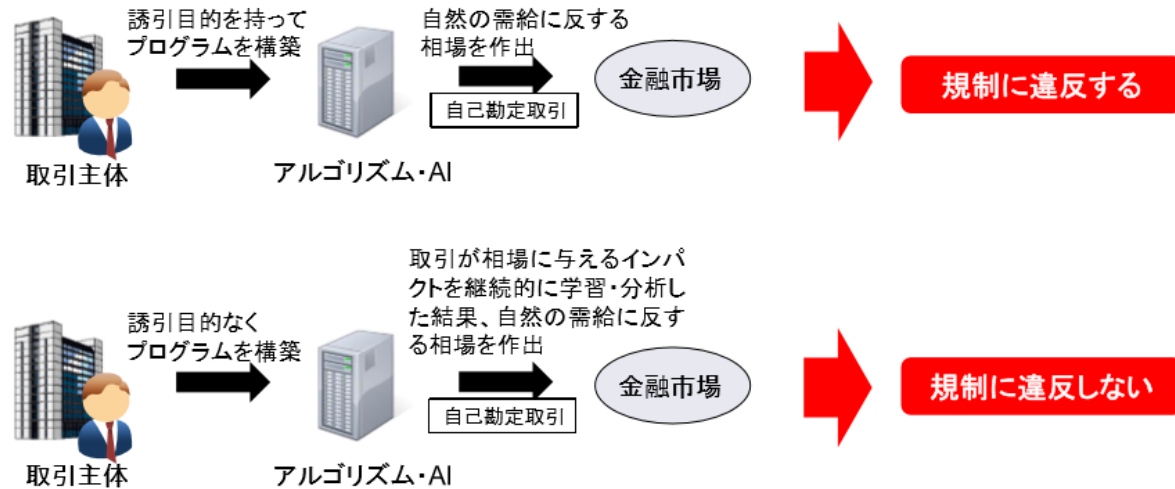
(参考文献)

水田孝信 「人工知能が不正取引を行ったら誰の責任か？」, 2020  
スパークス・アセット・マネジメント

<https://www.sparx.co.jp/report/special/3071.html>

6. アルゴリズム・AIの利用と相場操縦規制

## (2) アルゴリズム・AI利用時の問題: 誘引目的の欠如



- 取引が相場に与えるインパクトを継続的に学習・分析するアルゴリズム・AIを利用するような場合、自然の需給に反する相場を作出する取引が行われたとしても、取引主体には誘引目的がないことが考えられる。
- 人間であれば誘引目的が推認されるような取引態様であっても、アルゴリズム・AIには誘引目的がないために規制対象とならないとすると、市場の公正性が害されないか？

12

第4回金融資本市場のあり方に関する産官学フォーラム  
(2019/2/22)基調報告(3)  
<http://www.pp.u-tokyo.ac.jp/CMPP/forum/2019-02-22/>

日本銀行金融研究所「アルゴリズム・AIの利用を巡る法律問題研究会」報告書 (2018/9/11)  
[https://www.boj.or.jp/announcements/release\\_2018/rel180911a.htm/](https://www.boj.or.jp/announcements/release_2018/rel180911a.htm/)

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 —

- AIトレーダーが勝手に相場操縦をするかどうかをコンピュータシミュレーションで実験 → する場面があることが分かった
- ここでいう“勝手に”とは、AIトレーダーの作成者・使用者が、相場操縦するつもりがなかったとしても、AIトレーダーが学習の中で、相場操縦を最適な取引戦略として見つけ出し、実行すること
- 現在の日本の法律では（アメリカでも同様）、AIトレーダーの作成者・使用者が相場操縦を意図していない場合、刑事責任を問えない
- **このままだと、「AIが勝手にやった」と言い逃れする人が現れるため、規制を強化する必要がある、と結論付けた**

予稿 [https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2020.0\\_2L5GS1305](https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2020.0_2L5GS1305)  
プレゼン資料 <https://mizutakanobu.com/202006.pdf>  
プレゼン動画 <https://youtu.be/tgaeTA2MfDg>

AIを使った自動取引は自律性を持ち得るのか、市場にどんな問題が発生しうるのか、現在の法体系の問題点などを論じた論文  
Azzutti et al., Machine Learning, Market Manipulation and Collusion on Capital Markets: Why the 'Black Box' matters  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3788872>

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

投資家だけでなく、企業、銀行、中央銀行、政府、労働市場など、さまざまな市場をモデル化し、結合することで、財政政策、金融政策、経済・金融危機などの分析を行うことを目標

大きな期待！！

NATUREやSCIENCEに、人工市場に期待をかける記事

Farmer and Foley (2009), Nature <https://www.nature.com/articles/460685a>  
Battiston et al. (2016), Science <https://science.sciencemag.org/content/351/6275/818>

ECB総裁講演でも取り上げられる

ヨーロッパ中央銀行(ECB)総裁だったトリシェが効率的市場仮説に基づく金融理論が、金融危機中の政策決定に関してほとんど役に立たなかったと述べ、エージェントシミュレーション(広い意味で人工市場)などが金融政策に貢献することを期待していると述べた講演

<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2010/html/sp101118.en.html>

これまでの経済学ではリーマンショックを分析・対応できなかったという批判  
→ 人工市場 (エージェント・ベースド・モデル) ならできるとある・期待

標準的な経済学を否定し、人工市場を絶賛

金融危機は人工市場でしか扱えない！  
という勢いだが、ちょっと言いすぎ

リチャード・ブックスターバー  
投資銀行や大手ヘッジファンドでリスク管理の責任者を務めたのち、米国財務省を経て、現在はカリフォルニア大学で教鞭をとっている。『市場リスク——暴落は必然か』の著者。



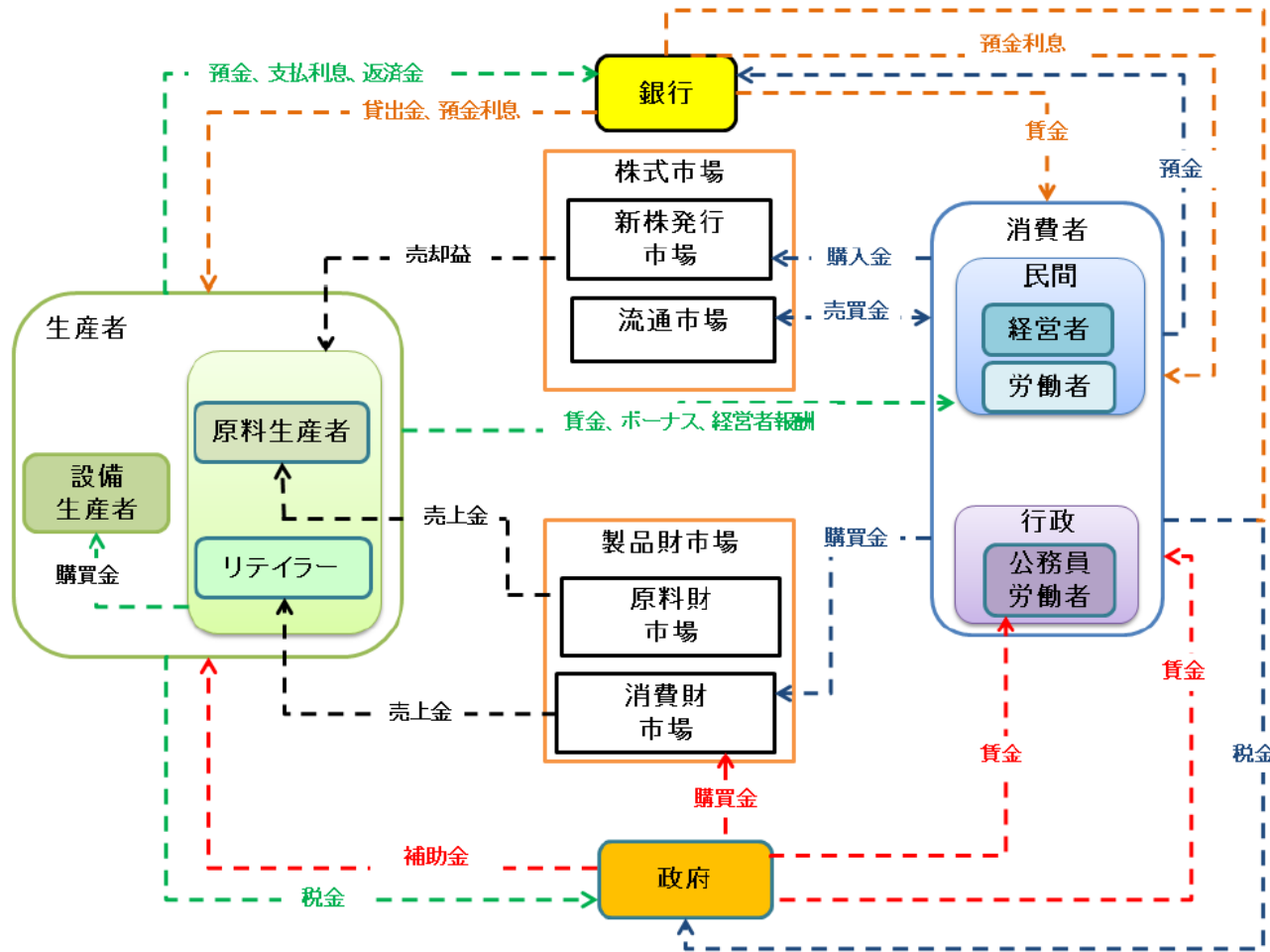
まだまだ研究者が少ない

経済理論の終焉 金融危機はこうして起こる, 2019/1  
<https://www.panrolling.com/books/wb/wb273.html>

前述までの金融市場だけのモデルに比べ需要はさらに大きいものの、困難も大きいモデルの規模が大きくなり、実務家が試したいことを試せるようになるまでの道のりが、さらに長い



# モデルの例



財政政策や金融政策、金融危機のメカニズムなどを議論するため、社会経済全体をモデル化した人工市場、人工社会、マクロ経済シミュレーターとも

例えば、この研究は、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

これらの研究の発展により、金融政策がシミュレーション結果を参考にしながら決められたり、国政選挙では各政党が財政政策のシミュレーション結果を出し合って論争をしたりする日は近いかもしれない

高島幸成、"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、2013  
<http://id.nii.ac.jp/1196/00000044/>

Kosei Takashima, Isao Yagi, "Model Building and Description Using the Agent-based Computational Economics Framework for Accounting", Journal of Information Processing, Elsevier, 2024,  
<https://doi.org/10.2197/ipsjip.32.10>

レビューとして、Gallegati et. al., "Introduction to Agent-Based Economics", Elsevier, 2017,  
<https://doi.org/10.1016/C2015-0-00736-5>

Ogibayashi, "Model Structure of Agent-Based Artificial Economic System Responsible for Reproducing Fundamental Economic Behavior of Goods Market", Springer Nature, 2022,  
[https://doi.org/10.1007/978-981-19-0937-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0937-5_4)



## 人工市場・人工経済

- ・メカニズムの解明  
特に複雑系の中でまれに起こる急激な現象
- ・人類が行ったことがない政策やルールの検証  
コロンブスのたまご的な発見  
調査すべき項目自体の発見



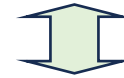
## ・現実世界の予測は苦手

金融危機は全く同じものは起きないが  
本質的には似たようなメカニズムを内包していることが多い  
→ 予想の自己成就など

エージェントのパラメータ調整に機械学習が使われる場合がある

## 機械学習を用いたマクロモデル

- ・高い予測精度



- ・ブラックボックス化しがち
- ・メカニズム解明は苦手
- ・まれに起こる急激な現象の予測は難しい

塩野剛志「深層学習とマクロ経済理論(DSGE)の連携」

AI・ビッグデータ経済モデル研究会 第7回

<https://www.jcer.or.jp/policy-proposals/20210624-2.html>

両方を同時に追求するのは無理

目的に応じてモデルは使い分けるべき ⇔ 最高の、統一的な、ベースとしての、モデルはダメ  
シェリングモデルは現実ではありえないモデルだが、政治学に多大な貢献

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

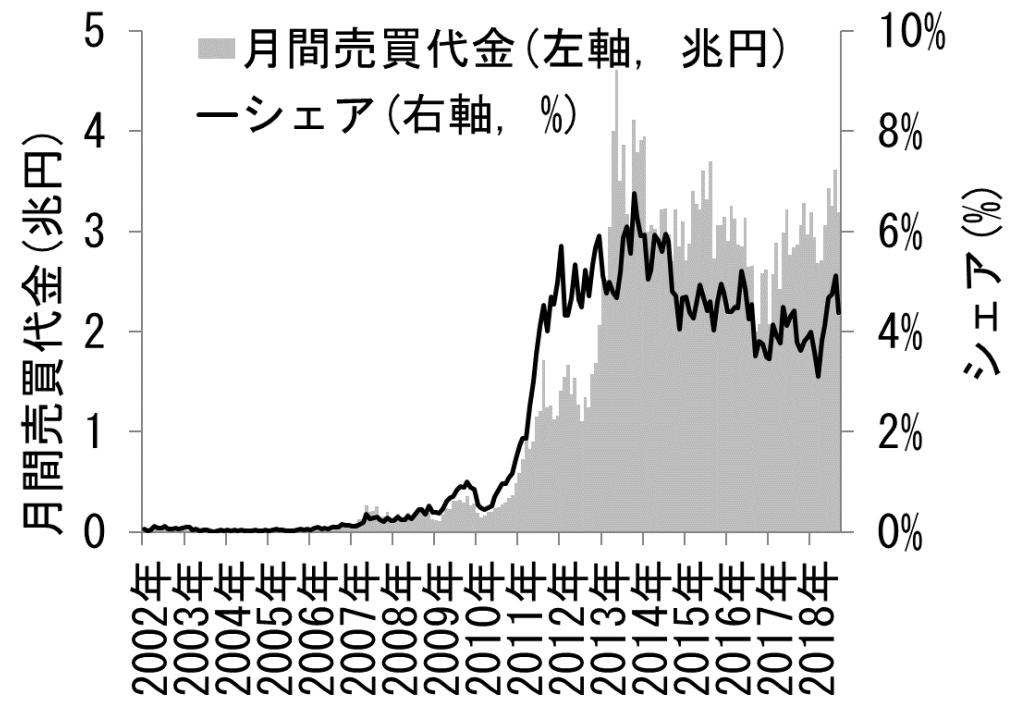
(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# 伝統的取引所と私設取引所(PTS)の競争

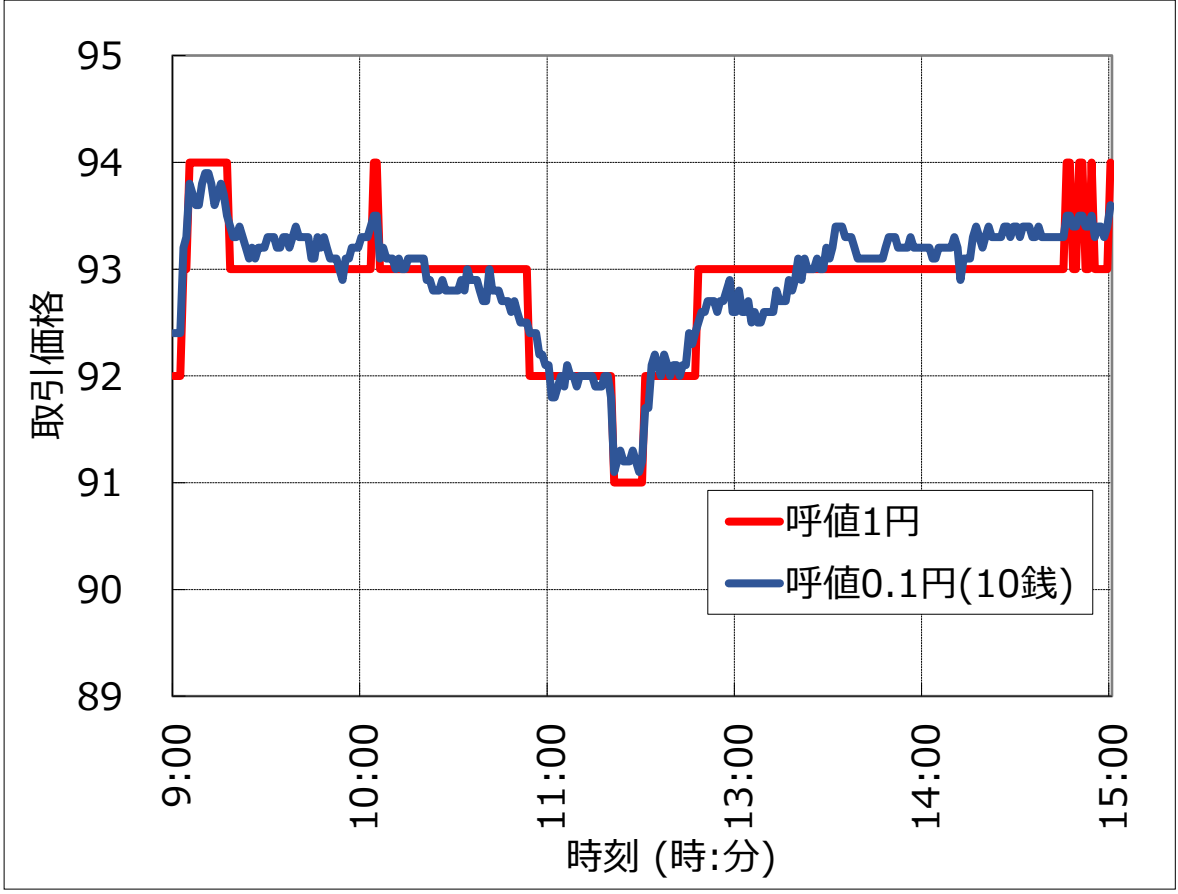
証券会社などが独自運営する私設取引所(PTS)：ジャパンネクスト証券、Cboeジャパン、大阪デジタルエクスチェンジ

- 東証の経営にとっても無視できない売買代金シェア
- ↑ 東証もPTSも売買代金に比例した手数料が主な売上



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, 2020/9  
<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339028225/>

2011年ころからPTSがシェアを奪ってきた



呼値が大きすぎると騰落率が比較的大きい  
⇒ 投資家が困る ⇒ 他の取引所で取引 ⇒ 取引量シェアが移る

PTSとの競争は“呼値”が重要な要素の1つ

# 呼値縮小に関する共同研究の推移

2011～2012 東京証券取引所の一部の方々が  
人工知能学会ファイナンスにおける人工知能応用研究会(SIG-FIN)に出入り

2012/12 東京証券取引所と東京大学工学系研究科が共同研究開始を発表

2013/1/30 J P X (日本取引所グループ) ワーキングペーパー Vol.2 (2013年1月30日)  
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  
<https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>  
共同研究第一弾として社長記者会見でも触れられる

2013/3/19 人工知能学会ファイナンスにおける人工知能応用研究会  
東京証券取引所で開催、招待講演にて上記研究を発表

2013/3/29 JPX社長記者会見：呼値を細かくすることを発表  
日経新聞朝刊の一面記事に

2014/7/22 一部の銘柄で10銭(0.1円)刻みの注文が可能に

2015/9/24 ごく一部の銘柄で呼値を拡大



The screenshot shows the JPX Working Paper website. The header includes navigation links for JPX, research, and working papers, along with language options (English, 中文) and a search bar. The main content area is titled "JPXワーキング・ペーパー" and contains a list of papers. The table below summarizes the visible papers.

	発行日	タイトル	全文	要約版
Vol. 29	2019/04/01	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	📄	📄
Vol. 28	2019/04/01	株価分析に基づく投資家行動の解析	-	-
Vol. 27	2019/02/25	株式とETFの裁定取引にかかるコストと流動性の関係 - 人工市場によるシミュレーション分析 -	📄	📄

価格決定メカニズム:現実と同じように複雑  
 調査対象の制度やルールが再現する必要がある

正確なモデル化

continuous double auction (ザラバ)

売り 注文数量	注文 価格	買い 注文数量
10	103	
30	102	
	101	
50	100	
130	99	
	98	150
	97	
	96	70

ここに売り注文を入れると  
即座に売買成立

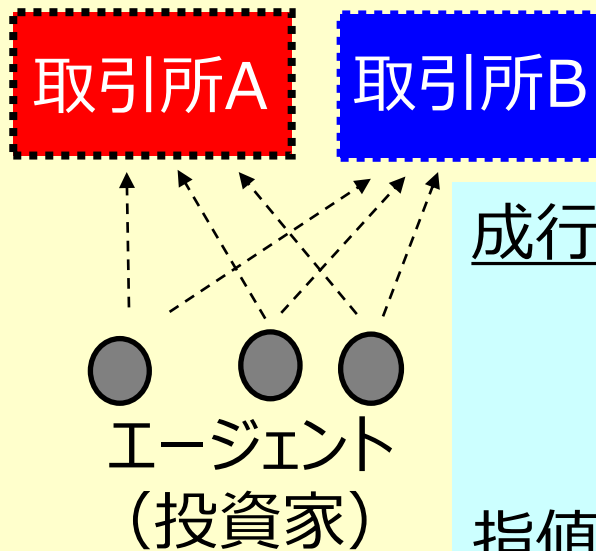
ここに買い注文を入れると  
即座に売買成立

対当する注文があると即座に売買成立

⇔簡略なモデル

価格変化  $\propto$  (買い注文量 - 売り注文量)

呼値のみ異なる取引所 A、B で  
どのように出来高シェアが移り変わるかを分析



成行注文(即座に成立する注文) :  
有利な価格で  
売買できる市場を選択

指値注文(即座には成立しない注文) :  
各市場の過去の取引量シェアに  
比例して配分

取引所 A : 初期の取引量シェア 90%、呼値大きい  
取引所 B : 初期の取引量シェア 10%、呼値小さい



## どちらの取引所に注文をだすか？

取引所 A			取引所 B		
売り	価格	買い	売り	価格	買い
84	101		1	99.2	
176	100		2	99.1	
	99	204		99.0	3
	98	77		98.8	1

- (1) 98円の買い：取引量シェアに応じた確率でAかBを決める
- (2) 99.1円の買い：取引所 B ← 99.1円で即座に買えるため
- (3) 100円の買い：取引所 B ← 99.1円で即座に買えるため

(2)、(3)によりシェアを伸ばすことが可能

# エージェント

1000体

[Chiarella2002]を発展  
↑ ゼラバかつstylized factを再現する中で  
可能な限りシンプルなエージェントモデル

統計的性質を再現するために  
最小限必要な項

テクニカル(順張り)

j: エージェント番号(順番に注文)  
t: 時刻(ティック時刻)

予想リターン

$$r_{e,j}^t = \frac{1}{\sum_i w_{i,j}} \left( w_{1,j} \log \frac{P_f}{P^{t-1}} + w_{2,j} \log \frac{P^{t-1}}{P^{t-\tau_j}} + w_{3,j} \varepsilon_j^t \right)$$

エージェントの  
パラメータ

$w_{i,j}$   $\tau_j$

一様乱数で決定  
途中で変わらない

$w_{i,j}$   $i=1,3: 0\sim 1$   
 $i=2: 0\sim 10$

$\tau_j$   $0\sim 1000$

ファンダメンタル

$P_f$  ファンダメンタル価格  
10000 = 定数  
 $P^t$  現在の取引価格

取引価格帯を定めるために  
便宜上加えた項

ノイズ

$\varepsilon_j^t$

正規乱数  
平均0  
 $\sigma=3\%$

エージェントの多様性確保と  
シミュレーションの安定性のため

予想価格  $P_{e,j}^t = P^t \exp(r_{e,j}^t)$

# ノーマルエージェントのファンダメンタル戦略とテクニカル戦略

## ファンダメンタル戦略

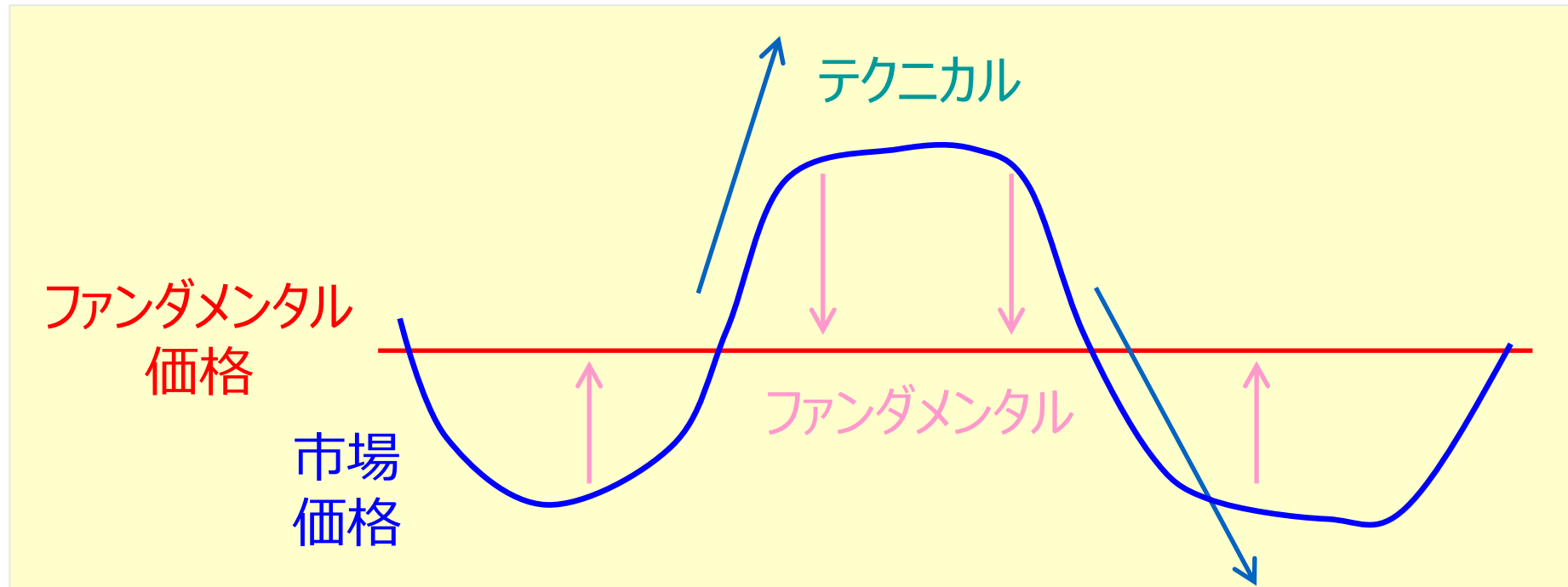
ファンダメンタル価格  $>$  市場価格  $\Rightarrow$  上がると予想

ファンダメンタル価格  $<$  市場価格  $\Rightarrow$  下がると予想

## テクニカル戦略

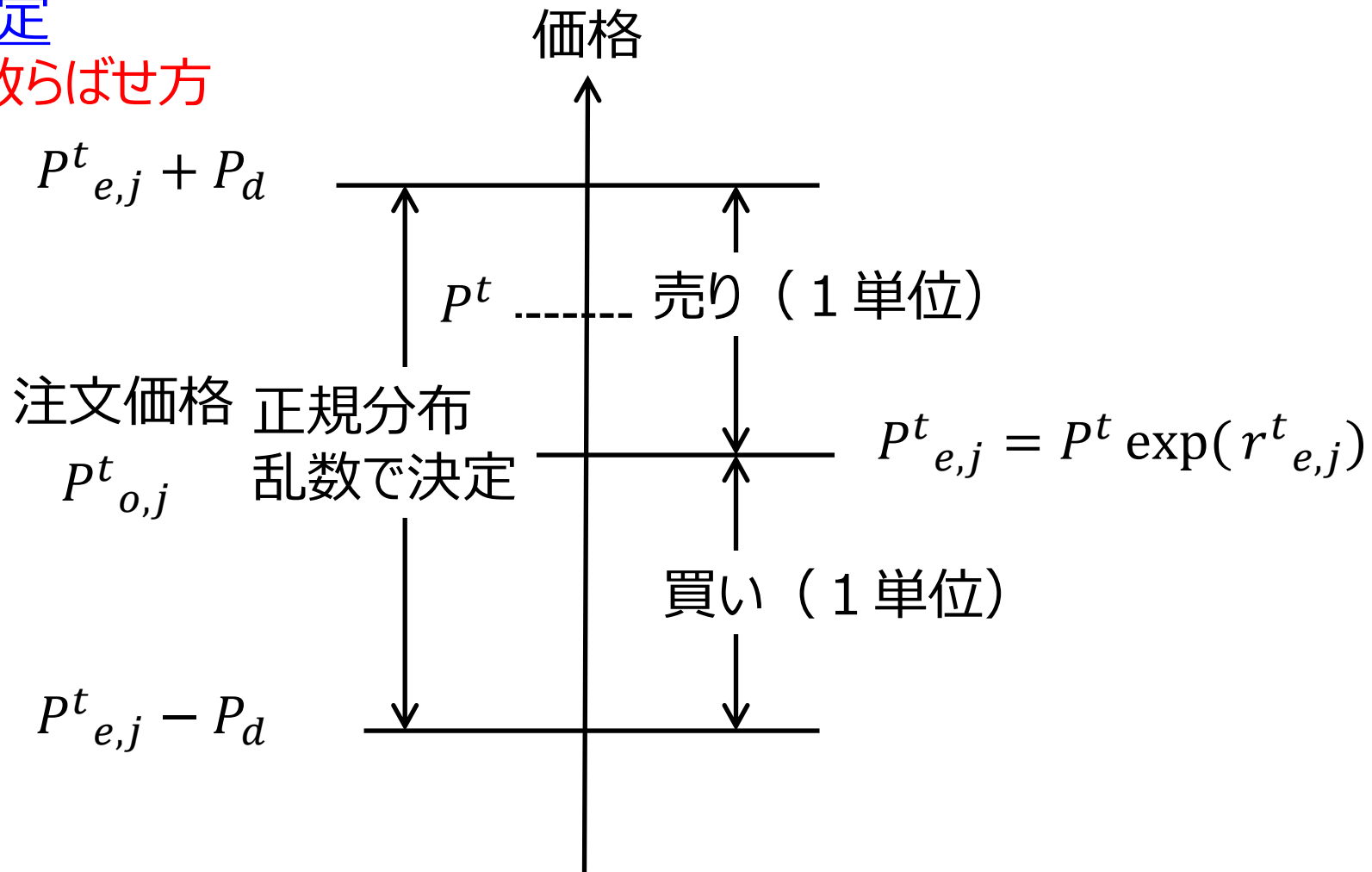
過去リターン  $>$  0  $\Rightarrow$  上がると予想

過去リターン  $<$  0  $\Rightarrow$  下がると予想



## 売り買いの決定

### 注文価格の散らばせ方

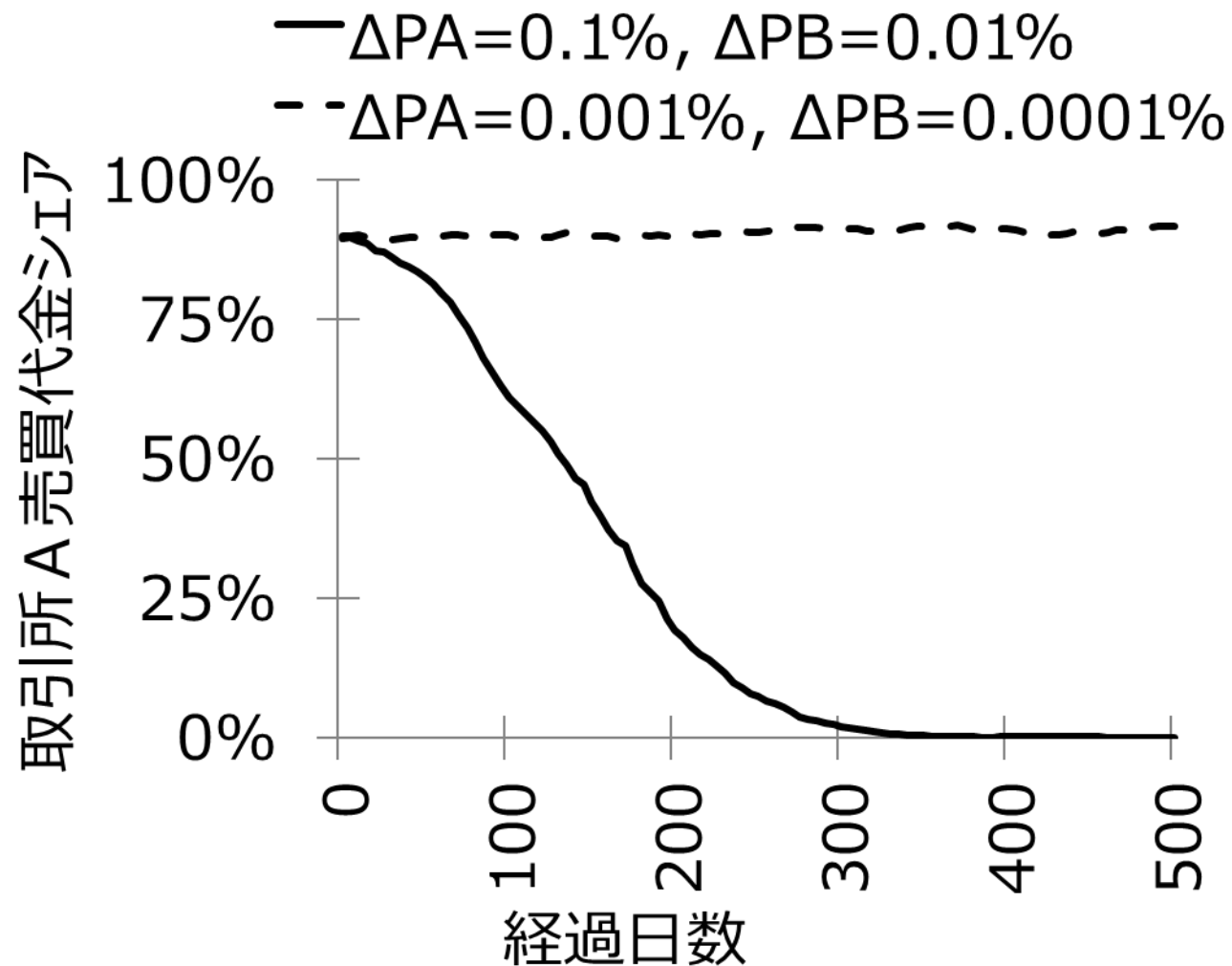


実際のザラバの注文状況を再現するため

⇒ 多くの待機している注文(指値注文)が存在

↑ 高い価格で多くの売り注文、安い価格で多くの買い注文

## 呼値に差がある時：通常の絶対水準の場合と、小さすぎる場合

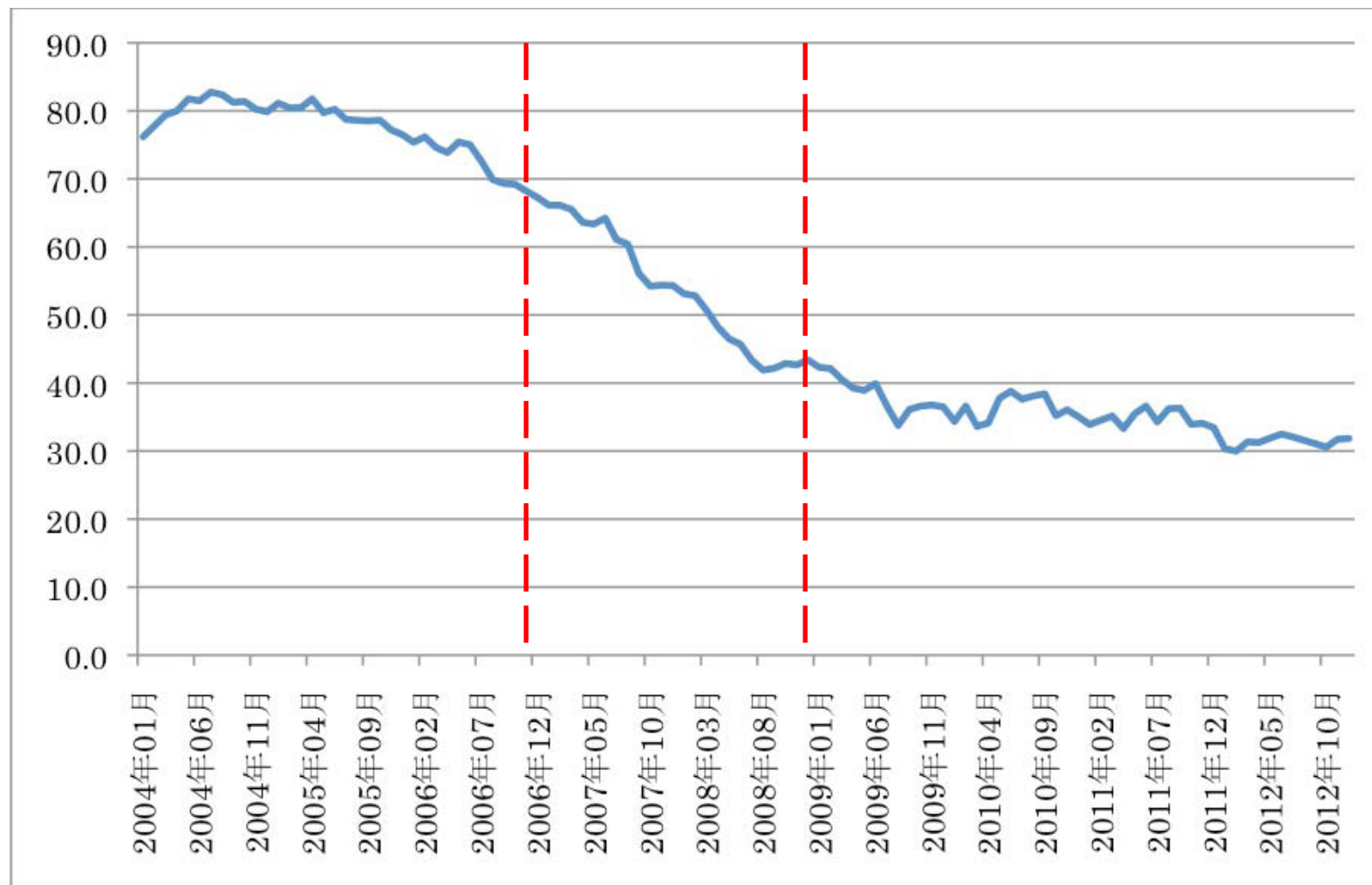


呼値に差があるとシェアが移り変わる

横軸は2年間 ⇔ 米国で起きた時間スケールに近い

ただし、呼値の絶対水準が小さいと、呼値に差があってもシェアを奪えない

# 米国におけるニューヨーク証券取引所のシェア



清水葉子, 金融庁金融研究センター ディスカッションペーパー 2013年5月

<https://www.fsa.go.jp/frtc/seika/discussion/2013/01.pdf>

2年程度で支配的地位から陥落



# 500営業日後の取引所Aの取引量シェア

取引所A 500営業日後シェア		取引所B 呼値 $\Delta PB$										
		0.0001%	0.0002%	0.0005%	0.001%	0.002%	0.005%	0.01%	0.02%	0.05%	0.1%	0.2%
取引所A 呼値 $\Delta PA$	0.0001%	90%	90%	91%	91%	92%	94%	97%	99%	100%	100%	100%
	0.0002%	90%	90%	90%	91%	91%	94%	97%	99%	100%	100%	100%
	0.0005%	89%	90%	91%	91%	92%	94%	96%	99%	100%	100%	100%
	0.001%	89%	89%	90%	90%	92%	94%	97%	99%	100%	100%	100%
	0.002%	87%	88%	89%	89%	91%	93%	97%	99%	100%	100%	100%
	0.005%	84%	85%	85%	84%	87%	92%	96%	99%	100%	100%	100%
	0.01%	75%	76%	76%	77%	78%	83%	92%	98%	100%	100%	100%
	0.02%	53%	52%	53%	54%	54%	59%	70%	93%	100%	100%	100%
	0.05%	5%	5%	4%	5%	5%	5%	6%	23%	93%	100%	100%
	0.1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	94%	100%
0.2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	96%	

取引場間シェアが  
移り変わらない条件

$$\Delta P_B > \Delta P_A$$

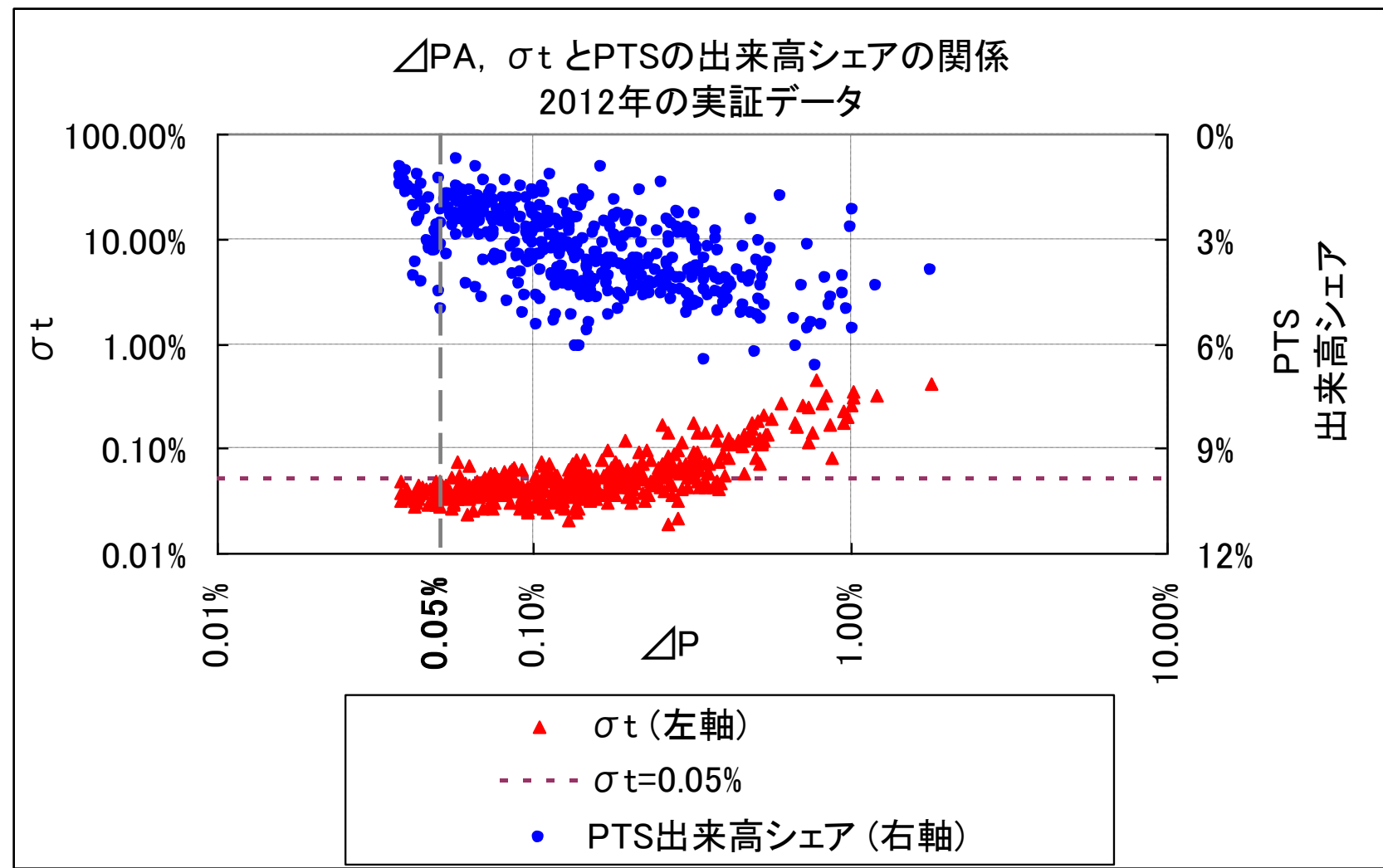
or

$$\bar{\sigma}_t > \Delta P_A$$

$$\bar{\sigma}_t = 0.05\%$$

騰落率の標準偏差：ボラティリティ

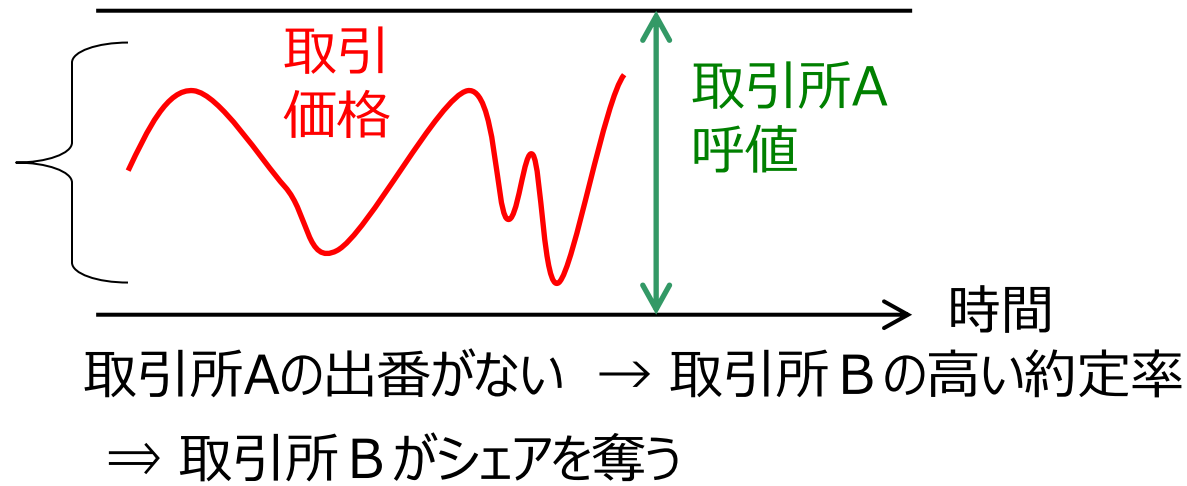
キーパラメーター



呼値により価格形成が阻害されている領域の発見  
↑取引所制定の制度で価格形成を規定しているという問題発見  
価格形成の阻害と出来高シェアの関係性を発見

$$\bar{\sigma}_t < \Delta P_A$$

取引場A  
で取引でき  
ない領域



$$\bar{\sigma}_t > \Delta P_A$$

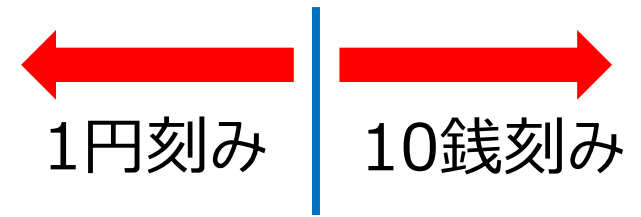
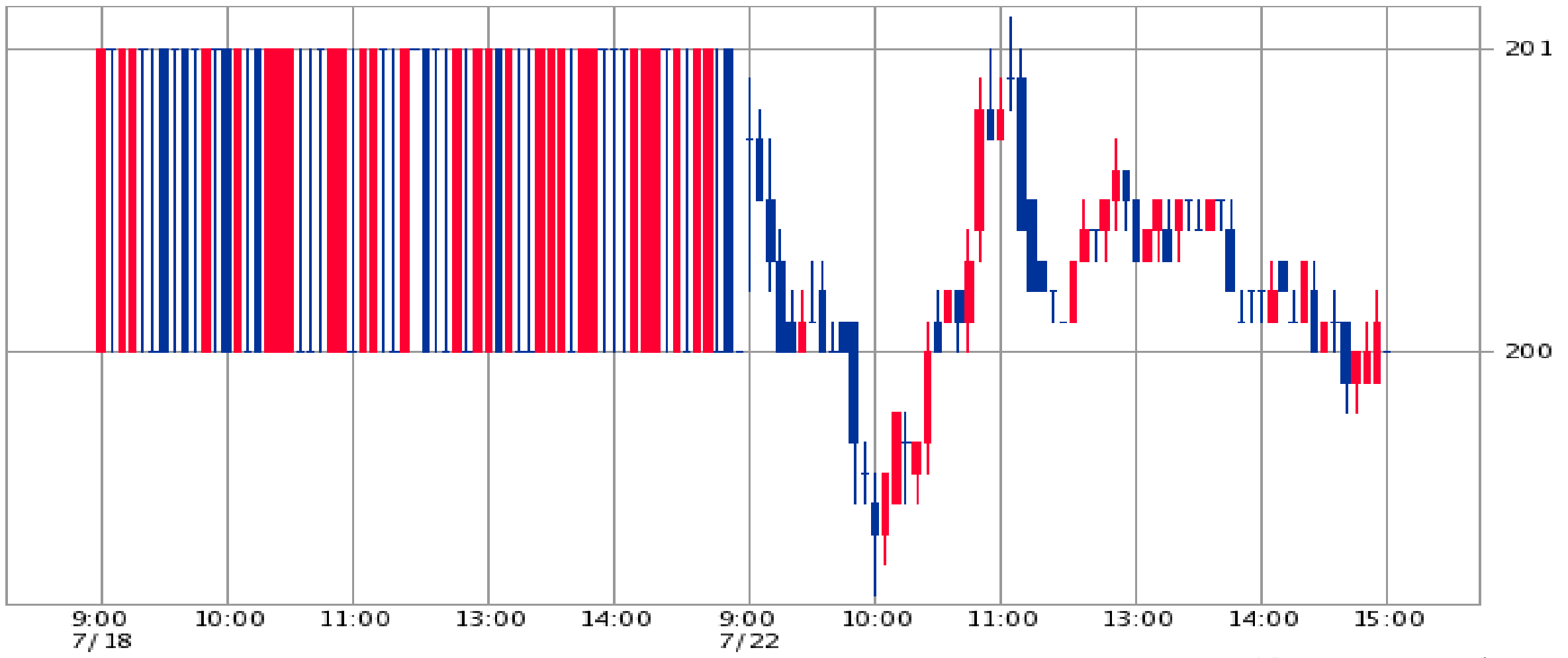
取引所B  
の必要性  
が薄い



## 現実の金融市場制度への示唆

- 呼値が大きいままだとPTSに売買代金シェアを奪われる、その期間は2年程度
- あまりにも小さい呼値の競争は意味がない可能性
- 呼値が大きすぎると価格の変動幅が大きくなる可能性  
↑ **取引所の制度で価格の変動幅に影響を与えるべきでない**
- 大きすぎる、小さすぎる、の具体的な水準(数値)を示唆
- **取引所の制度設計に参考にされた**(JPXワーキングペーパーとしても掲載)

# 2014年7月22日と18日（前営業日）



# その後の研究の進展

さらに単純化したモデルにより解析的な分析がなされ、  
 統合的な結果が得られた

- ← 呼値の比ではなく差がシェアの  
 移る速さを決める
- ← 呼値の過当競争は意味がない

CSP16

IOP Publishing

Journal of Physics: Conference Series 750 (2016) 012019

doi:10.1088/1742-6596/750/1/012019

Market A is chosen at a probability 1 in case of (i) and 1/2 in case of (iii). Likewise, market B is chosen at a probability 1 in case of (ii) and 1/2 in case of (iii) Therefore, share of market A and B should be

$$\begin{aligned}
 S_A^* &= 1 \cdot P_1' + \frac{1}{2} P_3' \\
 &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(a-b), \tag{4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_B^* &= 1 \cdot P_2' + \frac{1}{2} P_3' \\
 &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(b-a). \tag{5}
 \end{aligned}$$

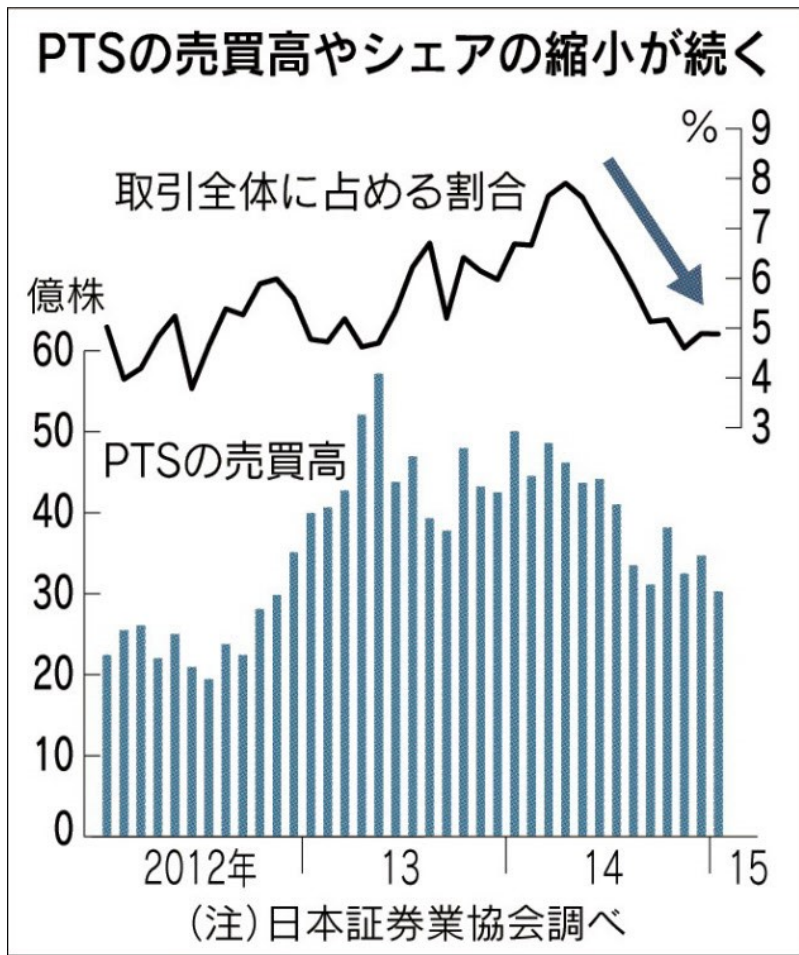
Therefore, it is found that share is shifted from a market with a larger tick size to a market with a smaller tick size. Moreover, the size of share-shift is determined by difference between tick sizes, not ratio between tick sizes.

株式の私設取引、売買シェア低下東証の刻み値縮小が響く  
 差別化難しく投資家離れ 2015/2/27 日本経済新聞

<https://www.nikkei.com/article/DGKKZO83727450W5A220C1DTA000/>

その後、社会はどうなったか、、、

- Nagumo, S. et. al.(2016), The effect of tick size on trading volume share in three competing stock markets, Journal of Physics: Conference Series, vol. 750,no.1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/750/1/012019>
- Nagumo, S. et. al.(2017), The Effect of Tick Size on Trading Volume Share in Two Competing Stock Markets, Journal of the Physical Society of Japan, vol. 86,no.1. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.014801>



# 呼値が大きすぎる・小さすぎる

## ティック・サイズ 0.01%

売気配株数	気配値	買気配株数
--	成行	--
100	43,070	
200	43,065	
100	43,060	
100	43,050	
100	43,035	
700	43,030	
100	43,025	
200	43,010	
	42,980	100
	42,970	100
	42,965	200
	42,960	100
	42,955	500
	42,950	300
	42,945	200
	42,940	200

0.07%

0.3%

7.4%

## ティック・サイズ 0.5%

売気配株数	気配値	買気配株数
--	成行	--
8,403,000	209	
9,273,300	208	
6,752,900	207	
7,283,900	206	
9,032,500	205	
13,942,600	204	
18,925,300	203	
16,667,700	202	
	201	20,197,400
	200	33,796,900
	199	18,616,100
	198	21,486,200
	197	9,092,000
	196	6,601,200
	195	6,643,200
	194	2,492,000

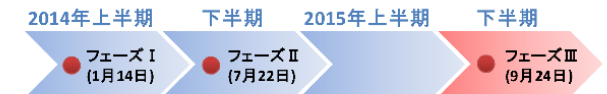
0.5%

株価		呼値の刻み	ティックサイズ	
最小	最大		最小	最大
1	1,000	0.1	0.01%	10.00%
1,001	5,000	0.5	0.01%	0.05%
5,001	10,000	1	0.01%	0.02%
10,001	50,000	5	0.01%	0.05%
50,001	100,000	10	0.01%	0.02%
100,001	500,000	50	0.01%	0.05%
500,001	1,000,000	100	0.01%	0.02%
1,000,001	5,000,000	500	0.01%	0.05%
5,000,001	10,000,000	1,000	0.01%	0.02%
10,000,001	50,000,000	5,000	0.01%	0.05%
50,000,001		10,000		0.02%

一部の価格帯で戻すことに



### 呼値の単位の適正化フェーズⅢの対応内容



<フェーズⅢ対応内容>

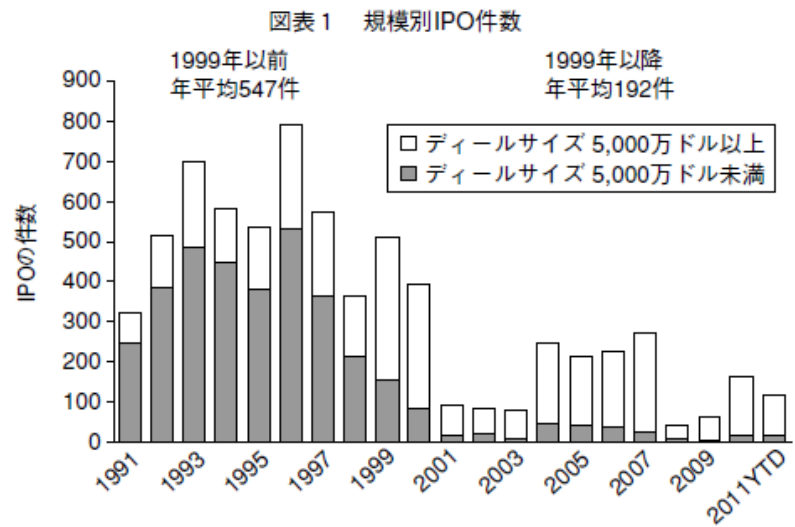
銘柄	細かい呼値の単位の適用範囲は引き続きTOPIX100構成銘柄のみ ※現状から変更なし
呼値の単位	TOPIX100構成銘柄について、3,000-5,000円を0.5円から1円に変更 ※上の桁における同等の価格帯も同様に修正

<呼値の単位>

価格帯(円)		通常銘柄	TOPIX100構成銘柄 フェーズⅠ	TOPIX100構成銘柄 フェーズⅡ	TOPIX100構成銘柄 フェーズⅢ
超	以下				
	1,000	1	1	0.1	0.1
1,000	3,000	1	1	0.5	0.5
3,000	5,000	5	1	0.5	1
5,000	10,000	10	1	1	1
10,000	30,000	10	5	5	5
30,000	50,000	50	5	5	10
50,000	100,000	100	10	10	10



## 新規上場企業が少ない原因のひとつ：呼値が小さすぎる？



図表2 ティックサイズ拡大議論の経緯

2011.10	IPO Task Forceが米財務省にディシマライゼーションとIPO危機に関する問題提起レポートを提出
2012.4	JOBS Act (Jumpstart Our Business Startups Act) 成立 ディシマライゼーションと中小型銘柄のIPOとの関係についてSECが議会報告を行うことを義務付け
2012.7	SECによる議会報告 "Report to Congress on Decimalization"
2013.2	SEC Decimalization Roundtable開催 小型株のティックサイズを拡大することにおおむね賛成の意見多し
2013.3	SEC "Advisory Commission on Small and Emerging Companies"
2013.11	Small Cap Liquidity Reform Act H.R.3448成立。
2014.6	FINRAと取引所に対して12ヶ月のパイロットプログラム実施を命令。 "Order Directing the Exchanges and the Financial Industry Regulatory Authority To Submit a Tick Size Pilot Plan"
2014.8	FINRAと取引所がパイロットプログラムのためのルール改正をSECへ提出
2016.10	ティックサイズ拡大のパイロットプログラム実施 (2年間)

図表3 試験プログラムの実証分析の概要

- ①ティックサイズを拡大したグループは、スプレッドの拡大、ボラティリティの増加、価格効率の低下が見られ、全体として市場の質が低下した。
- ②市場の質の低下は、取引価格の呼値の拡大による影響だけでなく、むしろ気配の呼値の拡大によってもたらされた。
- ③ティックサイズを拡大した3つの試験グループ全てで、最良気配で出されている注文の量である市場の厚み (depth) は増加した。しかし、最良気配の5セント範囲まで広くとった厚みで見ると、流動性はむしろ縮小した (ただしトレード・アット・ルールの影響を受けたものを除く)。
- ④最良気配の外側の厚みも増加したが、大口取引の取引コストの縮小にはつながらなかった。
- ⑤市場の質の低下は、試験プログラム前にスプレッドが5セントより小さかった銘柄についてはさらに悪化した。このことは、人為的にティックサイズを拡大したことになる銘柄の方が悪影響が大きいことを示している。

実験してみることに、、、

拡大しないほうが良かった

(1) エージェントシミュレーションとは？

(2) 金融・経済におけるエージェントシミュレーション：人工市場

(2-1) 金融市場の基本性質の分析

(2-2) 金融市場の制度設計

(2-3) 自動取引の実験場

(2-4) 社会経済全体のシミュレーション

(3) 人工市場による市場制度の設計事例：呼値の縮小

(4) 市場制度設計における適切な人工市場モデル

# Gilber(2008)によるエージェント・モデルに必要な複雑さの分類

## Abstract Model

複雑な社会現象の原理的な理解を目指す

(例) シェリングモデル、ここで紹介した人工市場

→ シンプルなモデル、だが、メカニズムの理解、知識獲得

KISS(Keep It Simple Stupid)の原理(Axelrod, 1997)

## Facsimile Model

特定の状況に限定された特定の現象を限りなく忠実に表現

(例) ある特定のビルの避難経路の検討、アルゴリズムの実験場としての人工市場？

→ 複雑で予測精度がある、具体的な施策検討できる、  
普遍性はなく、メカニズム理解や知識獲得は不得意

## Middle Range Model

上記 2 つの間

調査対象に応じたモデルに必要な要素の特定  
⇒ 調査内容によって良いモデルは異なる  
(不要な要素の実装は知識獲得の妨げ)  
実際に議論されている規制・ルールを分析・設計

規制・制度の議論に実務的に使える  
知識の獲得を目指す

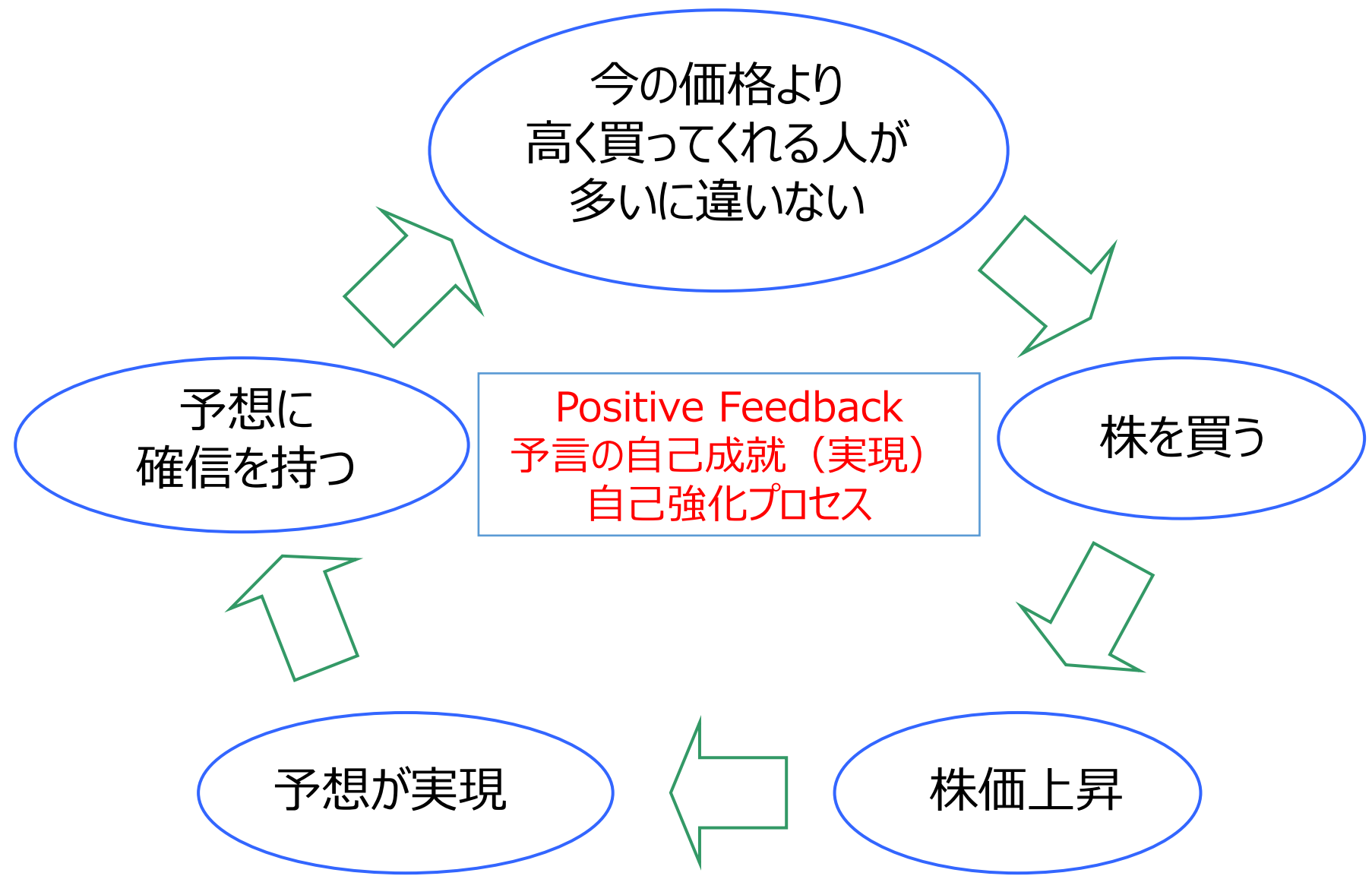
過去の特定制象の再現は目的でない

定量的に正確な議論は目指していない

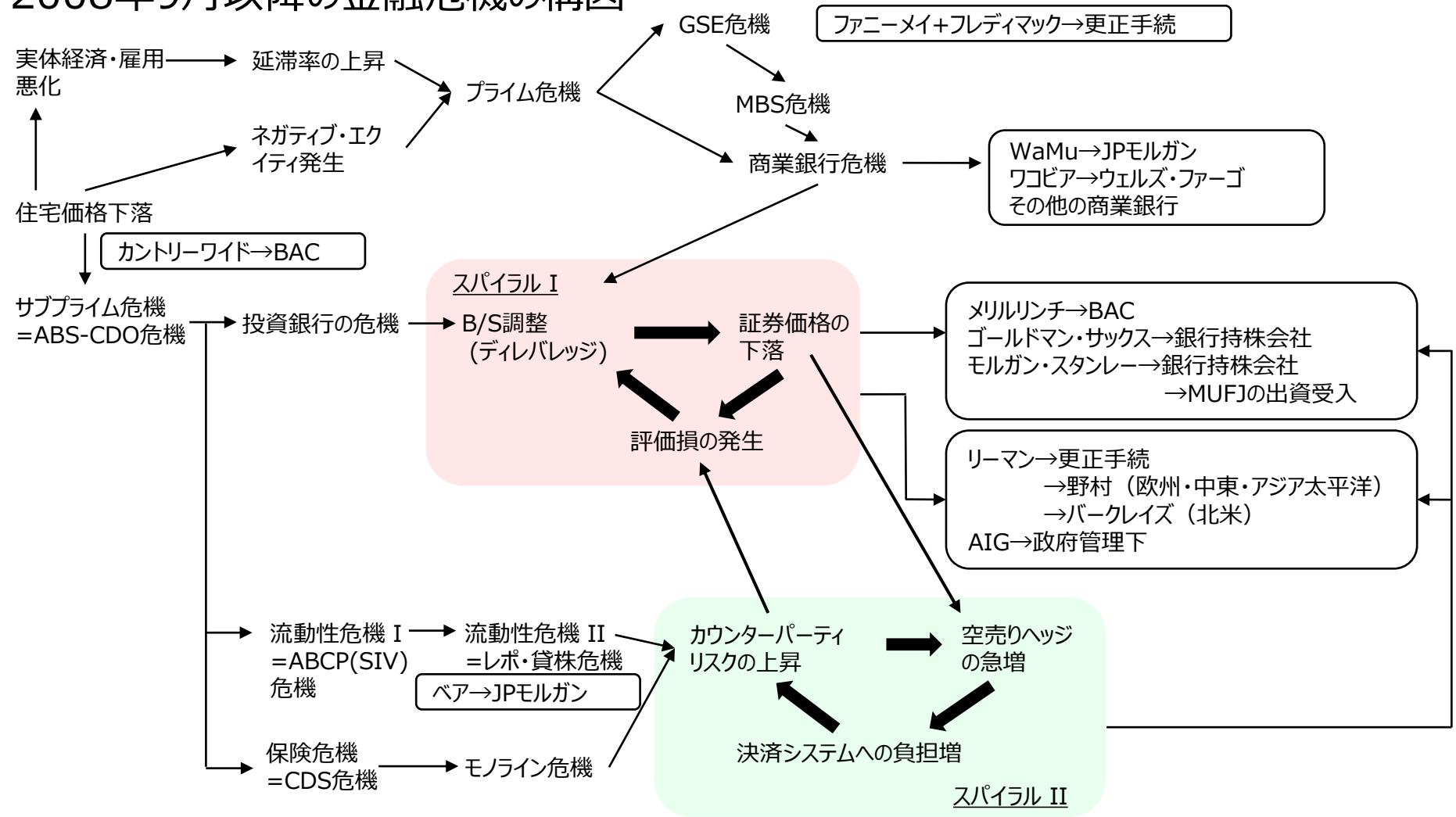
実際の議論で参考にされることを目指す

他の手法と協力して、「市場をうまく設計する」という目的を果たす

コロンブスの  
たまご的な  
気づき



## 2008年9月以降の金融危機の構図



(出所) 各種資料より野村資本市場研究所作成

野村資本市場研究所：サブプライム問題に端を発する金融危機の全貌，資本市場クォーターリー秋号付属資料（2008）



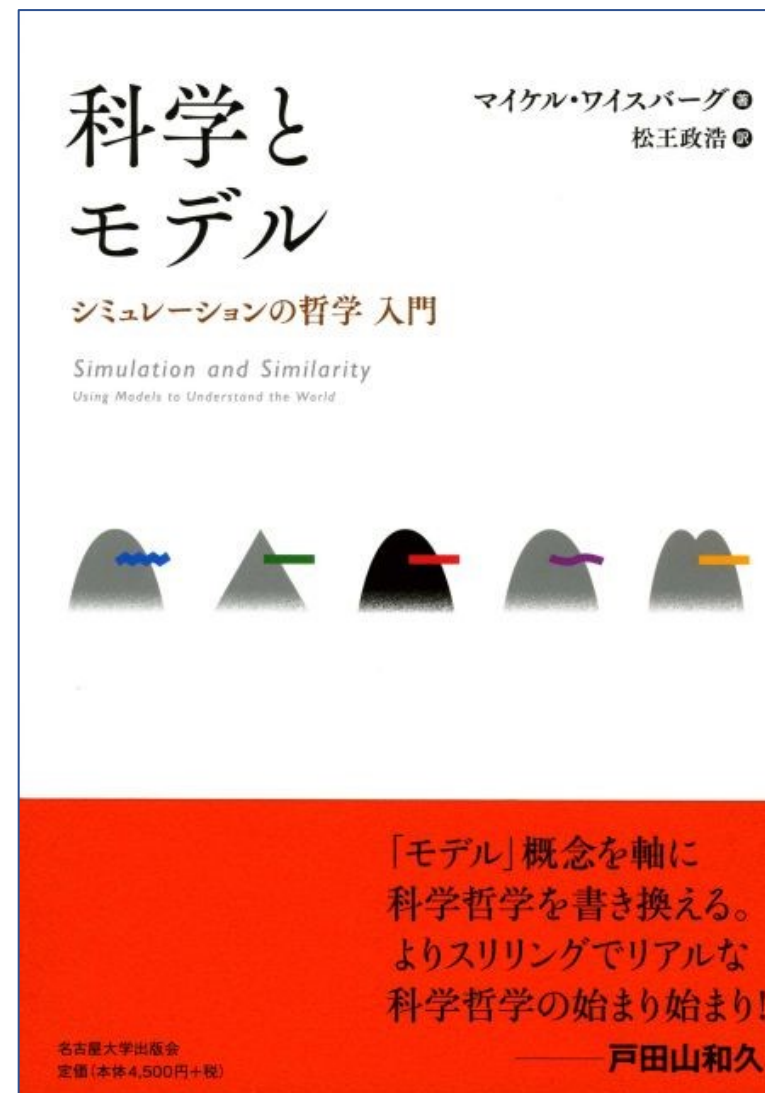
右の本は、“モデル”に関わっているすべての人に読んでほしいと思う。

そもそも“モデル”とは何なのか  
どういう役割があるのかを考察

この理解が不足しているため、  
不毛な議論が陥ることがしばしば

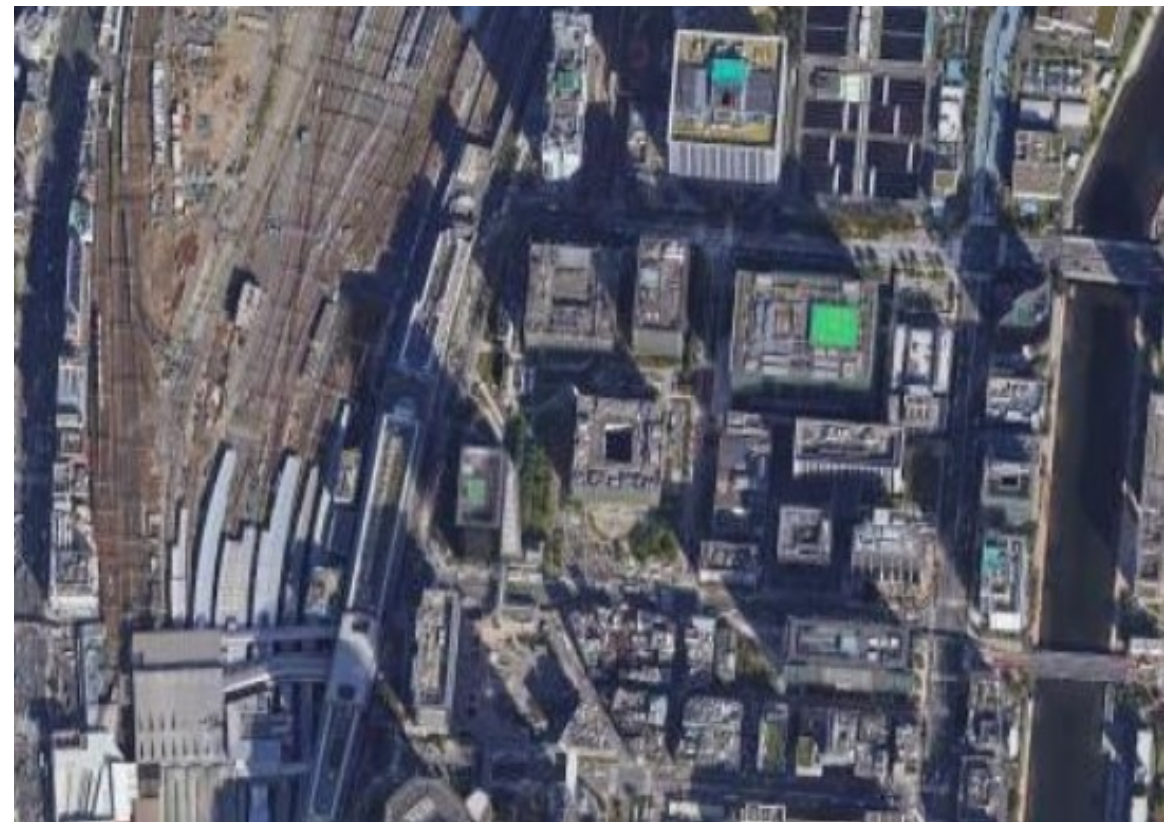
特に経済学の世界で、  
「シミュレーションモデルと  
数理モデルの役割の違い」  
に関する理解の欠如が顕著

シミュレーションモデルがどう役に  
立つのかほとんど理解されていない



科学とモデル シミュレーションの哲学 入門, 2017年  
<https://www.unp.or.jp/ISBN/ISBN978-4-8158-0872-3.html>

# どちらの地図が分かりやすいか？



(左)品川シーズンテラス公式ホームページ( <https://shinjuku-st.jp/access/train.html> )より,  
(右)Google mapより(画像 © 2020, CNES/Airbus, Digital Earth Technology, Maxar Technologies, Planet.com, The Geoinformation Group, 地図データ © 2020 Google)

現実とは大きく異なるが、理解しやすい  
迷子にならない

現実に近いが分かりにくい  
迷子になる

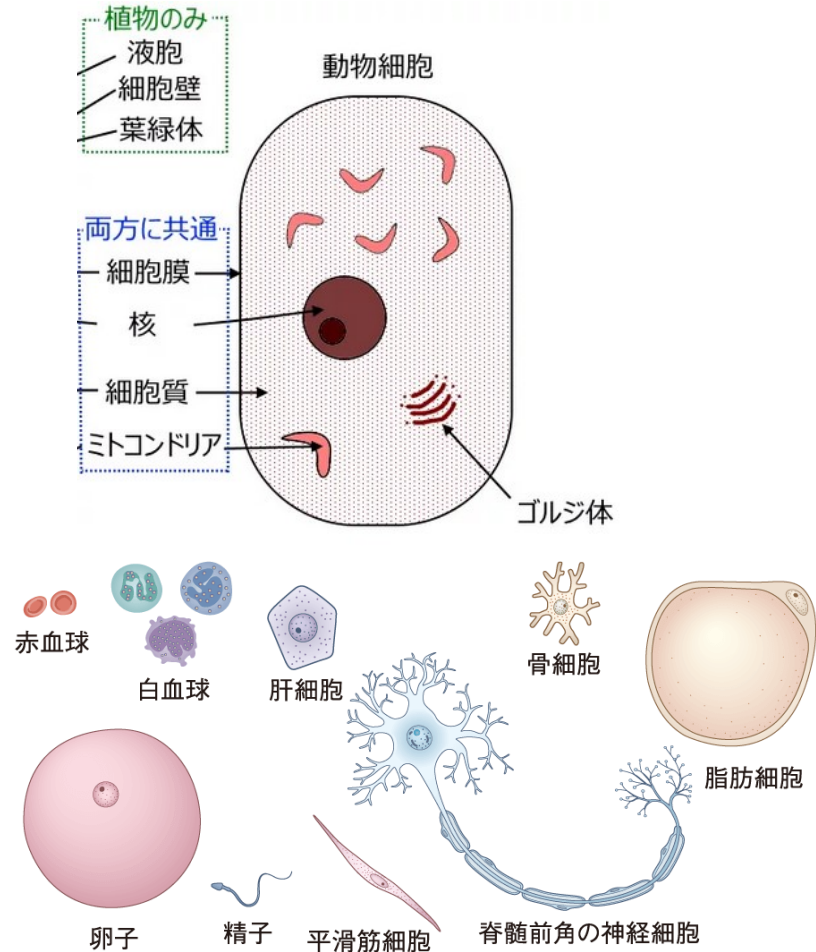
理解したいことの本質以外は削り落としてモデル化  
理解したいことが異なれば削り落とす部分も異なる

マイケル・ワイスバーグ「科学とモデル シミュレーションの哲学入門」, 2017年  
<http://www.unp.or.jp/ISBN/ISBN978-4-8158-0872-3.html>

# 現実の再現が目的ではない：細胞の教科書モデル

中学理科まとめ [https://rikamoto.com/2017/11/28/2\\_20/](https://rikamoto.com/2017/11/28/2_20/)

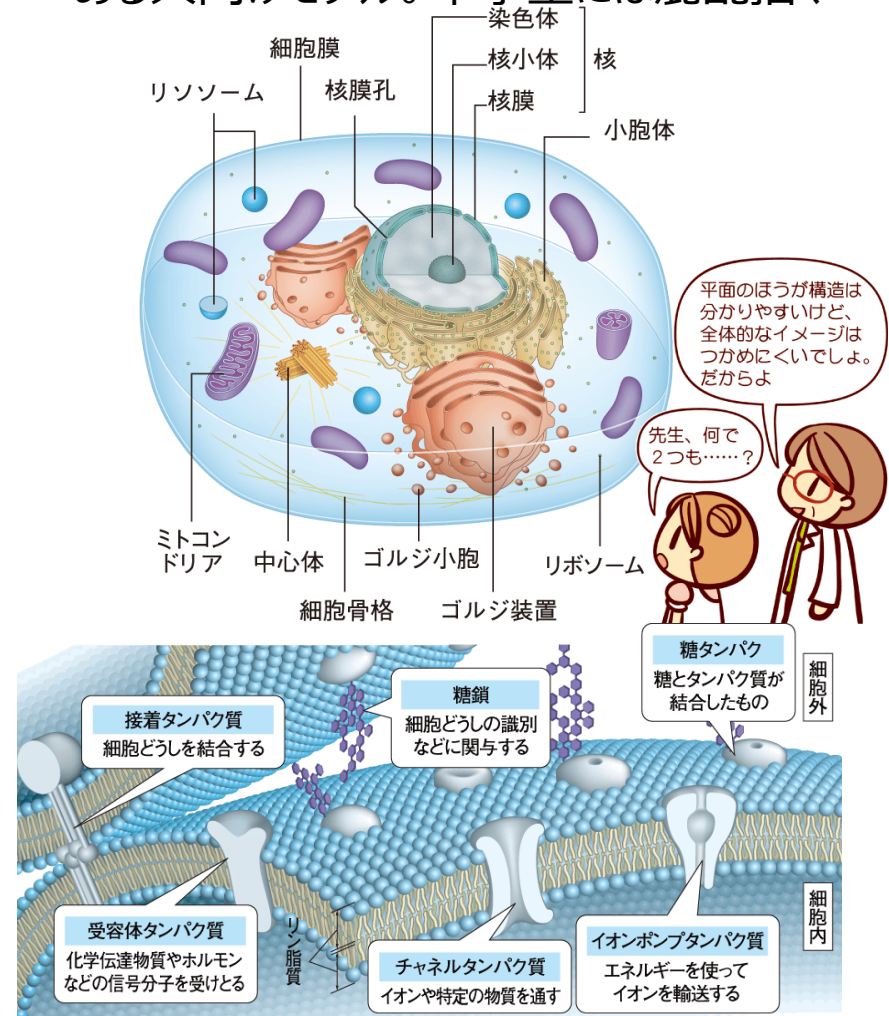
細胞の本質（核、細胞質、細胞膜等で構成）を学ぶためのモデル。この細胞は実際には1つも無い



いろいろな種類の細胞モデル  
上のモデルを見た後なら、違いを理解しやすい  
(例：核の大きさ、位置で分類できる)

解剖生理をおもしろく学ぶ, 2015年  
<https://www.kango-roo.com/sn/k/view/1554>

看護師試験レベル←もっと深く知る必要がある人向けモデル。中学生には混乱招く



細胞膜詳細←上のモデルにこれを書かれるとかえて分かりにくい



投資家  
Aさん

投資家  
Bさん

投資家  
Cさん

注目している現象に対して、  
本質的な性質（行動・手続き）のみ継承

注目している現象が違えば、  
本質的な性質も異なり  
モデルも異なる

投資家  
モデル

投資家を理解するための  
世界に一人もない投資家

例：ファッションモデル：服を理解  
モデルルーム：部屋を理解

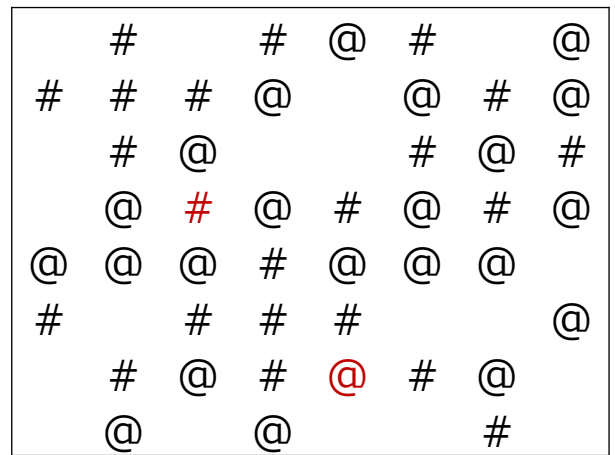
本質的な性質（行動・手続き）が、注目している現象に対して、  
どのような役割を果たし、どのようにマクロに影響を与えているか理解する

投資家Aさん、Bさん、、、の再現が目的ではない、  
投資家の本質を理解することが目的

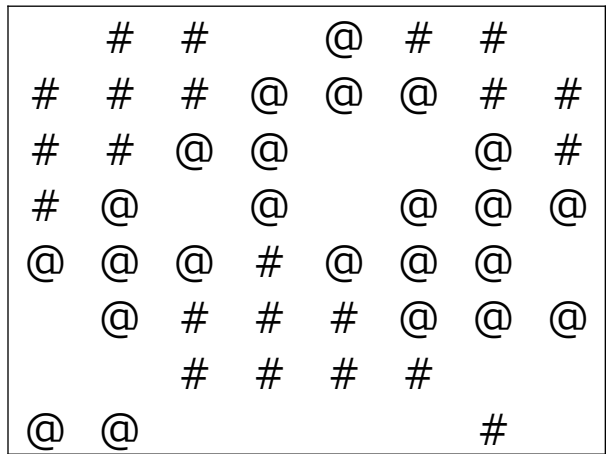
注目している現象ごとに良いモデルは異なる

## 学生(#)と教授(@)が参加する立食パーティー

解説記事「多角形のたとえ話」  
<https://ncase.me/polygons-ja/>



- ルール：
- 自分の周り(8マス)に自分の同類が1/3より多ければよい
  - 他方に囲まれた場合 どこかに移動
- 繰り返していくと、...

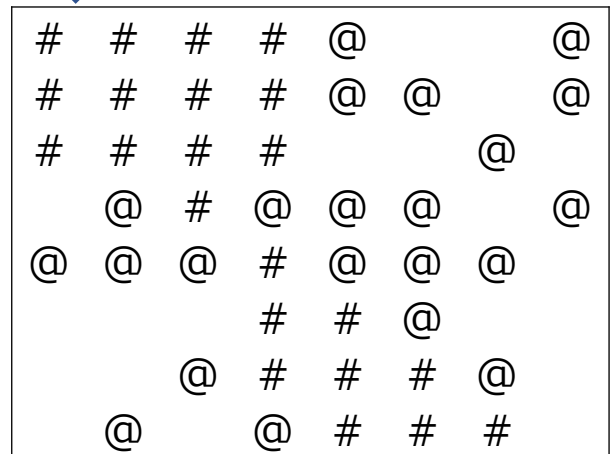


分離されてしまう

修正ルール：

# : 要求同類の人数 1 人増

@ : 1 人減、繰り返していくと、...



「自分があまりにも少数派になりたくない」だけで分離が起きる。積極的に「嫌い」なわけじゃない

この理由が分かることがシミュレーションの目的  
現実の会場の最終配置を予測することは目的でない

配膳テーブルの位置とか、個々人の食べる量の違いとか、准教授は？とか、現実にこんな会場ないとか、こんな単純な人いないとか、「この調査目的において」はどうでもよい。むしろ「理由の理解」には邪魔になるだけ。

#の場所が狭くなる

「知りたいこと」に応じてモデルを簡略化・複雑化することが大事

# シミュレーションモデルの役割

マイクロプロセス：投資行動、取引所ルール  
マクロ現象：価格形成  
の関係が知りたい

数理モデル  
マクロモデル  
このみ扱える



A国  
株式市場

A国  
債券市場

B国  
株式市場



価格形成  
(シミュレーション結果)

投資家  
モデル

投資行動  
(アルゴリズム)

取引所  
モデル

ルール  
変更

注文突合せ  
(アルゴリズムの集積)

これらの  
関係が  
知りたい！



投資家  
Aさん

投資家  
Bさん

投資家  
Cさん

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

- ・ 経済学やファイナンスの人たちの中には、シミュレーションというだけで受け入れない人がいるのは事実
- ・ 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

金融・経済分野以外のエージェントシミュレーションの研究者たちからも理解を得られにくい傾向

- ・ 投資家は常に他の投資家を出し抜こうと考えており、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、こうすればみんなハッピーになるという行動様式が存在しない
- ・ そのため、モデルを複雑にしても追加で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モデルにならざるを得ない。
- ・ そのようなモデルでも重要なメカニズムの知見が得られるのであるが、金融・経済分野以外のエージェントシミュレーション研究者たちからは、モデルは単純すぎるように見え、予測もできないことに物足りなさを感じるようだ。

どこの学会に属したらいいかわからない：よりどころがない

- ・ 金融市場の制度設計の場合は当局や取引所関係者から多くの研究ニーズが寄せられていて、数少ない理解者となっている ← 私はここ
- ・ ごく短い時間スケール(秒以下)の再現性を利用した分野は最近開拓されてきており、学術的にも実務的にも興味を持たれ始めている
- ・ 金融・財政政策を分析する人工市場は、実務家が求めている結果を出すまでにモデル自体の議論をまだ多くする必要のある段階であり、道のりが長すぎてよりどころがない。



2008年の金融危機以降、伝統的な経済学では複雑系であったこの金融危機を分析できていないと批判し、金融・経済分野におけるエージェントシミュレーションである人工市場や人工経済などの複雑系科学をもっと活用すべきだという主張があらわれた。人工市場をもっと活用し伝統的な経済学の弱点を補完すべきであることは確かだと思われる。

今回は、人工市場研究を簡単にレビューしたあと、人工市場による市場制度の設計の研究を呼値変更という実際に行われた制度変更の事例を交えながら紹介した。金融市場は人類の発展に必要な不可欠な道具である。McMillan[2002]が述べたように、「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なもの」であるうえに、「うまく設計されたときのみ、うまく機能する」、まさに複雑系である。人工市場は、これまでにない制度によってどういうことが“起こりえるか”を調べ“あり得る”メカニズムを見つけておく、“あり得る”副作用を見つけておく、という貢献ができる。特に、喫緊の課題として規制やルールを議論している実務家からの注目が高い。

人工市場の貢献はまだ始まったばかりで、研究者が全然足りていない。この分野は社会への重要な貢献ができることは間違いないので、啓蒙活動を続けていきたい。今後、もっと多くの金融市場の規制やルールが人工市場や人工社会で扱えるようになり、うまく金融市場を設計することに貢献し、社会の発展につながっていけばと願っています。