

明治大学 共同利用・共同研究拠点「現象数理学研究拠点」

明治大学現象数理学共同研究集会

# Data-Driven Mathematical Sciences：経済物理学とその周辺

講演概要集

2026 年 9 月 10 日（木）–11 日（金）

明治大学中野キャンパス

ハイブリッド形式（対面・オンライン併用）

研究代表者： 守 真太郎（弘前大学大学院理工学研究科・教授）

担当 MIMS 所員： 西森 拓（明治大学先端数理科学インスティテュート・所長）

## 研究集会の概要

経済物理学 (Econophysics) は、物理学の手法を用いて経済・金融現象を解析する学際的研究領域であり、2000 年頃より日米欧の研究者を中心に発展してきた。価格変動や市場ダイナミクス、景気循環、リスク管理といった問題に対し、統計物理学や非線形力学の知見を基盤とした理論的・実証的研究が展開されてきた。

近年では、大規模データの利用環境が整備され、機械学習・人工知能 (AI) の急速な進展と相まって、経済物理学におけるデータ駆動型アプローチの重要性が一層高まっている。これにより、従来の理論モデルとデータ解析手法の関係が再編されつつあり、数理モデルと実データの往復に基づく新たな研究枠組みが求められている。

本研究集会では、Data-driven Mathematical Sciences の視点を基盤として、経済物理学および計算社会科学の最新動向を踏まえた研究発表と議論を行い、データ解析と理論モデルの有機的な融合を目指す。

とくに、以下のトピックを中心に議論を深める。

- 金融市場のビッグデータ解析：高頻度取引データの統計分析、価格変動の確率過程モデル、情報流の影響
- 機械学習を用いた市場解析・予測：ディープラーニング、強化学習、生成モデルの応用
- ネットワーク科学と経済ダイナミクス：企業間取引・金融ネットワーク、システミックリスク
- エージェントベース・モデリング (ABM)：異種エージェントによる市場形成、政策効果のシミュレーション
- 進化経済学・行動経済学との連携：行動バイアスを考慮した市場モデルの構築

本研究集会は、経済物理学における理論・実証研究の深化に加え、計算社会科学や AI 技術との融合を通じて、新たな数理的視座を開拓することを目的とする。明治大学先端数理科学インスティテュートを拠点として、国内外の研究者が集い、分野横断的な議論と知見の共有を行う場を形成する。

本研究集会を通じて、データ駆動型手法が経済物理学にもたらす可能性と課題を明確化し、経済・金融分野における数理科学のさらなる発展に寄与することを目指す。

本研究集会は、2026 年 9 月 10 日から 11 日の 2 日間、明治大学中野キャンパスを会場とするハイブリッド形式で開催する。

## 組織委員会

| 氏名     | 所属機関・部局・職位              |
|--------|-------------------------|
| 守 真太郎  | 弘前大学・理工学研究科・教授          |
| 西森 拓   | 明治大学・先端数理科学インスティテュート・所長 |
| 増川 純一  | 成城大学・経営学部・教授            |
| 石川 温   | 金沢学院大学・情報工学部・教授         |
| 水野 貴之  | 国立情報学研究所・教授             |
| 石崎 龍二  | 福岡県立大学・人間社会学部・教授        |
| 佐野 幸恵  | 筑波大学・システム情報系・准教授        |
| 金澤 輝代士 | 京都大学・理学部・准教授            |
| 田中 美栄子 | 金沢学院大学・情報工学部・特任教授       |

## 目次

|         |    |
|---------|----|
| 研究集会の概要 | i  |
| 組織委員会   | ii |
| 講演概要    | 1  |

# 集約デフォルト件数における感染成分の識別性と時間粗視化

守 真太郎（弘前大学・理工学研究科）

## 要旨：

企業デフォルトの集中は、企業間の感染的相互作用によっても、景気・金融環境の変化に伴う共通のデフォルト確率変動によっても生じうる。本研究では、年次の集約デフォルト件数だけが観測される状況で、これらの機構をどこまで識別できるかを検討する。まず、Davis–Lo 型の累積感染、Torri 型の閾値感染、Vasicek 型の共通因子モデルを静的に比較すると、Vasicek モデルが年次データを最もよく記述する。ただし、年次デフォルト件数の尤度のレベルでは、Vasicek モデルはデフォルト確率が Probit–Normal 分布に従う binomial mixture と等価である。そこで、この分布を環境変動を表す簡潔な null model とみなし、その上に感染成分を加えたときに追加的な分布構造が識別されるかを調べる。

Moody’s の 1920–2023 年の年次データを用いた解析では、環境変動を導入すると年次デフォルト件数の変動の大部分が吸収される一方、Davis–Lo 型の累積感染は ALL および speculative-grade で尤度と情報量規準を大きく改善する。これに対し、Torri 型の閾値感染は環境変動に吸収されやすく、investment-grade では感染成分の証拠自体が弱い。さらに、環境分布を 2 成分 Gaussian mixture まです柔軟化しても、ALL および speculative-grade における Davis–Lo 型成分の優位性は維持される。したがって、年次・少標本という強い粗視化の下でも、感染機構の種類によっては環境変動から分布的に区別可能な痕跡が残る [1]。

最後に、この識別問題を月次データへ拡張した結果にも触れる。月次の潜在デフォルト確率を持続的な状態過程として推定し、その posterior path を survival aggregation によって年次へ粗視化すると、明示的な同時刻相関を導入しなくても長期の overdispersion や effective default correlation が生成される。これは、長期の「相関」の一部が静的な依存パラメータではなく、持続する信用状態の時間粗視化から生じうることを示している [2]。

## 参考文献

- [1] S. Mori, “Identifiability of contagion components amid environmental fluctuations in aggregated default counts,” arXiv preprint arXiv:2604.18118 (2026).
- [2] S. Mori, “Temporal coarse-graining of latent default-probability paths generates effective default correlation,” arXiv preprint arXiv:2606.12446 (2026).
- [3] S. Mori and M. Hisakado, “Temporal Coarse-Graining of Multi-Sector Default Count Data Generates Posterior-Implied Copulas,” arXiv preprint arXiv:2606.22162 (2026).

# 非対称 BA モデルにおけるリンクの蒸発の効果

中山 一昭（信州大学理学部）、守 真太郎（弘前大学理工学研究科）

**要旨：**Barabási-Albert (BA) モデルを拡張した非対称 BA モデルでは、入次数と出次数の寄与の相対的な重みを表すパラメータ  $\omega$  を導入することにより、優先接続によるハブ形成、ランダムネットワーク、格子的な構造までを統一的に記述することができる。本研究では、この成長ネットワークにリンクの蒸発 — 既存リンクが一定確率  $\rho$  で消滅する — 過程を導入し、その長時間構造を解析する。各時刻に新しい頂点を追加する。その頂点から既存の頂点  $i$  が接続先として選ばれる重みを次で定める ( $k_i^{\text{in}}(t)$ ,  $k_i^{\text{out}}(t)$  は時刻  $t$  における頂点  $i$  の入次数・出次数):

$$w_i(t) = [k_i^{\text{in}}(t) + \omega k_i^{\text{out}}(t)]_+$$

これにより  $m$  本の新規リンクを作成する。一方、既存リンクは独立に確率  $\rho$  で消滅する。このとき生存リンク数は長時間極限でおよそ  $m/\rho$  と評価される。このため、時間が進むにつれて頂点数が増加し続ける一方で、実効的に参照される過去の範囲は有限となり、蒸発によってネットワークに有限記憶が導入される。

この有限記憶構造を調べるため、新しい頂点からリンクを親方向へ  $g$  世代遡ったときの、重複を除いた異なる祖先数  $D_g$  を導入する。数値計算によると、浅い世代では木構造の指数成長

$$D_g \simeq m^g$$

が見られる一方、世代が深くなると異なる祖先経路の合流が顕著となり、ほぼ線形の成長領域

$$D_g \simeq a + vg$$

へクロスオーバーすることが分かった。さらに線形成長速度  $v$  は蒸発率に対して概ね

$$v \propto \rho^{-1}$$

とスケールし、非対称性  $\omega$  により系統的に変化する。

この速度則は、親頂点の年齢分布と branching random walk を用いることで定性的に理解できる。ただし、独立な分岐過程の予測に比べ、実際のネットワークでは祖先経路の重複・合流により成長速度が抑制され、その抑制の強さ自身も  $\omega$  に依存する。以上から、リンク蒸発は単に次数分布を変化させるだけでなく、成長ネットワークの因果的な記憶範囲と祖先構造を特徴づける新たな時間・長さスケールを生成することが分かる。

# 仮想通貨ネットワークにおける因果的循環取引

家富 洋（立正大学データサイエンス学部）

## 要旨：

有向ネットワークに含まれる閉路は、ネットワーク上の循環的な流れを特徴づける基本的な構造である。しかし、取引のように各リンクに発生時刻が付随する場合、単に閉路が存在するだけでは、実際にその閉路に沿って情報や資金が循環したことを意味しない。本研究では、リンクの時間的順序を満たしながら閉路を形成する構造を「因果的ループ」として捉え、その検出方法を提案する。さらに、この方法を仮想通貨の取引ネットワークに適用し、因果的な循環取引がどの程度存在するのかを統計的に検証する。こうした循環構造の検出は、通常の取引活動とは異なる資金循環を捉える手段となり、価格形成に関わる異常な取引や資金洗浄などを分析する上でも有用であると考えられる。

解析は有向ネットワークの強連結成分のみを対象とすればよい（強連結成分にのみ閉路は存在）。まず各リンクについて、その終点から始点へ戻る最短経路を探索し、当該リンクと組み合わせることで閉路を構築する。次に各リンクに付されたタイムスタンプを用いて、得られた閉路に沿った取引が時間的に整合した順序で生じているかを判定する。この条件を満たす閉路を因果的ループと定義する。ただし、閉路の重複は取り除く。さらに、観測された因果的ループ数が偶然に生じ得る範囲を超えているかを調べるため、ネットワーク構造を固定したままタイムスタンプをランダムに再配置した系を帰無モデルとし、統計的仮説検定を行う。

解析対象には、Coquid'e and Cazabet によって公開された Bitcoin の entity-entity 取引データセット [1] を用いる。このデータセットは 2009 年 1 月から 2021 年 1 月までの Bitcoin 取引を収録しており、ノードは個々のアドレスではなく、同一主体に属すると推定された entity に対応し、リンクは entity 間で行われた取引を表す。ここではデモデータとして提供されている 2016 年 7 月 8 日の 1 日分の取引を解析する。この日のネットワークは 205,741 ノード、565,228 リンクからなる。自己ループは除去し、多重リンクは維持する。多重リンクが少なからず存在するため、ループ数は格段に大きくなる。各リンクに付随する取引額には著しい不均一性が見られ、少数のリンクに大部分の取引額が集中している。実際、全リンクのうち 14,935 本だけで総取引額の 90% を占める。そこで、それら主要リンクから部分ネットワークを構築し、最大の強連結成分を抽出した。その最大強連結成分 (図 1) は 953 ノード、1,883 リンクから構成される。

表 1 は、得られた最大強連結成分から検出された因果的ループについての統計をループサイズ別にまとめたものである。ここでループサイズは閉路を構成するノード数である。また、各ループサイズに対して、ループ総数 (#loops)、実データから得られた因果的ループ数 (Real)、帰無モデルに基づく因果的ループ数の平均値 (Average) と有意水準 1% に対応する棄却限界値 ( $\alpha = 0.01$ ) を示している。実データにおける因果的ループ数は、三角ループを除き各ループサイズで棄却限界値を上回っており、有意水準 1% で帰無仮説は棄却される。特筆すべき事実として、実データと帰無モデルとの差異がループサイズの増加とともに顕著になっている。

以上の結果から、Bitcoin 取引ネットワークにおける因果的ループが、単に閉路を構成する取引の時刻が偶然に整列したことだけでは説明できないことがわかる。とりわけ、長いループほどランダムな時間配置のもとでは因果的な時間順序を満たすことが困難になるにもかかわらず、実データでは多

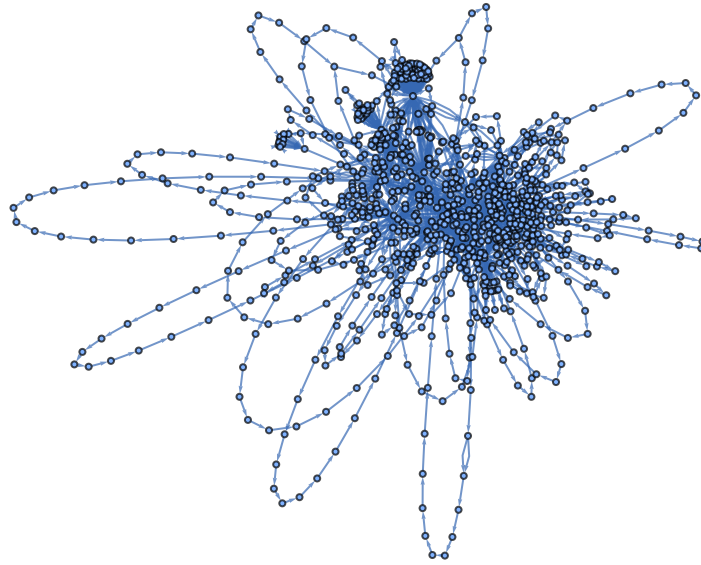


図1 バネ電気モデルで可視化した最大強連結成分

表1 Bitcoin 取引ネットワーク (2016 年 7 月 8 日) の因果的ループの統計

| Loop size | #loops  | #causal loops |         |                 |
|-----------|---------|---------------|---------|-----------------|
|           |         | Real          | Average | $\alpha = 0.01$ |
| 3         | 25,918  | 13,820        | 13,410  | 14,383          |
| 4         | 163,913 | 37,134        | 29,231  | 35,672          |
| 5         | 325,845 | 42,264        | 15,285  | 24,842          |
| 6         | 496,630 | 42,723        | 4,923   | 10,435          |
| 7         | 631,578 | 33,276        | 1,091   | 3,043           |

数の因果的ループが存在している。このことは、Bitcoin 取引ネットワークにおいて、大きな因果的ループであるほど、何らかの意図をもって複数の entity を経由して形成された循環取引である可能性が高いことを示唆している。

- [1] Célestin Coquidé and Rémy Cazabet, “A Temporal Graph Dataset of Bitcoin Entity-Entity Transactions,” Scientific Data 12:337 (2025).

# 潜在的消費者ニーズの特定への試案

加藤淳一（久留米大学）

**1. 研究の背景と目的：** 消費者ニーズの理解は、マーケティング活動の出発点となる。ここで消費者ニーズは、(1) 顕在的消費者ニーズと (2) 潜在的消費者ニーズに分けられる。これまで潜在的消費者ニーズの重要性は指摘されつつも、その特定については限られた議論しかなされていない [1][2][3]。本研究の目的は、マルチモーダルデータフュージョン（融合された多種類データ）の、探索的な分析と LLM での分析により、潜在的消費者ニーズの特定手順の試案を提示する。

**2. 提案手順：** 次の 5 つの手順を提案した。手順 1 は、言語と非言語データ（マルチモーダルデータ）の収集である。手順 2 は、この言語データと非言語データという、異なるモダリティのデータを、Japanese CLIP など基盤モデルにより同一多次元空間に位置づける。手順 3 は、コサイン類似度を基礎として、次の 2 つを計算する。(1) 言語と非言語の乖離 から、言葉にできないズレを計算する。これは顕在的消費者ニーズが、いつどこでほころび始めているのかを捉える。(2) シフトベクトルにより、潜在的消費者ニーズがどの方向にありそうかを計算する。手順 4 は、最適座標  $v^* = \operatorname{argmax}_{v \in V} \frac{Attraction(v)}{Density(v) + \varepsilon}$  を計算する。最適座標  $v^*$  は、同一多次元空間の中で、顕在的消費者ニーズの密度  $Density(v) = \sum_{i=1}^{12} \exp\left(-\frac{\|v - z_{future,i}\|^2}{2h^2}\right)$  が低く、かつ、無自覚な不満の収束  $Attraction(v) = \sum_{i=1}^{12} w_i \cdot \|s_i\| \cdot \cos(\theta_i) \cdot \exp\left(-\frac{\|v - z_{future,i}\|^2}{2\sigma^2}\right)$  が高い領域として特定する。手順 5 は、LLM により、潜在的消費者ニーズの解釈を行う。まず、潜在的消費者ニーズを表すデータを入手する。次に、顕在的消費者ニーズを表すデータを入手する。最後に、これらデータを LLM へ渡すことで、潜在的消費者ニーズを自然言語で理解できる。

**3. 今後の課題：** 以上のような手順は、試論であり、次のような今後の課題 4 点も含めて、貢献としたい。(1) 収集したデータのデータクリーニング、(2) レコメンデーションシステムを用いた、具体的な商品・サービスの提案、(3) 分析結果の信頼性と妥当性のチェック指標の設定、(4) 実データの収集と分析を実行である。

## 参考文献

- [1] Bao, Yongchuan., Zelong Wei, and Anthony Di Benedetto, Strategic Entrepreneurship Journal, Vol. 14, pp. 444–469 (2020).
- [2] Song, Xi., Zelong Wei, and Yongchuan Bao., Industrial Management & Data Systems, Vol. 124, pp. 2939–2964 (2024).
- [3] Wang, Xiaoyuan ., Guangxu Wang, Liangxing Shi, and Shaoyi Stephen Liao., Journal of Business Research, Vol.215, (2026).

# SNS 上の非正規ネットワークと投稿数増幅との関連性に関する研究

Wu Qianyun (弘前大学), 外谷弦太 (東京科学大学), Bruno T. Sugano (東京科学大学), 市川慧 (東京科学大学), 橋本康弘 (会津大学), 豊田正史 (東京大学), 吉永直樹 (東京大学), 笹原和俊 (東京科学大学)

## 要旨:

ソーシャルネットワーキングサービス (SNS) における情報拡散パターンの解明は、デマ・誤情報の拡散抑止や情報流通構造の理解において極めて重要な課題である。従来の情報カスケード研究は、時系列のバースト分析かネットワーク構造解析のいずれかに偏る傾向があり、時系列波形とネットワークの階層性・有向性を統合的に捉えた大規模実証分析は未だ不足している。

本研究の目的は、大規模な実証データに基づき、情報カスケードの伝播メカニズムを多角的に解明することである。具体的には、「言語特徴」「ネットワーク構造」「時系列パターン」の三次元を統合し、話題属性と時間発展、および有向ネットワーク階層構造の関連性を定量的に明らかにし、将来的な数理モデル構築へと繋げる包括的な分析を行う。

本研究では、Kprogram との共同研究により提供されたデータ基盤を用い、2024 年 4 月から 2026 年 2 月にかけて X (旧 Twitter) 上に日本語で投稿されたカスケードのうち、ツイートおよびリツイートの総数が 1 万件以上に達した 58,793 件のカスケードを対象とした (広告・プロモーション系カスケードは除外)。分析にあたり、以下の三つの次元を統合的に評価した。

- 言語特徴 (Textual Feature)**: 大規模言語モデル (LLM) を用いたトピック分類を行い、各カスケードを政治、エンターテインメント、科学、自然災害などに分類した。
- ネットワーク特徴 (Network Feature)**: ネットワークの「非正規性 (Non-normality)」に着目し、トロフィックレベル (Trophic Level) およびトロフィック非干渉性 (Trophic Incoherence,  $F_0$ ) を用いて、伝播構造の階層性・有向性を定量化した。
- 時系列パターン (Time-Series Shape)**: K-Shape アルゴリズムを適用して波形クラスタリングを行い、外生型・内生型、単峰型・二峰型など、情報カスケードの拡散特性を抽出した。

分析の結果、話題カテゴリと拡散の時系列・構造パターンの間に顕著な対応関係が確認された。「エンターテインメント」や「自然災害」は外生的な単峰型が支配的であり、高い非正規性 (一方向的で明確な階層的ブロードキャスト構造) を示した。一方、「政治」や「個人発言等 (Others)」では内生的な拡散が顕著であり、非正規性が比較的に低い (コミュニティ間の横断的架橋や階層飛び越しを伴う複雑なリレー構造) ことが明らかになった。さらに、非正規性の時間変化率と投稿数の増幅率、およびそれらの相互相関 (Cross-correlation) を計算した結果、外生・単峰型カスケードは構造的な非正規性に基づく予測しやすい一方、内生・二峰型カスケードは波形と階層構造の動的遷移を考慮する必要があることが示された。

# Data-driven サイエンスにおけるデータ供給の問題点について

田中 美栄子（金沢学院大学 情報工学部 情報工学科）

## 要旨：

データを自ら作る場合は別として、解析手法とその結果に重きを置く場合、どうやってデータをゲットするかは永遠の課題である。以前は研究会で典型的なデータを用意する方法を模索したこともあった。近年は個別株価や TOPIX 指数のデータが JPX クラウドから安価に入手できたこともあり研究費で購入していたが、抜本的な対策が欲しい所である。

# 大都市圏通勤のガラス的ダイナミクス: 重力ベース住居交換モデルによる平衡仮定の検証

鄭 軼璇 (テイ イーシャン)<sup>1</sup>, 高安 秀樹<sup>1</sup>, 高安 美佐子<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京科学大学

都市の通勤流（OD 行列）を記述する重力モデルは、半世紀にわたり都市が「平衡状態」にあると仮定してきた [1]。すなわち、通勤パターンは現在の都市構造のみで決まり、擾乱に対しても迅速に適応するという前提である。もし都市が非平衡であれば、調整は遅く都市介入の帰結を見誤ることになるが、この基礎的仮定は未検証であった。

我々は、日本の 6 大都市圏における 1 年間・約 3000 万件の通勤軌跡データ [2, 3] を用い、重力ベース住居交換モデル（Gravity-based Home Swapping Model; GHSM）を導入する。本モデルでは、OD 行列の行和、列和を固定したまま、通勤者ペアが住居を交換するメトロポリス過程として実装され、詳細釣り合いを満たしカノニカル分布へと収束する。

本研究でこの凸性を証明したことにより、熱平衡状態は GHSM 定常分布のモードとなり、平衡仮定は「現実の OD 行列と GHSM の定常状態の一致」として検証可能になった（図 2）。

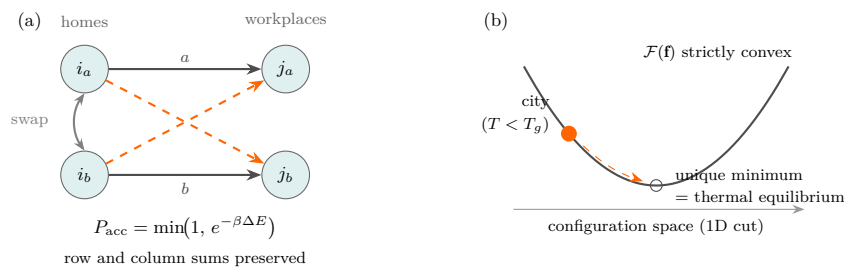


図 2 GHSM とその凸自由エネルギー地形.(a) 基本移動: 通勤者  $a$  と  $b$  が職場を保ったまま住居を交換する. $f$  の行和・列和はすべて保存される.(b) 現実の都市は平衡状態に辿れず, 都市は Kinetic arrest.

経験データに基づく検証から、2 つの結論を得た。第一に、現実の都市は平衡の近傍に位置するが、残余の緩和は動力学的に凍結している。この状態は、エイジング、ヒステリシス、クロスオーバー温度以下でのエルゴード性の破れという、ガラス特有の徴候を示す。第二に、ランダム状態から出発した軌道も観測配置へ収束することから、通勤パターンを規定するのは初期条件ではなく都市の制約であることが判明した。

## 参考文献

- [1] A. G. Wilson, “A statistical theory of spatial distribution models,” *Transportation Research* **1**, 253–269 (1967).
- [2] Zheng YY, Shida Y, Takayasu H, Takayasu M (2025) Enhancing the gravity model for commuters: Time-and-spatial-structure-based improvements in Japan’s metropolitan areas. *PLOS ONE* 20(8): e0329603. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329603>
- [3] Zheng, Y. Y.; Takayasu, H.; Takayasu, M. Do Railway Commuters Exhibit Consistent Route Choice “Rationality” Across Different Contexts and Time? Evidence from Tokyo Metropolitan Commutes. *Journal of Social Physics* 2026, 1 (1), 6. <https://doi.org/10.53941/jsp.2026.100006>.

# 地図構造を考慮した人流軌跡生成

打田裕啓（総合研究大学院大学）、藤本祥二（金沢学院大学情報工学部）、石川温（金沢学院大学情報工学部）、水野貴之（国立情報学研究所）

## 要旨：

Transformer は、人流の文脈を学習することで、ルールベースや従来の深層学習モデルよりも元データに近い軌跡を生成できる。一方、既存モデルには空間認識が十分に組み込まれていない。そこで今回、地図情報を明示的に埋め込み、空間構造を考慮した新たな人流軌跡生成モデルを提案する。

# シミュレーションから実世界へ： 大規模言語モデルによるサッカー軌道生成の sim-to-real 転移

藤本祥二（金沢学院大学）、水野貴之（NII）、石川温（金沢学院大学）、  
成塚拓真（立正大学）、家富洋（立正大学）

## 要旨：

サッカーの試合は、22 人の選手とボールが刻一刻と相互作用する「人間の多体系」であり、全員の位置が完全観測される稀有な集団運動データである。個々の判断の集積が集団のパターンを生み、その全軌跡が高解像度で記録される。本研究のアプローチは「Soccer as a Language」——この集団運動を物理モデルではなく言語としてモデル化し、さらに「実データが少ない」という社会系データに共通の壁を、シミュレーションからの転移（sim-to-real）で乗り越える。

方法の核は軌道の「言語化」である。ピッチを縦横に分割を繰り返し、約 1.6m×1.0m の各マスをも 7 文字の単語で表すと、ある瞬間の全員の配置は 47 語のひとフレームになる。フレームの区切りには読点を、プレーの切れ目には句点を表すトークンを打つことによって、ひと続きのプレーが 1 つの文、試合は数万語の文章になる。これを LLaMA 型の大規模言語モデル（約 1.3 億パラメータ）に読ませ、「次の瞬間の配置」を予測する言語課題として学習させる。語順（エンティティの並び）は形式として与えるが、オフサイドラインの上下動や攻守の切り替えといった集団運動の規則性は与えず、モデルが統計的に獲得していく。

問題は実試合データの少なさである。利用可能な J1 リーグの試合は約 300 試合に留まり、そのまま学習すれば過学習で生成が崩壊する。そこで、サッカービデオゲーム eFootball (KONAMI) の対戦ログ約 5,000 試合分でまず事前学習を行い、実試合データへは低ランク適応 (LoRA) ——基盤モデルの重みを凍結し、少数の補正パラメータだけを学習する軽量な転移法——で適応させた。ゲームの中のサッカーと実試合とは、プレーの速さも戦術も選手の挙動も同じではない。それでも検証損失は LoRA 転移 (0.646) < 全パラメータ再学習 (0.653) < 実データのみの学習 (0.670) と一貫して LoRA 転移が最良で、少数データ域では実データ換算で約 5 倍のデータ効率を示した。ゲームで獲得した集団運動の規則性を保ったまま、実試合特有の「癖」だけを注入する——両者が共有する集団運動の構造が転移を支えていることを示唆する。

それでは、適応でモデルの内部では何が起きているのか。重みの変化を層ごとに追うと、適応は全層一様ではなく中間層に集中し、実データ特有の「癖」の学習は特定の深さに局在する。さらに、選手間で誰が誰に注意を向けるか (attention 行列) を見ると、実データ適応の過程でセンターバックと攻撃的 MF、左右のサイドバック同士といった役割特異的な対が選択的に強まる——モデルの内部に、マッチアップの相互作用ネットワークが誰にも教えられずに浮かび上がる。講演ではこの「モデルの中のサッカー」の可視化と実試合の軌道生成を紹介し、軌道の言語化・シミュレーションでの事前学習・LoRA による適応という枠組みの、他の集団運動データへの展開可能性を議論する。

# 運行頻度で重み付けしたネットワークにおける都市バス乗客負荷の電気回路モデルによる再構成

吉田 大地（弘前大学大学院理工学研究科）、守 真太郎（弘前大学大学院理工学研究科）

**要旨：**地方都市の公共交通では、路線再編や運行本数の適正化のため、路線全体の利用者数だけでなく、各区間を何人の乗客が利用しているかを把握することが重要である。詳細な Origin - Destination (OD) データを用いれば区間別乗客負荷を直接把握できるが、個々の移動情報を含むため公開・共有には制約がある。そこで本研究では、個々の OD ペアを復元するのではなく、停留所単位の乗降情報、運行頻度および路線ネットワークから、区間別乗客負荷を再構成できるかを検討した。対象は弘前市の 2025 年 6 月および 12 月のバス利用 OD データ 327,822 件である。弘前駅・バスターミナル周辺の 6 停留所を中心ノード (CORE\_STATION) として統合し、中心から郊外へ向かう流れを DOWN、郊外から中心へ向かう流れを UP として方向別に分解した。まず、環状・環状類似路線を含む方向別データと、それら 15 路線を除外した非環状方向データを比較し、電気回路モデルの適用条件を検討した。この比較に基づき、その後の時間帯別解析、期間外評価および中心駅限定解析には非環状方向データを用いた。なお、環状・環状類似路線を除外した後もネットワークは木構造ではなく、DOWN、UP の独立閉路数はそれぞれ 51、69 であり、分岐や代替経路を含んでいる。停留所 ( $i$ ) の乗車人数を ( $A_i$ )、降車人数を ( $B_i$ ) とし、乗降差を

$$S_i = A_i - B_i$$

と定義した。( $S_i > 0$ ) の停留所は乗客をネットワークへ供給し、( $S_i < 0$ ) の停留所は乗客をネットワークから吸収するノードとして扱う。また、リンク ( $e$ ) の実測運行頻度 ( $f_e$ ) をコンダクタンスとして

$$G_e = f_e$$

と設定した。停留所電位を ( $\phi$ )、コンダクタンス重み付きグラフラプリアンを ( $\Delta_G$ ) とすると、

$$\Delta_G \phi = S$$

を解くことで各停留所の電位を求める。リンク ( $e = (i, j)$ ) を流れる電流を

$$I_e = G_e(\phi_i - \phi_j)$$

とし、これを再構成された区間乗客負荷 ( $L_{e, \text{rec}}$ ) とした。

モデルの適用条件を確認するため、全停留所の乗降差を用いる全停留所モデル (Full-S) について、環状・環状類似路線を含む場合と除外した場合を比較した。環状・環状類似路線の除外により、有効 OD 記録に対するカバー率は 93.3 % から 60.0 % に低下した一方、決定係数は DOWN で 0.901 から 0.989、UP で 0.818 から 0.963 へ向上した。この結果から、以降の解析では非環状方向データを用いた。非環状方向データを用いた期間外評価では、6 月および 12 月をそれぞれ前半・後半に分けた 4 通りの評価を行った。運行頻度をコンダクタンスとする電気回路モデルの平均決定係数は、DOWN で  $0.977 \pm 0.006$ 、UP で  $0.953 \pm 0.012$  となり、運行頻度のみを説明変数とする線形回帰の DOWN 0.874、UP 0.821 を上回った。このことから、区間ごとの運行頻度だけでなく、路線ネットワークと各ノードにおける乗客保存則を考慮することが再構成性能に寄与していると考えられる。さらに、6

月の乗降差構造と 12 月の GTFS 運行頻度を用いて 12 月の区間負荷を再構成したところ、12 月の平均日乗客数が 6 月より約 9.2 %多いにもかかわらず、乗客数に対する追加のスケーリングを行わず、決定係数は DOWN 0.961、UP 0.915 となった。さらに、観測する乗降差を CORE\_STATION のみに制限した中心駅限定モデル (CORE-only) を検討した。弘前では、全停留所モデルの決定係数が DOWN 0.989、UP 0.963 であったのに対し、中心駅限定モデルでも DOWN 0.907、UP 0.768 となった。すなわち、特に DOWN では、中心駅の乗降差、運行頻度、路線ネットワークおよび保存則のみから、区間別乗客負荷の変動の約 91 %を再構成できた。一方、同じ手法を五所川原市へ適用すると、全停留所モデルの決定係数は DOWN 0.884、UP 0.795 であり、弘前より低かった。さらに中心駅限定モデルでは DOWN 0.456、UP - 0.016 まで低下した。

表 2 弘前市と五所川原市における再構成性能の比較

| モデル      | 弘前 DOWN | 弘前 UP | 五所川原 DOWN | 五所川原 UP |
|----------|---------|-------|-----------|---------|
| 全停留所モデル  | 0.989   | 0.963 | 0.884     | 0.795   |
| 中心駅限定モデル | 0.907   | 0.768 | 0.456     | -0.016  |

五所川原では路線の 80.4 %、運行の 86.9 %が五所川原駅を通過する一方、駅を乗降地点とする乗客は 28.0 %にとどまった。また、8.1 %は非中心停留所間を移動しながら五所川原駅を通過し、63.9 %は五所川原駅を通過しない非中心停留所間の移動であった。中心拠点の乗降差の絶対値が、DOWN では正の乗降差の総和、UP では負の乗降差の絶対値の総和に占める割合は、弘前では DOWN 0.911、UP 0.855 であるのに対し、五所川原では DOWN 0.611、UP 0.374 であった。したがって、路線や運行が駅へ集中していることと、実際の乗客需要が駅へ集中していることは異なる。弘前と五所川原の比較から、本手法は単純な木構造を前提とはしないものの、その性能にはネットワーク構造に加えて、中心拠点が方向別の乗降差構造をどの程度支配しているかが関係すると考えられる。特に中心駅への需要集中が強い非環状方向ネットワークでは、詳細な非中心部 OD 情報を用いなくても区間別乗客負荷を一定の精度で再構成できる。一方、多中心的な需要構造や環状交通への適用には課題が残る。今後は、駅だけでなく学校、病院、商業施設等の複数の活動中心を考慮する多中心モデルへの拡張や、人口・土地利用等の外部データから停留所ごとの乗降差を推定する手法への発展が期待される。

## 参考文献

- [1] Mori, S. and Yoshida, D., “Electric-circuit reconstruction of urban bus passenger loads on service-frequency-weighted networks,” *Scientific Reports*, in press (2026).

# 「賢い粒子」のながれを調べる

江崎貴裕（東京大学先端科学技術研究センター）

## 要旨：

物流や交通では、荷物や移動主体は、混雑状況や配送計画に応じて経路を選び直すことができる。こうした系では、最適化や状況に応じた意思決定が、粒子の運動を決める規則に組み込まれている。では、そのような「賢い粒子」が多数集まったとき、全体の流れはどのように決まるのだろうか。個々の移動が効率化されても、系全体の効率や頑健性が保証されるとは限らない。

本講演では、輸送や意思決定の過程を抽象化した数理モデルを通じて、この問いに取り組む研究を紹介する。エージェントベースの記述を用いつつ、個別のシステムの細部よりも、経路選択、容量制約、需要変動などの要素が集団の流れを生む仕組みに注目する。最適化は解くべき問題であると同時に、調べる対象の動きを決めるルールでもある。そのルールを含む系に対して数値実験や理論的な検討を行い、どの条件で流れが改善し、どの条件で混雑や非効率が生じるかを考える。

まず、物流ネットワーク上のパケット輸送を例に、状況に応じた経路探索の効果が、迂回路を持つネットワーク構造に依存することを示す [1]。続いて、障害時に生じる迂回需要を定量化する「代替性中心性」を紹介し、平常時の効率と外乱に対する頑健性を両立する輸送容量の配分を考える [2]。さらに、断片化した輸送網の統合を最大流の観点から調べ、統合の相乗効果を左右する構造的な条件を議論する [3]。また、高層建築物における複数ドローンと単一エレベーターの配送を比較し、個別輸送と一括輸送という運行ルールの違いが、確率的な需要に対する待ち時間やエネルギー消費をどう変えるかを紹介する [4]。これらを通じて、流れを理解するには、粒子の移動を決めるルールと、それを支える構造・制約を併せて捉える必要があることを論じる。

最後に、判断を担う部分に大規模言語モデル（LLM）を用いた最近の取り組みに触れる。輸送事業者を選ぶ荷主エージェントの選択集中 [5]、位相を調整するエージェント集団の同期 [6]、二経路選択におけるハンチングや混雑の固定化を例に、情報の与え方が行動則と集団挙動に及ぼす影響を考える。明示的なアルゴリズムから言語に基づく判断へと対象を広げながら、「賢さ」と流れの関係を数理モデルから理解するための視点を提示したい。

## 参考文献

- [1] T. Ezaki, N. Imura and K. Nishinari, *Commun. Transp. Res.* **2**, 100064 (2022).
- [2] T. Ezaki, N. Imura and K. Nishinari, *J. Phys. Commun.* **7**, 025001 (2023).
- [3] T. Ezaki, N. Imura and K. Nishinari, *PLOS Complex Syst.* **1**, e0000017 (2024).
- [4] T. Ezaki, K. Fujitsuka, N. Imura and K. Nishinari, *Commun. Transp. Res.* **4**, 100130 (2024).
- [5] T. Ezaki, N. Imura and K. Nishinari, arXiv:2607.19967 (2026).
- [6] T. Ezaki, N. Imura and K. Nishinari, arXiv:2608.06968 (2026).

# 経済価値のリスク管理と深層生成モデリング

松山直樹（明治大学）

## 要旨：

2026年3月期より導入された保険会社の新ソルベンシー規制は経済価値に基づく。ここでいう経済価値とは市場整合的に評価された保険キャッシュフローの現在価値であるが、生命保険契約は超長期に及ぶため、40年を超える超長期年限のイールドカーブや超長期のキャッシュフロー予測など、データによる検証が困難で未発達な領域の時系列モデリング技術が必要になる。この規制では第一の柱として、一定の限界を有するが全社で実装可能な標準モデルによる経済価値ベースのソルベンシー比率（適格資本/所要資本）計算が義務付けられるが、第二の柱のモニタリング対象となる内部モデルでは、各社の実情に応じて標準モデルでカバーしきれないリスクへの対応が求められる。我々の研究は、この内部モデルでの利用を想定している。しばしばデータ系列より出力系列が長くなる超長期の外挿タスクにおいては、高い汎化性能に加えて出力結果の時間的暴走を防ぐ必要があり、柔軟な非線形構造の学習能力と、推定と外挿プロセスが統合された生成構造がモデルに求められる。このため我々は、生成構造を持つデータ駆動型モデル、特に深層生成モデルを主な探索領域として研究を進めてきた。イールドカーブ外挿に関する既存提案は、Smith-Wilson（2001）に代表される収束金利を仮定する仮定駆動型、Nelson-Siegel（1987）に代表されるパラメトリックなモデル駆動型に大別できるが、外挿部において前者は過小変動、後者は過大変動をもたらし、いずれも外挿年限の保険キャッシュフローのデューレーションによる金利リスク管理に支障をきたす。我々はこの分野に初めてデータ駆動型アプローチを適用し、生成 LSTM network を用いて比較的自然な形状と変動性を持つイールドカーブ外挿ができることを示した（doi:10.1017/asb.2024.27）。一方、保険キャッシュフロー予測の根幹をなす死亡率予測モデルにおいては、年齢と時間の双線形構造を特異値分解で推定する Lee-Carter モデルが一般的であるが、時間成分の外挿モデルの二段階推定が必要なため、超長期予測では推定と外挿の整合性が崩れることによる時間的暴走が避けられない。我々は、深層生成モデルのひとつである変分自己符号化器を用いて Lee-Carter モデルを非線形拡張し、高い汎化性能と共に時間的暴走をしない超長期予測が実現できることを示した（doi:10.1017/asb.2022.15）。上記の既存研究を踏まえ、これからの経済価値ベースのリスク管理におけるデータ駆動型モデリングの方向性についても展望する。

# 集団意思決定のタイミングに関する理論的考察と金融市場での実証分析

伊藤真利子（キャノングローバル戦略研究所，東京大学生産技術研究所）

## 要旨：

本講演では，人々の集団意思決定，および意思決定の結果が反映されたアウトプットの一例である金融取引を対象に，それらが「いつ」生じるかというタイミングに着目した研究について紹介する。

一つ目に，逐次意思決定モデルにおける，個々のエージェントの最適な意思決定について理論的に考察した研究を紹介する [1]。ここでは，各エージェントが，これまでに意思表明したエージェントたちの意見を取り入れて自身の正答率を最大化するような状況を考える。独立に意思決定するエージェントの意見を集約する場合，各エージェントの意見に対し，独立に正解できる確率（能力）の対数オッズ比に比例した重みを与えることで，集約結果の正答率を最大化できることが知られている。本研究では，この重み付けの考え方を，意見間の独立性が自然と失われる逐次意思決定の状況へ適用する方法について考察した。その結果，不均一な能力をもつエージェントたちの意思表明の順番が，後続のエージェントたちの正答率に大きな影響を与えることが示唆された。本講演では，この結果について，集合知に関する既存研究の知見と合わせて解釈を議論したい。

二つ目に，東京証券取引所（東証）株式市場における取引の点過程時系列を実証分析した研究を紹介する [2]。市場では，ニュースなどによる外生ショックと，取引が新たな取引を誘発するという内生的な連鎖により，短時間に取引が集中する現象がしばしば見られる。価格変動の背後にあるこれらの要因を分離して理解することは，市場状態を知る上で重要である。本研究では，東証の高頻度取引データを用いて銘柄ごとに取引の点過程時系列を構成し，Hawkes 過程モデルに基づいて，取引を引き起こす外生・内生要因の時間変化を推定する方法を検討した。その結果，日銀政策決定会合における金融緩和発表などの外生的ニュースを契機として取引が活発化し，その後に取引間の内生的な連鎖が強まっていくという市場の反応等を，定量的に捉えることができた。本講演では，このような市場状態の定量化を用いた変化点検知や不安定性の予兆検知に関する展望についても議論したい。

## 参考文献

- [1] M. I. Ito et al., PLOS ONE, Vol. 19, e0301462 (2024).
- [2] M. I. Ito and A. Sasaki, PLOS ONE, Vol. 18, e0282062 (2023).

# 国際研究協力の分断と代替 —トランプ制限後におけるネットワーク再編と知識拡散—

王菲（総合研究大学院大学）、水野貴之（国立情報学研究所）

## 要旨：

本研究は、2019 年の米国による対 Huawei 規制を対象に、機関間の共著・引用関係から成る二層ネットワークを構築し、国際研究協力の再編過程を分析する。米中間の共著関係の切断が引用関係の変化に先行するか、また中国国内・第三国への再配線や企業・大学・技術分野による差異を定量的に明らかにする。

# 複雑な相互作用ネットワークにおける 異常ダイナミクスの状態空間理論

池田裕一（名古屋市立大学大学院データサイエンス研究科）

**要旨：**動的相互作用ネットワークにおける異常は、従来、異常なノード、リンク、部分グラフ、あるいはグラフ全体のパターンとして検出されてきた。しかし、このような局所的記述だけでは、集団的な状態遷移を生み出すネットワーク全体の巨視的構造ダイナミクスを直接捉えることはできない。本研究では、ネットワーク異常を隠れた巨視的ネットワーク状態の遷移として捉える状態空間フレームワークを提案する。

グラフ理論、トポロジー、幾何学、スペクトル解析、高次元統計に由来する異種の構造観測量を、共通する隠れたネットワーク状態の相補的な射影として解釈する。この状態が異常領域へ向かう時間発展を Network-Induced Anomaly Dynamics (NIAD: ネットワーク誘起異常ダイナミクス)、その動力学を低次元潜在空間で表現する座標を Network-Induced Anomaly Coordinate (NIAC: ネットワーク誘起異常座標) として定義する。本枠組みでは、異常ダイナミクスそのものと、それを推定する学習アルゴリズムを明確に分離し、本研究では NIAC の一つの推定器として Restricted Boltzmann Machine を用いる。

ケーススタディとして、2017 年 10 月から 2021 年 9 月までの暗号資産 XRP の週次取引ネットワークを用いた分析を行って、異なる数学的領域に由来する構造観測量が大規模な市場変動の周辺で協調的な時間変化を示した。それらを統合した潜在表現が正常なネットワーク状態からの逸脱を捉えること、この逸脱が XRP の価格変化に先行することが分かった [1]。さらに、潜在的異常を元のネットワーク構成要素へ投影することで、その構造的要因を解釈した [2]。

本研究は、ネットワーク異常を孤立した局所的異常ではなく、ネットワーク全体の集団的構造再編成として理解する状態空間的視点を提示し、多様な動的相互作用ネットワークにおける潜在的構造遷移を記述する一般的な数理的枠組みを提供する。

## 参考文献

- [1] Y. Ikeda, et al., Verification of Elemental Technologies for Anomaly Detection in Crypto Asset Transactions, RIETI Discussion Paper Series 24-E-085 (2024).
- [2] Y. Ikeda, et al., Artificial Intelligence for Detecting Price Surges Based on Network Features of Crypto Asset Transactions, RIETI Discussion Paper Series 25-E-113 (2025).

# 線形な価格応答モデルの結果はどこまで信頼できるのか： モデル誤設定に対する感度分析

藤原俊太（京都大学）、佐藤優輝（筑波大学）、金澤輝代士（京都大学）

## 要旨：

金融市場において、注文の売買は価格の変化に影響を与えることが知られており、特に即時執行される成行注文が与える価格変動は価格応答と呼ばれている。一般的に、価格は買い（売り）注文に応じて上がる（下がる）という性質がある。また、その成行注文の売買符号（買いなら +1 で、売りなら -1 で表される）は長期記憶性を持つことが知られている [1]。この長期記憶性とは、次に来る成行注文が買いであるか売りであるかをある程度予測できることを意味している。よって、もし価格応答が注文量に対して線形に積み重なっていくならば、価格の変動もある程度予想出来るように思われる。したがって、この議論は価格変動は予想できないという一般的な経験則に反するため、ある種のパラドックスのように捉えられる。

このパラドックスの解決策の一つとして、経済物理学では線形プロパゲータモデルと呼ばれる価格応答モデルに依る理解が挙げられる [1, 2]。このモデルでは、価格応答は線形に積み重なるが、価格への影響伝播を表すプロパゲータと呼ばれる関数が時間とともに減衰することによって、価格変動の予測可能性を抑制するとして説明されてきた。特に、その際にプロパゲータが “fine-tuning condition” と呼ばれる絶妙にバランスされたべき型減衰をすることが価格の予測不可能性のための条件として主張されている。そして、このプロパゲータの振る舞いは、実証研究での推定によって確認されると言われてきた。

しかし、この線形プロパゲータモデルには、モデル誤設定（model misspecification）の問題がある。具体的には、価格応答は注文量に対して線形にはならず、非線形に振る舞うことが近年の実証研究を通して知られてきた [1]。よって、このモデル誤設定に対して、線形プロパゲータモデルの結果がどれだけロバストに信頼できるのかが問題として挙げられる。そこで本研究では、線形プロパゲータモデルの結果が、線形近似に依るモデル誤設定によってどれだけ影響を受けるのかについて、[3] のモデルにより感度分析した。本講演では、その結果について報告する。

## 参考文献

- [1] J.-P. Bouchaud et al., Trades, quotes and prices: financial markets under the microscope (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2018).
- [2] J.-P. Bouchaud, Y. Gefen, M. Potters, and M. Wyart, Quant. Financ. **4**, 176 (2004).
- [3] Y. Sato, S. Fujiwara, and K. Kanazawa, arXiv:2608.00988 (2026).

# 大口注文データ解析の推定アルゴリズムに対する頑健性の検証

若月大暉（京都大学）、佐藤優輝（筑波大）、金澤輝代士（京都大学）

## 要旨：

機関投資家は、取引数量の大きい注文（大口注文）を複数の子注文に分割して執行することが知られている。単一の大口注文に由来する子注文は同じ売買方向を持つため、取引時系列では同一の取引符号（買い・売り）が連続して観測される。このような大口注文の性質は、金融市場の統計則の重要な役割を持つと考えられる。

このような大口注文の統計的性質は、実市場データの解析を通じて実証的に調べられてきた。しかし、個々の大口注文を生じさせる機関投資家の意思決定は、外部から直接観測することができない。そのため、実データ解析では一般に、同一トレーダーによる同一符号の連続取引を、一つの大口注文に由来する子注文とみなす推定アルゴリズムが用いられる（図 1）。これにより、観測可能な取引データから大口注文を推定し、その統計的性質を分析する。

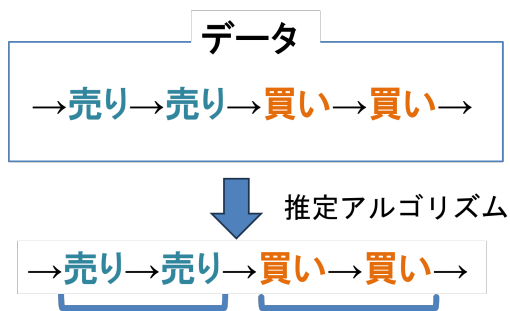


図 1 推定アルゴリズムの概要

しかし、この推定アルゴリズムには、少なくとも二つの構造的なバイアスが存在する。第一は、複数の大口注文の過剰な集約である。例えば、互いに異なる二つの買い大口注文が連続して執行された場合、推定アルゴリズムは両者を一つの大口注文として認識する。また、第二に大口注文の取引符号に人工的な相関が生じることである。こうした推定アルゴリズム固有のバイアスが分析結果に与える影響は、これまで十分に検討されてこなかった。

そこで本研究では、大口注文を複数の子注文に分割して執行する機関投資家のモデルをシミュレーションし、これらのバイアスを定量的に評価する。まず、シミュレーションによって真の大口注文と、それに基づく子注文の時系列を生成する。次に、生成された子注文の時系列に対して既存の推定アルゴリズムを適用し、大口注文を再構成する。最後に、真の大口注文と推定された大口注文から得られる統計量を比較することで、推定アルゴリズムが大口注文の統計的性質をどの程度歪めるのかを明らかにする。

## 参考文献

[1] J.-P. Bouchaud, J. Bonart, J. Donier, and M. Gould, *Trades, quotes and prices: financial markets under the microscope* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2018).

# 金融時系列の大変動における変動方向を考慮した自己励起構造

石崎 龍二（福岡県立大学）、井上 政義（鹿児島大学名誉教授）

## 要旨：

私たちはこれまで、短期情報量や短期 Kullback–Leibler 情報量を用いて、市場の混乱期や異常な変動局面を特定する手法の構築に取り組んできた。短期情報量は一定時間幅ごとに大変動の出現のランダムさを定量化し、短期 Kullback–Leibler 情報量は大変動の出現パターンが独立な二項分布からの程度乖離するかを評価するものである [1]。さらに、金融時系列データに自己励起型の確率過程であるホークス過程を適用し、株価や為替レートにおける大変動をイベントとしてモデル化することにより、大変動の連鎖構造について分析してきた [2]。

金融市場では、不安定化した局面において、ボラティリティ・クラスタリングと呼ばれる大変動の連続がみられる。これまでの分析では、対数収益率の絶対値に基づいて大変動を抽出し、その発生時点の一つのイベント系列として扱ってきた。この方法により大変動の連鎖性を捉えることができる一方、価格変動の方向に関する情報は考慮されない。しかし、金融市場における大変動の連鎖構造は、変動の大きさだけでなく、その方向によって異なる可能性がある。

そこで本研究では、対数収益率の絶対値に基づいて抽出した大変動を、その符号により正方向と負方向に分類し、変動方向を考慮したイベント系列を構成する。これらに多変量のホークス過程を適用することにより、正負それぞれの方向における大変動の連鎖性と、異なる方向間にみられる相互作用について検討する。

さらに、株価指数や為替レートなど複数の金融時系列を対象として解析を行い、変動方向を考慮することで、大変動の自己励起構造にどのような特徴が現れるかを比較する。これにより、絶対値に基づく従来の分析を拡張し、金融市場における大変動の連鎖構造を変動方向の観点から明らかにすることを目的とする。

## 参考文献

- [1] R. Ishizaki and M. Inoue, Short-term Kullback–Leibler divergence analysis to extract unstable periods in financial time series, *Evol. Inst. Econ. Rev.*, **21**(2), 227–236 (2024).
- [2] R. Ishizaki and M. Inoue, Exploring the Self-Exciting Dynamics of Financial Time Series: Modeling Extreme Fluctuations with the Hawkes Process, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**(4), 044801 (2025).