

2019年6月4日-7日
第33回 人工知能学会全国大会

<https://www.ai-gakkai.or.jp/jsai2019/>

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—

https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2019.0_201J1302

水田 孝信 スパークス・アセット・マネジメント株式会社

<http://mizutatakanobu.com>

本資料は、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。

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

(1) はじめに

(2) 人工市場モデル

(3) シミュレーション結果

(4) まとめ

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

(1) はじめに

(2) 人工市場モデル

(3) シミュレーション結果

(4) まとめ

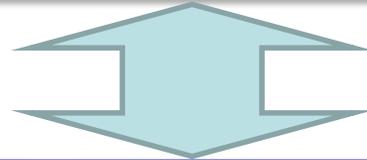
こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

ETF(Exchange Traded Funds, 上場投資信託)

- ✓ 多くの株式や債券などに分散投資された投資信託（ファンド）
- ✓ 証券取引所で取引できる

手軽な分散投資を提供する商品として、投資家に広く普及

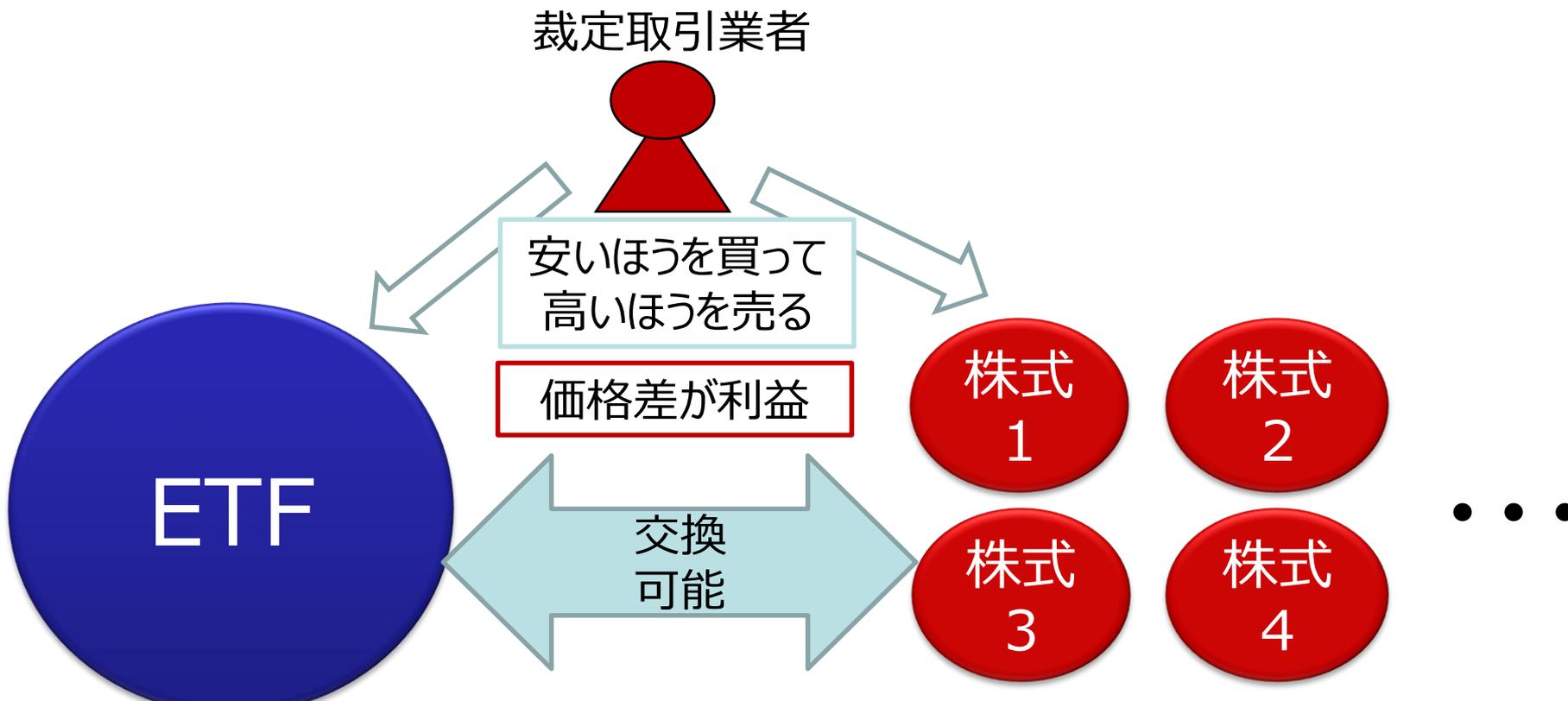


一部のETFは注文量や取引量が少なく取引したいときに適切な価格で取引しづらい（流動性が低い）状況

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

[http://mizutakanobu.com/201906.pdf](http://mizutatakanobu.com/201906.pdf)

ETFと株式の交換、裁定取引

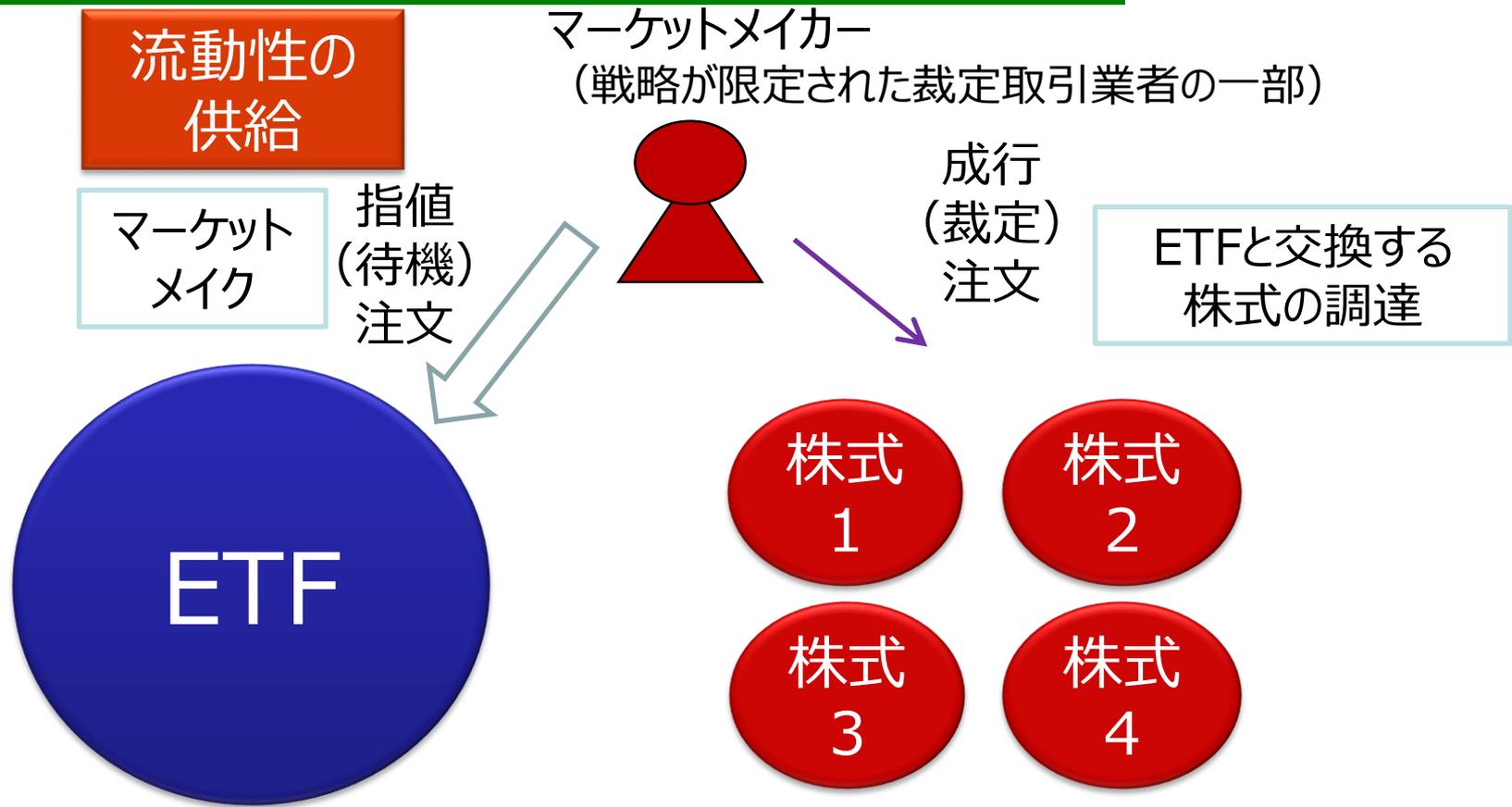


ETFは組み入れている株式をすべて集めたものと交換可能

ETFと組み入れ株式に価格差があるときに、安いほうを買い、交換を行い、高いほうを売って、価格差を利益とすることができる。

ETFへの注文が増え、ETFの流動性を向上させる

マーケットメイカーと手数料優遇策



東京証券取引所は流動性が低いETFの流動性を高めるため、ETFに注文を常にだしておき（マーケットメイク）、利益の機会があれば裁定取引を行う専門業者（マーケットメイカー）には取引手数料を引き下げるなどの制度を2018年に導入した [東証 17].

裁定取引にかかるコストによってETFや株式の流動性がどのように変化するか、そのメカニズムはどのようなものなのかといったことは分かっていない。

実証研究の困難

- ✓ 裁定取引にかかるコストによってETFや株式の流動性がどのように変化するのか、そのメカニズムはどのようなものなのかといった、ミクロ・マクロ相互作用を含むメカニズムを分析できない
- ✓ まだ導入したことがない手数料体系を調べたり、その変更の純粋な効果やメカニズムを議論したりするのは困難



人工市場モデルによるシミュレーション

そこで本研究では、

[水田 13]の人工市場モデルをベースに、2つの株式とそれら合計と同じ価値のある1つのETFという3つの証券に拡張し、これらの証券間の裁定取引を行うエージェントを実装したモデルを構築

株式とETFの裁定取引にかかるコストが流動性に与える影響を分析

金融市場の規制・ルール変更の議論に貢献

呼値の刻みの縮小（適正化）、空売り価格規制（アップティック規制）、適切な値幅制限の制限時間や値幅、ダーク・プールの適正な普及率、バッチオークションの副作用、H F T が市場間競争に与える影響、証券取引所システムの適切な速さ、レバレッジETFの影響、信用分散規制の影響、自己資本規制やVaRの効果、銀行の連鎖倒産、クラッシュの伝播・それをおさえる制度・規制
売買の少ないアクティブ運用が市場を効率化するかどうか

NATUREやSCIENCEに、人工市場に期待をかける記事

Farmer and Foley (2009) The economy needs agent-based modelling, Nature, 460, 685-686, Aug 2009 <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/full/460685a.html>

オバマ大統領の経済チームが作成した洗練された経済・金融（数理）モデルはリーマンショックを理解するのに役に立っただろうか、いや役に立っていない。今まさに、エージェント・ベースド・モデル（人工市場モデル）が必要だ

Battiston et al. (2016) Complexity theory and financial regulation-Economic policy needs interdisciplinary network analysis and behavioral modeling-, Science 19 Feb 2016, Vol. 351, Issue 6275, pp. 818-819. <http://science.sciencemag.org/content/351/6275/818>

銀行間ネットワークやエージェント・ベースド・モデル（人工市場モデル）の研究を複雑系モデルとして紹介。金融の応用研究の分野では、複雑系モデルを使った研究は、まだ初期段階だがとても期待される分野。エージェント・ベースド・モデルは、金融の複雑系に潜む正のフィードバック現象を弱くし金融システムの安定化させるような、政策や規制はどのようなものかの知見を得られる。世界の金融システム全体をリアルタイムに監視する技術へつなげたいと、抱負。

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 ⑧



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）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

31本中、実に9本が人工市場を用いた研究

呼び値の刻み、HFT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>

日本銀行職員のワーキング・ペーパー

Toshiyuki Sakiyama and Tetsuya Yamada, Market Liquidity and Systemic Risk in Government Bond Markets: A Network Analysis and Agent-Based Model Approach

<http://www.imes.boj.or.jp/research/abstracts/english/16-E-13.html>

(日本語要約版) https://www.boj.or.jp/research/wps_rev/lab/lab16j09.htm/

国債市場のデータ分析と銀行ネットワークシミュレーションを比較

EUが資金を出す金融政策研究プロジェクト

Integrated Macro-Financial Modelling for Robust Policy Design Work Package 7: Bridging agent-based and dynamic-stochastic-general-equilibrium modelling approaches for building policy-focused macro financial models <http://www.macfinrobods.eu/research/workpackages/WP7/wp7.html>

当然のようにエージェント・ベースド・モデルの研究が含まれる。マクロ経済を分析するにDSGEモデルでは不十分で、複雑系をそのまま扱えるエージェント・ベースド・モデルをDSGEモデルと比較可能な感じで導入しようという感じの研究

(1) はじめに

(2) 人工市場モデル

(3) シミュレーション結果

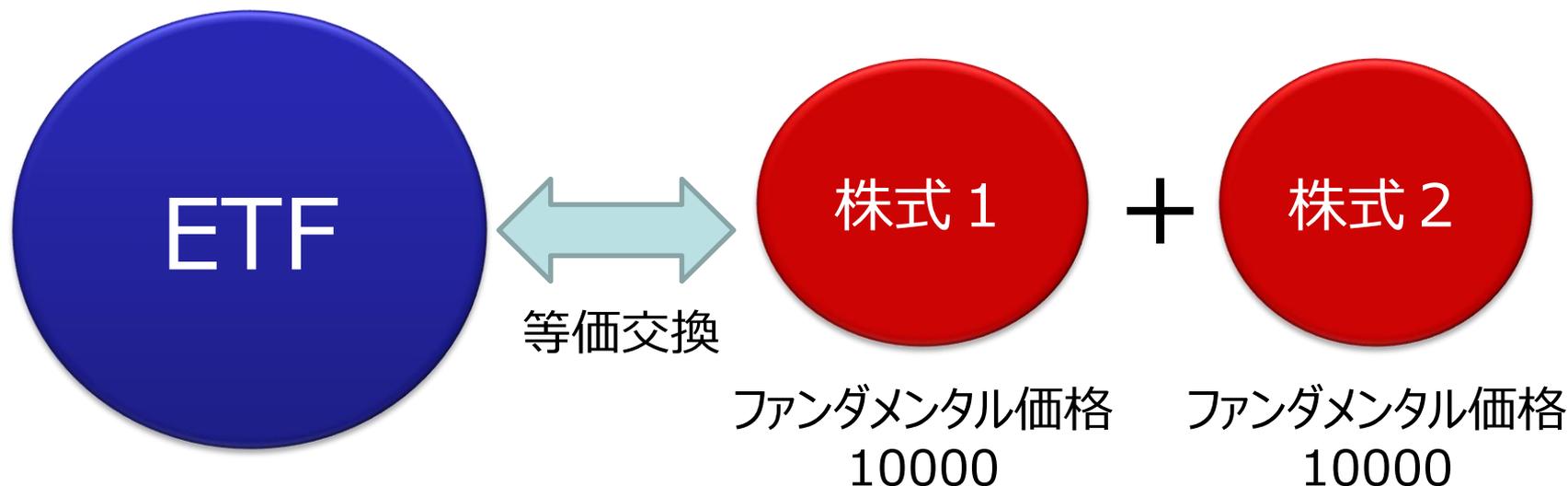
(4) まとめ

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

$$\text{ETF}(1 \text{ 株}) = \text{株式 1}(1 \text{ 株}) + \text{株式 2}(1 \text{ 株})$$

で交換できる

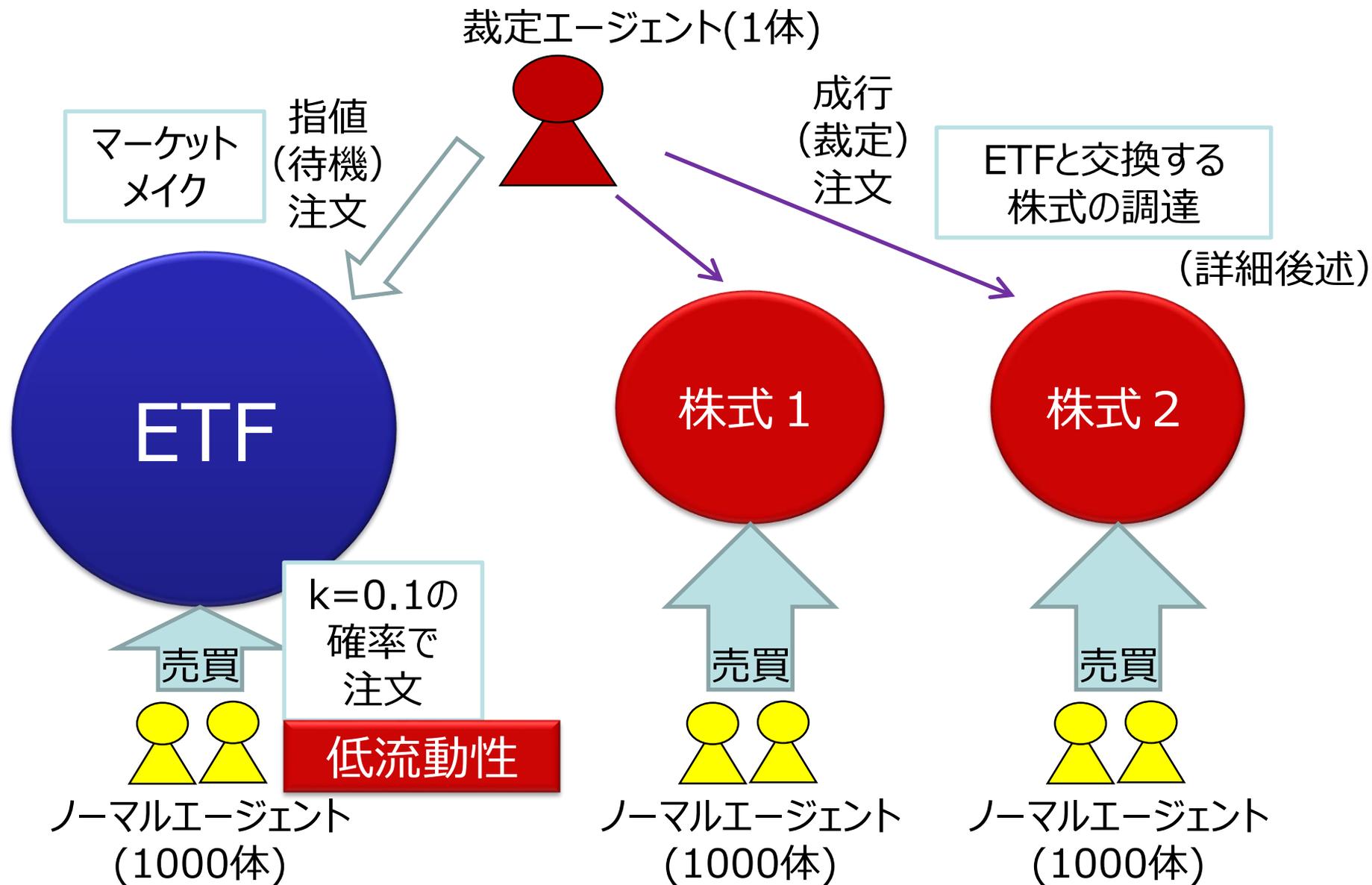


ファンダメンタル価格
20000

注文の量
=各株式の 1/10

(各時刻でエージェントが注文をだす確率が10%)

ノーマルエージェントと裁定エージェント



ETF, 株式 1・2 それぞれに別々の1000体ずつのノーマルエージェントが売買する

ノーマルエージェント

j : エージェント番号
(各株式・ETFに1000体づつ)
 t : 時刻(ティック時刻)

過去リターン

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

テクニカル

予想リターン

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

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

$w_{i,j}$ $i=1,3$: 0~1
 $i=2$: 0~10
 τ_j 0~10000

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_j^t
正規乱数
平均0
 $\sigma=3\%$

予想価格

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

* ファンダメンタル戦略

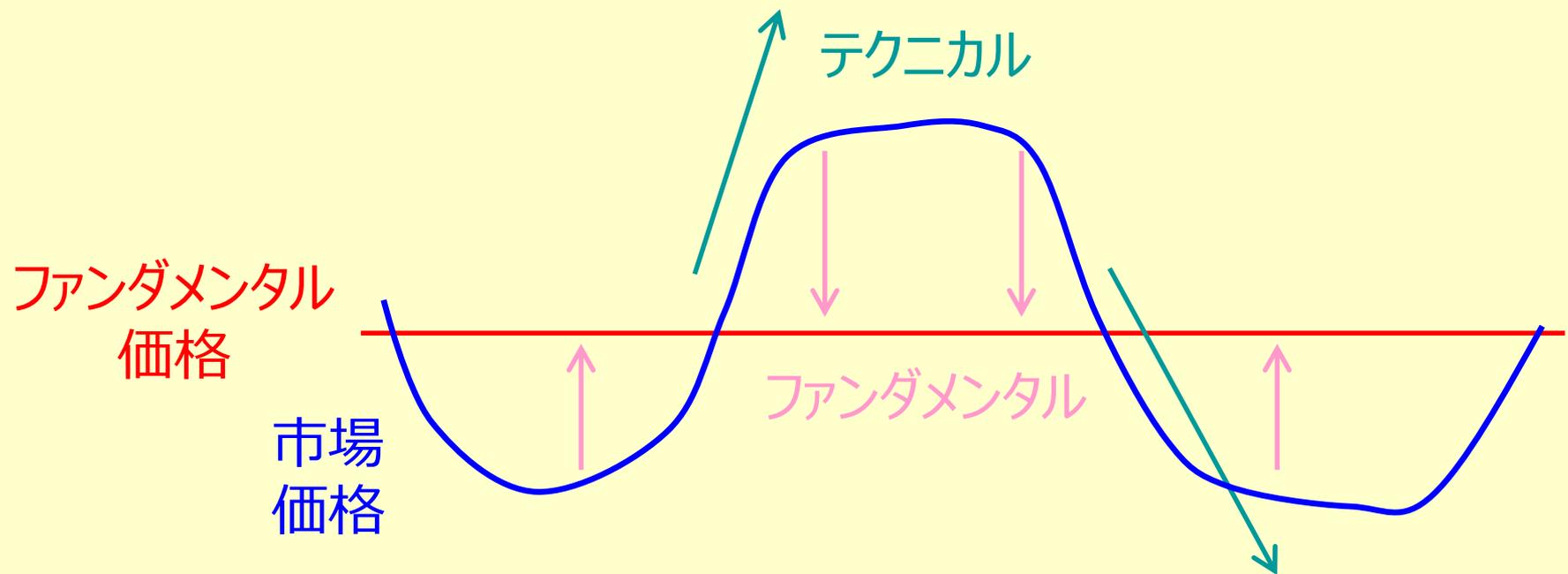
ファンダメンタル価格 $>$ 市場価格 \Rightarrow 上がると予想

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

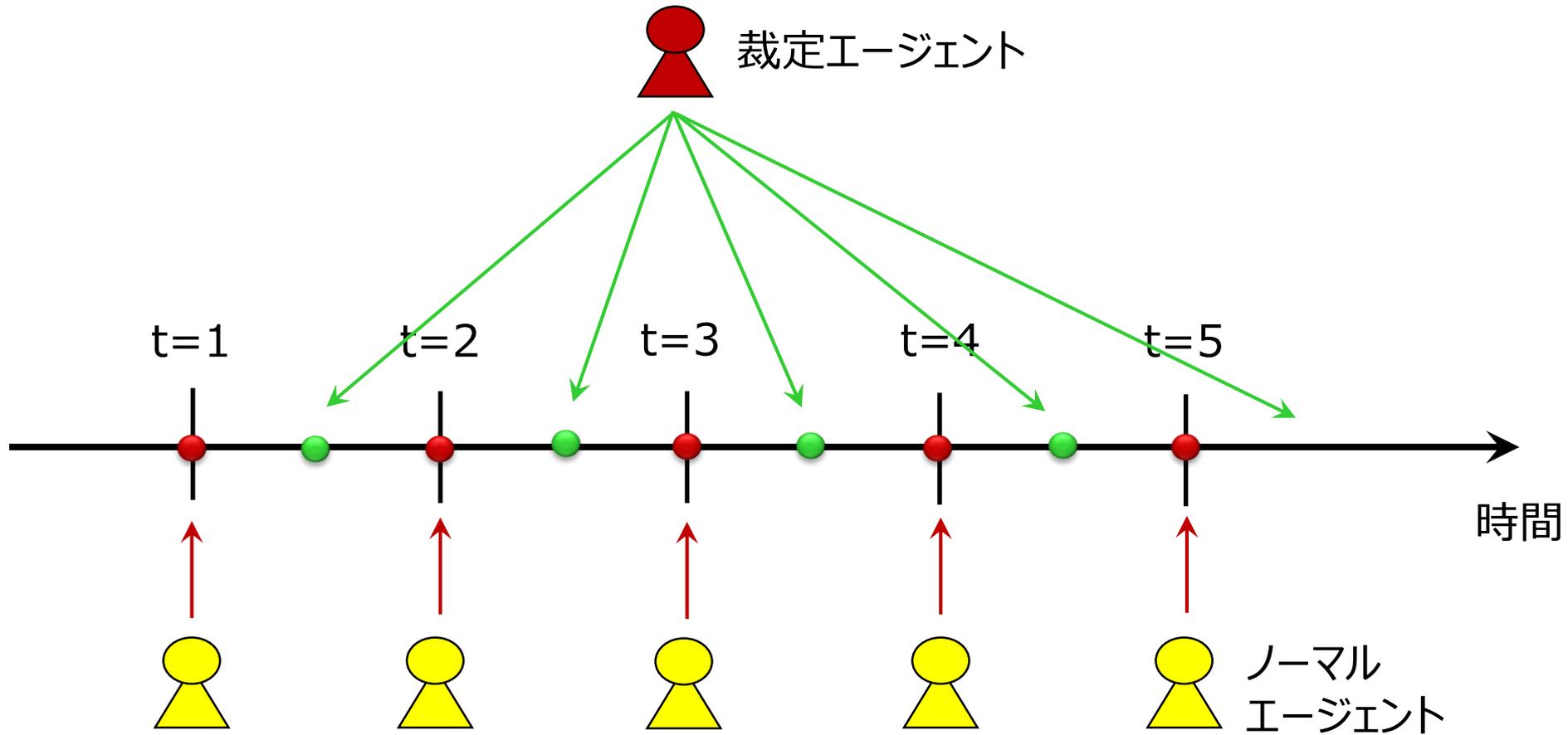
過去リターン $>$ 0 \Rightarrow 上がると予想

過去リターン $<$ 0 \Rightarrow 下がると予想



裁定エージェント (1/3)

注文の頻度



裁定エージェントは、新規注文、キャンセル、変更をいつでもできる

裁定エージェント (2/3)

$$\text{ETF}(1 \text{ 株}) = \text{株式 1}(1 \text{ 株}) + \text{株式 2}(1 \text{ 株})$$

ETF			株式 1			株式 2		
売り	価格	買い	売り	価格	買い	売り	価格	買い
7	20300		30	10400		50	10400	
10	20200		44	10300		70	10300	
	20100		70	10200		90	10200	
	20000		134	10100		116	10100	
	19900	←		<u>10000</u>	<u>120</u>		<u>10000</u>	<u>154</u>
	19800	10		9900	88		9900	60
	19700	6		9800	52		9800	55
	19600	4		9700	25		9700	31

もし、

$$\text{ETF最良買い価格} + \text{コスト} < \text{株式 1 最良買い価格} + \text{株式 2 最良買い価格}$$

なら、ETFに買い指値注文 (1株) : 19900円で買ったものが10000円×2で売れる
 売り指値注文も逆に同様 ↑ 手に入れたETF1株を株式 1株ずつに交換

コスト

売買手数料のみならず、(1取引あたりに)必要な利益も含む

裁定エージェント (3/3)

$$\text{ETF}(1 \text{ 株}) = \text{株式 1}(1 \text{ 株}) + \text{株式 2}(1 \text{ 株})$$

ETF			株式 1			株式 2		
売り	価格	買い	売り	価格	買い	売り	価格	買い
7	20300		30	10400		50	10400	
10	20200		44	10300		70	10300	
	20100		70	10200		90	10200	
	20000		134	10100		116	10100	
→	19900	1	→	<u>10000</u>	120	→	<u>10000</u>	154
	19800	10		9900	88		9900	60
	19700	6		9800	52		9800	55
	19600	4		9700	25		9700	31

指値注文が約定（取引成立）したら
瞬時に株式 1、株式 2 に成行売り注文（1 株ずつ）を出す
そして、可能なら指値注文を瞬時にまた出す

19900円で買ったものが10000円×2で売れる

↑手に入れたETF1株を株式 1 株ずつに交換

* ノーマルエージェントは 1 株ずつしか注文をださないため、
裁定エージェントは 1 株の指値注文で十分である

(1) はじめに

(2) 人工市場モデル

(3) シミュレーション結果

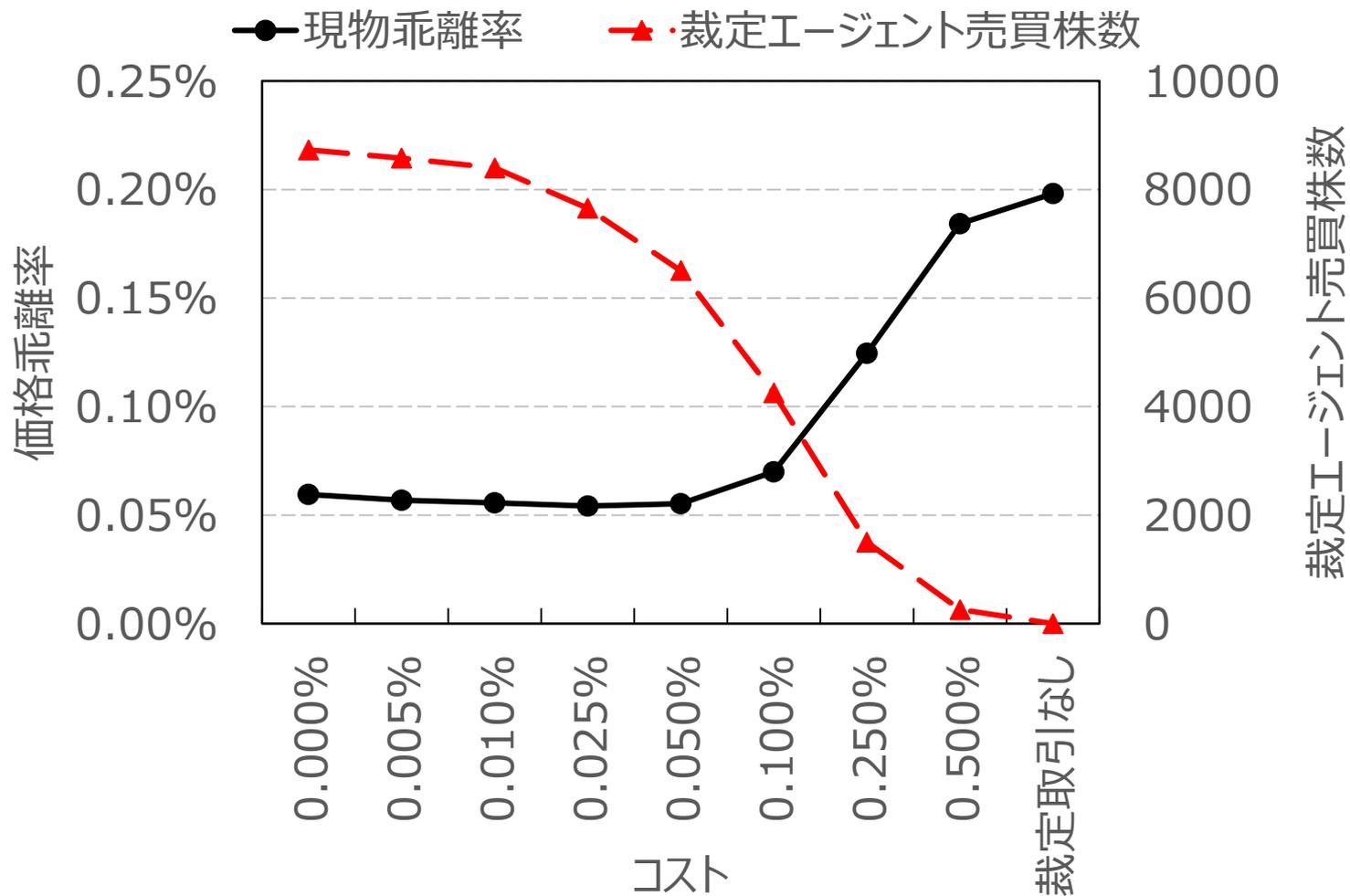
(4) まとめ

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

価格乖離率と裁定エージェント売買株数

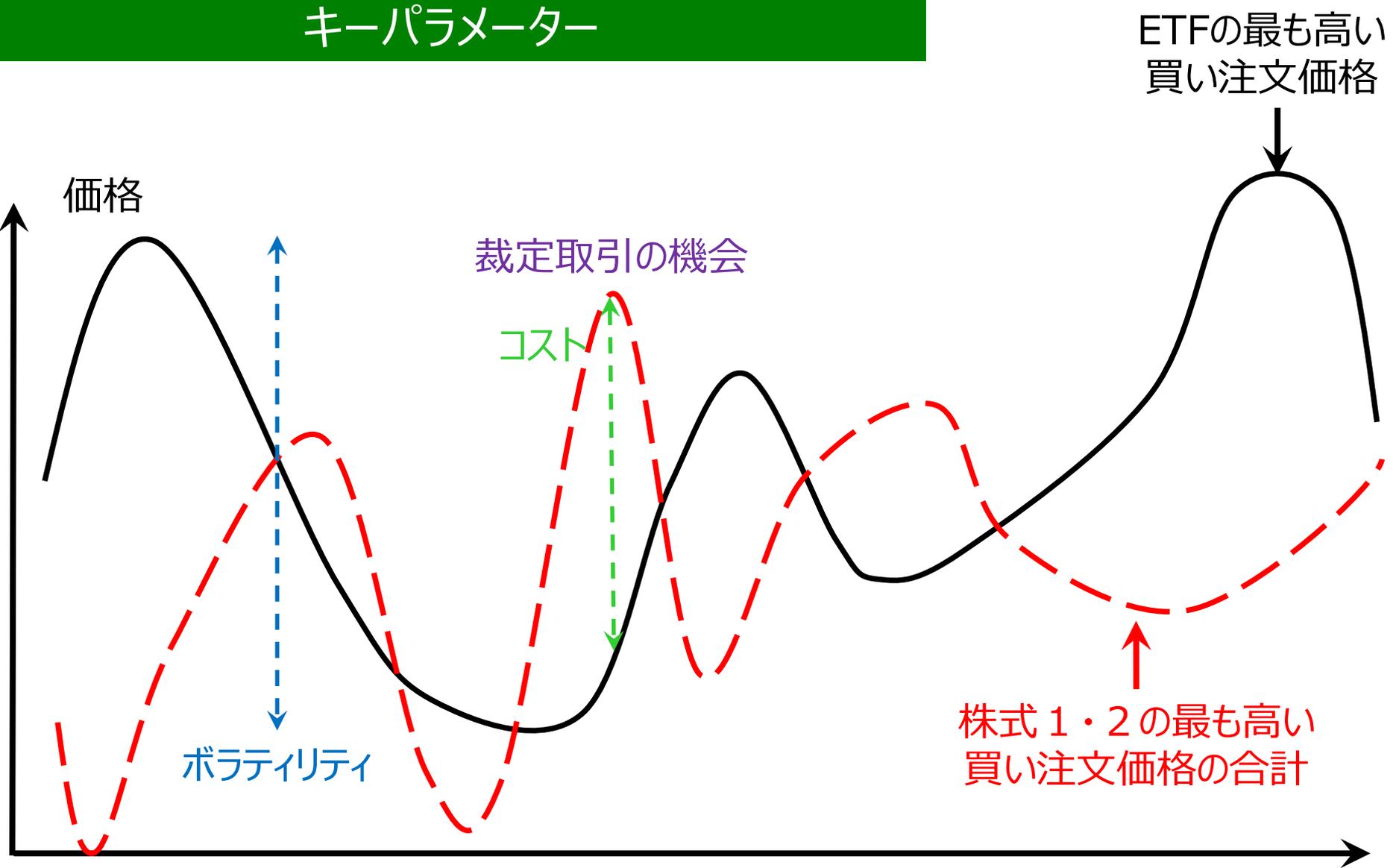
$$\text{価格乖離率} = \text{ETFの仲値} / \text{株式1・2の仲値合計} - 1$$



コスト0.1%あたりが閾値：これ以上下げても効果薄い

閾値は短期ボラティリティに近い値

キーパラメーター



短期のボラティリティが必要なコスト幅を発生させている

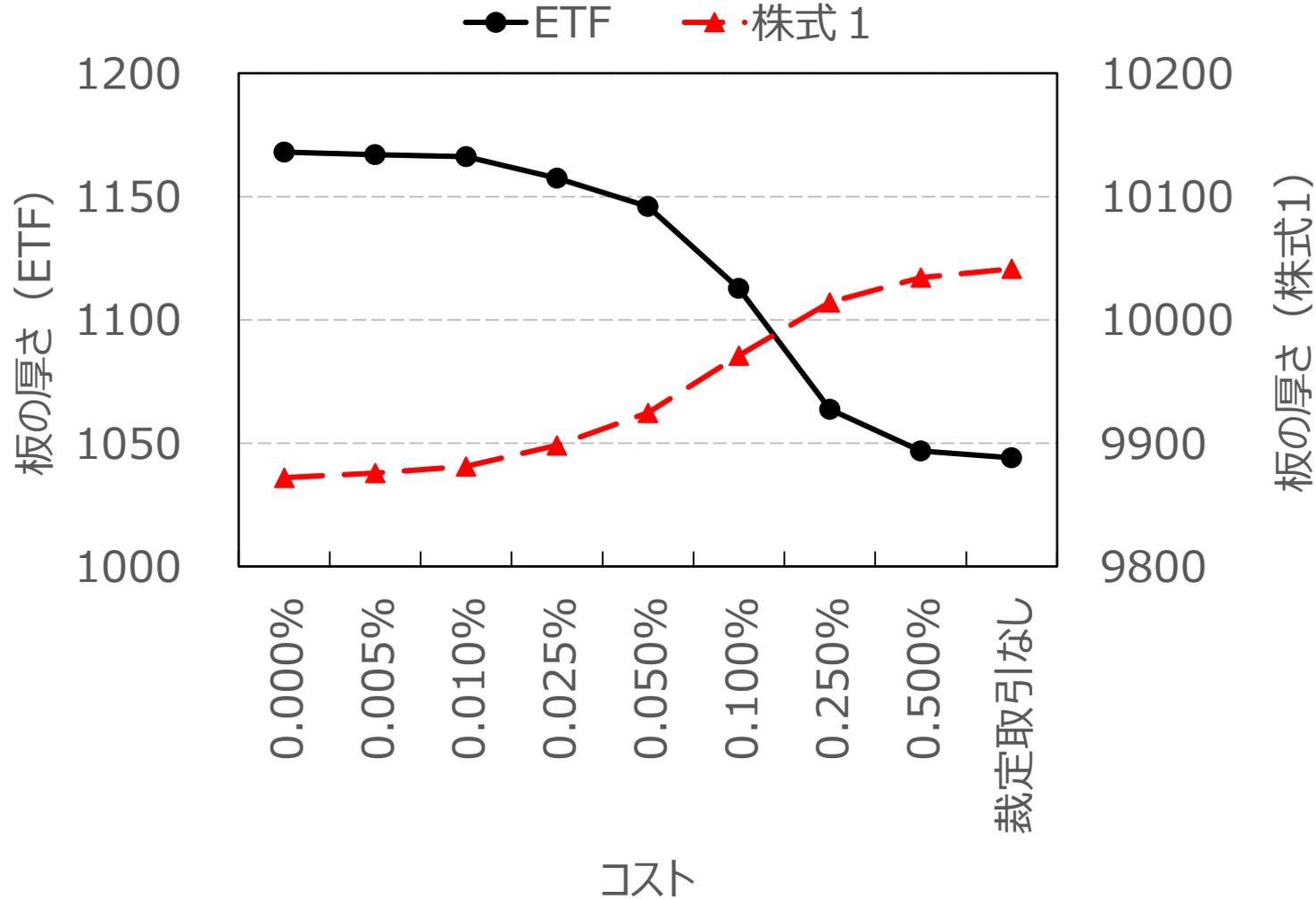
必要条件

短期ボラティリティ > コスト

時間

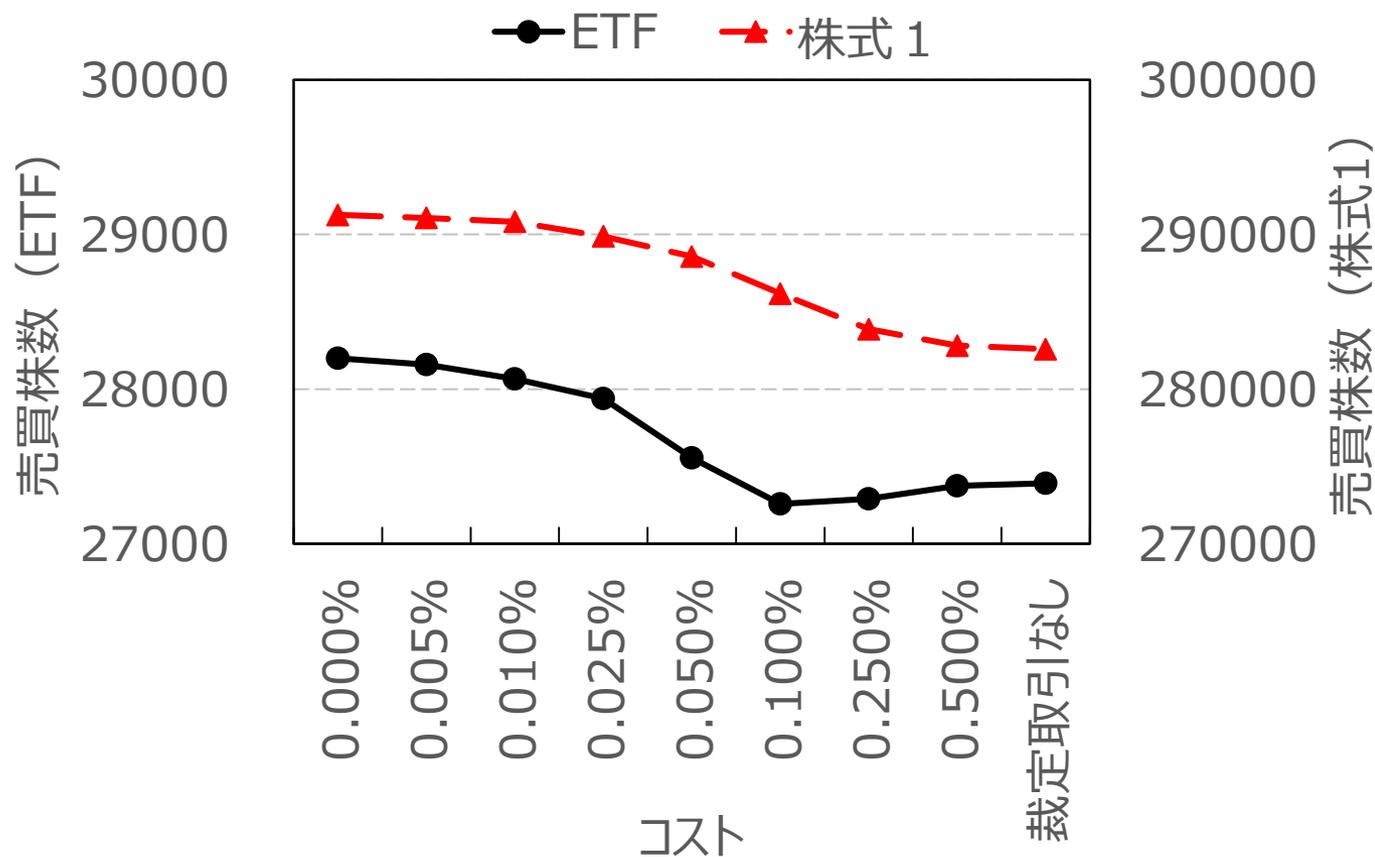
板の厚さ

仲値±0.1%に待機している指値注文の合計



ETFはコストが下がると板が厚くなる、株式1は逆の傾向

売買株数



ETF, 株式会社1ともにコストが低くなると売買が増えている

コストの減少により株式会社1の板の厚さが減少し売買が増えていることは,

株式会社1の待機注文が裁定取引と対当していると考えれば整合的

(1) はじめに

(2) 人工市場モデル

(3) シミュレーション結果

(4) まとめ

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

- ✓ [水田 13]の人工市場モデルをベースに、2つの株式とそれら合計と同じ価値のある1つのETFという3つの証券に拡張し、これらの証券間の裁定取引を行うエージェントを実装したモデルを構築した。そして、株式とETFの裁定取引にかかるコストによって流動性がどのように変化するかを調べた。
- ✓ その結果、ボラティリティよりコストが小さければ裁定の機会が訪れやすく、裁定エージェントの売買が増え、ETFと株式の価格の乖離が小さくなることが分かった。
- ✓ また板の厚さを見ると、ETFはコストが下がると板が厚くなっており、株式は逆の傾向となることが分かった。また、ETF、株式ともにコストが低くなると売買が増えていることも示した。コストの減少により株式の板の厚さが減少し売買が増えていることは、株式の待機注文が裁定取引と対当していると考えれば整合的である。
- ✓ ただし実際には、売買の量が増えればより多くの量を注文する市場参加者もいる。この効果を取り入れれば株式においてもコストが下がると注文量が増え、板の厚さも厚くなる可能性もあり、今後の課題である。

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

[http://mizutakanobu.com/201906.pdf](http://mizutatakanobu.com/201906.pdf)

参考文献

-- ETFのマーケットメイク制度 --

- [東証17] 東証マネ部！：ETF が買いやすくなる「マーケットメイク」とは？, 東証マネ部！
<https://money-bu-jpx.com/news/article006961/>

-- 参照した人工市場モデル --

- [水田 13] 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, 吉村忍：人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析, JPX ワーキング・ペーパー, No. 2, 日本取引所グループ
<https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>

レビュー

-- 解説論文 --

- [水田 19] 水田孝信：人工市場シミュレーションを用いた金融市場の規制やルールの議論,証券アナリストジャーナル, 2019年5月号 (第57巻第5号)
https://www.saa.or.jp/learning/journal/each_title/2019/05.html

-- 講義資料 --

- 2019/5/23「人工市場シミュレーションを用いた金融市場の制度・規制の議論」東京大学 金融レジリエンス情報学
<http://mizutatakanobu.com/20190523.pdf>

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

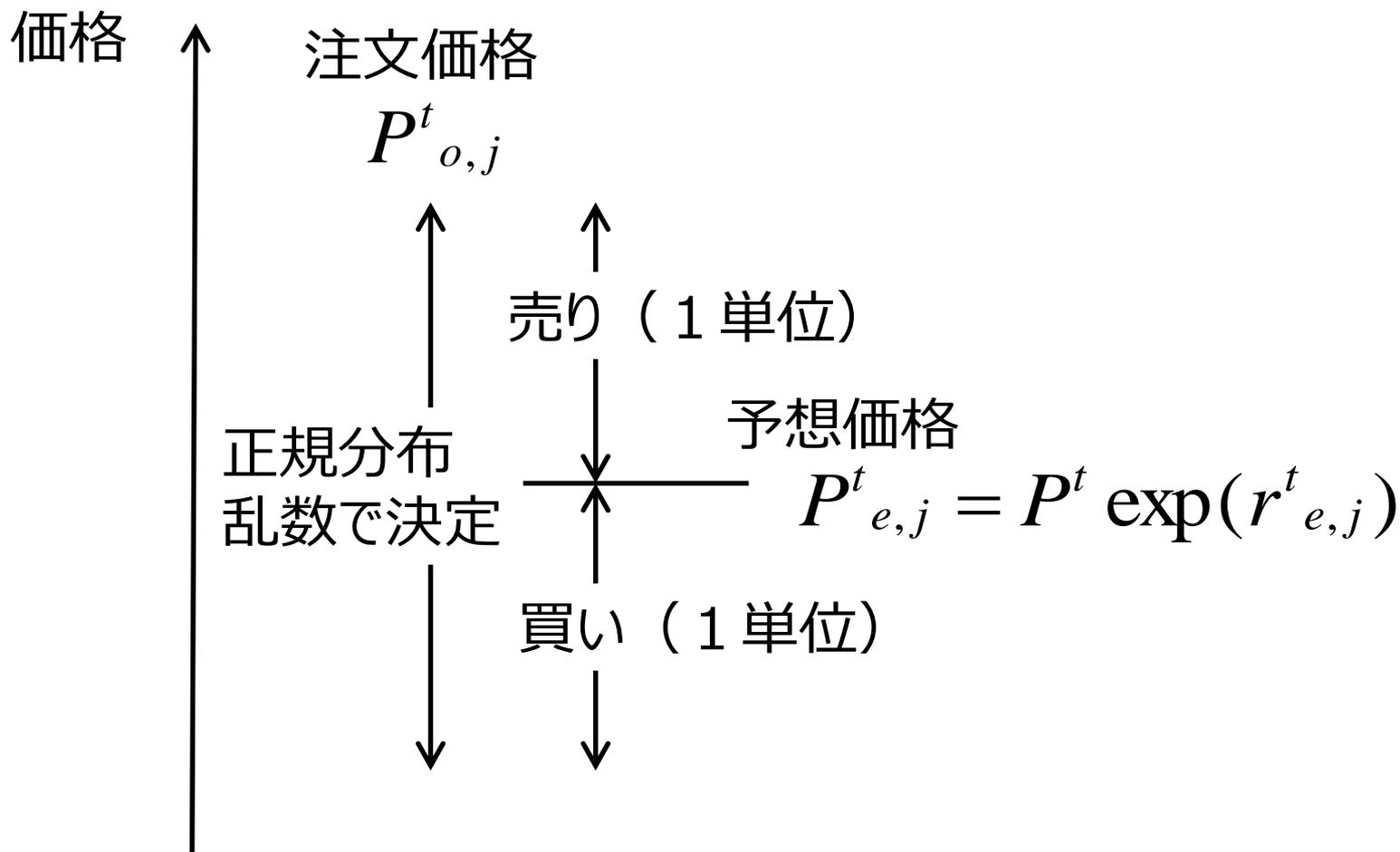
<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

参考資料

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<http://mizutatakanobu.com/201906.pdf>

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

⇒ 値には幅あり

(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

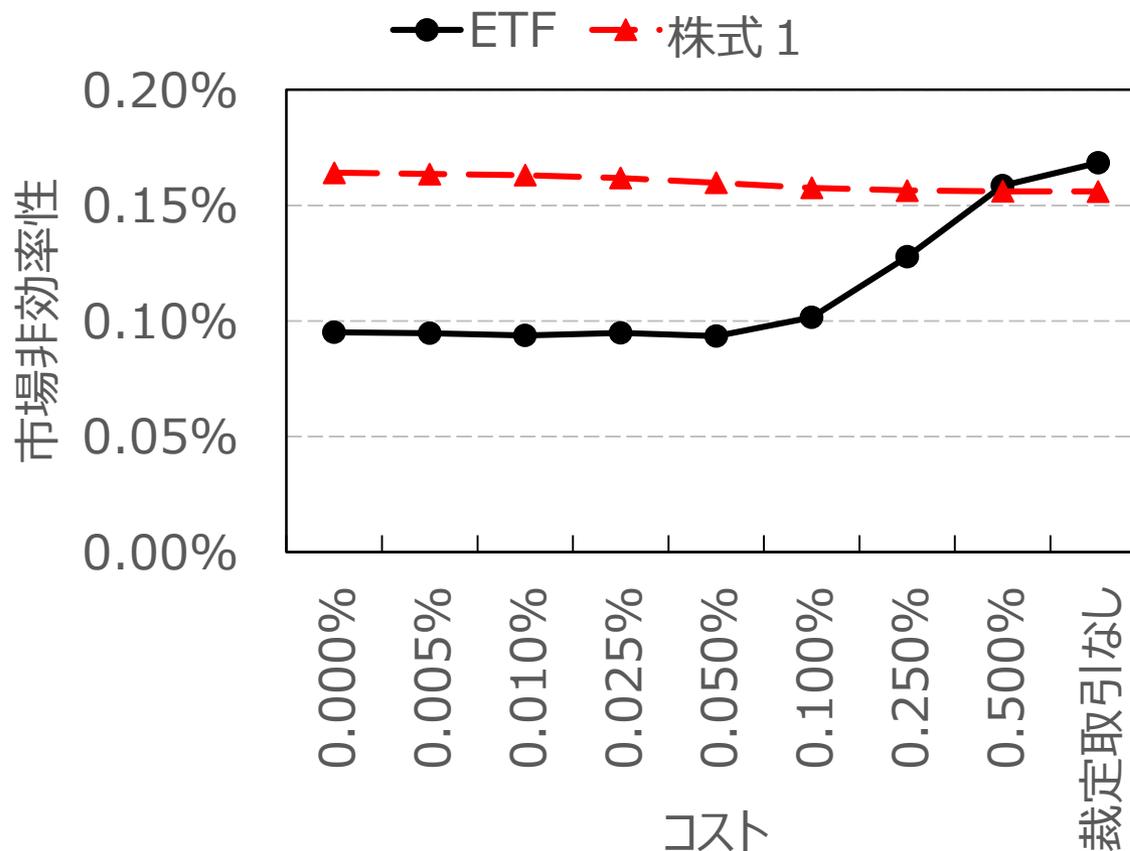
(2) ボラティリティ・クラスタリング (Mandelbrot 1972等多数)

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）

市場非効率性

$$\text{市場非効率性} = \text{仲値/ファンダメンタル価格} - 1$$



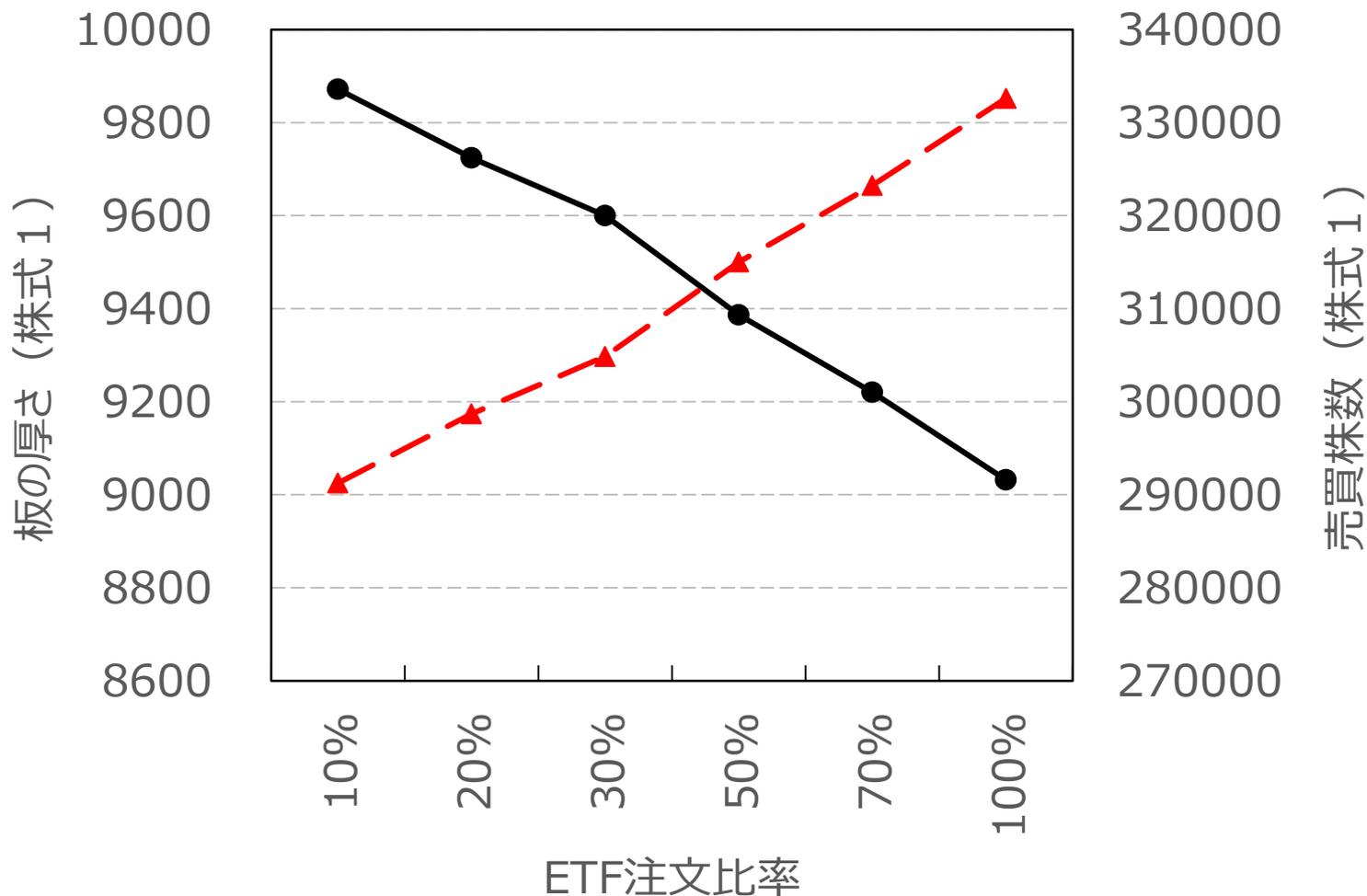
ETF市場は効率化、株式 1 は非効率になっていない

株式 1 の効率性を犠牲にしてETFを効率的にしているわけではない

ETF注文比率を増やした場合（コスト=0）

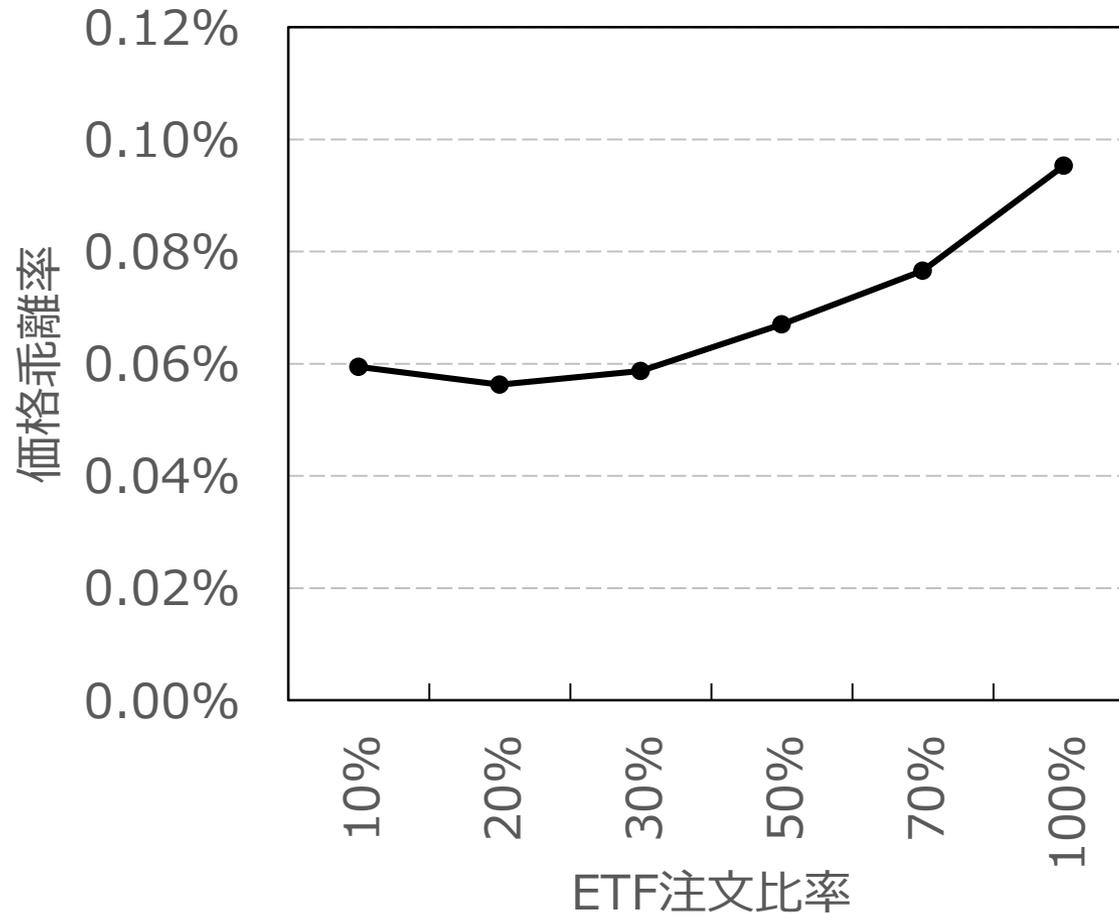
これまで10%に固定していた

● 板の厚さ ▲ 売買株数



ETF注文比率の上昇：株式1：板の厚さ減少， 売買株数増加

価格乖離率



ETFへの注文量が増えるほど価格乖離率が上昇

より多くの裁定取引が行われるようになっても、
価格乖離率はETFへの注文が低いときほどには改善しない

シミュレーションモデルの役割

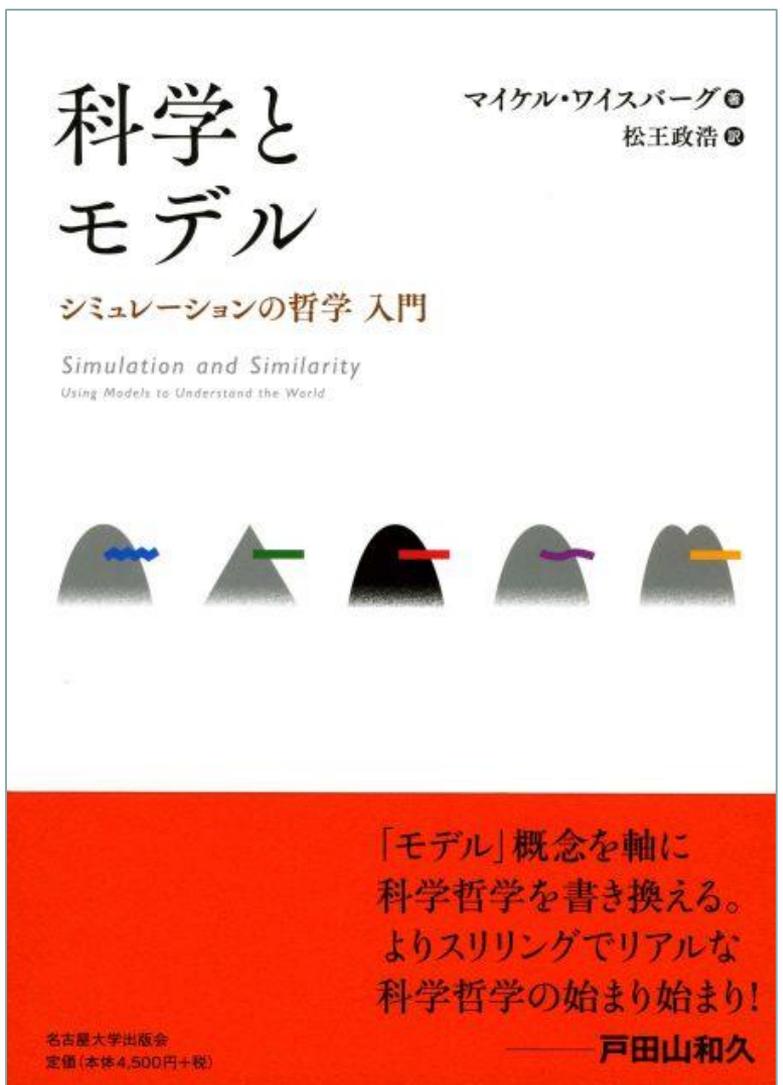
右の本は、“モデル”に関わっているすべての人に読んでほしいと思う。

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
<http://www.unp.or.jp/ISBN/ISBN978-4-8158-0872-3.html>

* 冒頭の扉の文

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合う帝国地図を作り上げた。西部の砂漠では、ぼろぼろになって獣や乞物の仮のねぐらと化した地図の断片がいまでも見つかることがある

J.L.ボルヘス「汚辱の世界史」

- * モデリングとは、モデルの構築や分析を通じて、現実世界を間接的に研究する手法のことである
- * 多くの例からわかるように、モデリングは必ずしも現実世界の完全な表現を目指しているわけではない。（中略）。むしろ彼らが力を入れていたのは、背景システムのどんな特徴が、自らの探求に対して特に重要となるのかを突き止めることだった。
- * 細胞の教科書モデルは実際の細胞に比べて抽象的であり、同時に理想かもされていると指摘する。抽象的だというのは、それがいかなる特定の種類の細胞とも違うからである。標準モデルは、すべての真核細胞が共有する性質をもったモデルである。このことと関連するが、理想化されているというのは、それが汎化される事でモデルのある部分が現実の細胞に対して歪められているからである。

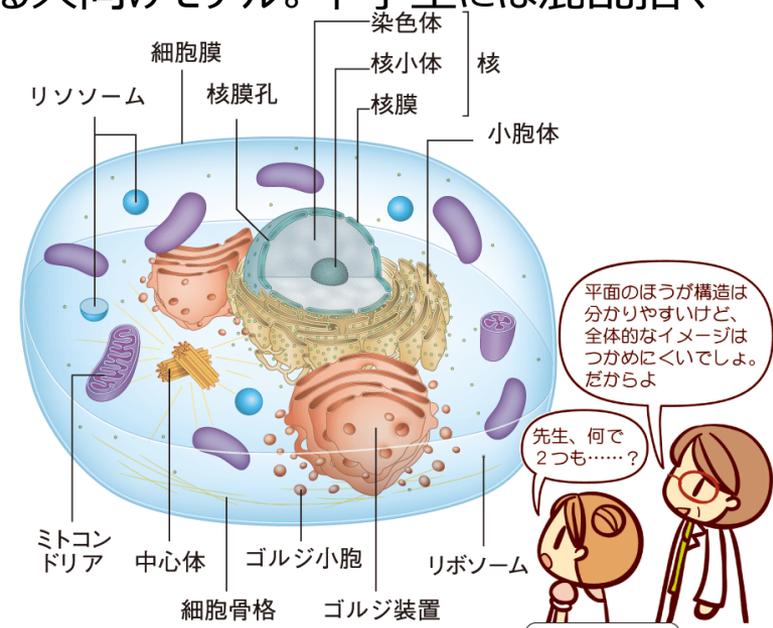
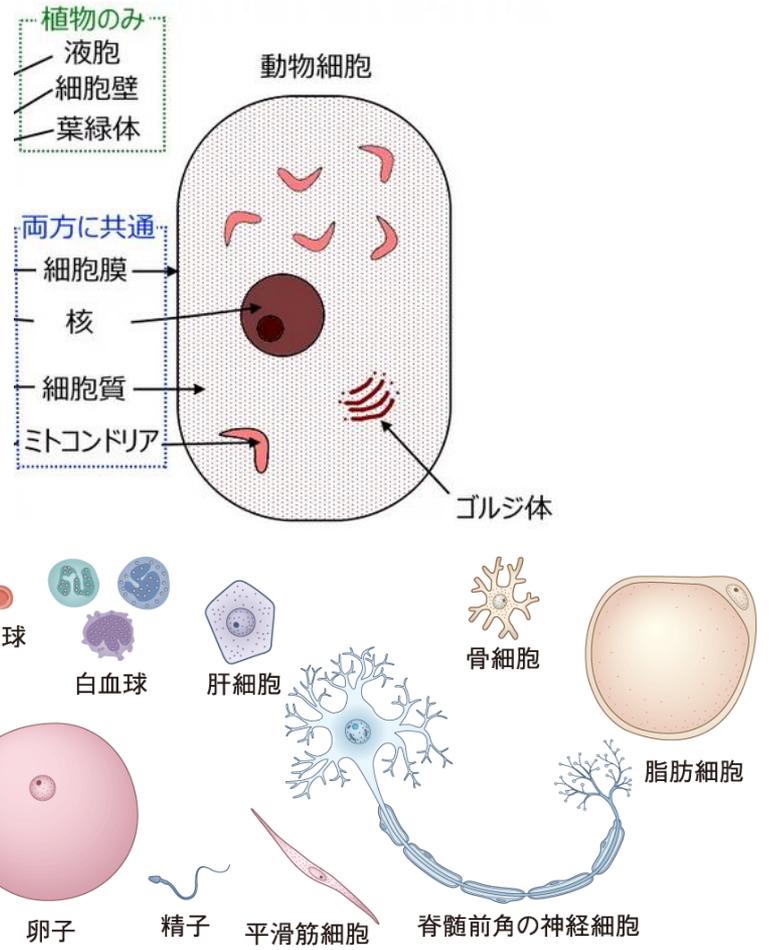
現実の再現が目的ではない：細胞の教科書モデル

中学理科まとめ http://rikamoto.com/2017/11/28/2_20/

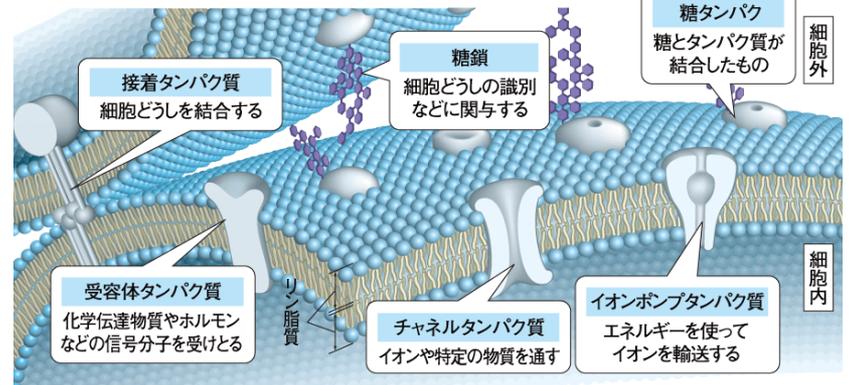
細胞の本質（核、細胞質、細胞膜等で構成）を学ぶためのモデル。この細胞は実際には1つも無い

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



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)



細胞膜詳細←上のモデルにこれを書かれるとかえって分かりにくい

モデルの役割

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

シミュレーションモデルにはできて数理モデルにはできないこと

* ある現象を説明するために数値計算（シミュレーション）モデルが持ち出されるとき、たいていは、遷移規則やアルゴリズムが説明項として用いられる。シェリングは、小さな心の傾向を反映した小さな意思決定が集まると、大規模な人種分離の人口統計につながることを指摘し、人種分離に関する説明を行った。ここではモデル状態の時系列やモデルの最終的な平衡状態などは、いずれも説明力を持っていない。説明には、アルゴリズムそのものが必要なのである。

アルゴリズム：自分と同じ人種が隣にいる割合が30%から100%の間ならばこれを気にかけず、30%未満になると不満になる

19 第2章 三つの種類のモデル

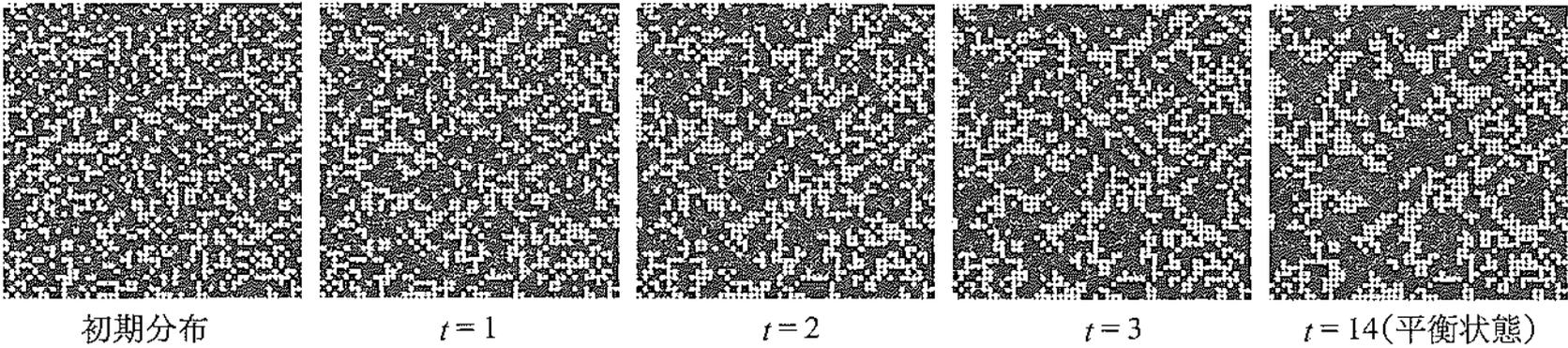


図 2.2 シェリングの人種分離モデルの例。51 × 51 の格子に 2000 の行為者が配置されたもの。各行為者は、ムーア近傍の 30% が同じ色、形であることを好む。行為者の初期の分布はランダムで、14 の時間ステップ後にモデルは平衡状態となった

シミュレーションモデルにはできて数理モデルにはできないこと：シリングモデルを例に

学生(#)と教授(@)が参加する立食パーティー

ミクロ動機とマクロ行動, 2016年
<http://www.keisoshobo.co.jp/book/b251669.html>

#	#	@	#	@		
#	#	@	@	#	@	
#	@		#	@	#	
@	#	@	#	@	#	@
@	@	@	#	@	@	@
#	#	#			@	
#	@	#	@	#	@	
@	@			#		

- ルール：
- ・自分の周り（8マス）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

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

本質的な性質のみ再現

価格形成
(シミュレーション結果)

投資家モデル

取引所モデル

ルール変更

投資行動
(アルゴリズム)

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！

本質的な性質のみ継承

- 投資家 Aさん
- 投資家 Bさん
- 投資家 Cさん