

2021年6月12日

2021年度 経済物理学 第9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/2021e.pdf>

質疑応答用に用意した参考資料は: <https://mizutatakanobu.com/sankou.pdf>

English ver.: <https://mizutatakanobu.com/2021kyushu.pdf>

金融市場は人類の発展に必要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。

しかし、これまでの伝統的な経済学で使われてきた手法では、この良い設計が見つけれなかったという批判がある。そのため、複雑系を複雑なまま取り扱える、人工市場モデル（金融市場のエージェント・ベースド・モデル）に期待が集まり始めている。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。

本講演では、人工市場モデルの特徴やこれまでの貢献を紹介した後、一例として「呼び値の刻みの変更」という実際に行われた取引所のルール変更のときに、人工市場モデルがどのように貢献したかを紹介する。

自己紹介

2000年 気象大学校卒業

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： バックオフィス業務

2005年 ボトムアップ・リサーチ・アナリスト

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 金融市場全般の調査、株式市場やポートフォリの定量的分析、上記の学術研究も継続

2007年 日本証券アナリスト協会検定会員

2009年 中小企業診断士

2014年より 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 → 2019年度より 主幹事

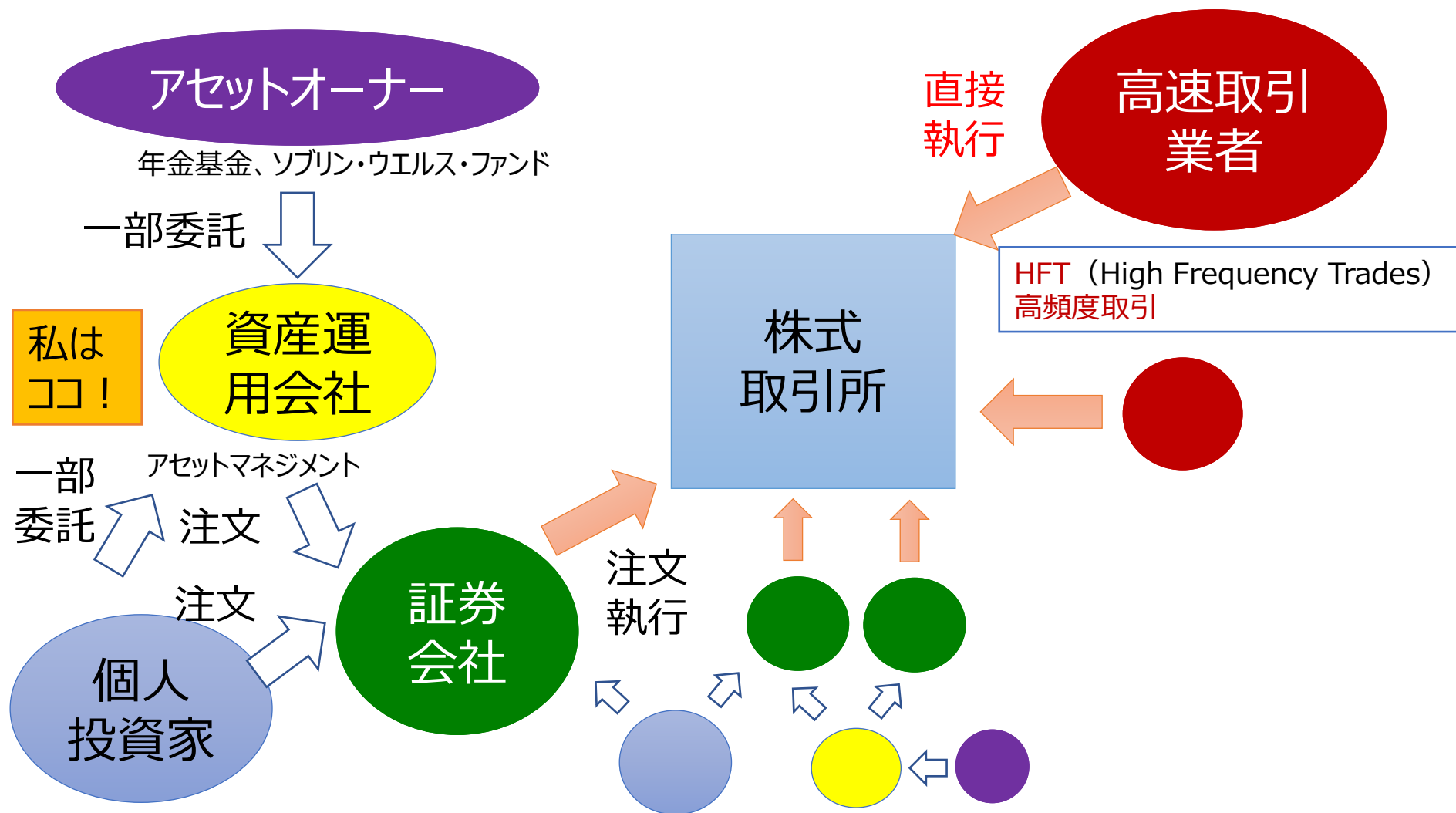
2017・18年度 人工知能学会 代議員（終了）

2019年より Computational Finance and Economics Technical Committee Member on IEEE CIS

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

<https://mizutatakanobu.com/202011OPT.pdf>



その他の話題：もしご興味あればご覧下さい

金融における人工知能

<https://mizutatakanobu.com/20210118.pdf>

株式の高速取引と取引所の高速化

<https://mizutatakanobu.com/202011OPT.pdf>

金融の役割と機関投資家の株式投資実務

<https://mizutatakanobu.com/20161005x.pdf>

本業の調査

高速取引や資産運用業界についてのレポート



SPARX Asset Management Co., Ltd.

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

例えば、
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？
2019/3/11 あの日から8年～自然災害と取引所～
2018/5/21 なぜ株式市場は存在するのか？
2018/4/23 水平株式保有は経済発展をとめるのか？
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-



一般向けに解説したインタビュー記事

東証公式のページ「東証マネ部！」インタビュー記事

<https://money-bu-jpx.com/news/article008322/>

本日の後半の話「ティックサイズ変更を人工市場で議論」したことを、一般向けに解説したインタビュー記事です

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/>

人工知能学会誌の特集記事

水田孝信, 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」
人工知能学会誌 人工知能 2021年5月号

https://doi.org/10.11517/jjsai.36.3_262

amazon: <https://www.amazon.co.jp/dp/B092XBKFKN/>

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://mizutatakanobu.com/jphd.htm>

上記や本資料の英語版

Mizuta (2019) An agent-based model for designing a financial market
that works well, arXiv <https://arxiv.org/abs/1906.06000>

Slide: <https://mizutatakanobu.com/2020CIFErB.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>



今日のお話

人工市場による市場制度の設計

(1) 人工市場とは？

(2) 最適な複雑さ、長所短所

(3) モデル例

(4) 研究事例：呼値の縮小

具体例：実際に制度・規制変更

実務・社会の動きも交えて

(1) 人工市場とは？

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

金融市場の制度設計の重要性

人類

高度なお金と物の交換で協力しあう

他の動物を凌駕する文明

金融
市場

協力 & 競争

よい物・よいサービス

社会を破壊？

規制の無い
自由な競争が良い？

そうではなくて

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」, 2007年 <https://www.nttpub.co.jp/search/books/detail/100001751>



人類発展に
必要不可欠な道具

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

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喻

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

金融市場では、金融危機による混乱がしばしば発生
⇒ どのような規制・制度で対応するか議論

取引市場の新規参入により、さまざまな制度の取引市場が登場
⇒ より良い取引市場にするために、どのようなルールを採るべきか

実証研究の困難さ

導入したことがない規制・制度変更を議論

→ 実証データが全くない

価格形成に関して規制・制度変更の効果だけを取り出す

→ 実際の市場ではさまざまな要因が複雑

当局や取引市場が規制・制度を策定するときの議論

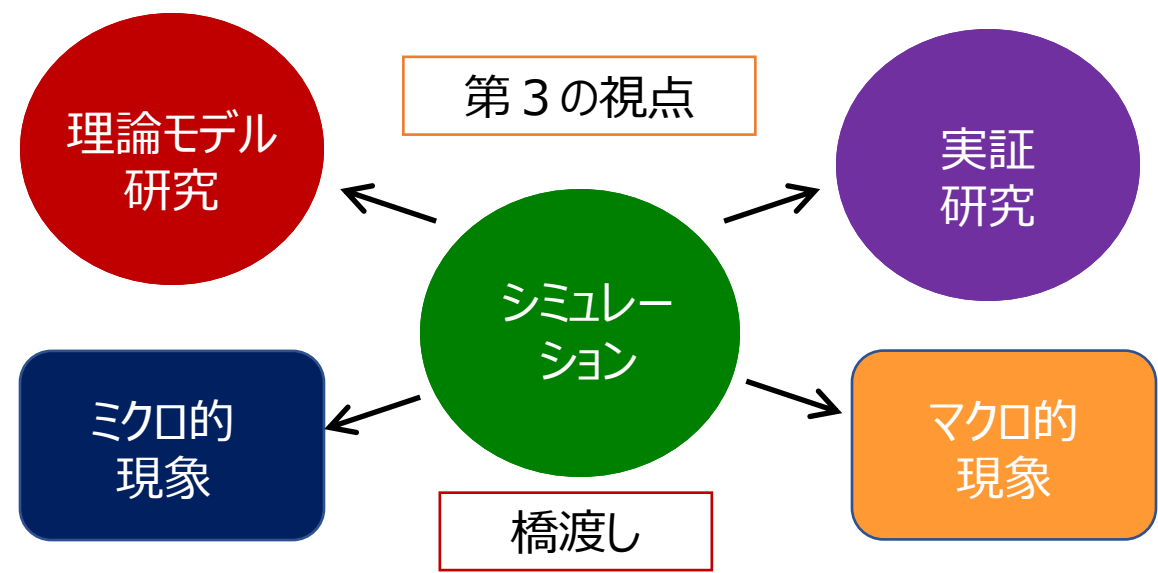
⇒ 仮説検証型の分析に基づかない定性的な議論のみ
導入した後に副作用を発見し導入したものを廃止するといったことが繰り返される場合も



人工市場シミュレーション

さまざまな分野で活躍するマルチ・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。ミ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

簡単な具体例：初期のマルチ・エージェント・シミュレーション（後ほど再掲）

学生(＃)と教授(@)が参加する立食パーティー

トーマス・シェリング「マイクロ動機とマクロ行動」, 2016年
<http://www.keisoshobo.co.jp/book/b251669.html>

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

活躍するマルチ・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。... ただ、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>

http://www.city.okayama.jp/toshi/gairokoutsuu/gairokoutsuu_00206.html



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



ホワイトハウスのキューバ危機

マルチエージェント・シミュレーションで探る
核戦争回避の分水嶺

阪本拓人・保城広至・山影進



核戦争危機から50年。

ケネディ(大統領)が自ら執務室等に仕掛けたテープ分析を駆使し、実際に起こった現実だけでなく、起こらなかった(起こり得た)現実をも説明できる新モデルを開発。
「歴史のIF」に敢えて挑戦する!

最前線 早山 定典(本誌2007年10号)

(変わり種)

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

https://jwww.iss.u-tokyo.ac.jp/publications/books/2012/hoshiro_2012_03.html



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

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

新型コロナではNHKにも取り上げられる注目度
(筑波大 倉橋先生)

注：新型コロナ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

<https://covid19outputjapan.github.io/JP/>

新型コロナでは新聞記者自らがシミュレーション：解説に必要だった

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

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

The Washington Post
Democracy Dies in Darkness

Why outbreaks like coronavirus spread exponentially, and how to “flatten the curve”

By Harry Stevens March 14, 2020

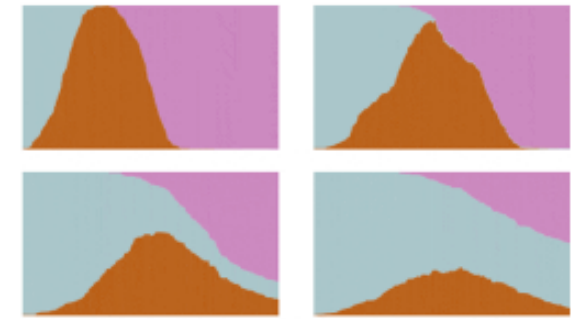
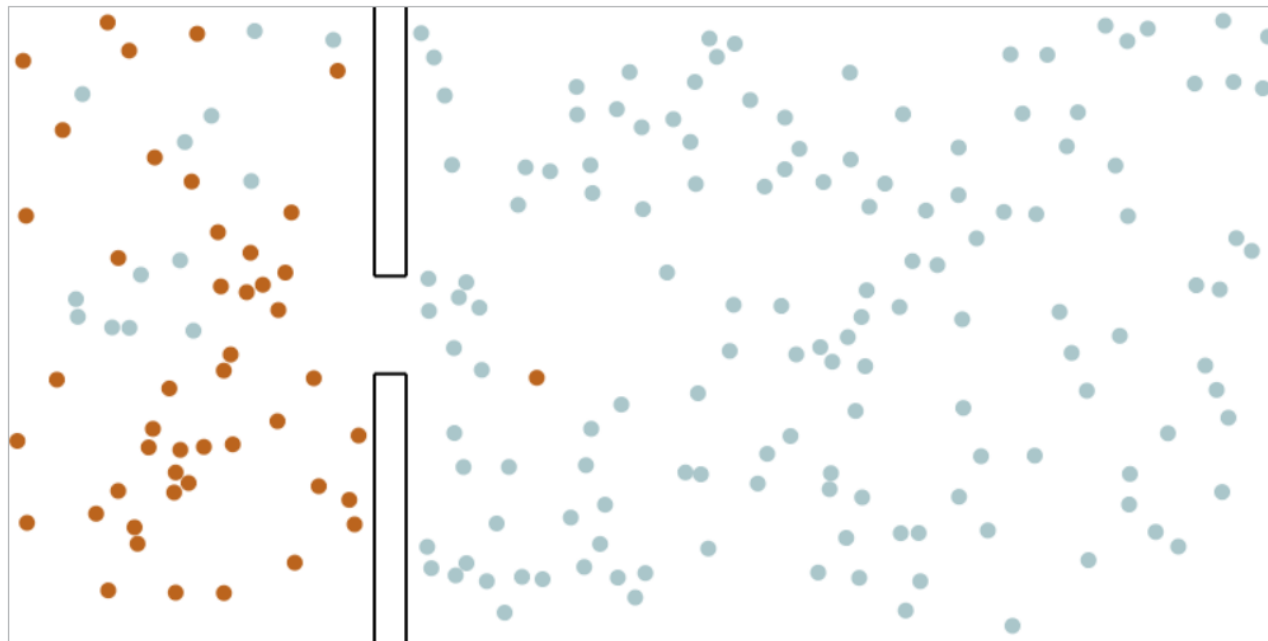
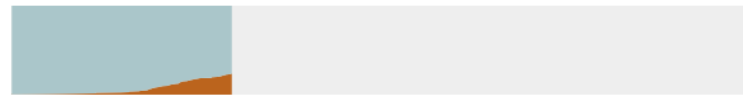
Count

Recovered 0

Healthy 153

Sick 47

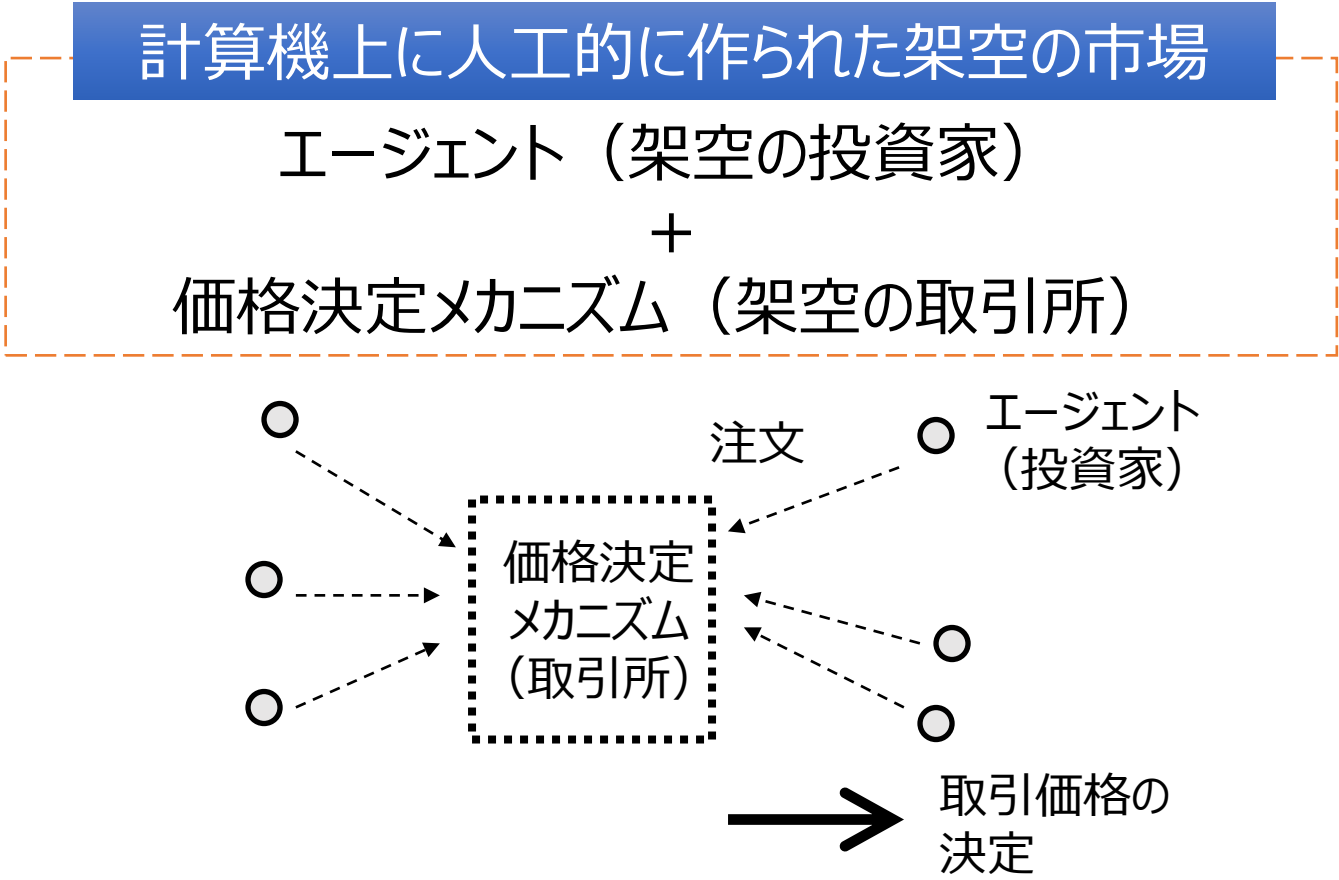
Change over time



- ・ボールのように動く：直線に動く、ぶつкаると反射
 - ・ぶつкаると感染
 - ・感染して時間がたつと回復
もう感染しない・させない
- ⇒ 何もしないとピーク高い：収束早い
対応するとピーク低い：収束遅い
- ⇒ 自粛解除の良い：タイミングはピーク近辺？
- ↑ こういう理由が分かる、議論ができる

モデルは単純であり得ない設定だが、だからこそ分かるプロセスがある

人工市場モデルを用いたシミュレーションとは？ (金融市場のマルチ・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

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。

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>



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

J P X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(J P X) は市場を巡る様々な環境変化や法制度等に関する調査・研究を行いワーキングペーパーを公表

35本中、実に10本が人工市場を用いた研究(2021年3月末現在)

呼び値の刻み、H F T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>

(2) 最適な複雑さ、長所短所

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

マクロ現象

価格時系列

積み上げの結果

シミュレーション

フィードバック

相互作用を直接扱う

ミクロプロセス

エージェントの振る舞い

シンプルモデル

相互作用を扱える！
相互作用を分析できる！

数理モデル
実証研究

マクロ現象

価格時系列

精密なモデリング

単純な足し算には
なっていない

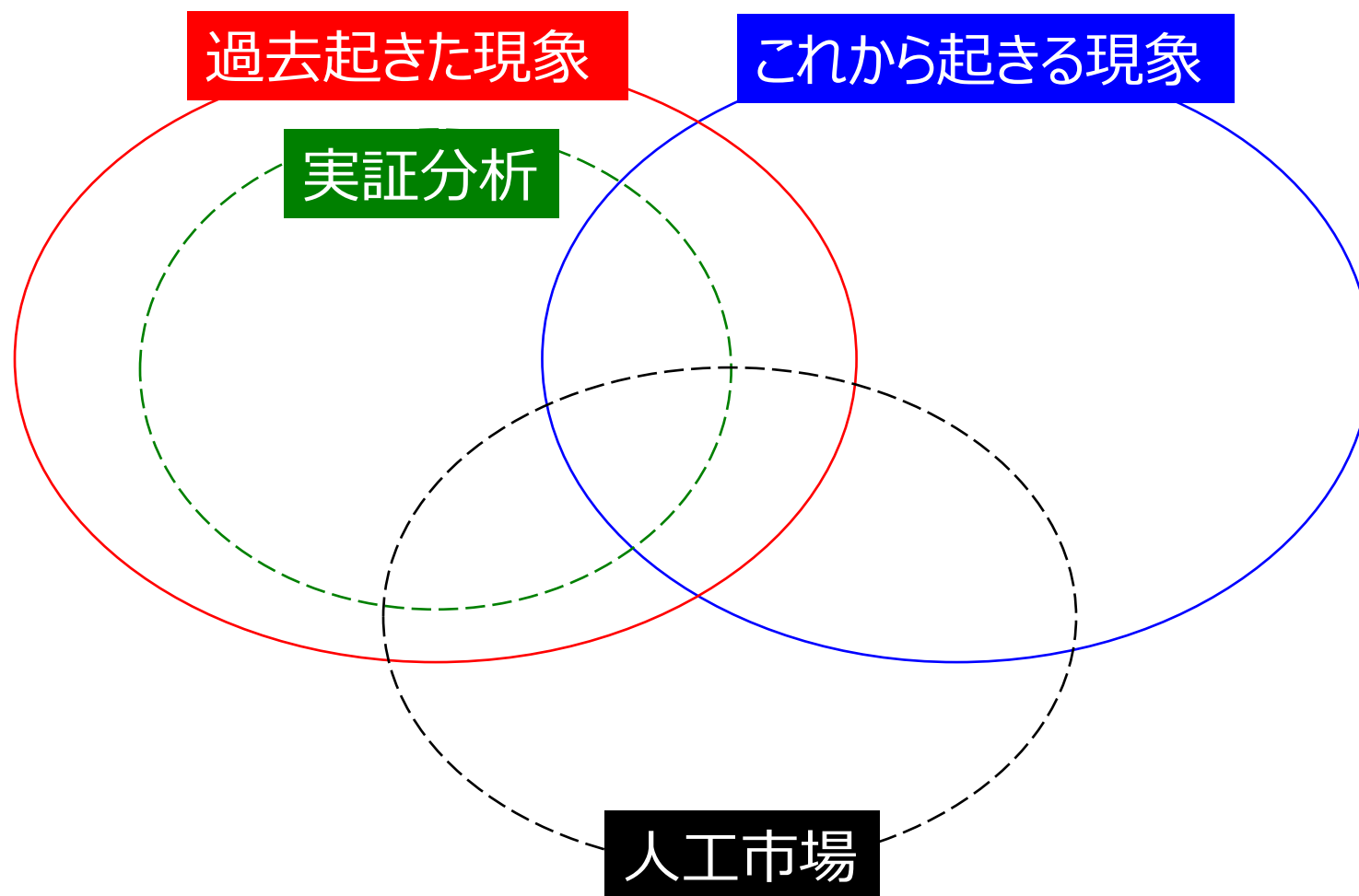
別々に扱う

ミクロプロセス

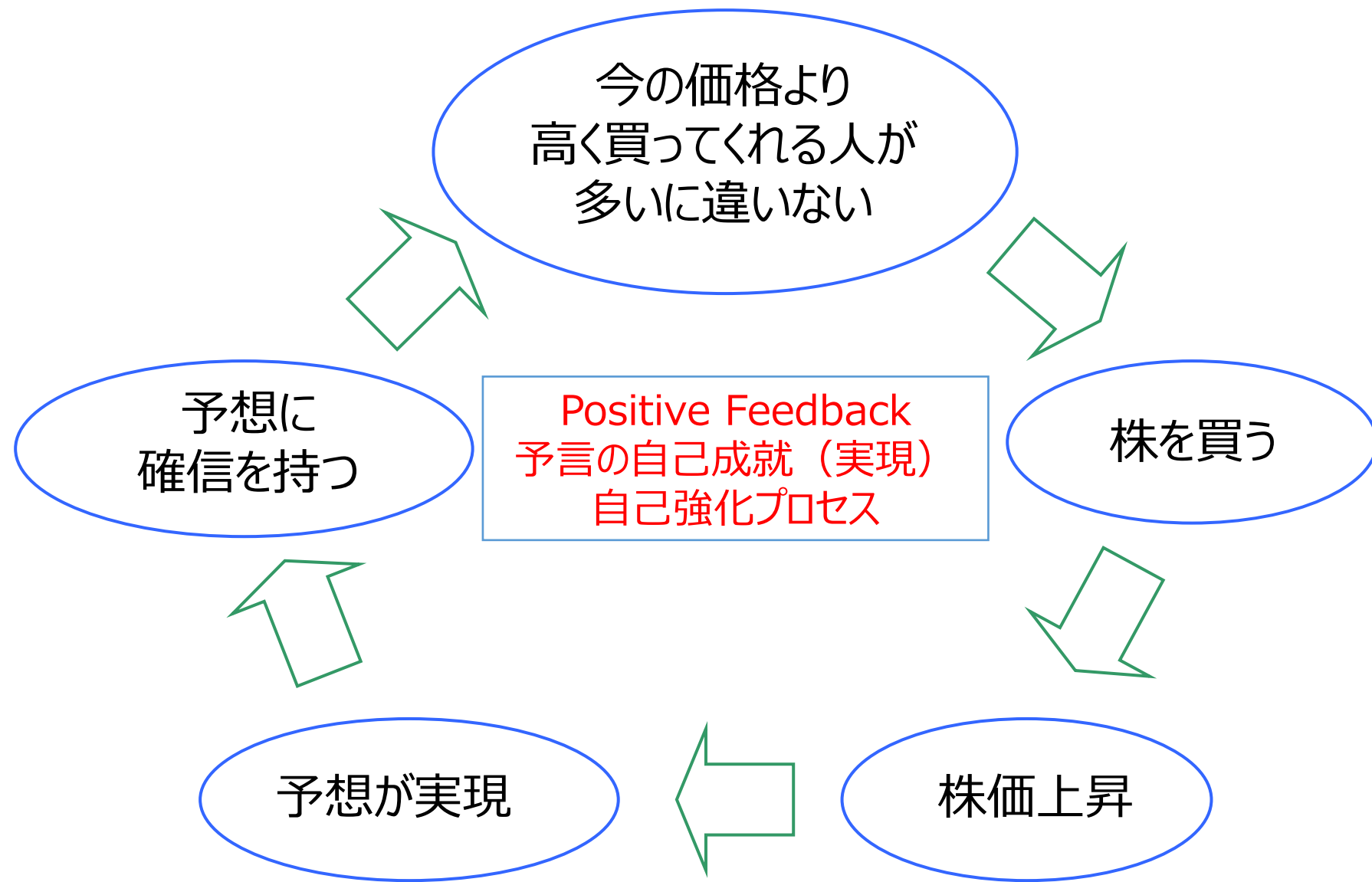
投資家の振る舞い

精密なモデリング

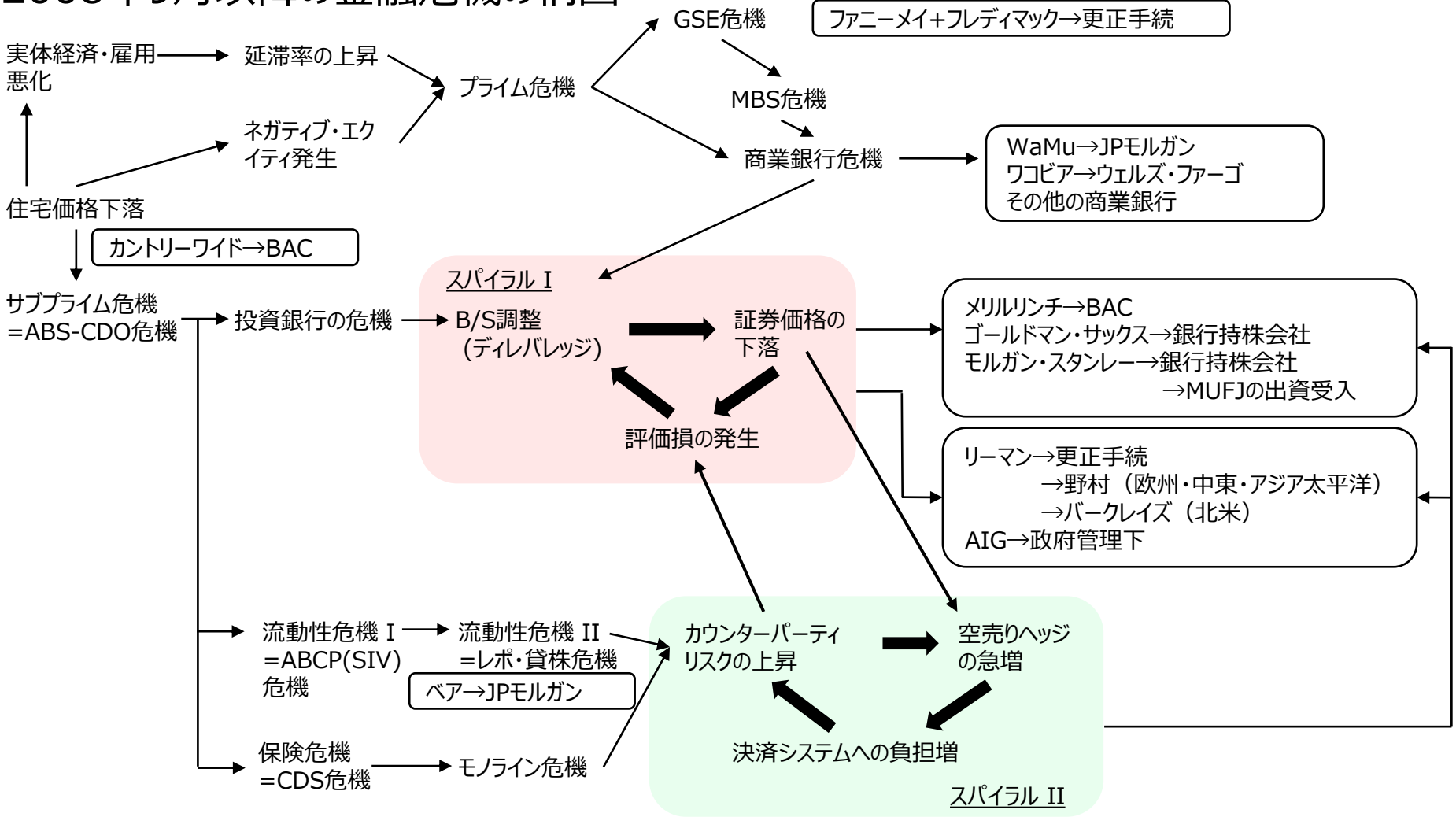
マクロとミクロの相互作用があるため、マクロ現象とミクロプロセスをそれぞれ調べても複雑系を理解できない。



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

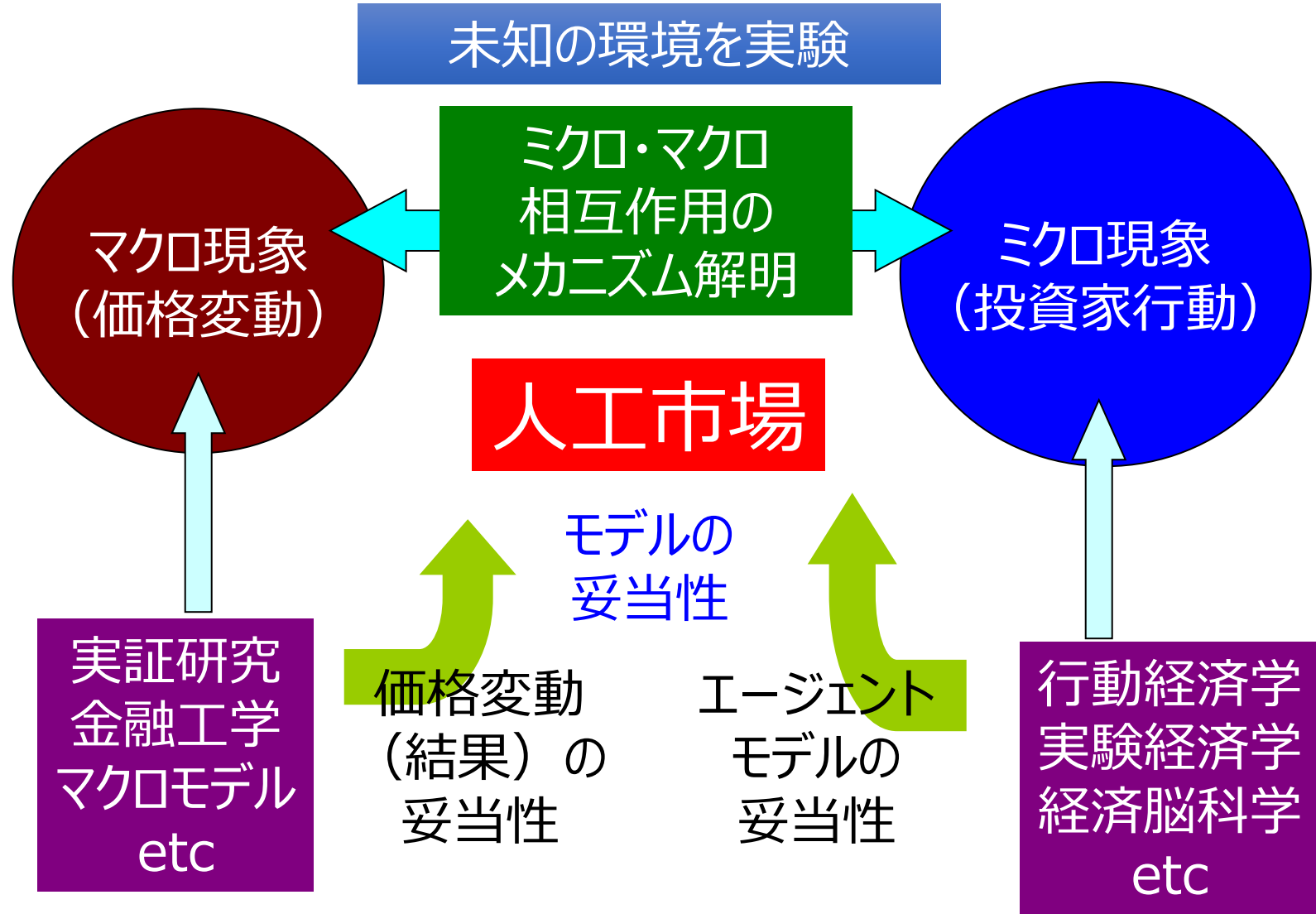


2008年9月以降の金融危機の構図



(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)



今回議論する人工市場の使い方

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

過去の特定事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

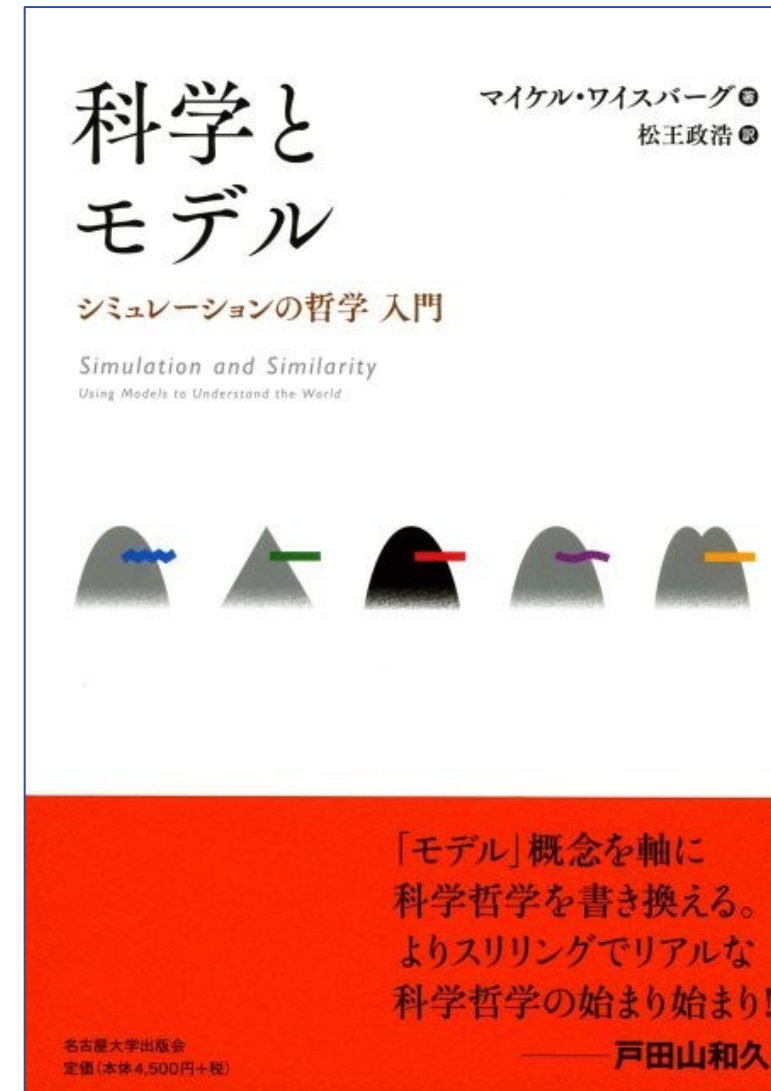
右の本は、“モデル”に関わっている
すべての人に読んでほしいと思う。

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

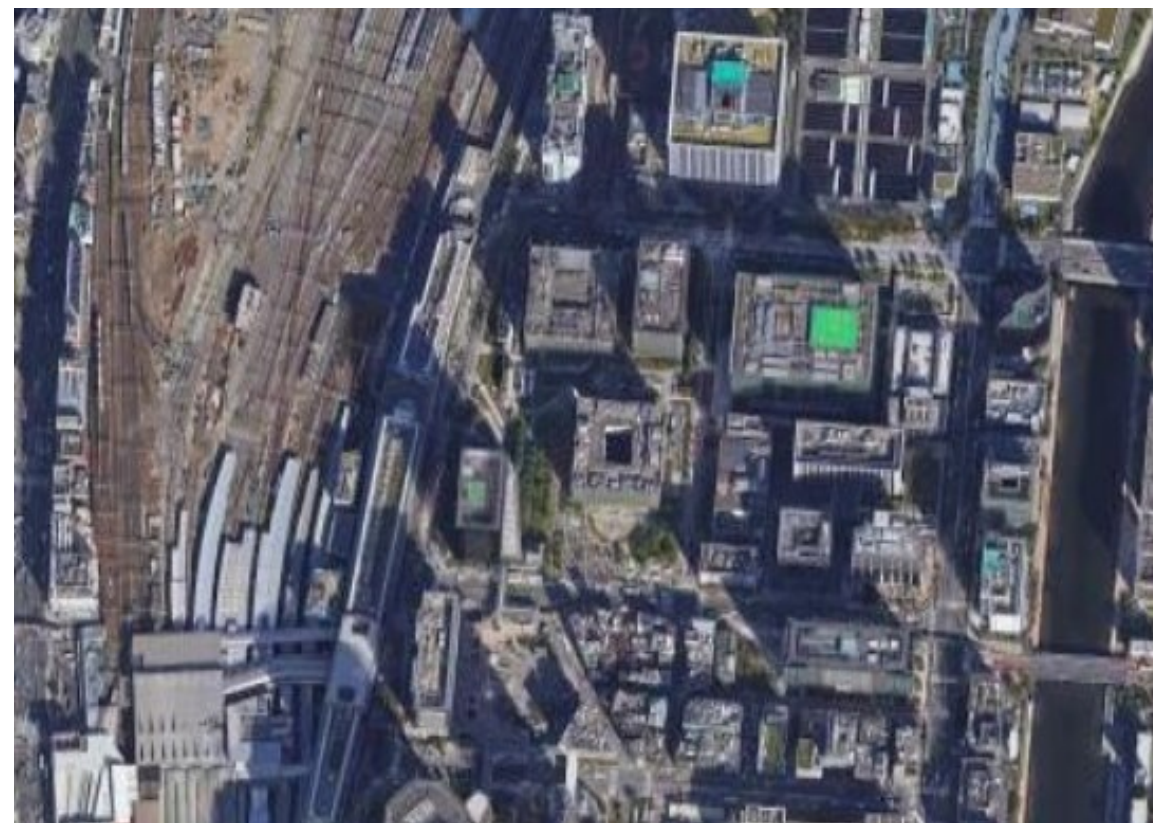
特に経済学の世界で、
「シミュレーションモデルと
数理モデルの役割の違い」
に関する理解の欠如が顕著

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://shinagawa-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

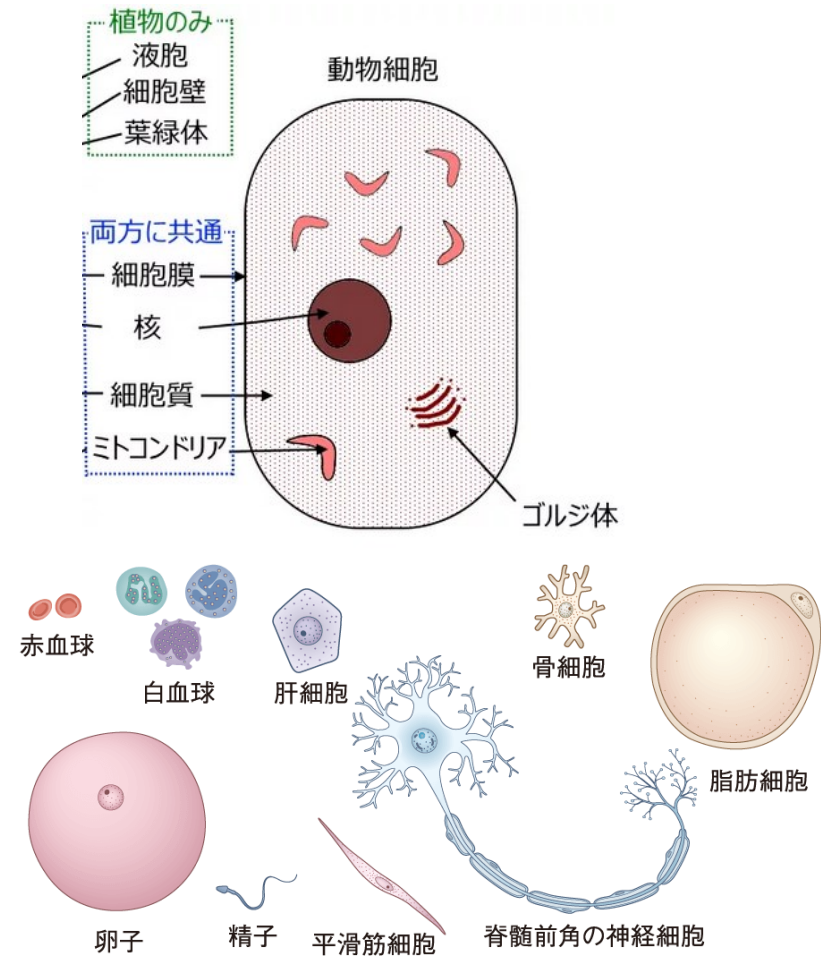
現実に近いが分かりにくい
迷子になる

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

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://rikamato.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

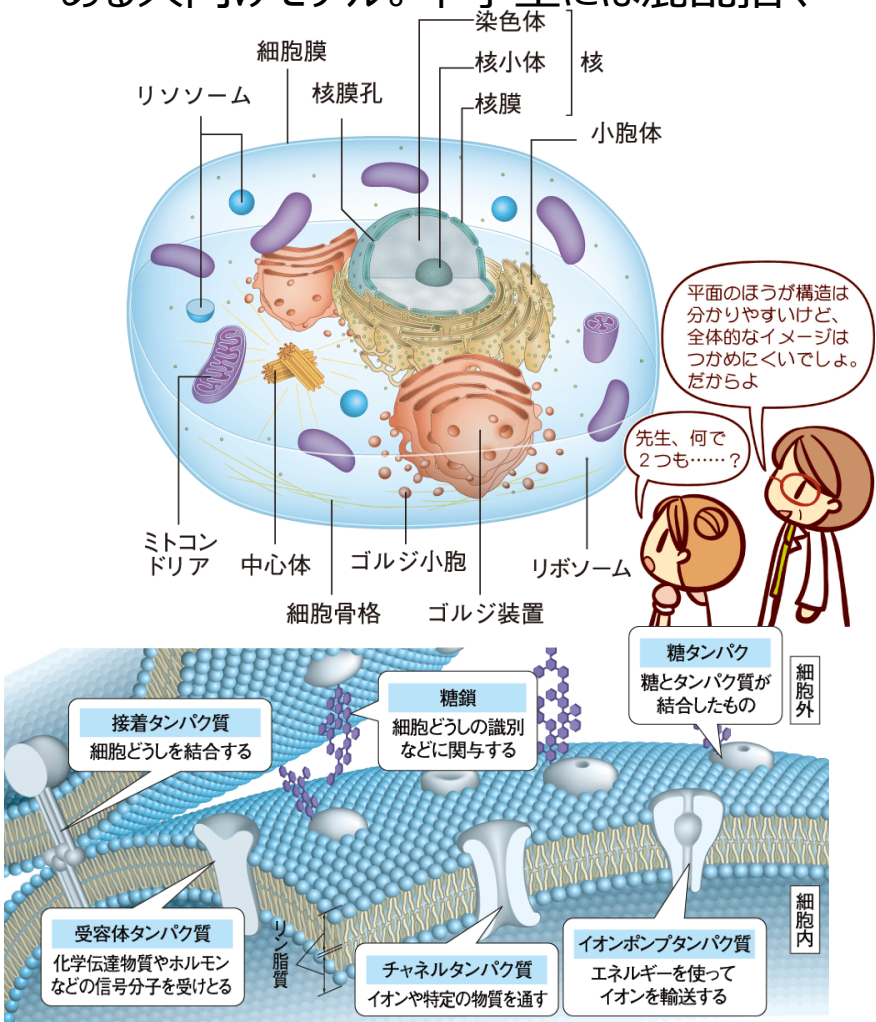


いろいろな種類の細胞モデル

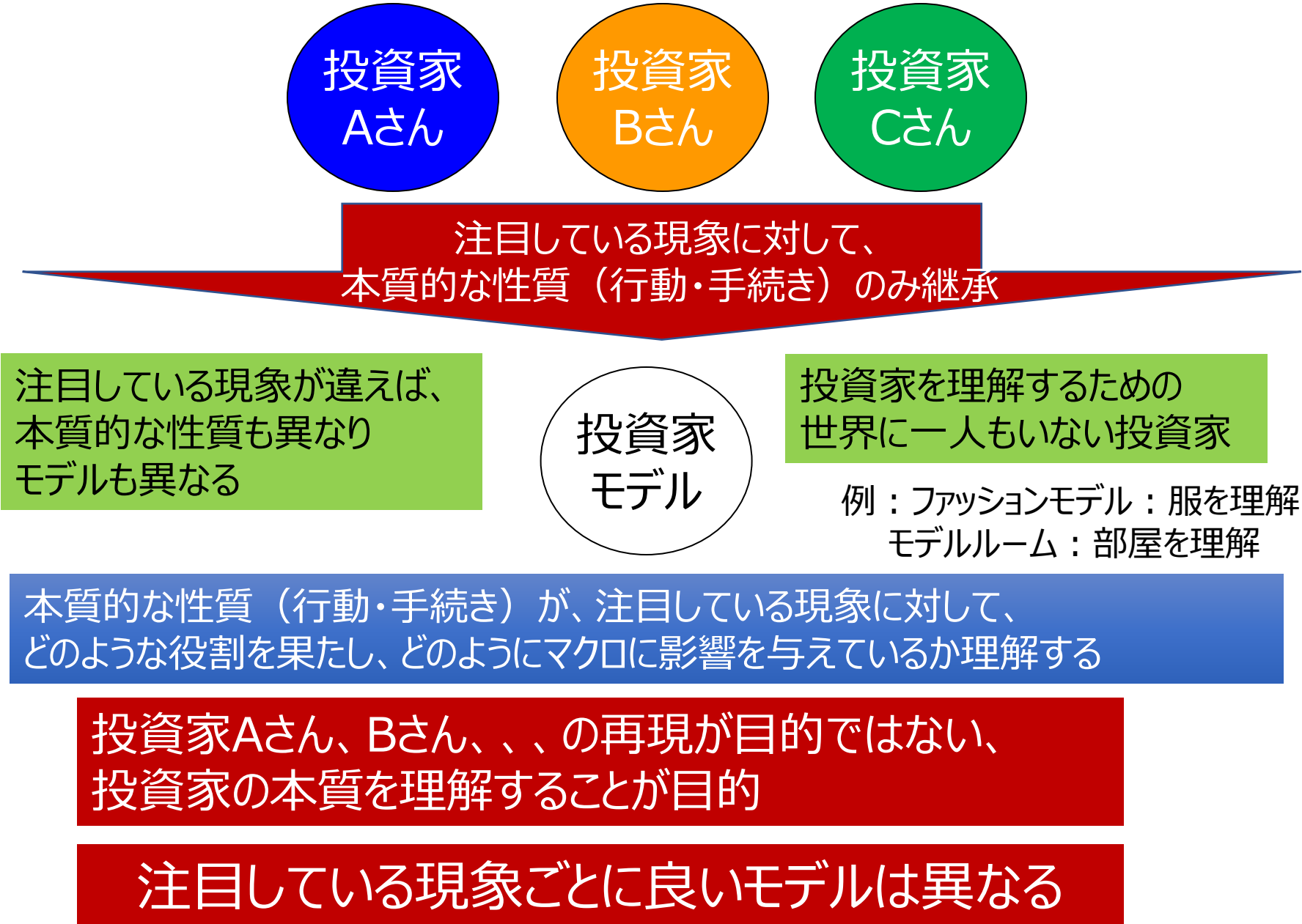
上のモデルを見た後なら、違いを理解しやすい
(例：核の大きさ、位置で分類できる)

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



簡単な具体例：初期のマルチ・エージェント・シミュレーション

学生(＃)と教授(@)が参加する立食パーティー

トーマス・シェリング「マイクロ動機とマクロ行動」, 2016年
<http://www.keisoshobo.co.jp/book/b251669.html>

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

ミクロプロセス：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)



投資行動
(アルゴリズム)



投資家
Aさん

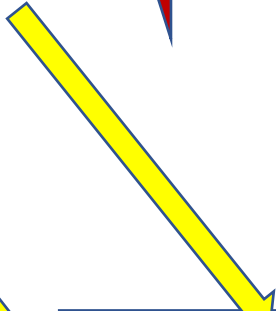
投資家
Bさん

投資家
Cさん



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！

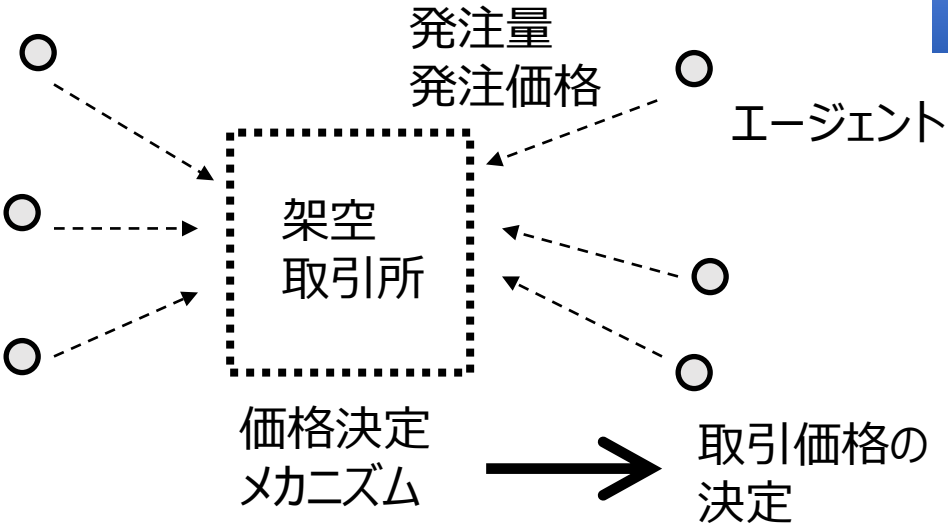


(3) モデル例

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



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

Chiarella et. al. 2002をベースにしてモデルを構築

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 (ザラ場)

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	
ここに売り注文を入れると 即座に売買成立	98	150
	97	
	96	70

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)

エージェントモデル

j: エージェント番号
(1000体, 順番に注文)
t: 時刻(ティック時刻)

過去リターン

$$r^t_{h,j} = \log P^t / P^{t-\tau_j}$$

テクニカル

予想リターン

$$r^t_{e,j} = \frac{1}{\sum_i w_{i,j}} \left(w_{1,j} \log \frac{P_f}{P^t} + w_{2,j} r^t_{h,j} + w_{3,j} \varepsilon^t_j \right)$$

エージェントの
パラメータ

$w_{i,j}$ τ_j
一様乱数で決定
途中で変わらない

$w_{i,j}$ $i=1,3: 0\sim1$
 $i=2: 0\sim10$
 τ_j $0\sim10000$

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

ノイズ

ε^t_j
正規乱数
平均0
 $\sigma=3\%$

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

* ファンダメンタル戦略

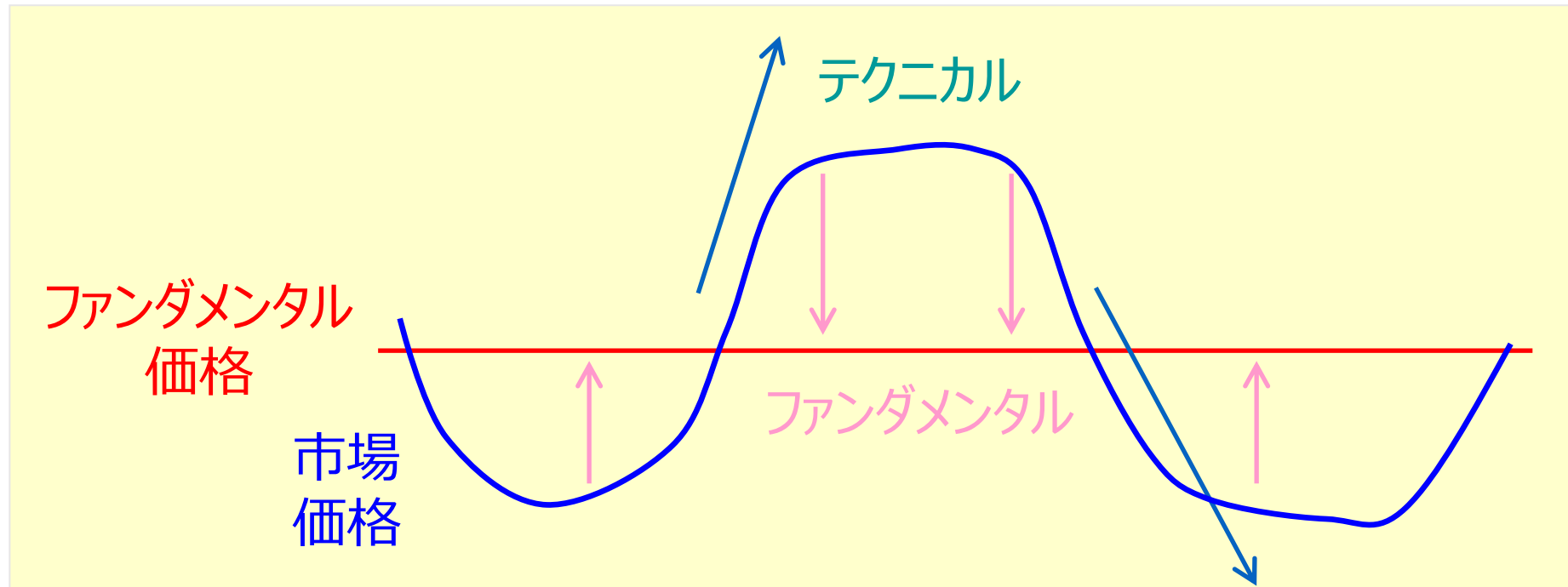
ファンダメンタル価格 $>$ 市場価格 $\Rightarrow$ 上がると予想

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

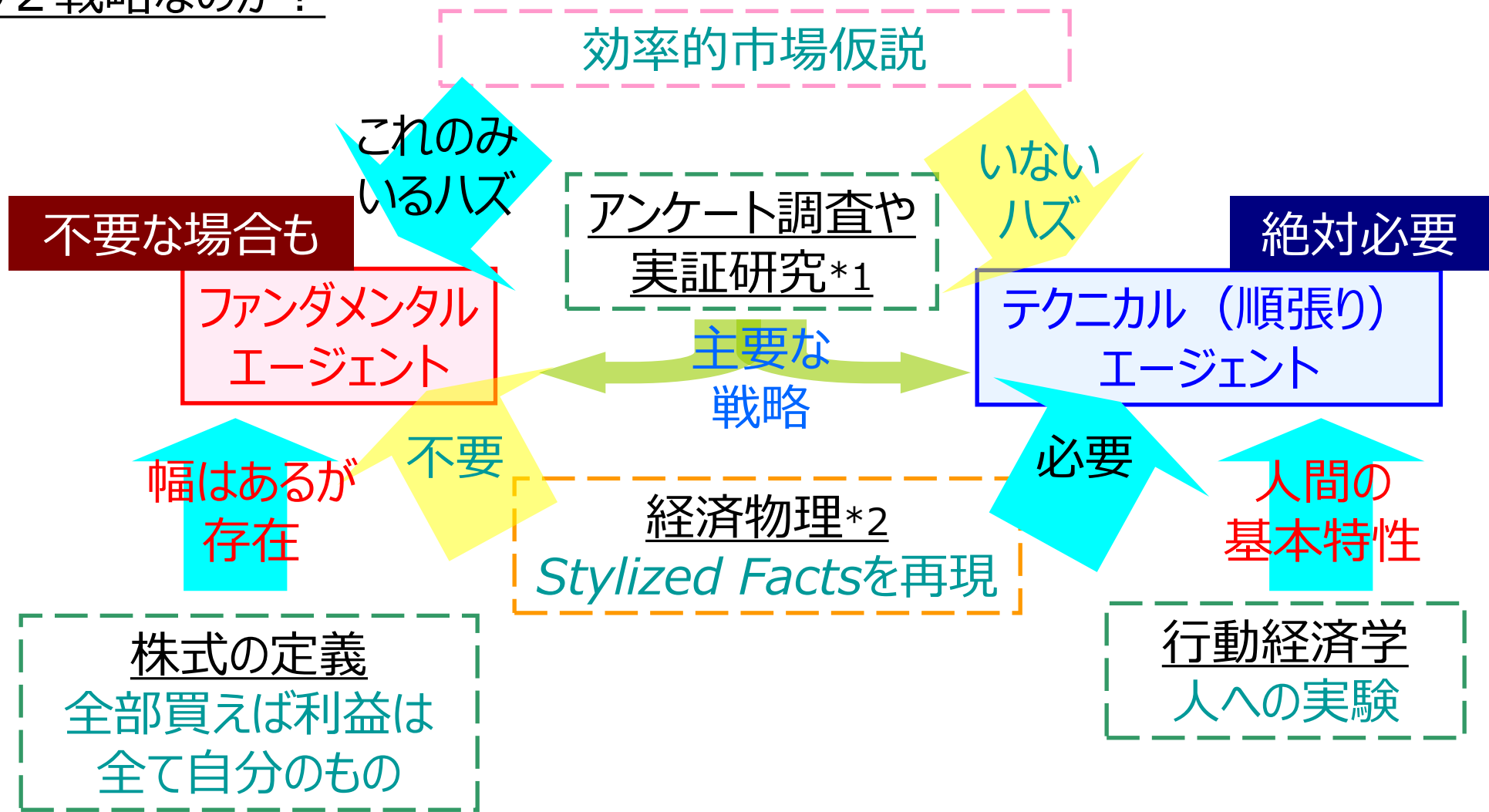
* テクニカル戦略

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



なぜ、この2戦略なのか？



*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>

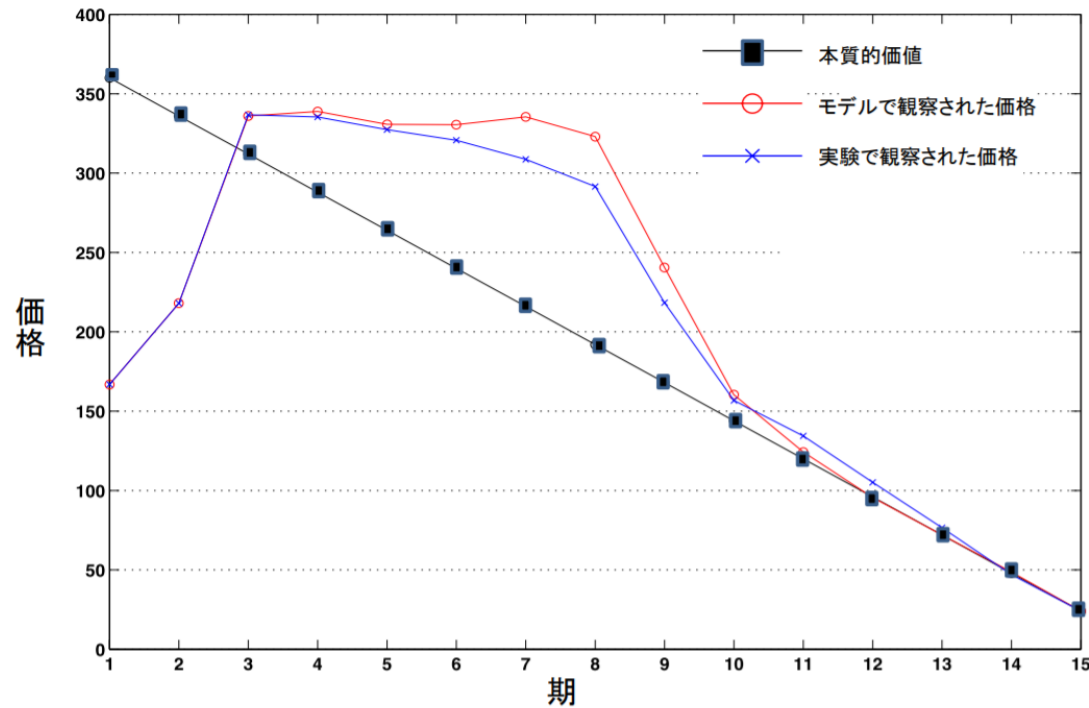
*2 Lux, T. and Marchesi, M.(1999) Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market, Nature

被験者を使った実験市場でも確認されている

実験市場についてよくまとまった本

<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339028164/>

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

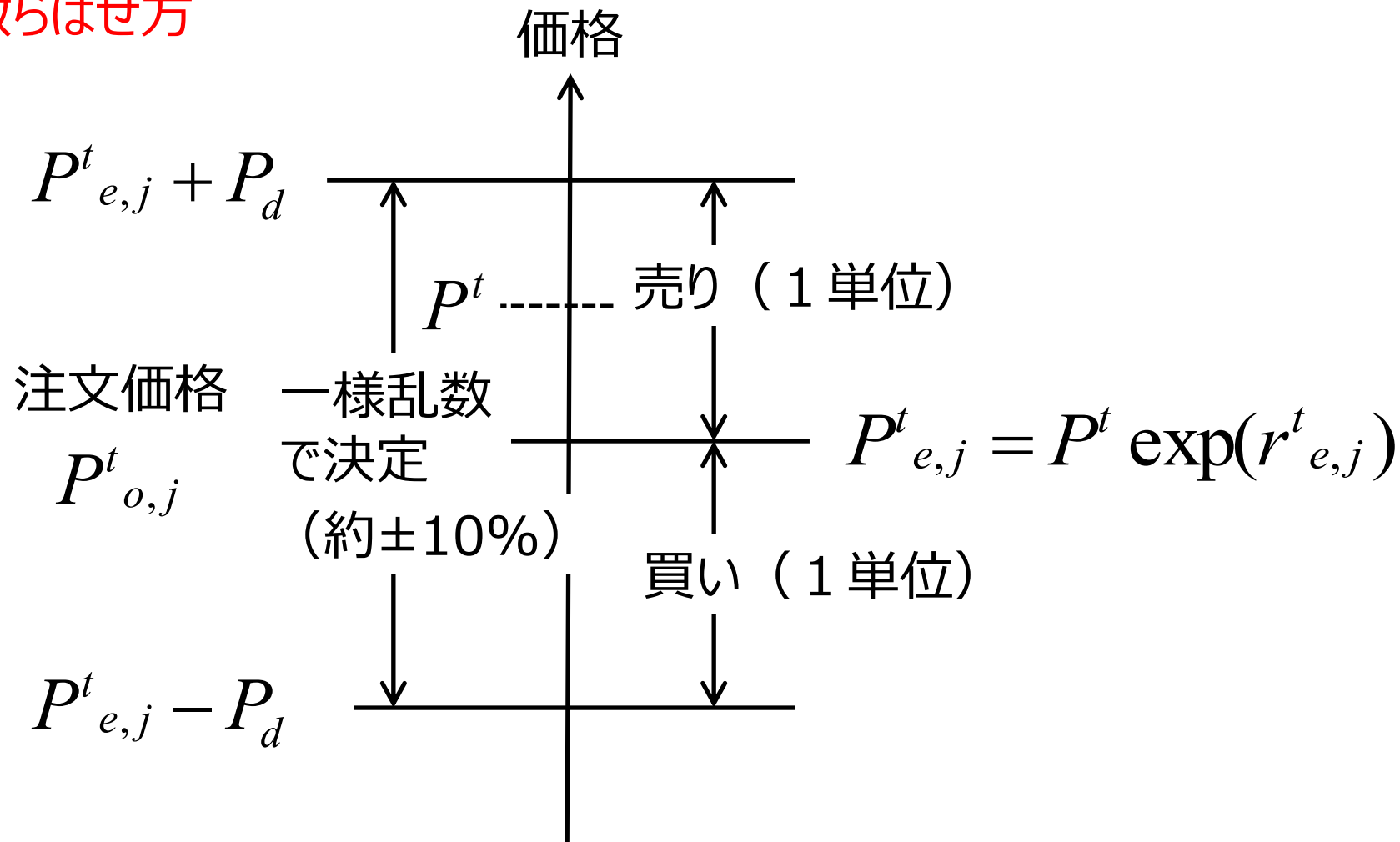
被験者を使った実験市場の結果にあうような人工市場シミュレーションを試みた
ファンダメンタル戦略、順張り戦略をモデルに用いて、パラメータ調整すると、
実験市場の結果とよくあった

Haruvy and Noussair (2006): The Effect of Short Selling on Bubbles and Crashes in Experimental Spot Asset Markets
<https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2006.00868.x>



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

妥当性検証（概略）

知られている全てのスタイライズド・ファクトの再現は目的でない
⇒ 調査目的に応じた適切な複雑さ

★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
→ 市場が荒れたすと持続する

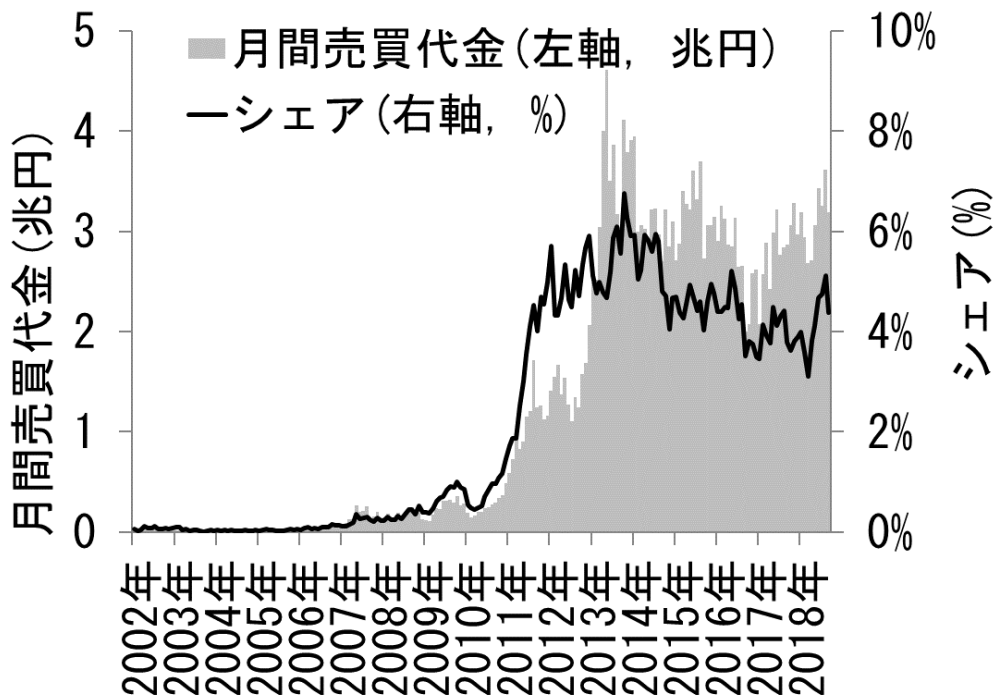
短いラグで0.1～0.2程度、ラグが長くなると急激に減少
ゼロに近づくもののマイナスにはならない（プラスを維持）

(4)
研究事例：呼値の縮小

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（SBI系）、Chi-X Japan（独立系）

→ 東証の経営にとっても無視できない売買代金シェア

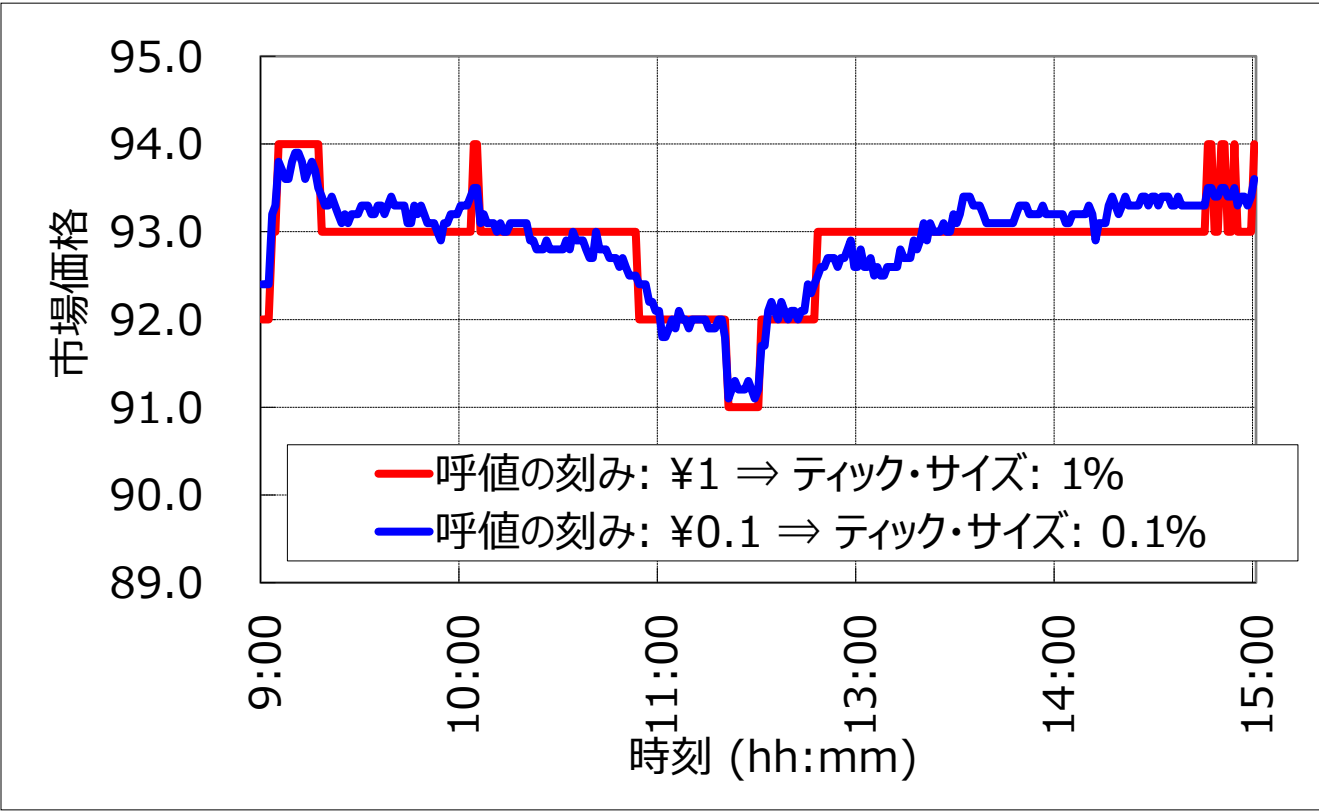
↑ 東証もPTSも売買代金に比例した手数料が主な売上



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

同じ株式の、2つの取引市場での株価の動き



ティック・サイズが大きすぎると騰落率が比較的大きい
⇒投資家が困る⇒他の取引市場で取引⇒取引量シェアが移る

PTSとの競争は“ティック・サイズ”が重要な要素の1つ

ティック・サイズ変更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：呼び値の刻み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 ごく一部の銘柄でティック・サイズを拡大



日本取引所グループ
JPX企業情報

MENU

調査・研究／政策提言

JPXワーキング・ペーパー

日本取引所グループ金融商品取引法研究会

JPX金融資本市場ワークショップからの提言

デリバティブ投資家層の裾野拡大に向けた勉強会

業界連携型DLT実証実験

過去の各種研究会

JPX トップページへ アクセス お問合せ English 中文 文字サイズ 小 中 大 検索キーワード

JPXについて 調査・研究／政策提言 JPXワーキング・ペーパー

2019/04/01 更新 このページを音声で聴く 印刷

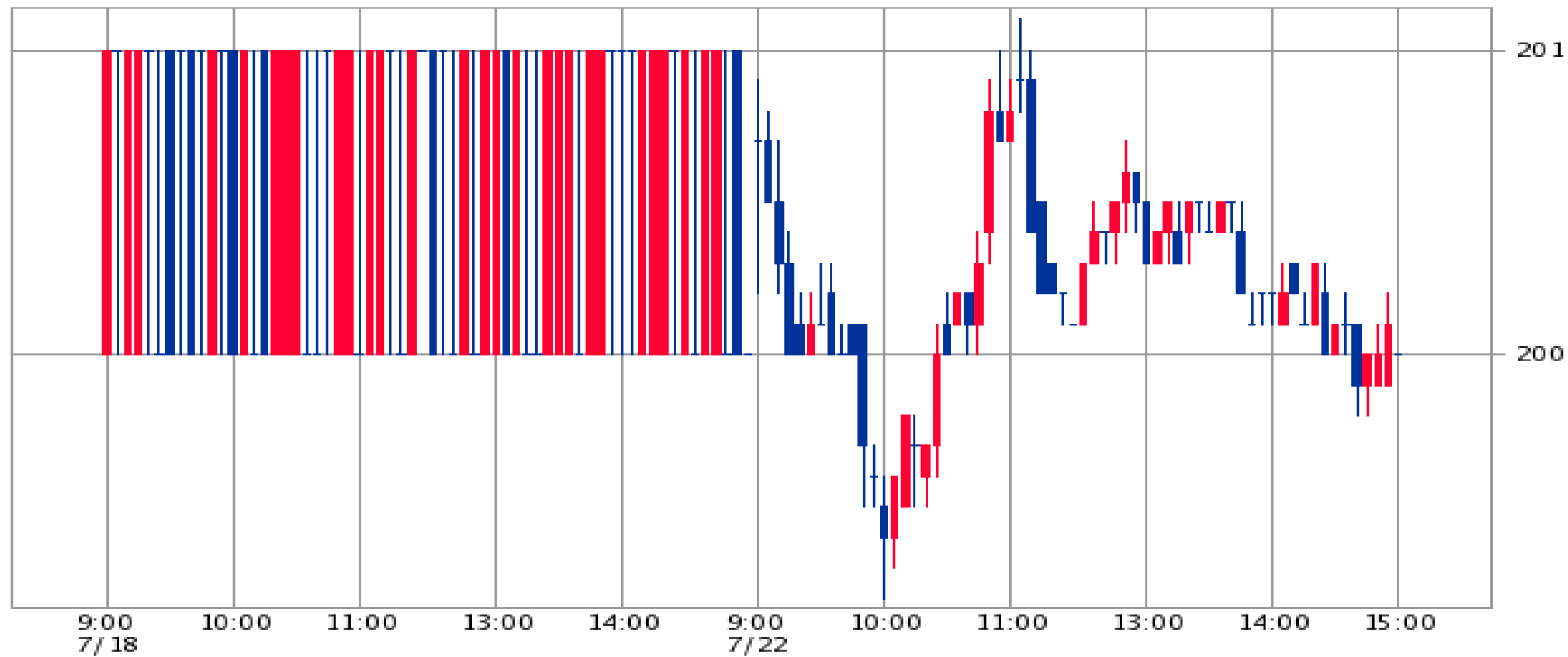
JPXワーキング・ペーパー

JPXは、競争力強化に向けて、市場を巡る様々な環境変化や法制度等に関する調査・研究を進めております。JPXワーキング・ペーパーは、株式会社日本取引所グループ及びその子会社・関連会社の役員及び外部研究者による当該調査・研究を取りまとめたものであり、学会、研究機関、市場関係者他、関連する方々から幅広くコメントを頂戴することを意図しております。

なお、掲載されているペーパーの内容や意見は執筆者個人に属し、株式会社日本取引所グループ及びその子会社・関連会社の公式見解を示すものではありません。

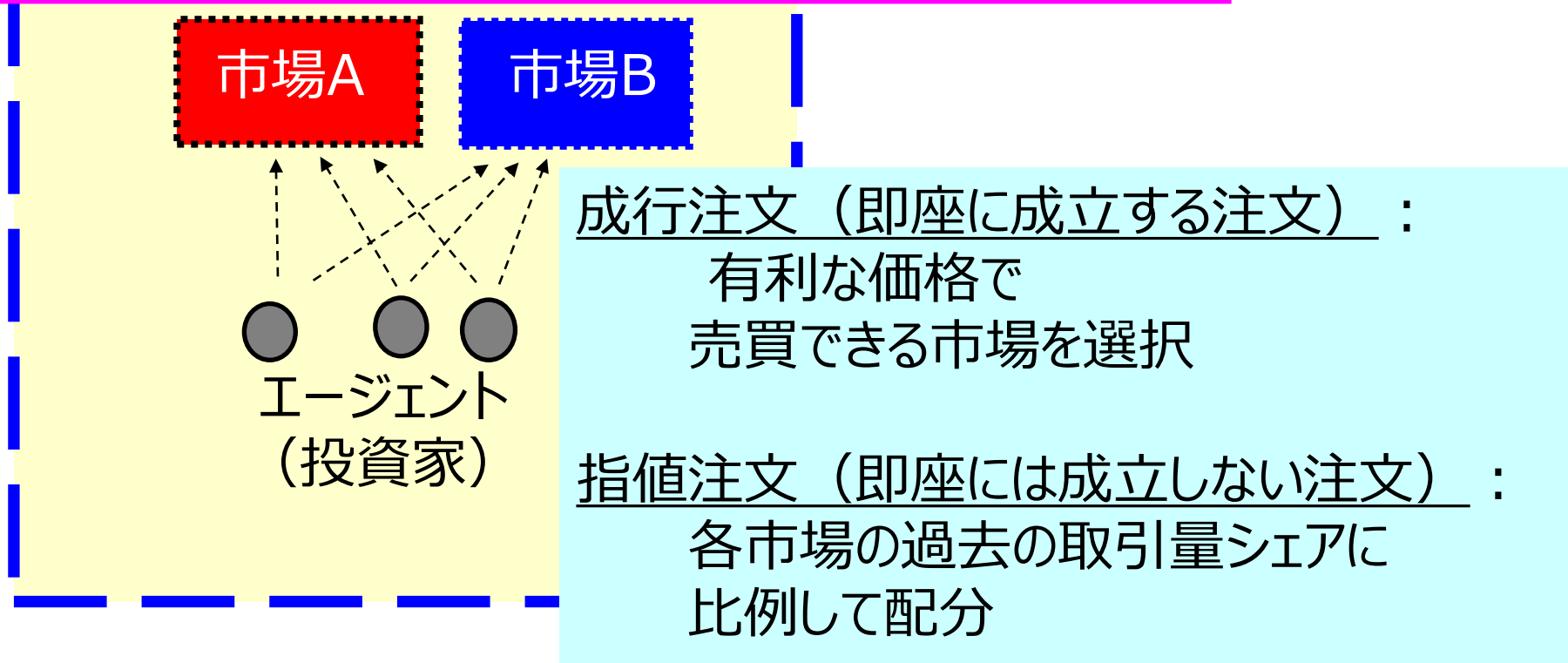
	発行日	タイトル	全文	要約版
Vol. 29	2019/04/01	人工市場を用いた金融市場流動性に影響を与える要因の調査		
Vol. 28	2019/04/01	株価分析に基づく投資家行動の解析	-	-
Vol. 27	2019/02/25	株式とETFの裁定取引にかかるコストと流動性の関係 - 人工市場によるシミュレーション分析 -		

43



← 1円刻み | → 10銭刻み

価格の刻み（ティック・サイズ）のみ異なる市場 A、B で
どのように出来高シェアが移り変わるかを分析



市場 A : 初期の取引量シェア 90%、ティック・サイズ大きい
市場 B : 初期の取引量シェア 10%、ティック・サイズ小さい

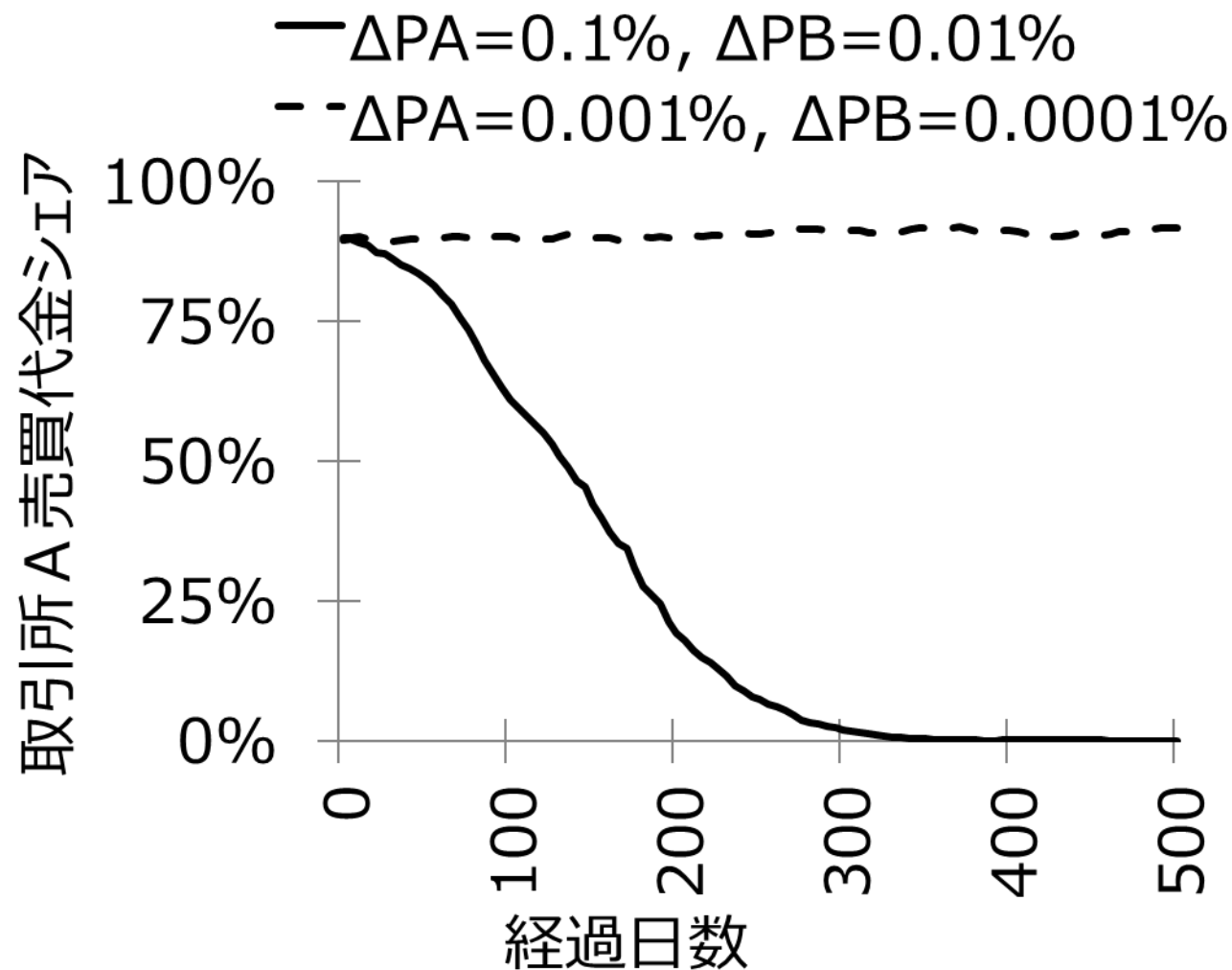
どちらの市場に注文をだすか？

市場 A			市場 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：市場 B ← 99.1円で即座に買えるため
- (3) 100円の買い：市場 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

ティックサイズに差がある時：通常の絶対水準の場合と、小さすぎる場合



ティックサイズに差があるとシェアが移り変わる

横軸は 2 年間 $\Leftrightarrow$ 米国で起きた時間スケールに近い

ただし、ティックサイズの絶対水準が小さいと、ティックサイズ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営業日後の取引市場Aの取引量シェア

取引市場A 500営業日後シェア		取引市場B ティックサイズ ΔPB										
		0.0001%	0.0002%	0.0005%	0.001%	0.002%	0.005%	0.01%	0.02%	0.05%	0.1%	0.2%
取引 市場A ティック サイズ ΔPA	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%

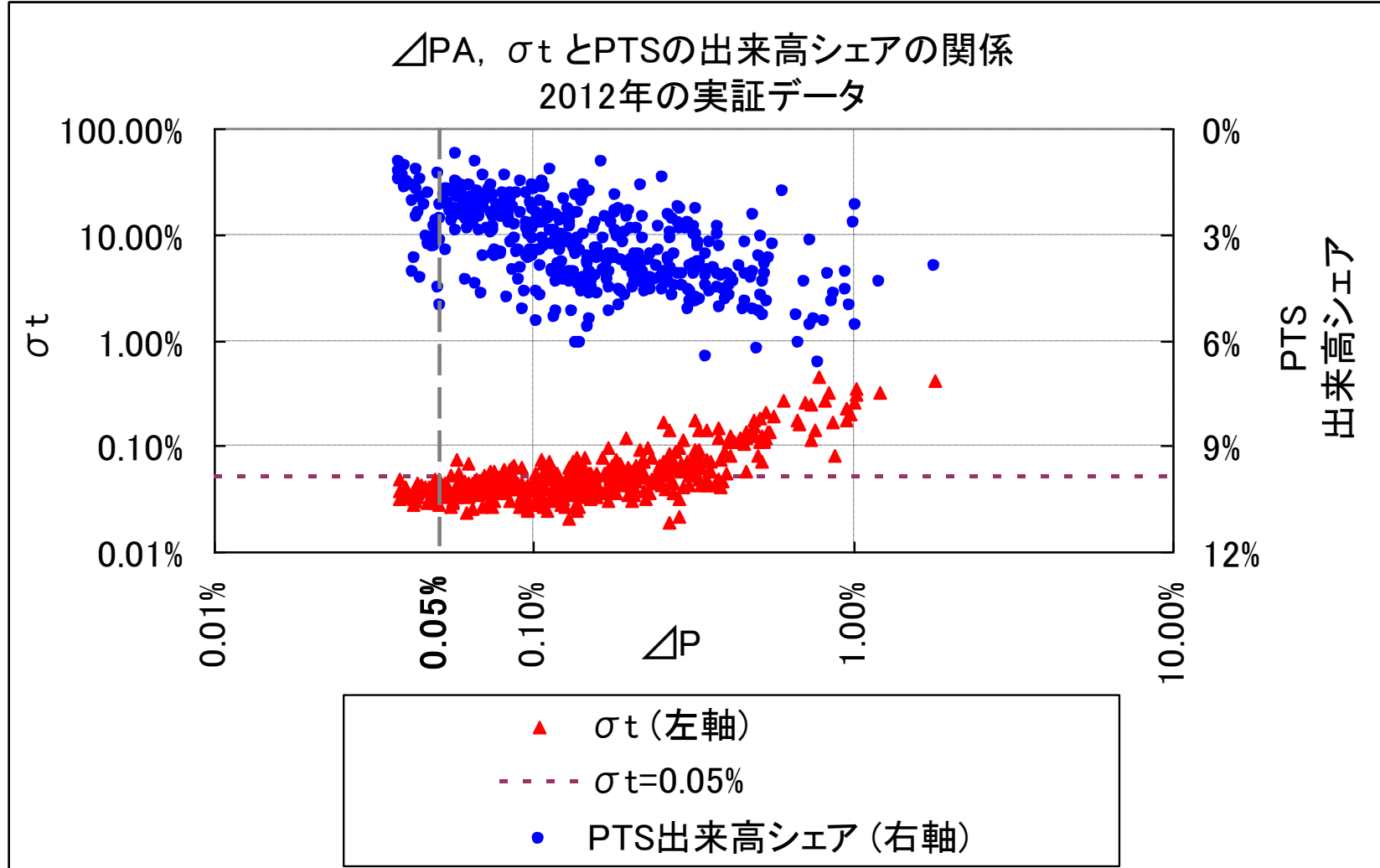
取引市場間シェアが
移り変わらない条件

$\Delta P_B > \Delta P_A$ 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

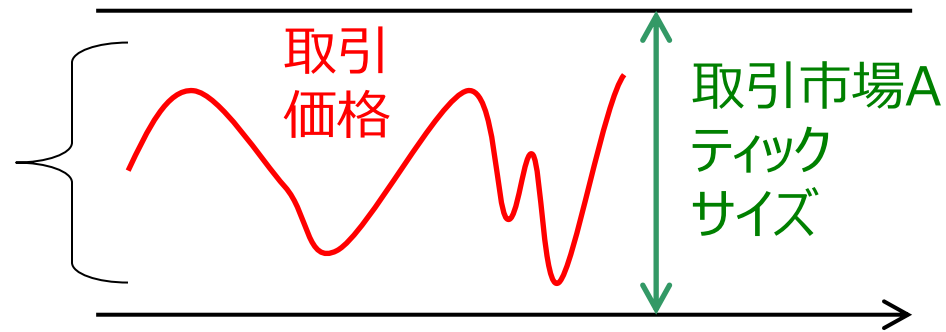
キーパラメーター



ティック・サイズ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

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

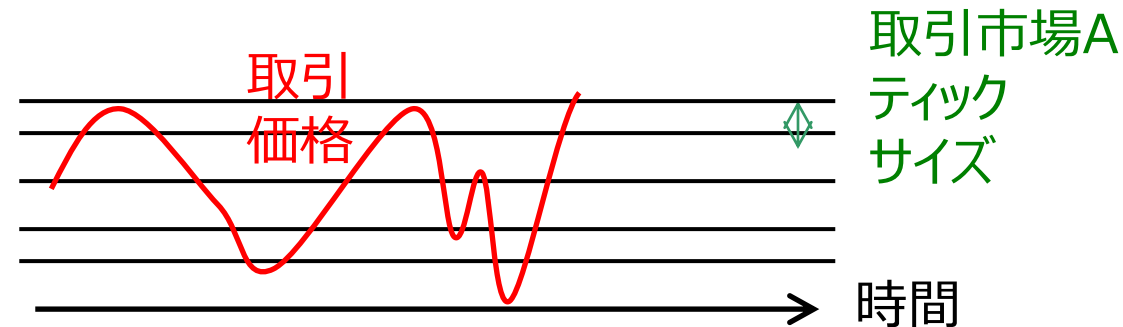
取引市場A
で取引でき
ない領域



取引市場Aの出番がない → 取引市場Bの高い約定率
⇒ 素早く取引市場Bがシェアを奪う

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

取引市場B
の必要性
が薄い



⇒ シェアが動かない

現実の金融市場制度への示唆

- ティック・サイズが大きいとまだとPTSに売買代金シェアを奪われる、その期間は2年程度
- あまりにも小さいティック・サイズの競争は意味がない可能性
- ティック・サイズ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）

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、
整合的な結果が得られた

← ティックサイズの比ではなく差がシェアの
移る速さを決める

← ティックサイズ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

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

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

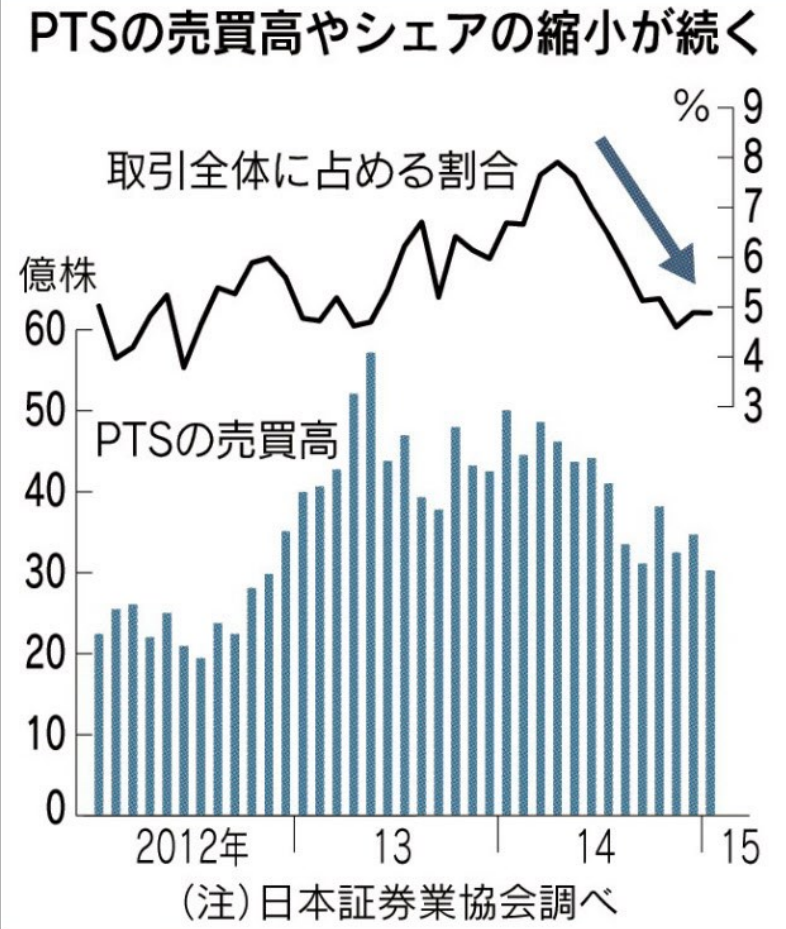
Therefore, it is found that share is shifted from a market with a larger tick size to a market with a smaller tick size. Moreover, the size of share-shift is determined by difference between tick sizes, not ratio between tick sizes.

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>



ティック・サイズが大きすぎる・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%

100

7.4%

0.3%

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

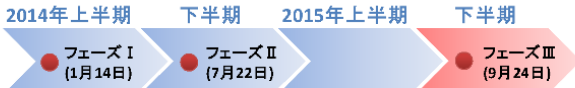
0.5%

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



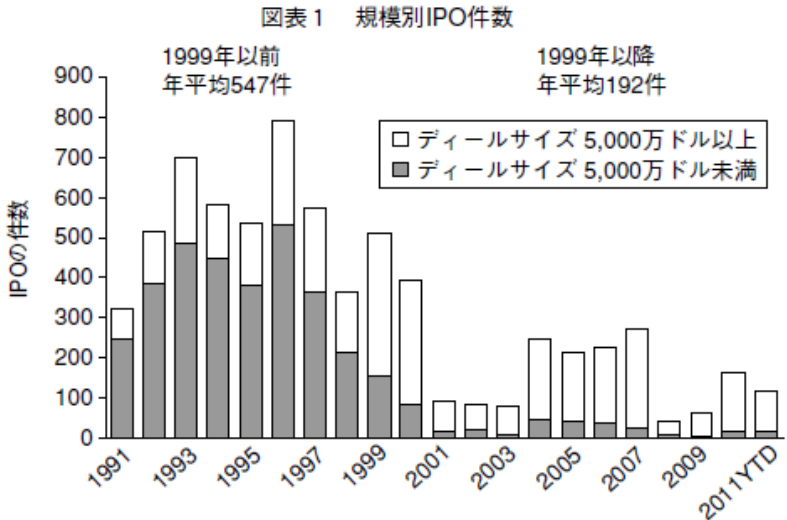
<フェーズⅢ対応内容>

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：ティックサイズが小さすぎる？



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



<https://sigfin.org>

年2回（10月ごろと3月ごろ）東京都内で開催
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://sigfin.org/mailman/listinfo/jsai-fin>

- ✓ 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

この資料はこちらにあります： <https://mizutatakanobu.com/2021e.pdf>

もし時間があれば次ページ以降の私の最近の研究を紹介します
人工知能が相場操縦を勝手に行う可能性の検討--遺伝的アルゴリズムが人工市場で学習する場合--

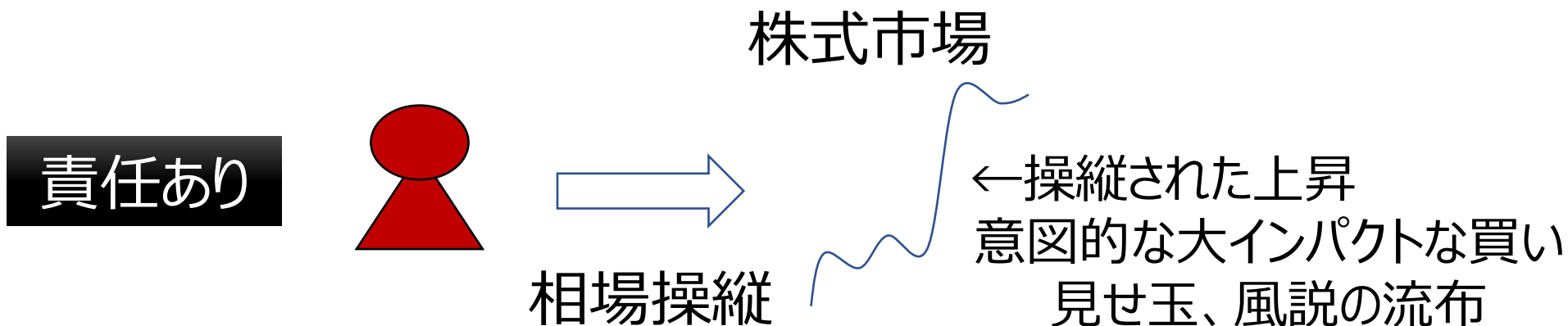
<https://sigfin.org/025-15/>

<https://mizutatakanobu.com/2020SIGFIN.pdf>



相場操縦は犯罪です

相場(市場価格)を自分に有利になるように動かし利益を得ようとする戦略



本来の価格形成を阻害する不正な行為であるとして多くの市場で禁止

日本においてもインサイダー取引にならぶ検挙数が多い不公正取引

証券取引等監視委員会課徴金事例集・開示検査事例集 <https://www.fsa.go.jp/sesc/jirei/index.htm>

人工知能が勝手に相場操縦をしたら作成者の責任？

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
－投資判断におけるアルゴリズム・AIの利用と法的責任－ (2018/9/11)

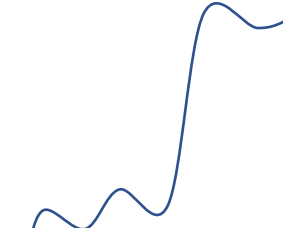
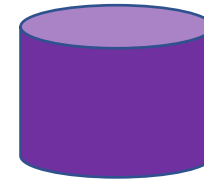
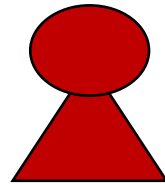
https://www.boj.or.jp/announcements/release_2018/rel180911a.htm/

人工知能作成者

人工知能

株式市場

責任あり



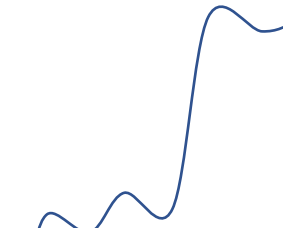
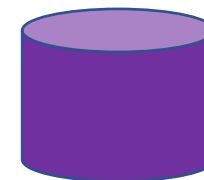
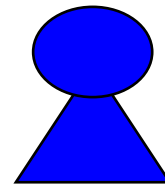
相場操縦の意図

相場操縦

現在の日本の法律だと

「あり」

責任
問えない
場合も



相場操縦の意図

相場操縦

「なし」

刑事事件化には「故意」である必要がある

人工知能が勝手に相場操縦を行った場合、責任が問えないケースがあると指摘

このままだと「人工知能が勝手にやった」と言い逃れする人間が続出する懸念

秘書が勝手にやったみたいなの...

そもそも、人工知能が勝手に相場操縦することはあり得るのか？

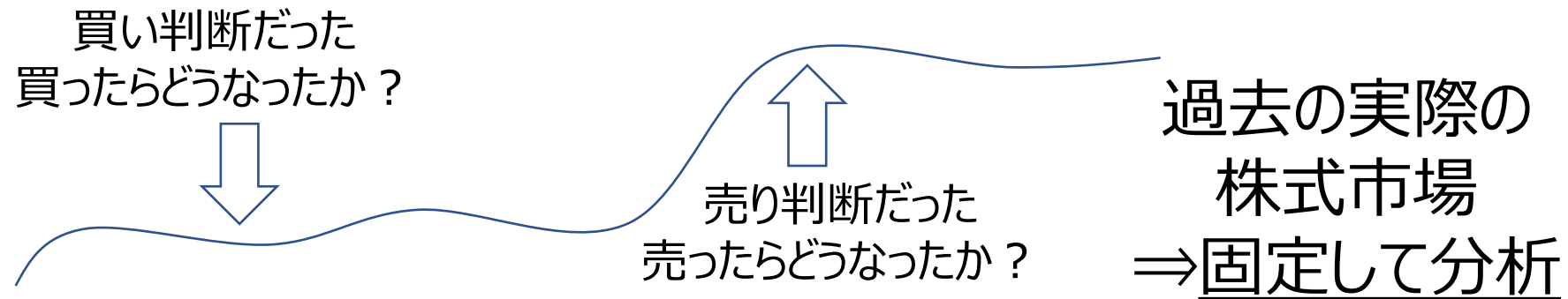
同報告書の重要な指摘

自分の取引が市場価格に与える影響を
継続的に学習・分析する人工知能なら相場操縦しうる

しかし現実には、ほとんどの場合、自動取引戦略の評価・学習は「バックテスト」で行う

「バックテスト」

過去の実データを用いて「もし取引していたらどうなっていたか」を分析



「バックテスト」では自分の取引が市場価格に与える影響は考慮できない

「バックテスト」では相場操縦を発見できない

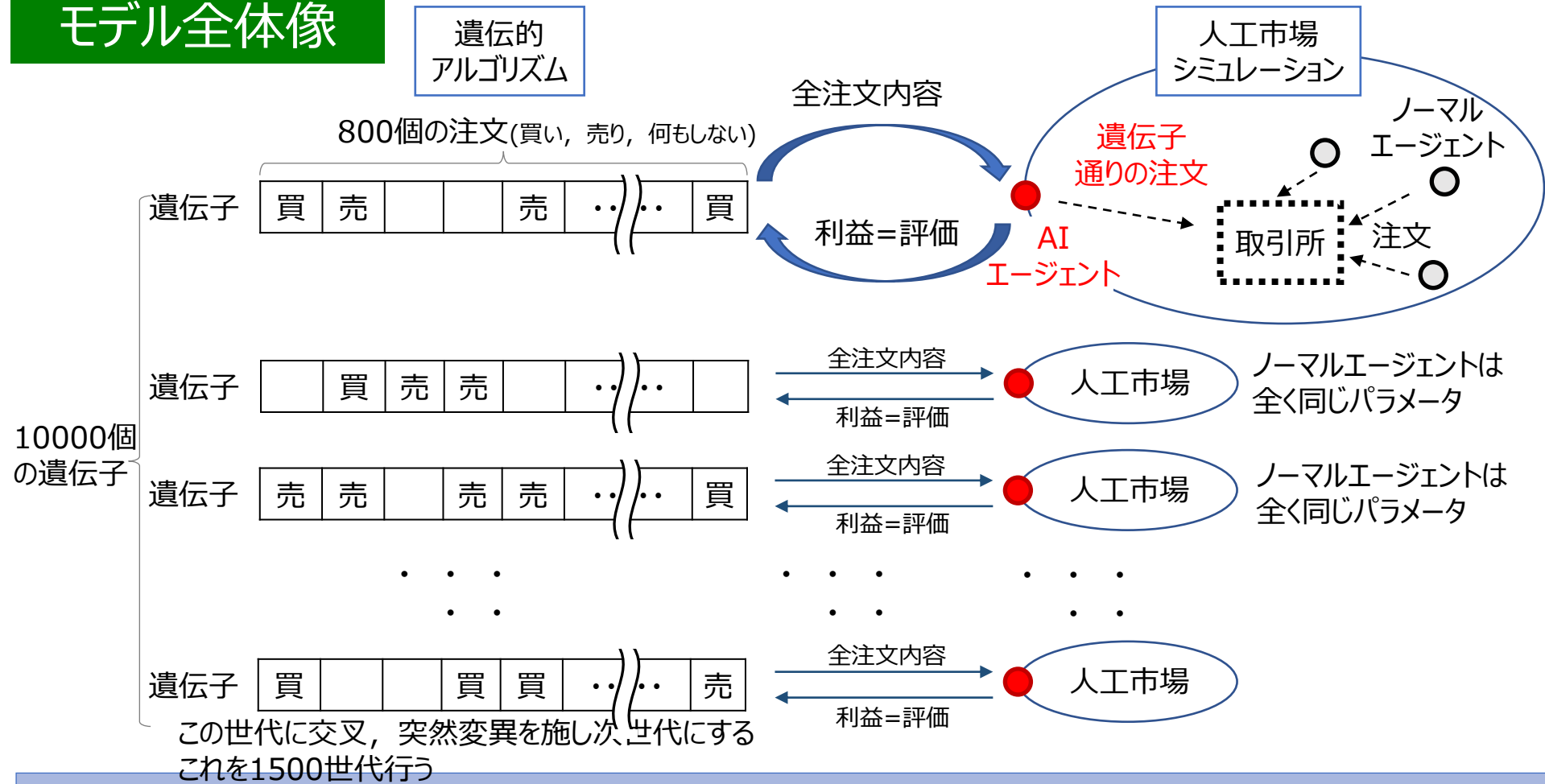
しかし、「人工市場モデルによるシミュレーション」なら、
自分の取引が市場価格に与える影響を考慮できる！

今後、人工市場を用いて学習をする人工知能が
市場に参加することが考えられ、
もし、それが勝手に相場操縦をする可能性があるのなら、
その時のために法律・ルールを整備する必要がある

そこで本研究では、

遺伝的アルゴリズムを用いた人工知能が
人工市場シミュレーションを用いて学習するモデルを構築し、
（人工知能の作成者が相場操縦という取引戦略を
全く意図していなかったにも関わらず、）
人工知能が学習を通じて相場操縦という取引戦略を発見し、
実行に移すのか調べる。

モデル全体像



1つの遺伝子：全800個のAIEージェントの取引行動

1つの人工市場：1つの遺伝子に対して1つの人工市場（1つの仮想世界）

1体のAIEージェント(遺伝子通りの取引を行う)とノーマルエージェント

ノーマルエージェント：全人工市場で全く同じパラメータ: AIEエージェントの売買が同じであれば同じ売買となる

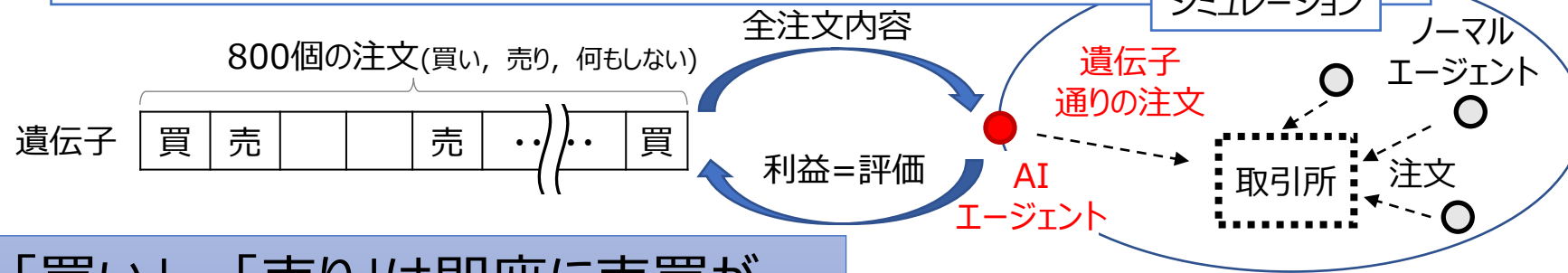
各遺伝子の評価：各人工市場内のAIEエージェントの利益: どういう売買が一番儲かるか？を調べる

遺伝的アルゴリズム：10000個の遺伝子を1500世代にわたって世代交代を行い

評価の高い遺伝子(利益の高い取引行動)を見つける

AIエージェント

いかなる投資戦略も意図しないことが明確なモデルであることが重要
あえて具体的な売買戦略(順張り、逆張りなど)のモデル化を行わず、
ある人工市場環境で最適なすべての取引を直接探し出すモデルとした
本研究の目的はあくまでも相場操縦という戦略を人工知能が学習時点で見つけ出せるかどうか
に注目しており、実際にモデルを稼働させることは目的としない
⇒ 具体的な戦略によってはさらに容易に相場操縦を見つけられる



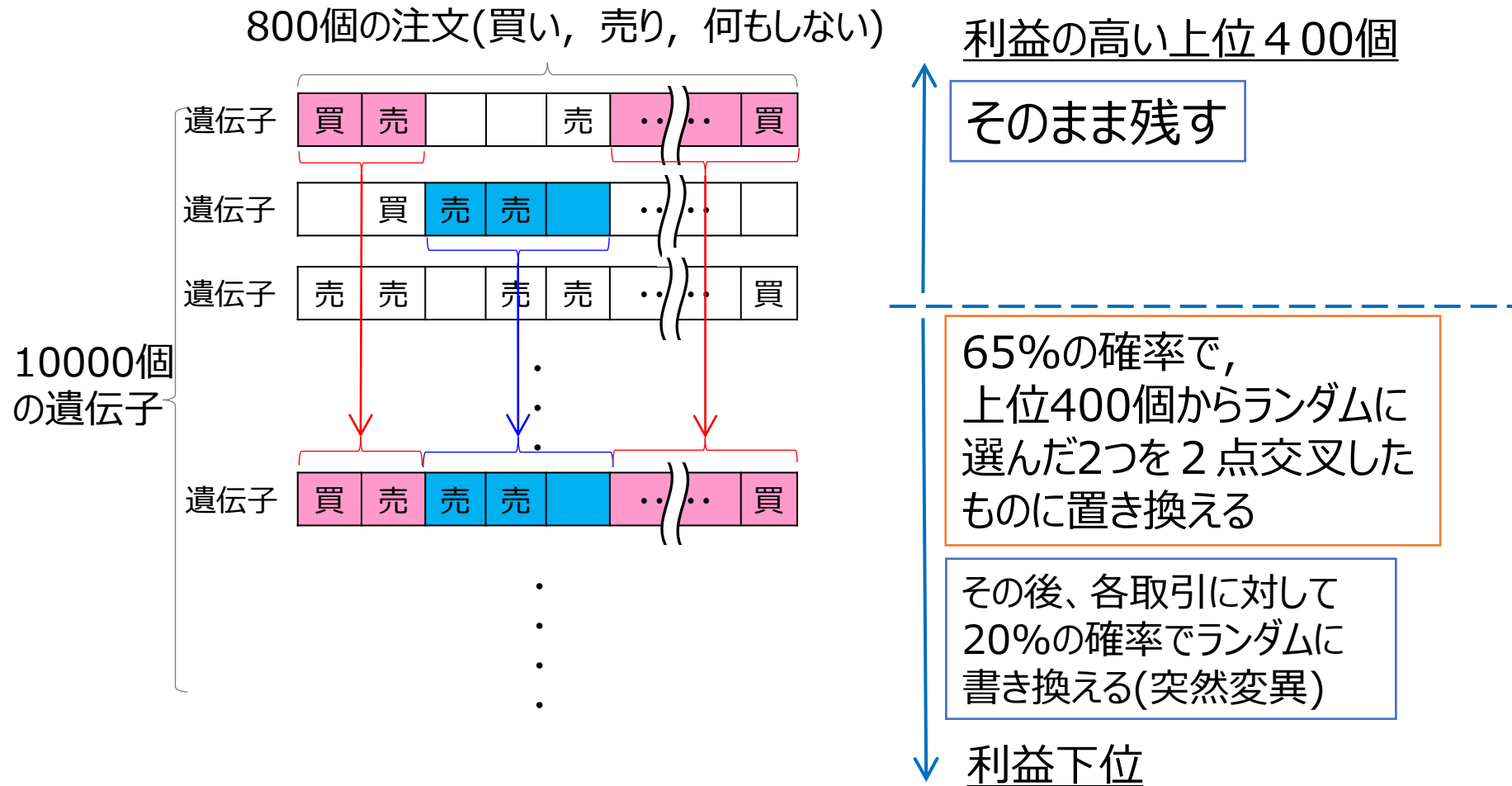
「買い」、「売り」は即座に売買が
成立する価格で注文
(10ティック時刻ごと, 数量は1株)

当然、AIエージェントの売買によって市場価格の時系列は変化する
(ノーマルエージェントはまったく同じでも)

「自分の取引が市場価格に与える影響を継続的に学習・分析」できる
(バックテストとは異なる)

遺伝的アルゴリズム

まず、利益が高い順に並べる



1500世代にわたって世代交代を行い
評価の高い遺伝子(利益の高い取引行動)を見つける

遺伝的アルゴリズムは多くの研究で用いられている普通の手法 [Goldberg 1989]

市場価格とAIエージェントの売買数量

買いを減らすも上昇継続 ← ノーマルエージェントのテクニカル戦略が先の上昇のせいで上昇を予想してしまった

大量の買い → 上昇させる

売り ← 先の上昇のおかげで買った価格より高く売れる

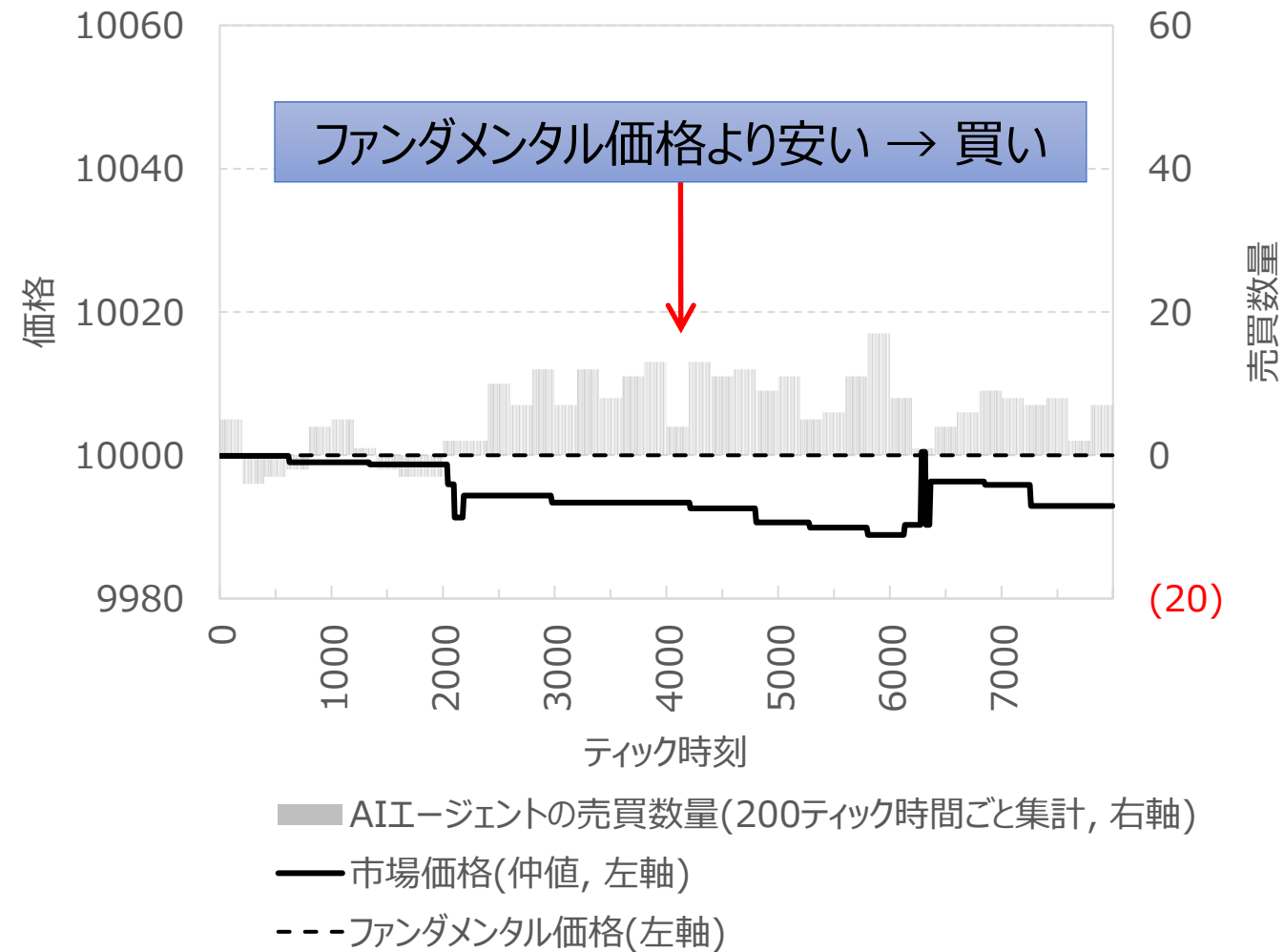


- AIエージェントの売買数量(200ティック時間ごと集計, 右軸)
- 市場価格(仲値, 左軸)
- ファンダメンタル価格(左軸)

AIエージェントのこれらの取引行為は相場操縦に他ならない

バックテストの場合

価格時系列はAIエージェントがない場合と同じ



通常ファンダメンタル戦略に他ならない → 相場操縦は発見しない