

2022年6月14日-17日
第36回 人工知能学会全国大会

<https://www.ai-gakkai.or.jp/jsai2022/>

投資戦略の最適化の不安定性による金融市場の不安定性 -人工市場を用いた分析-



水田 孝信

スパークス・アセット・マネジメント株式会社

mizutata[at]gmail.com <https://mizutatakanobu.com>

八木 勲

工学院大学

高島 幸成

長岡大学

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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

(1) はじめに

(2) 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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

(1) はじめに

(2) 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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

投資戦略の最適化には様々な批判がある

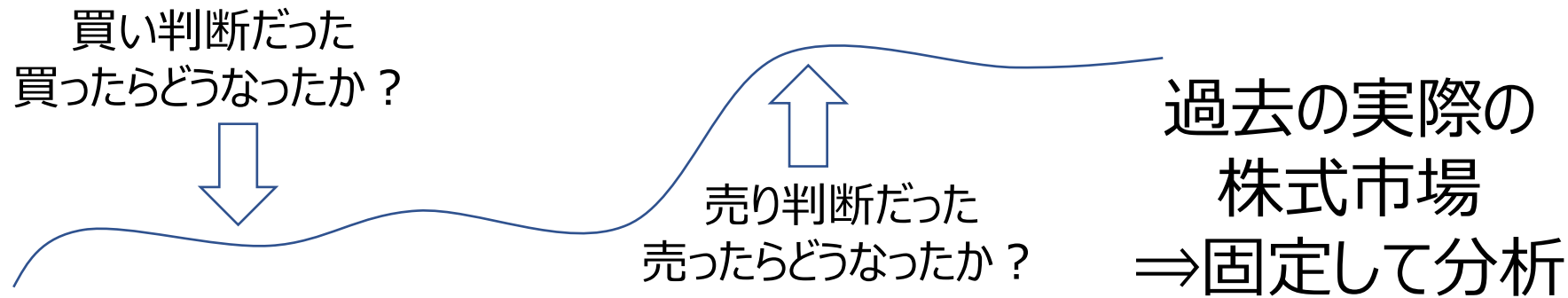
多くのファイナンス(金融)研究は、投資戦略の最適化や市場の効率性など、さまざまな仮定の上で議論されている。しかし、その仮定そのものが批判されることも少なくない。投資戦略の最適化に関しても多くの批判がある

- ・ 投資家は合理的には行動していない [Shiller 2003]
- ・ そもそも投資戦略の最適化が投資家の観測範囲や計算能力の限界から不可能 [Shiozawa 2019]
- ・ 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

本研究で
議論

バックテストとは

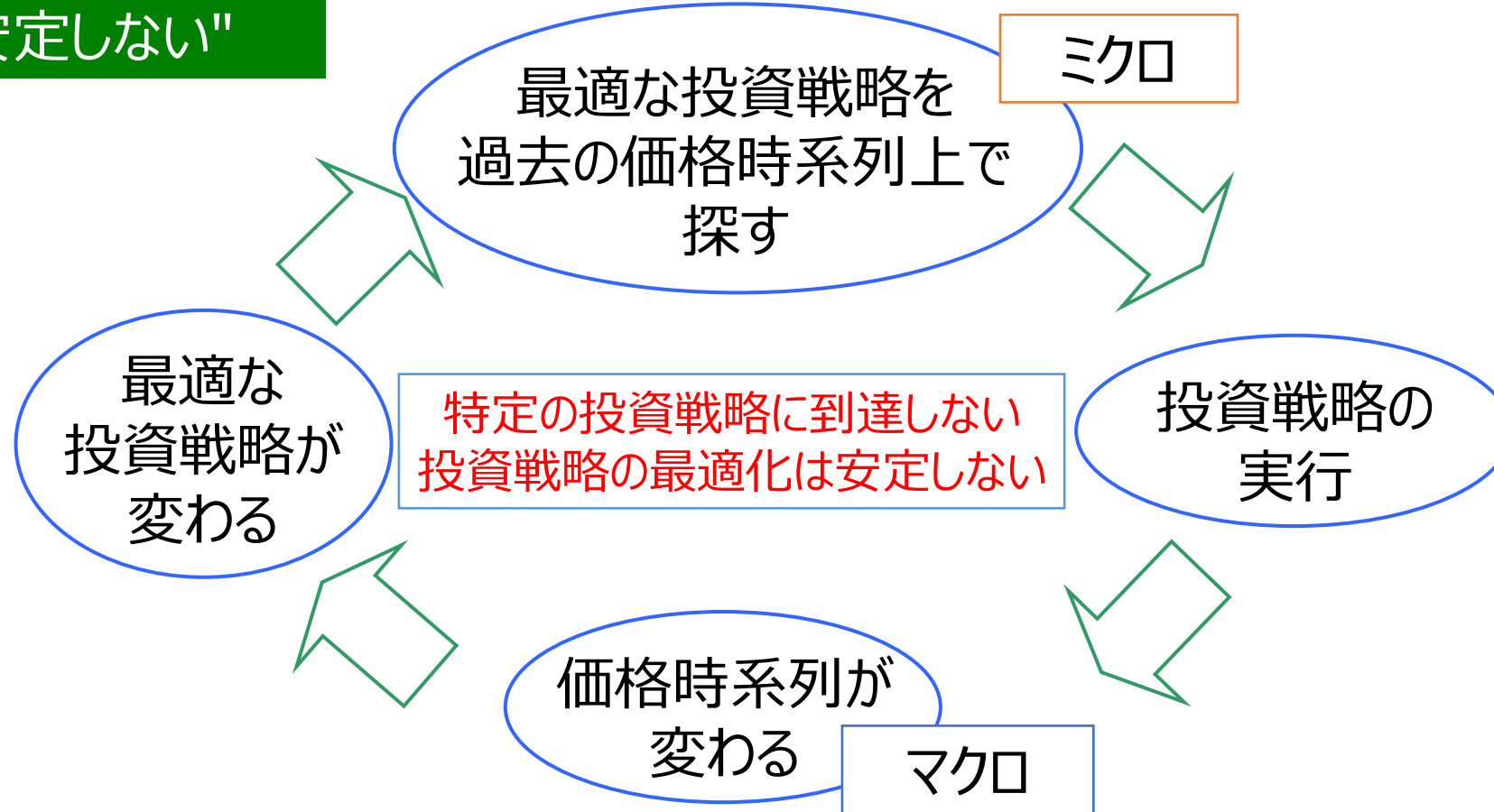
過去の実データを用いて「もし取引していたらどうなっていたか」を分析



現実の金融市場では他に方法がない

自分の取引が市場価格に与える影響「マーケットインパクト」は考慮できない

“最適化が安定しない”



最適化の不安定性は、市場価格が変化し続けるだけでなく、投資戦略のパラメータも安定せずに変化し続けること

この最適化の不安定性は、いわゆる“市場価格が均衡しない”という不安定よりもさらに上位の不安定性と言えるだろう

“最適化が安定しない”はまさにミクロ・マクロ相互作用（フィードバック・ループ）

このようなことは実証研究では調べようがなく人工市場シミュレーションでしか調べられない

実際に取引してしまうわけにはいかない

時間経過による投資家・市場環境の違いなのか、マーケットインパクトによるものなのか区別できない

人工市場なら、マーケットインパクト以外の要因すべてを固定できる
ミクロ・マクロ相互作用を直接扱える唯一の手法

シミュレーション期間を通じて最適なパラメータを1つ定めることを行った人工市場研究はない、
マーケットインパクトのみで最適化が安定しなくなることを人工市場で議論した研究はない

そこで本研究では、

[水田 2014],[Mizuta 2016]の人工市場にバックテストによってシミュレーション期間を通じて投資戦略の最適なパラメータを1つ探す(最適化を行う)テクニカルエージェント(TA)を追加してシミュレーションを行い、マーケットインパクトを最適化時に考慮できないという要因だけで最適化が安定しなくなることを議論した。
TAは2体、順張り(TA-m)と逆張り(TA-r)を追加実装した。

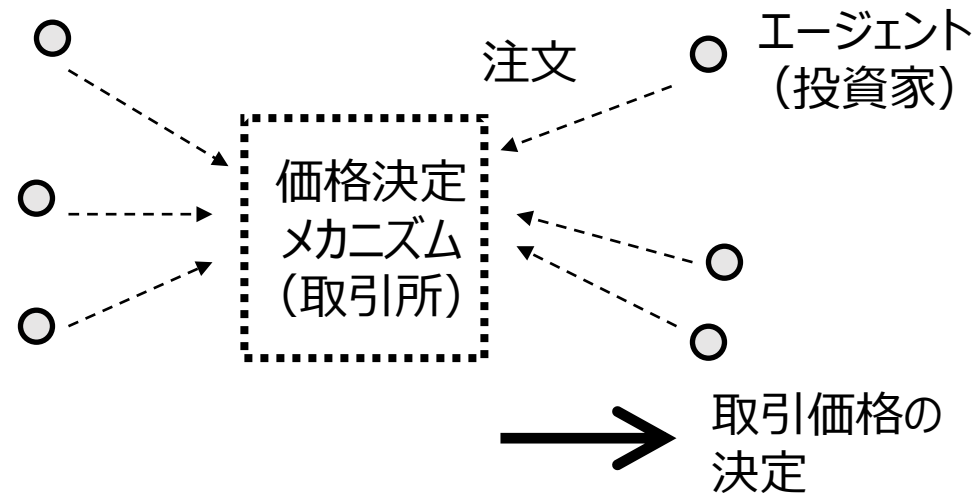
人工市場とは？・・・金融市場のマルチエージェントモデルです

計算機上に人工的に作られた架空の市場

エージェント（架空の投資家）

+

価格決定メカニズム（架空の取引所）



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規制・制度も議論できる
その純粋な影響を抽出できる

マイクロ・マクロ相互作用(フィードバック・ループ)を扱える！

(1) はじめに

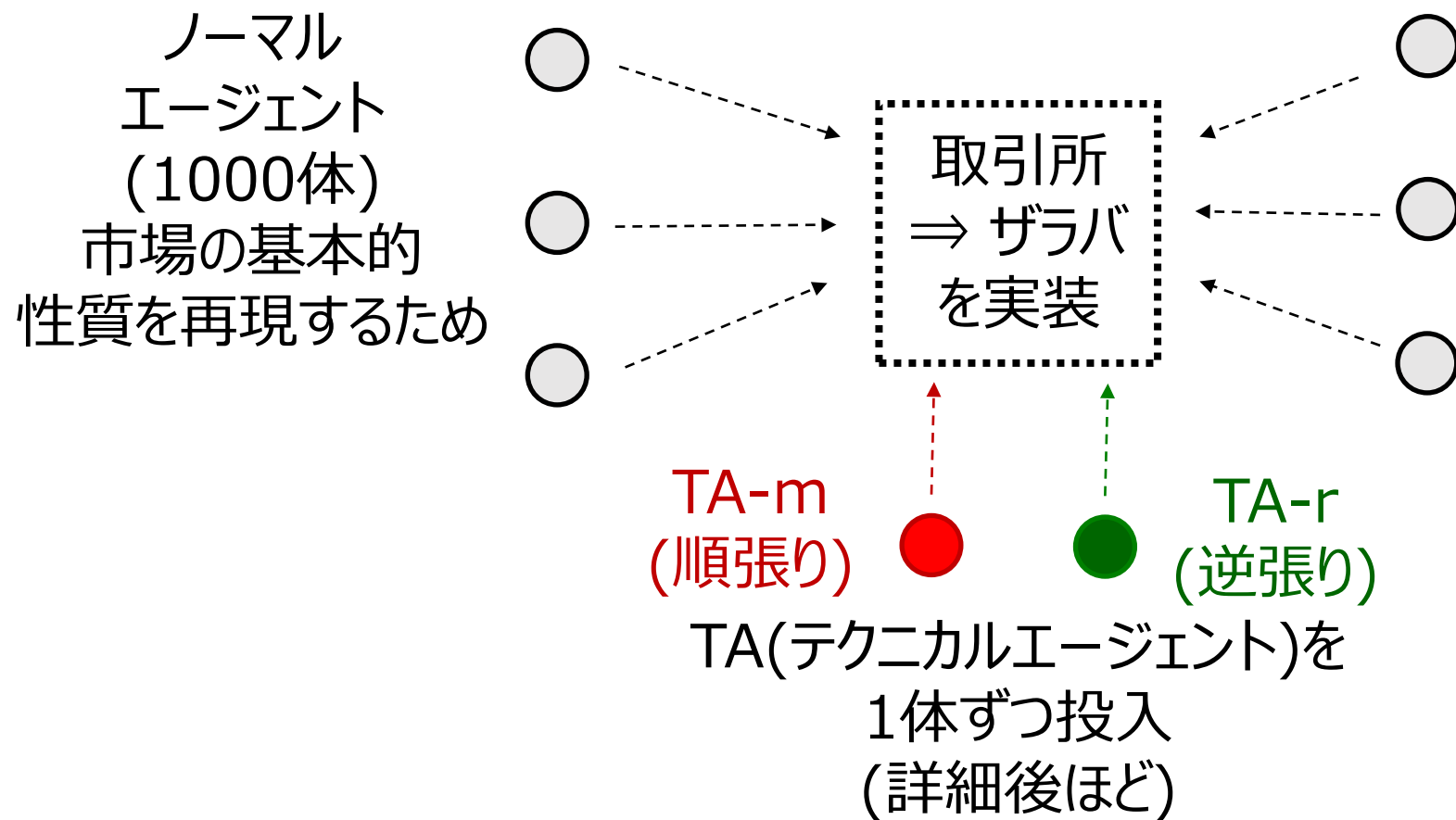
(2) モデル

(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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>



多くの研究で使われている標準的なモデル [水田 2014],[Mizuta 2016]の取引所とノーマルエージェントを実装

バックテストによる学習でパラメータを決める
TA(テクニカルエージェント)を1体ずつ投入

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

対当する注文があると即座に売買成立

ノーマルエージェント

1000体

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

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

$w_{i,j}$ $i=1,3: 0\sim 1$
 $i=2: 0\sim 100$

τ_j $0\sim 1000$

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)

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

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

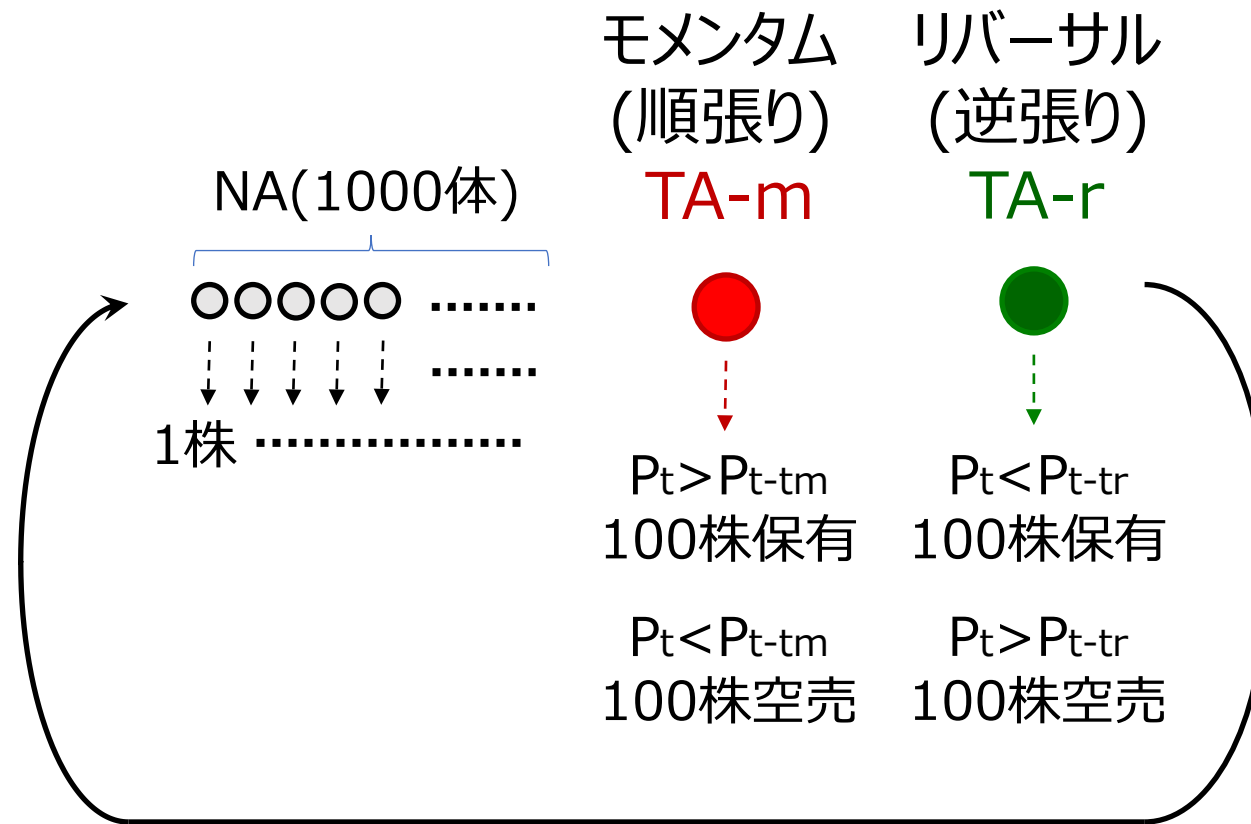
ε_j^t

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

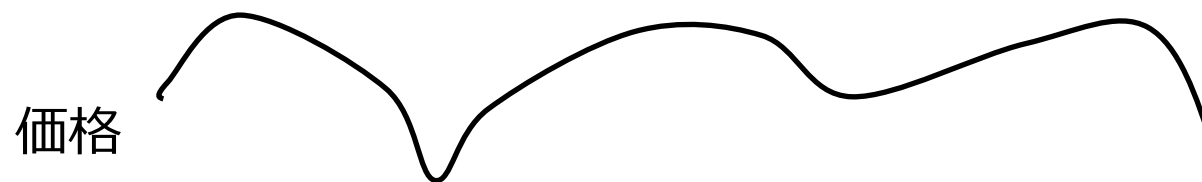
TA(テクニカルエージェント)の注文



1000体のNAが注文し終わった後に、
TA-m(TA-モメンタム), TA-r(TA-リバーサル)の順に売買
tm,trはバックテストによる**学習**によって決める

1回目: TA-m, TA-r不参加

NA ○○○○○○



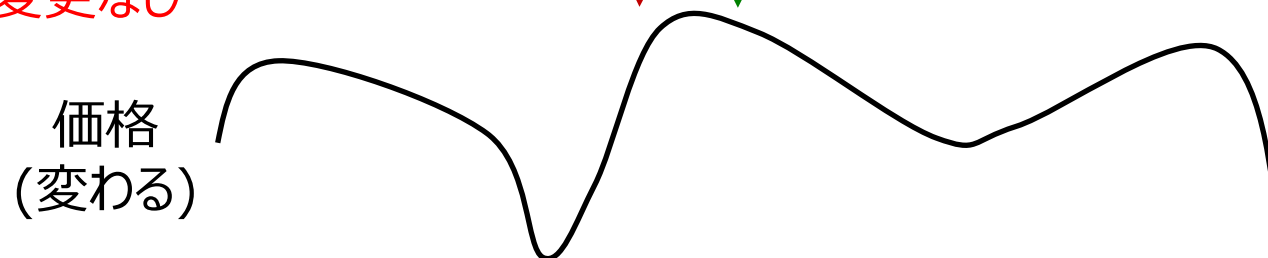
TA-m TA-r



バックテスト
最も利益が大きくなる
tm, trを求める

2回目: 1回目のバックテストで得られたtm, trでTA-m, TA-r参加

NA ○○○○○○ ● ●
パラメータは
変更なし



バックテスト
最も利益が大きくなる
tm, trを求める

3回目: 2回目のバックテストで得られたtm, trでTA-m, TA-r参加

.....



“固定された”ノーマルエージェント

1000体

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

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

価格時系列が変化するため
これらの部分は変化する

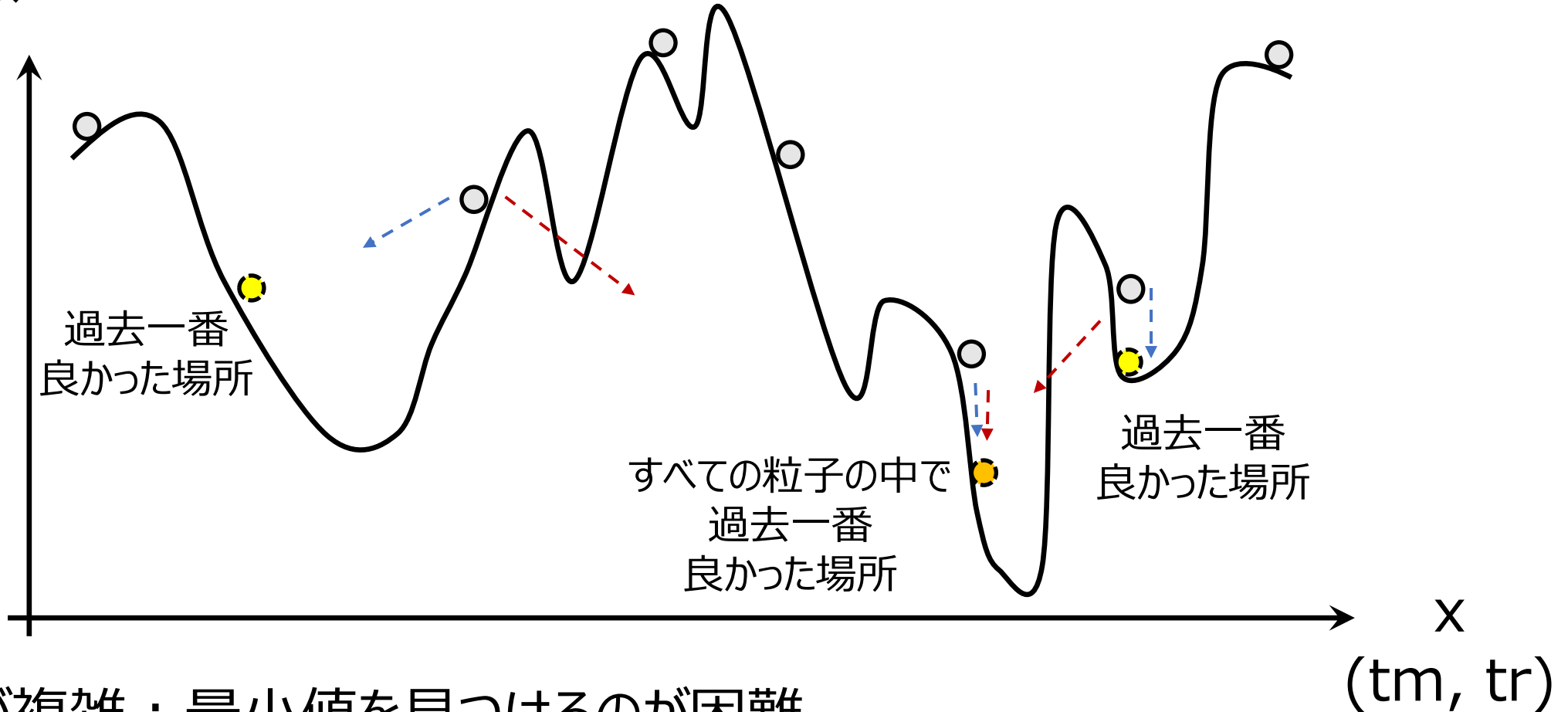
固定

ノーマルエージェントのパラメータは (ε_j^t) も含めて固定
しかし価格時系列が変われば売買行動は変わる

PSO(Particle Swarm Optimization, 粒子群最適化)

低い方が良い
複雑な関数

$f(x)$
(-利益)



関数系が複雑：最小値を見つけるのが困難

多数の粒子を投入し、各粒子は自己ベストおよびすべての粒子のベストに引っ張られて移動
多数の粒子があるため、局所解につかまって終わってしまうことが少なくなる

(1) はじめに

(2) モデル

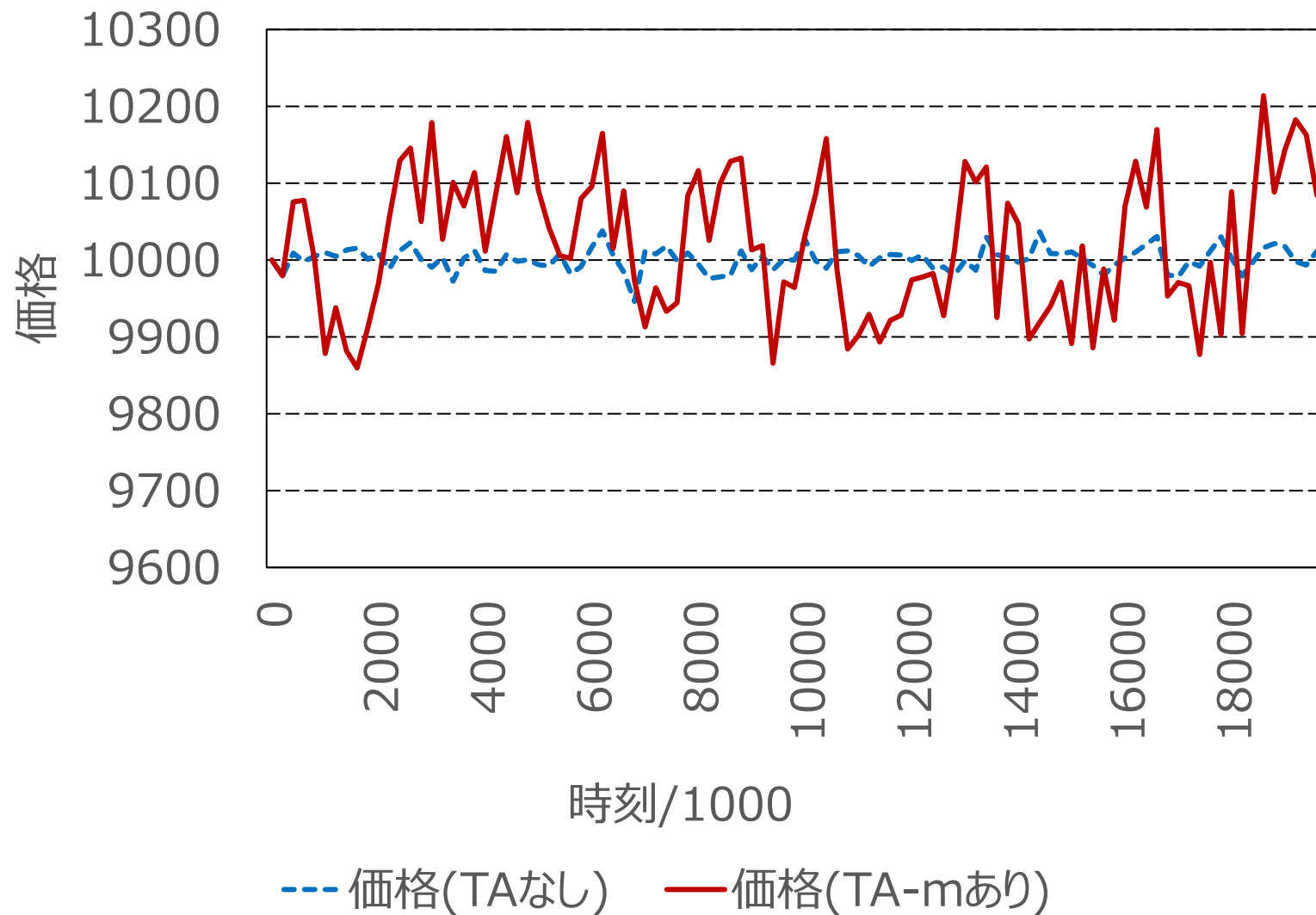
(3) シミュレーション結果

(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

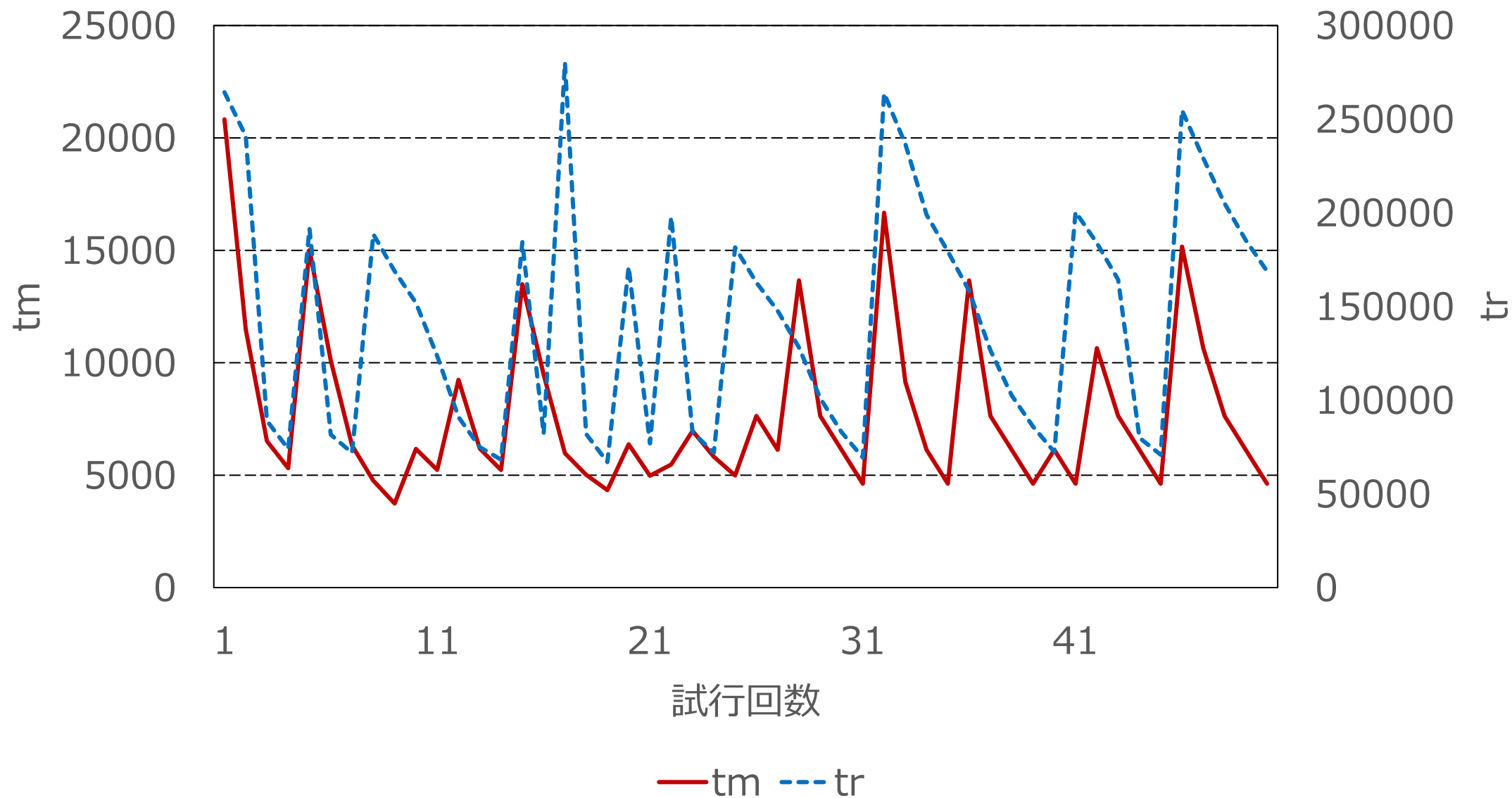
<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

TA-mのみいる場合といない場合の価格時系列

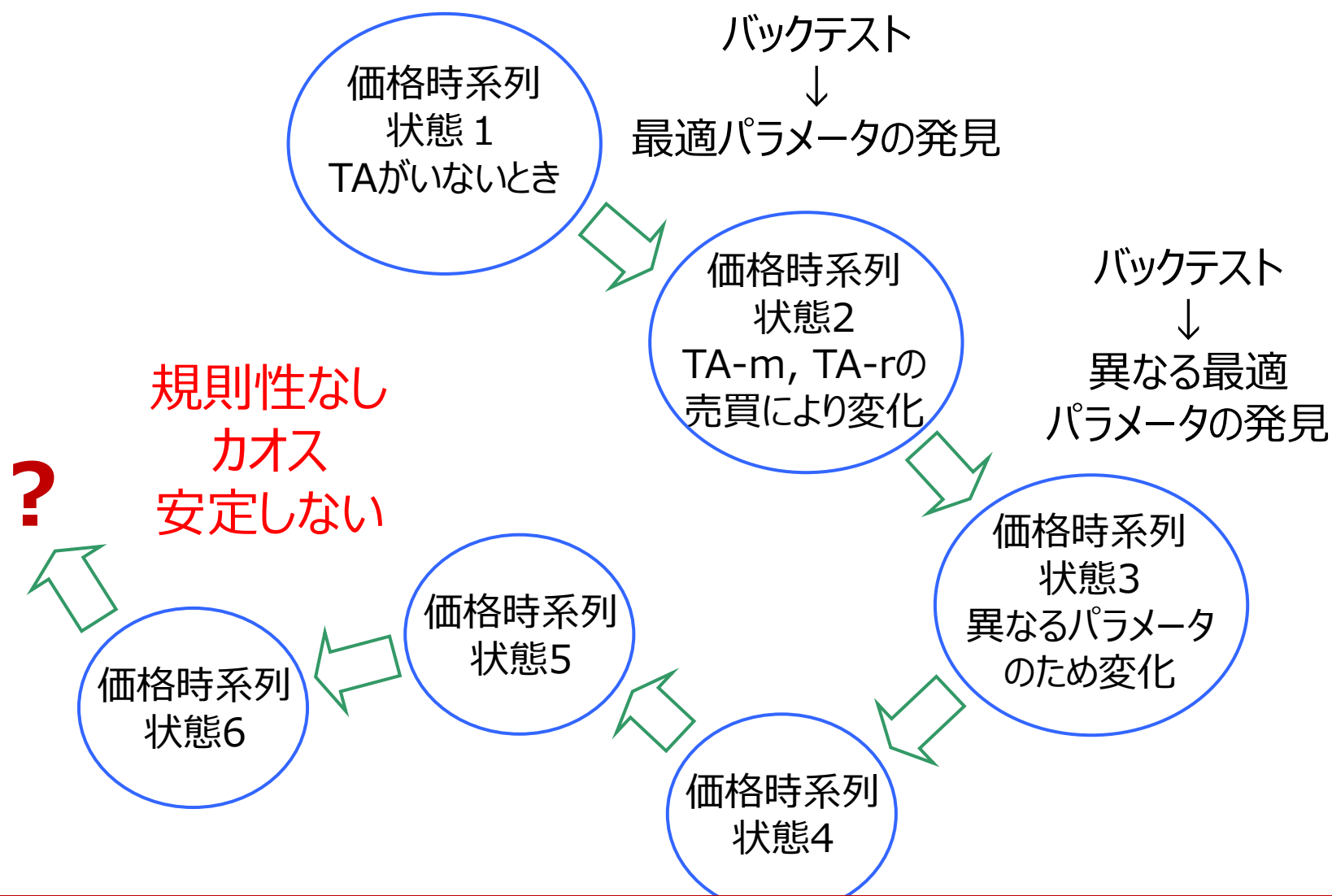


TA-mが存在すると価格変動が大きくなる
→ マーケットインパクトがある

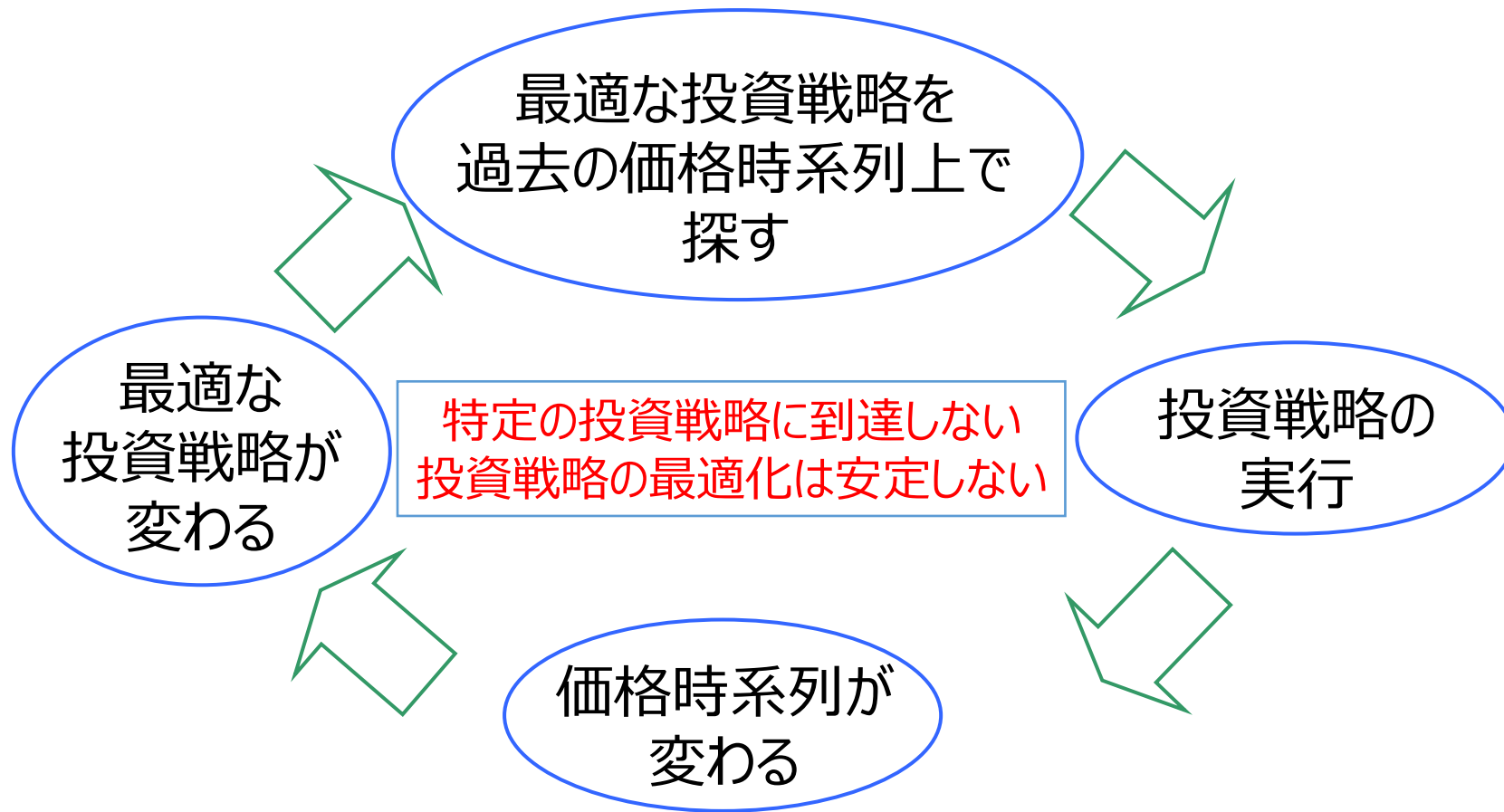
TA-m, TA-rの両方がいる場合



予測不能な動き



tmはある値に収束することなく不規則に値が変わっている
TA-m, TA-rは特定の投資戦略に落ち着くことはなく、最適化が安定しない。
TA-m, TA-r自身以外は全く同じ環境であるにも関わらず、
自身の戦略の最適なパラメータを探すことをさえも安定しない。



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。

(1) はじめに

(2) 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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

- ✓ 本研究では, [水田 2014],[Mizuta 2016b]の人工市場にバックテストによってシミュレーション期間を通じて投資戦略の最適なパラメータを1つ探す(経済学やファイナンス研究で言うところの最適化を行う)テクニカルエージェント(TA)を追加してシミュレーションを行い, マーケットインパクトを最適化時に考慮できないという要因だけで最適化が安定しなくなることを議論した. TAは2体, 順張り(TA-m)と逆張り(TA-r)を追加実装した.
- ✓ TA-m, TA-rの両方がいる場合, 投資戦略のパラメータは予測不能な動きとなった. 他の全員が全く同じに固定されていたとしても, 1人でも, 戦略の最適化を行うために, バックテストとその実践投入を繰り返し行うだけで, その戦略は定まることがないし, 価格時系列も特定のものには達せず, 不安定となった. 金融市場は本質的に, 投資戦略は安定しない性質を持っていると言えるだろう. なぜなら, 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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

- ✓ 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の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。
- ✓ この最適化の不安定性は、いわゆる“市場価格が均衡しない”という不安定よりもさらに上位の不安定性であり、当然、市場価格の均衡を妨げる。そして、価格時系列の規則性をも不安定にさせうる。しかも、他のあらゆる要素を固定して最適化を試みても、マーケットインパクトという避けることができない要素のみで、最適化は不安定化する。このことから、金融市場は本質的に不安定であると言えるかもしれない。

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

参考文献(1/2)

-- 使用した人工市場モデル --

- [水田 14] 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・制度の分析”, 博士論文, 東京大大学大学院工学系研究科, 2014, <https://doi.org/10.15083/00007779>
- [Mizuta 16] Mizuta, T., Kosugi, S., Kusumoto, T., Matsumoto, W., Izumi, K., Yagi, I., and Yoshimura, S., “Effects of Price Regulations and Dark Pools on Financial Market Stability: An Investigation by Multiagent Simulations”, Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management, Vol. 23, No. 1-2, pp. 97-120, 2016, <https://doi.org/10.1002/isaf.1374>

-- 整合的な結果が得られている別の調査をした先行研究--

- [水田 2021] 水田孝信, “新しい株式投資戦略は既存の戦略からリターンを奪うのか?-人工市場によるシミュレーション分析”, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. JSAI2021, https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2021.0_3I2GS5e04

こちらのスライドは以下からダウンロードできます

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

参考文献(2/3) -- 人工市場による市場制度設計 --

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「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/>

一般向け解説記事

水田孝信「金融市場の制度設計に使われ始めた人工市場」, 2021,
スパークス・アセット・マネジメント
<https://www.sparx.co.jp/report/special/3215.html>

講義資料

水田孝信, 「人工市場による市場制度の設計」
[https://mizutakanobu.com/2022r.pdf](https://mizutatakanobu.com/2022r.pdf)
参考動画 YouTube: <https://youtu.be/tq9AsMrig9s>



参考文献(3/3) -- 人工市場による市場制度設計 --

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

Slide: <https://mizutatakanobu.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>

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/

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

<https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

自己紹介

スパークス・アセット・マネジメント(資産運用会社)所属

2014年働きながら博士課程 (東京大学 和泉潔 研究室)で博士取得

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(のためのシステム整備)、学術研究も

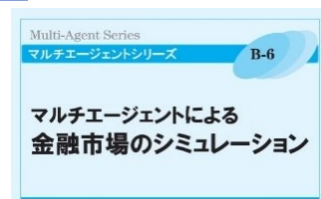
2016年度より 人工知能学会 金融情報学研究会(SIG-FIN)幹事 → 2022年度より 主査 <https://sigfin.org/>

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

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



SPARK Asset Management Co., Ltd.



学術研究: 人工市場による市場制度の設計

左のレポート「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/special/3215.html>

講義資料 人工市場による市場制度の設計

資料: <https://mizutatakanobu.com/2022r.pdf>

YouTube: <https://youtu.be/tq9AsMrig9s>

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/>

例えば、

2021/11/15 **金融市場の制度設計に使われ始めた人工市場**

2021/9/8 金融市場で使われている人工知能

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

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?

2018/4/23 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

この資料はこちらにあります: <https://mizutatakanobu.com/2022jsai.pdf>

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

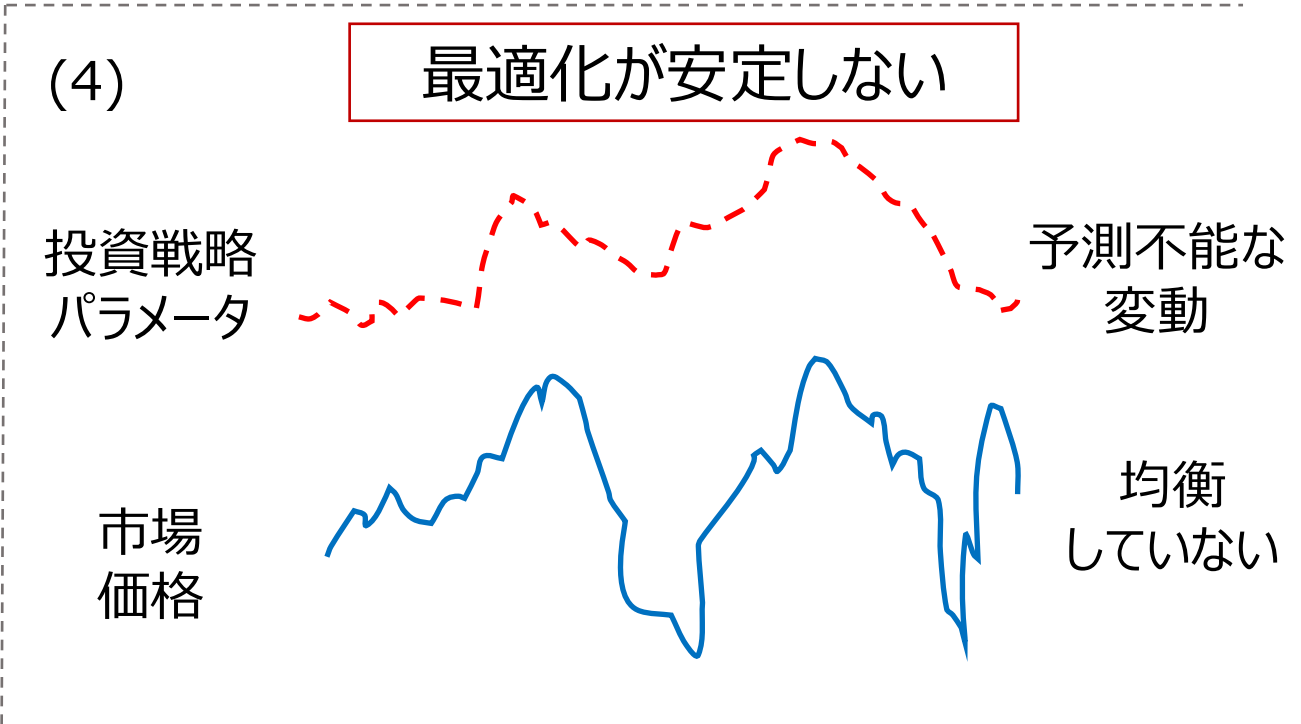
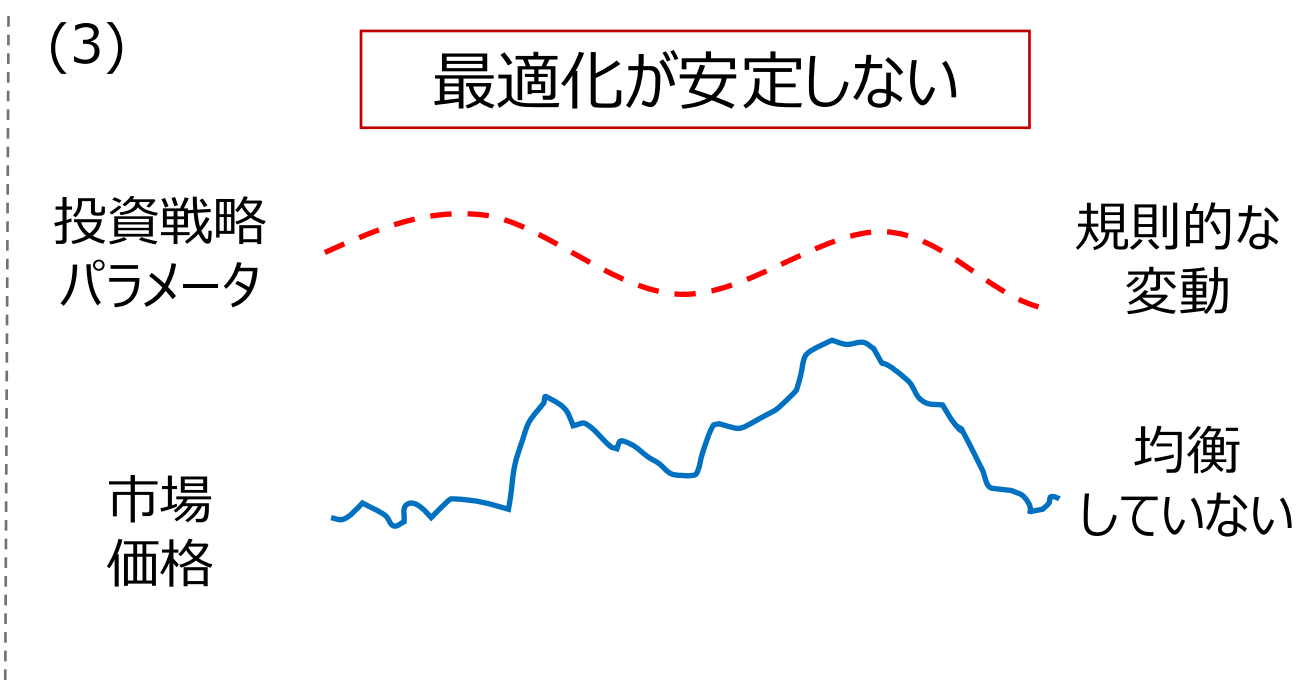
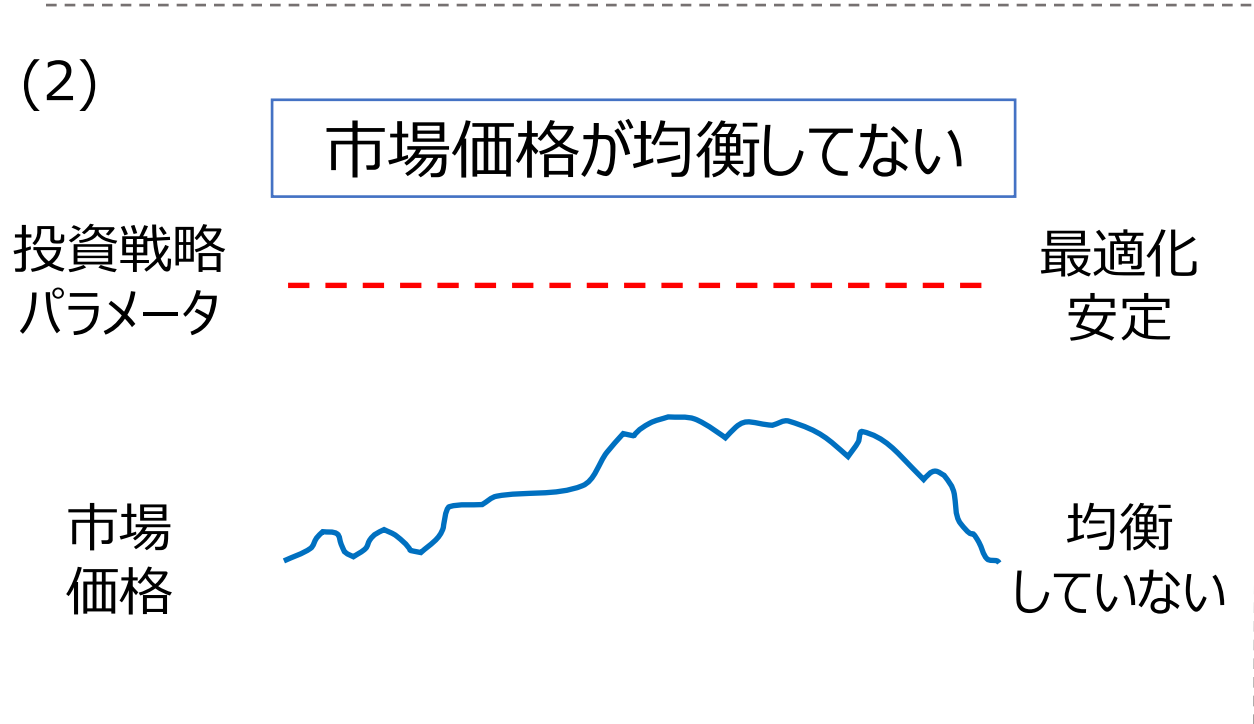
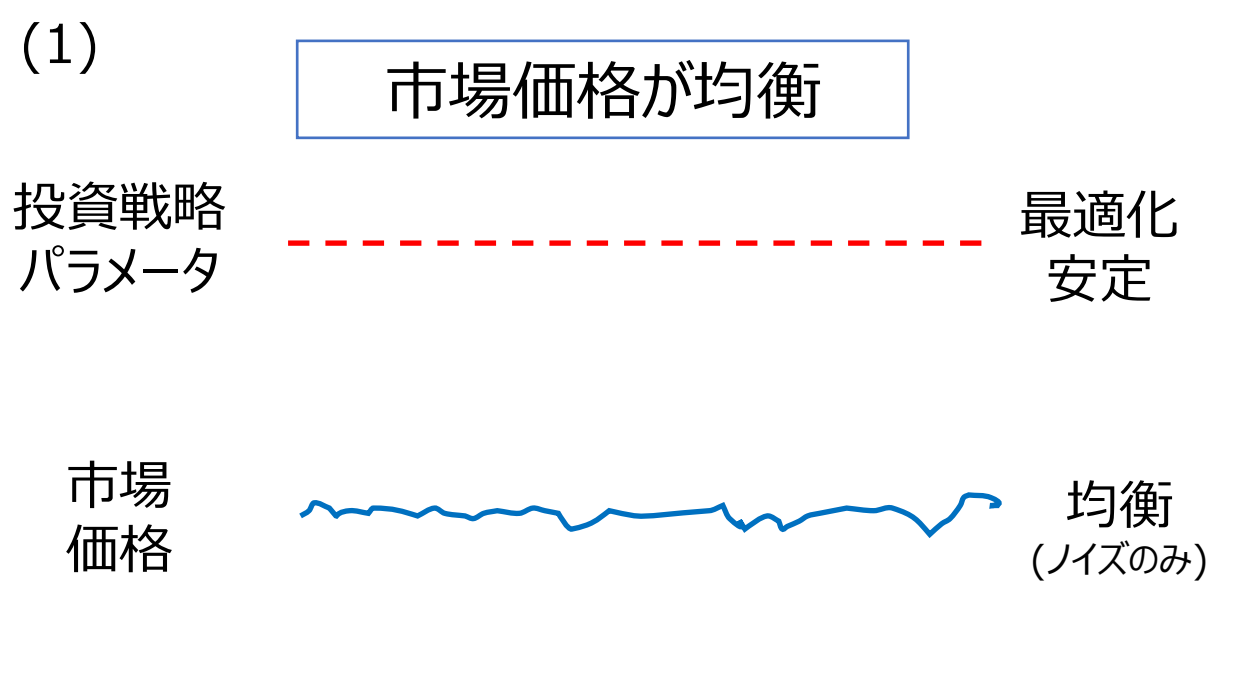
別々に扱う

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。



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

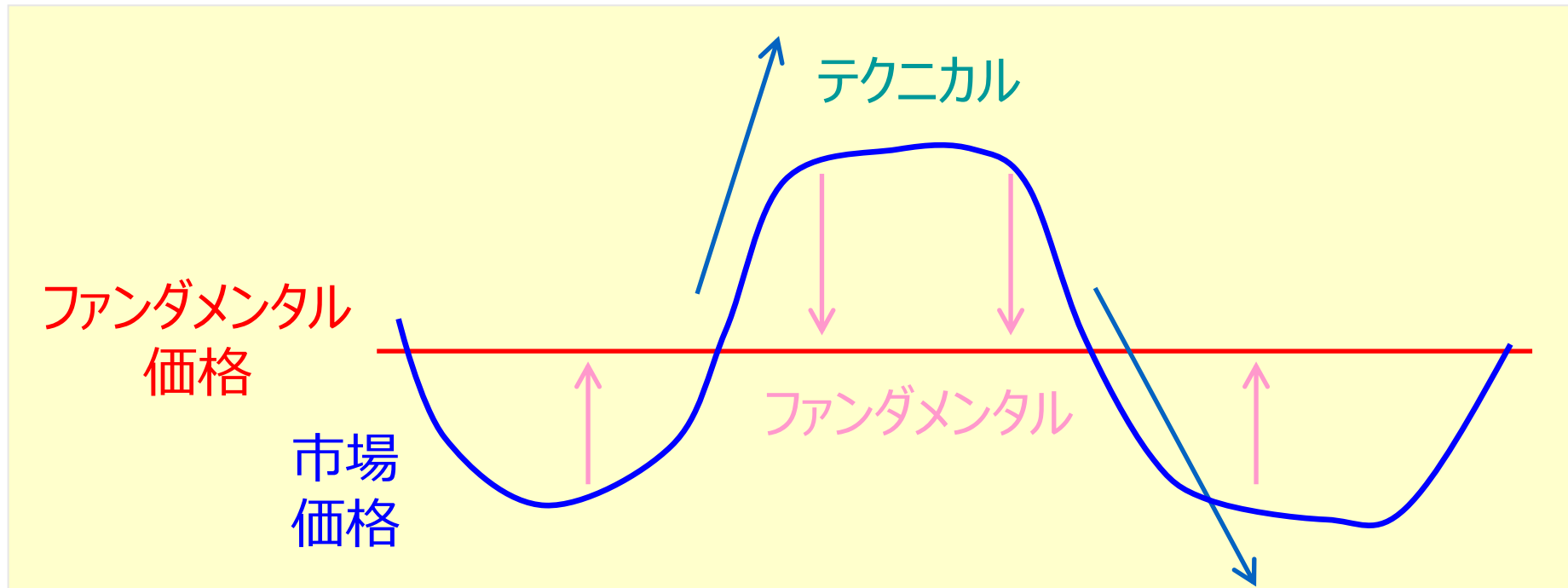
ファンダメンタル価格 $>$ 市場価格 $\Rightarrow$ 上がると予想

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

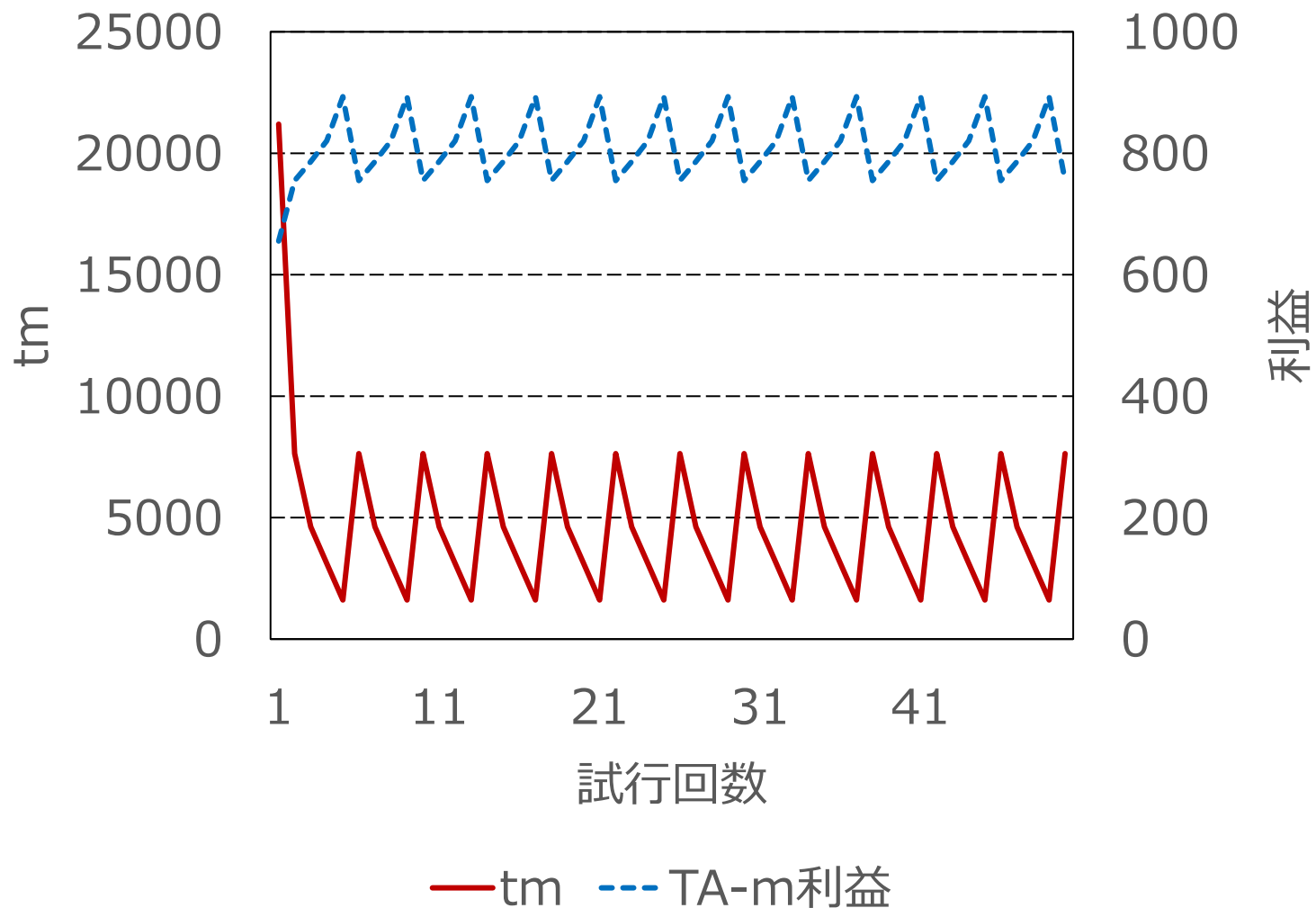
テクニカル戦略

過去リターン $> 0 \Rightarrow$ 上がると予想

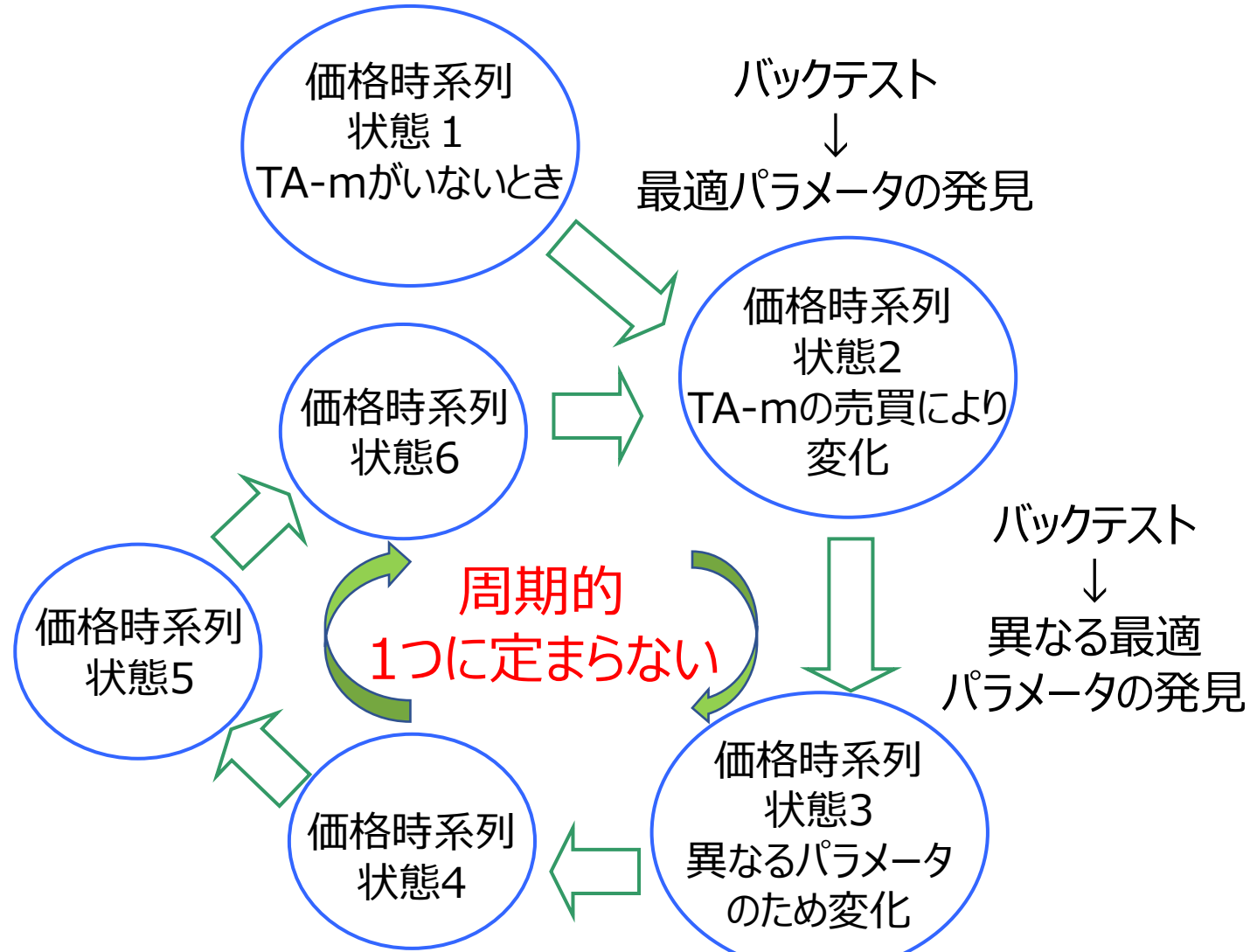
過去リターン $< 0 \Rightarrow$ 下がると予想



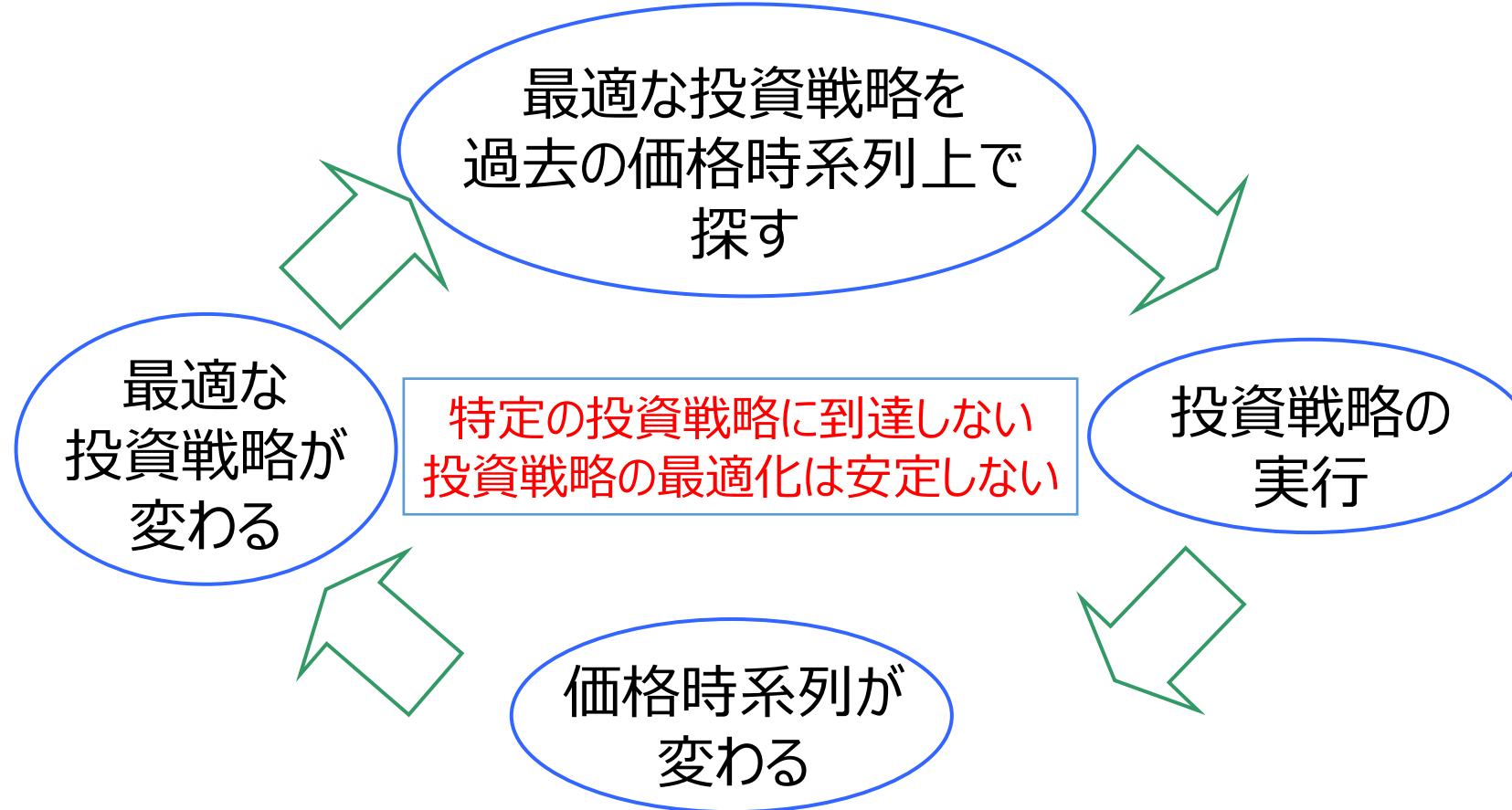
tmとTA-mの利益の推移



tmはある値に収束することなく周期的に値が変わっている
TA-mは特定の投資戦略に落ち着くことはなく、最適化が安定しない



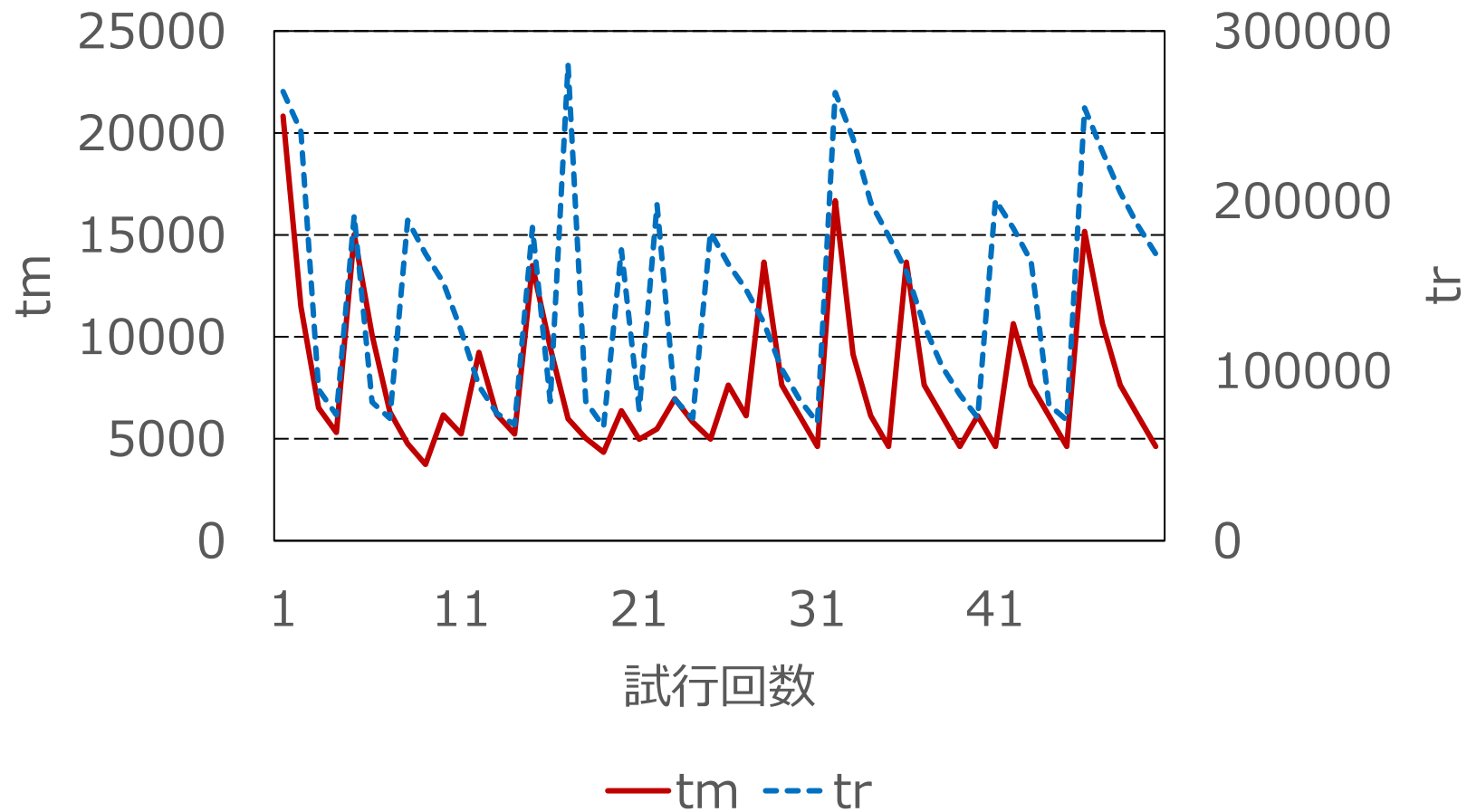
tmはある値に収束することなく周期的に値が変わっている
TA-mは特定の投資戦略に落ち着くことはなく、最適化が安定しない。
TA-m自身以外は全く同じ環境であるにも関わらず、
自身の戦略の最適なパラメータを探すことをさえも安定しない。



他の全員が全く同じに固定されていたとしても、1人でも戦略の最適化を行うために、バックテストとその実践投入を繰り返し行うだけで、その戦略は定まることがないし、価格時系列も特定のものには達しない。

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。

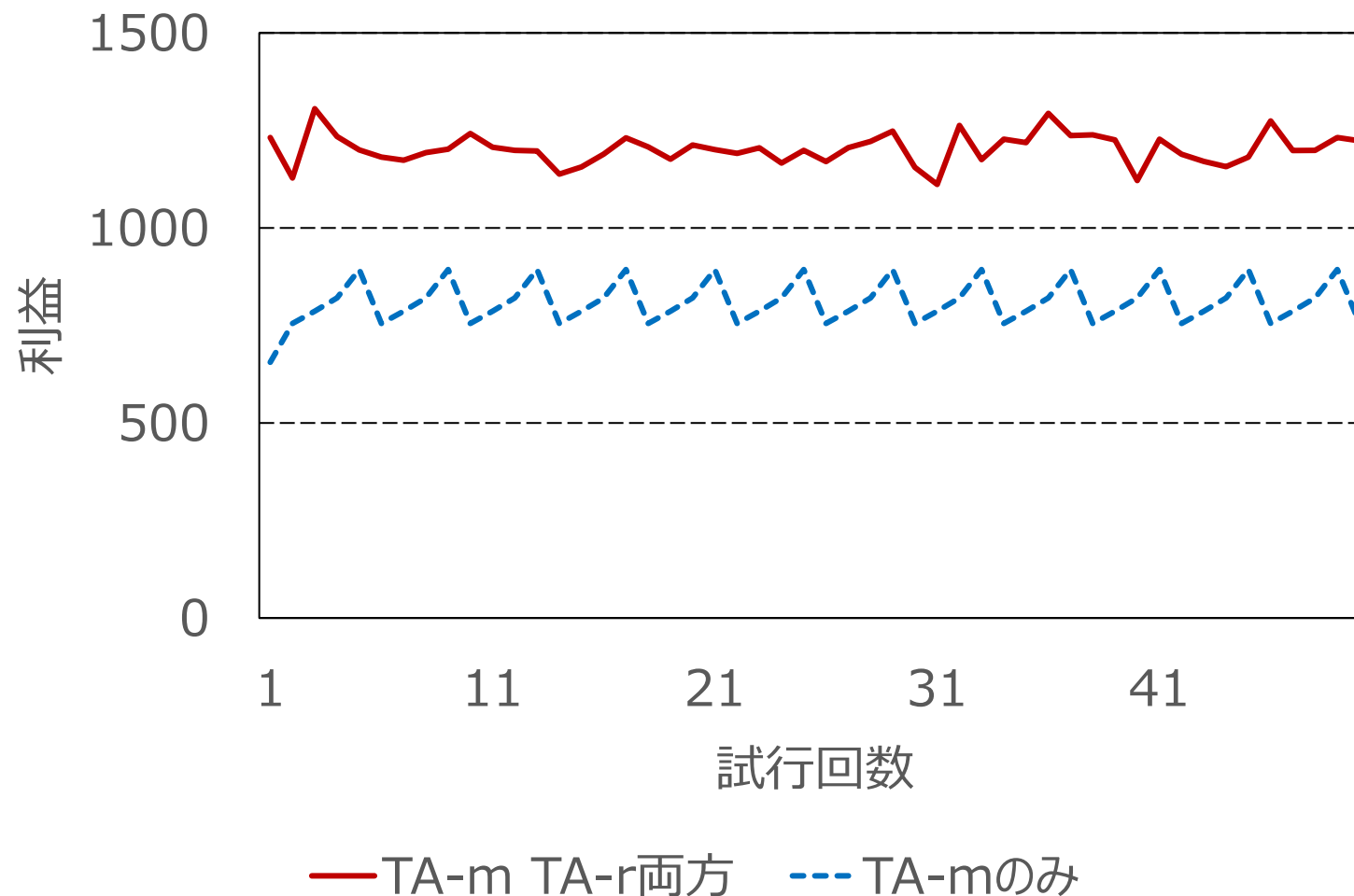
TA-m, TA-rの両方がいる場合



周期性はなくなり，予測不能な動き

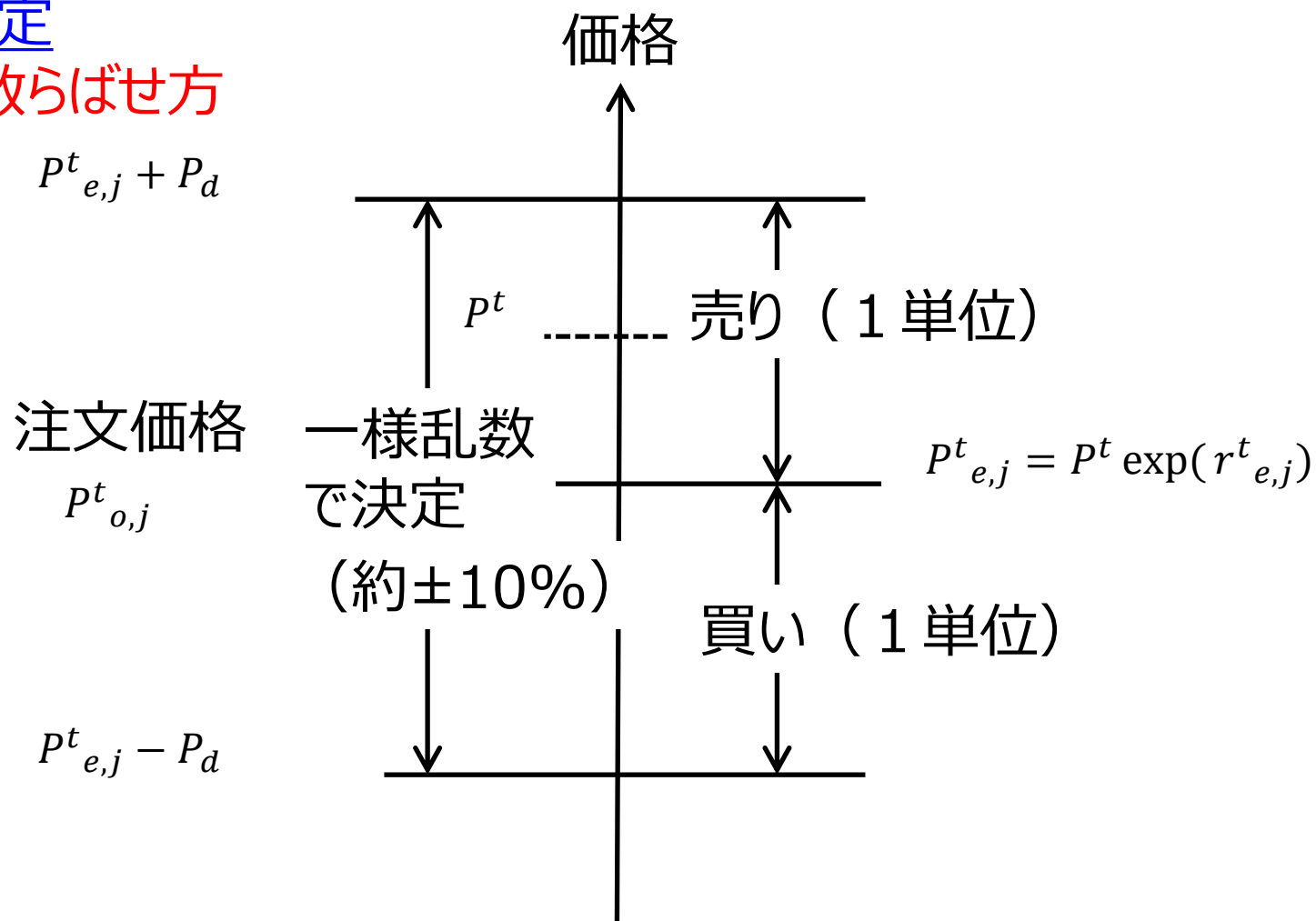
このような予測不能な動きとなるパラメータに基づいた投資戦略によって生み出された市場価格の時系列が，予測可能であったり規則性が安定的に存在したりするとは考えにくい。規則性の不安定性は，価格時系列を数理モデル化の際の大前提である斉一（せいいつ）性原理をも疑わせ，価格時系列の数理モデル化の難しさを示すものであると考えられる。

TA-rがいる場合といない場合のTA-mの利益



TA-rがいる場合の方が利益が高く、他の戦略の存在によって利益が奪われるというよりは利益を引き上げてくれる存在となっている

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

TAがない場合の各種統計量

尖度		18.341
騰落率の 2乗の 自己相関	lag	
	1	0.060
	2	0.050
	3	0.047
	4	0.038
	5	0.036

ファットテール、ボラティリティクラスタリングが成立

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

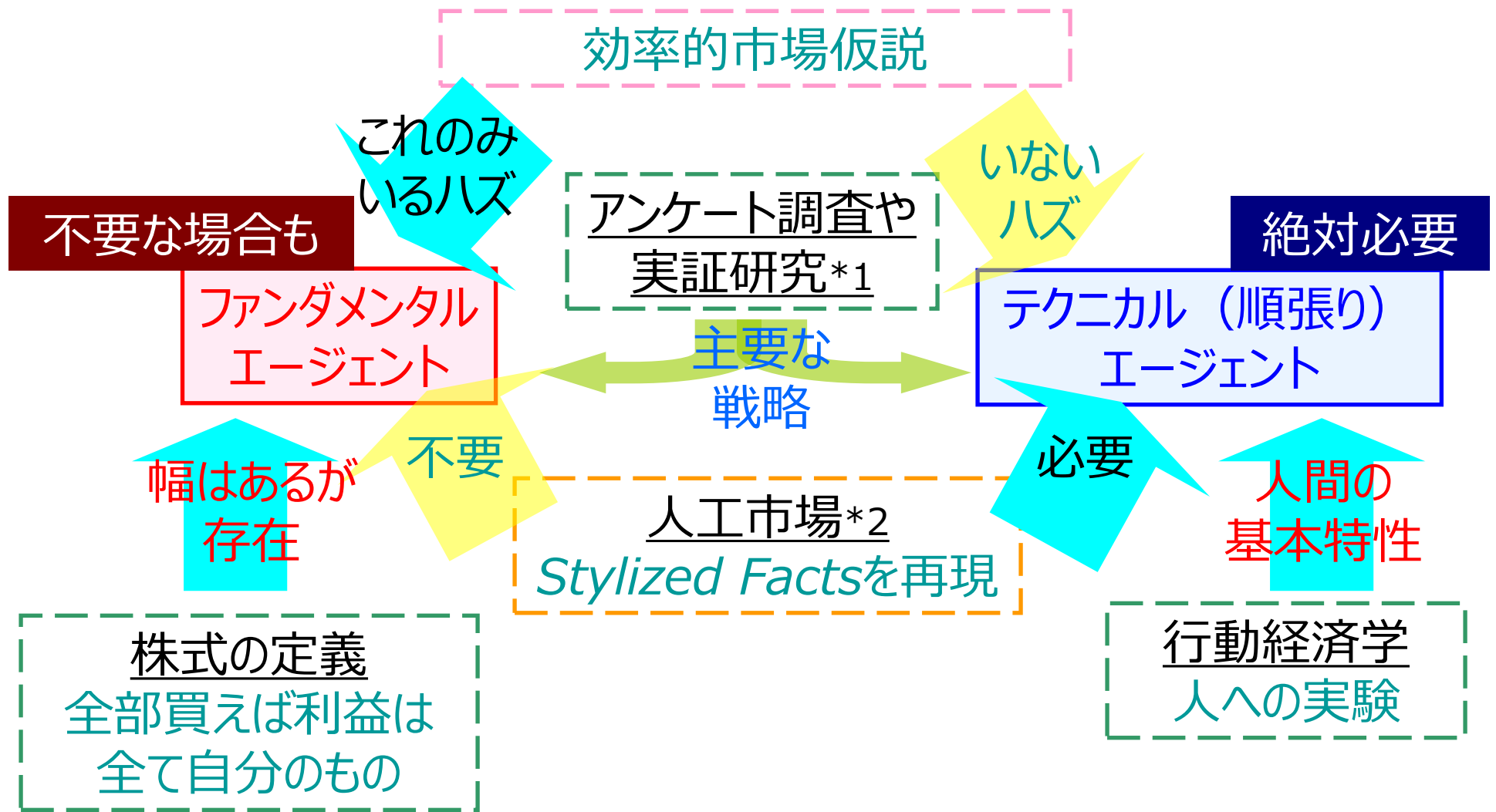
PlhamJ: 和泉研作成 : <https://github.com/plham/plhamJ>

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

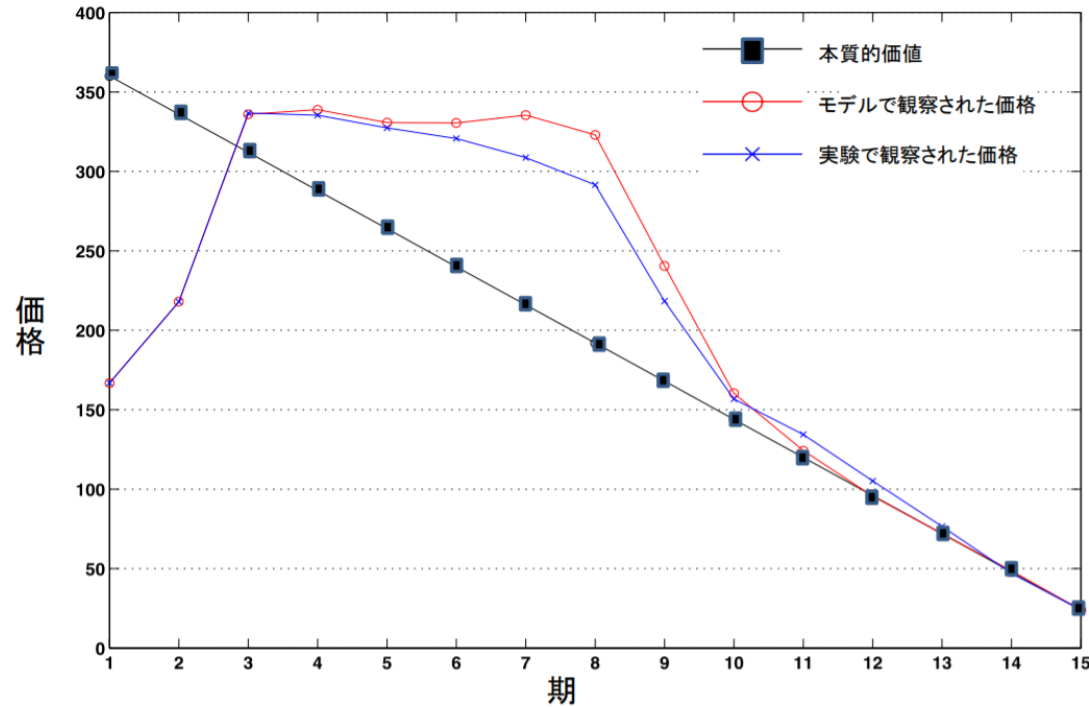


*1 Menkhoff, L. and Taylor, M. P. (2007): The Obstinate Passion of Foreign Exchange Professionals: Technical Analysis, Journal of Economic Literature
Yamamoto, R. (2021): Predictor Choice, Investor Types, and the Price Impact of Trades on the Tokyo Stock Exchange, Computational Economics
<https://arxiv.org/abs/1906.06000>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

実験市場についてよくまとまった本

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



実証研究との一致はいろいろ議論があるものの、

★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）

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