

明治大学数理科学 2021年度 研究集会

Data-driven Mathematical Sciences

経済物理学とその周辺

アブストラクト集

日時：2022年3月2日～3日

場所：オンライン Web 研究集会

主催：明治大学「現象数学」共同利用・共同研究拠点

はじめに

本研究会は、データ解析に基づいた、数理・および定量科学としての視点から経済学を見直そうとの目標を掲げて研究活動を行っている、数理・情報・物理科学分野の研究者に発表の機会を提供することを目的としている。

歴史的には、総合研究大学院大学・教育研究交流センターの「新分野の開拓」（1998－2003）の一環として発足した「経済学」小研究会に端を発し、引き続き、統計数理研究所・共同利用による「経済物理学とその周辺」研究会として活動したあと（2003－2017）、明治大学「現象数理学」共同利用・共同研究拠点の主催で年次研究集会「Data-driven Mathematical Sciences：経済物理学とその周辺」として活動を継続してきた。2021年度は前年から続く新型コロナ病禍の蔓延に対する防御のため、zoom利用による遠隔開催となった。

3月2日(水)午前は、金沢学院大学の石川温と藤本祥二、国立情報学研究所の水野貴之の共同研究による、「ノンランダム欠損値を持つ企業財務データのCatBoostを用いた補間」、「業種別に観た労働生産性分布の従業員数依存性」、2題とChen（総研大）および水野貴之による「企業と顧客の党派性とロビー活動」の発表講演があった。

同日午後には、立正大学データサイエンス学部の家富洋と相馬亘による、「SNSにおけるエコーチェンバー現象への数理的アプローチ」、および、明治大学総合数理学部の田中美栄子と井倉弓彦による「株価指数の秒足揺ぎの乱数度低下が预言する価格下落」の2件の発表講演があった。

3月3日(木)午前は、筑波大学・システム情報系、JST さきがけの金澤輝代士と佐藤優輝による、「取引者の注文分割行動と売買符号時系列の長期記憶性に関する実証分析」、および金澤輝代士とDidier Sornette (ETH Zurich) の共同研究による、「非線形ホークス過程とその一般化」およびその動機としての、「非マルコフ確率過程の標準解法」を求める研究の解説があった。

同日午後には近隣分野の紹介が2件続いた。その第1は、田中和夫（大阪大学、ルーマニア極限レーザー核物理研究所）による招待講演、「Institute of World Highest Intensity LASER Emerging in Rumania」であり、欧州連合の事業として、世界最大強度のレーザー光を作れる装置をルーマニアの首都ブカレスト近郊に建設するように依頼され、6年間所長として勤務して先月帰国した。日本からは他の大学（東大、京大）からも当該装置を使用して、ダークマター（暗黒物質）探査を行う研究者のグループもあったこと等、国際研究協力の様相について知識を深める機会となった。第2は、本研究集会の組織委員でもある、黒田正明（明治学院大学）による、感染症の数理解模の解説、「ウィルス、ワクチン、感染症の問題の数理科学的考察」であり、社会を騒がせている問題に対して我々ができることを探り、どのような寄与が可能かを考える機会とした。

最後に名倉賢(NEC/青山学院大学)による発表講演、「政府調達における応札数による入札行動の変化」があった。

■プログラム■

◆2022年3月2日（水）《午前》

藤本祥二、石川温（金沢学院大学）、水野貴之（国立情報学研究所）

「ノンランダム欠損値を持つ企業財務データのCatBoostを用いた補間」

石川温、藤本祥二（金沢学院大学）、水野貴之（国立情報学研究所）

「業種別に観た労働生産性分布の従業員数依存性」

水野貴之（国立情報学研究所）、藤本祥二、石川温（金沢学院大学）

「GPT-2によるAI BOTと移動軌跡ジェネレーター」

Jinghui Chen（総合研究大学院大学）、水野貴之（国立情報学研究所）

「企業と顧客の党派性とロビー活動」

◆2022年3月2日（水）《午後》

家富洋、相馬亘（立正大学）

「SNSにおけるエコーチェンバー現象への数理的アプローチ」

田中美栄子、井倉弓彦（明治大学）

「RMT テストの応用：価格揺動の乱数度急低下後に起きる価格急落の観測」

◆2022年3月3日（木）《午前》

佐藤優輝、金澤輝代士（筑波大学、JST さきがけ）

「取引者の注文分割行動と売買符号時系列の長期記憶性に関する実証分析」

金澤輝代士（筑波大学、JST さきがけ）

「非マルコフ確率過程の標準解法は何か？：非線形ホークス過程とその一般化」

◆2022年3月3日（木）《午後》

田中和夫（大阪大学、ルーマニア極限レーザー核物理研究所）

「Institute of World Highest Intensity LASER Emerging in Rumania」（日本語講演）

黒田正明（明治学院大学）

「ウィルス、ワクチン、感染症の問題の数理科学的考察」

名倉賢（青山学院大学、NEC）

「政府調達における応札数による入札行動の変化」

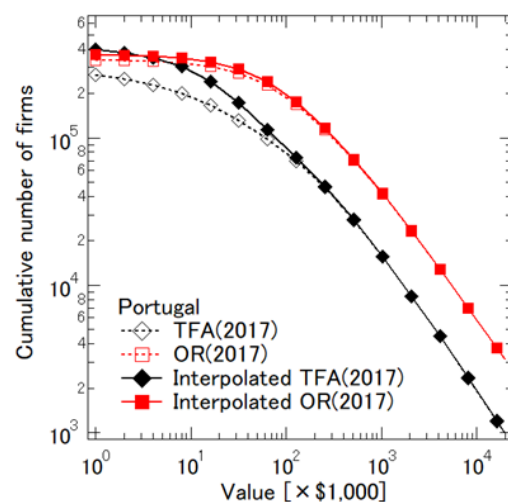
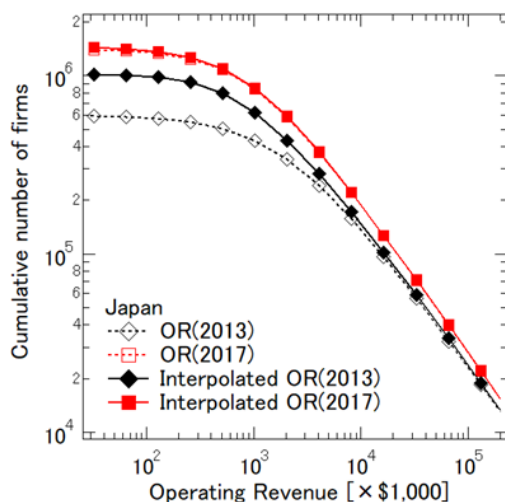
ノンランダム欠損値を持つ企業財務データの CatBoost を用いた補間

藤本祥二 (金沢学院大学)・石川温 (金沢学院大学)・水野貴之 (国立情報学研究所)

ビッグデータを利用した研究が進むに従って、そのデータには研究に必要なデータがしばしば欠落しているという Incompleteness (不完全性)、母集団からのランダムサンプルではないという Nonrepresentative (非表現性) 等の大きな問題がいくつも立ちはだかっていることが明らかになってきた。本研究ではまず、世界最大の企業財務に関するであるビューロ・ヴァン・ダイク社が作成している商用データベース ORBIS を用いてその中の、営業収益・従業員数・所得・現金及び現金同等物・売掛金・無形固定資産・株式・無形固定失算・株式・有形固定資産・資本金・買掛金・借入金・長期借入金・引当金・株式資本、14 項目に対して欠損率の国別・財務項目別・決算年別・営業収益サイズ別の依存性の調査を行った。その結果、欠損率にはこれら全ての依存性が認められ、ランダムに欠損が現れているとはとても言い難い状況であることを明らかにした。特に営業収益のサイズによる依存性は大企業や上場企業ほどカバレッジが高くなること、中小企業でデータの欠損が発生しやすいことを表している。

さらに、本研究ではこれらの欠損値を予測して補間するためのモデルの作成を行った。複雑な依存性が認められるノンランダムな欠損値を予測するため、機械学習を用いた重回帰モデルを採用している。欠損値を予測したい年の財務項目を重回帰モデルの目的変数として採用し、その他の財務項目の前年・当年・次年の値や国を表すカテゴリデータ・産業分類を表す SIC コードを説明変数として採用した。重回帰モデルを作る際の注意点は、財務項目の値の分布は大域的に Zipf の法則に平均と分散が発散することである。このような分布の値を回帰分析の目的変数とし誤差が評価できるようにするためには、通常は対数値に変換する事が行われるが、本研究ではゼロや負の値も欠損値ではなく取り扱うために、逆双曲線正弦関数による変換を用いている。また、機械学習に決定木のアンサンブル学習を用いることによって、説明変数の分布の形状に依らず高い精度のモデルを作成することが可能となり、説明変数が欠損値の場合は通常では取り得ない値である -10^{-12} で置き換えることによって、説明変数の欠損の特徴も取り込んだ予測が可能となる。本研究では決定木によるアンサンブル学習の中で、カテゴリデータの扱いに長けている CatBoost アルゴリズムを用いて機械学習を行った。

財務項目分布の、欠損値補間前と本研究のモデルによる欠損値補間後の比較が下図である。左図の黒菱形実線は 2013 年の日本の営業収益 (Operating Revenue) の欠損値補間後の分布である。白抜き黒菱形点線は欠損値補間前の分布である。欠損値補間前は $10^{3.3}$ 以降が両対数グラフで直線とみなせるべき分布の領域である。欠損値を補完することによって更に小さな領域 10^3 までべき分布の領域が広がることが予想される。また、赤四角実線は 2017 年の日本の営業収益の欠損値補間後の分布で、白抜き赤四角点線は欠損値補間前の分布である。この年のデータは欠損自体が比較的少なかったため、欠損値の補間前後で分布の形は殆ど変わっていない。左図の黒菱形実線は 2017 年のポルトガルの有形固定資産 (Tangible Fixed Assets) の欠損値補間後の分布である。補間前の白抜き黒菱形点線と比較すると、補間後はより小さな領域までべき分布の領域が広がることが予想される。また、赤四角実線は 2017 年のポルトガルの営業収益の欠損値補間後の分布で、白抜き赤四角点線は欠損値補間前の分布である。営業収益の財務項目のデータ欠損は、有形固定資産のデータ欠損に比べてが少なかったため、欠損値の補間前後で分布の形はあまり変わっていない。



業種別に観た労働生産性の従業員数依存性

石川 温、藤本 祥二（金沢学院大学経済情報学部）、水野 貴之（国立情報学研究所）

売上や従業員数などの企業規模量が、大規模域でベキ分布に中規模域で対数正規分布に従うということは良く知られた経験則であり、その起源も様々な角度から議論されている。例えば藤原氏らにより、短期的に観測される反転対称性とジブラ則よりベキ分布が導かれることが示されている。また発表者らにより、反転対称性と非ジブラ性より対数正規分布が導かれることも示されている。また、企業活動の効率を表す労働生産性分布にも、企業規模量と同じ分布が観られることが知られている [Aoyama et al. (2012), Nigai (2016)]。我々は先の研究で、労働生産性として『営業収益(Y)/従業員数(L)』を考え、企業規模量の場合と同じ手法を用いて、労働生産性分布のベキ分布と対数正規分布を導いた [Ishikawa et al. (2022)]。その過程で、労働生産性分布がほとんど従業員数には依存していないという興味深い性質が観測された (図 1)。本発表では、企業を業種別に分類した場合にもこの性質が観測されるのか、その起源がどこにあるのかについて考察する。

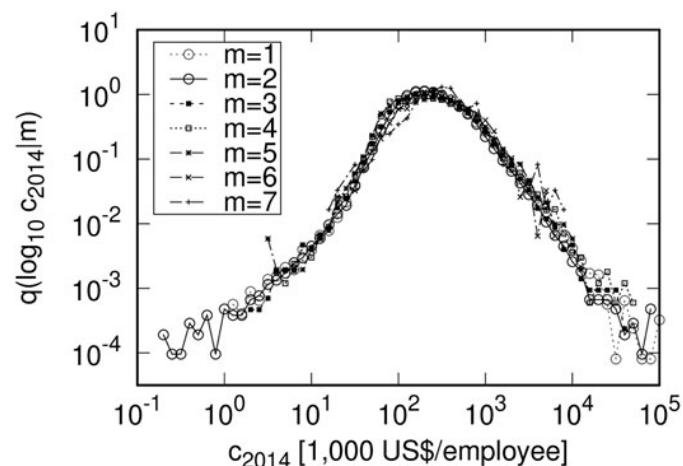


図 1 : 2014 年における日本企業の従業員数と営業収益の比 ($c_{2014} = Y_{2014}/L_{2014}$) の分布。初期条件は 7 つ : $L_{2014} \in [10^{0.5(m-1)+0.5}, 10^{0.5m+0.5})$ ($m = 1, 2, \dots, 7$)。横軸は対数比 (労働生産性の対数) : $\log_{10} c_{2014}$ 、縦軸はその条件付き PDF $q(\log_{10} c_{2014} | m)$ 。

我々は、世界各国約 4 億社の財務情報が収録されている ORBIS の 2020 年版を用い、日本・フランス・スペイン・イタリアの 2011 年より 2019 年の期間で、 Y と L の両方のデータがある企業を分析対象とした。業種としては、全体に占める割合が低い農林水産業、鉱業は省き、運輸・通信・電気・ガスおよび衛生サービス業、卸売業、小売業、金融・保険・不動産業、サービス業はまとめて非製造業とし、「建設業」「製造業」「非製造業」及び「全業種」の労働生産性分布の従業員数依存性を観測した。

その結果、上記の 4 カ国ともに「全業種」では労働生産性分布にほとんど従業員数依存

性がないことが確認された。一方、「建設業」「製造業」では、従業員数が多いほど労働生産性分布は高くなることが確認された（図 2）。さらに、「非製造業」では、全業種と同様に労働生産性分布にほとんど従業員数依存性は無かった。

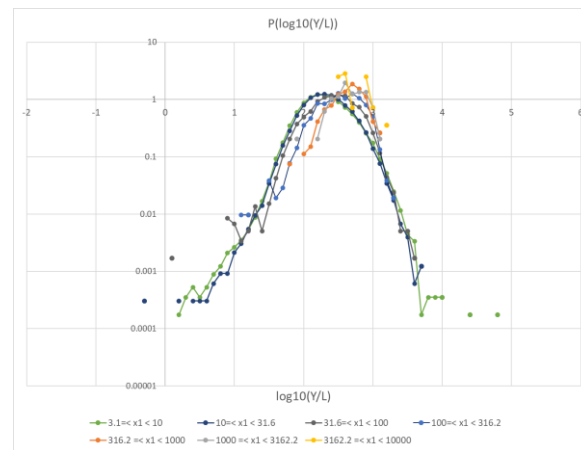


図 2：2014 年における日本の建築業の従業員数と営業収益の比 ($c_{2014} = Y_{2014}/L_{2014}$) の分布。

労働生産性分布の従業員数依存性は、従業員数 (L) と営業収益 (Y) の散布図に観られる対称性に関係している。図 3 は、2015 年における日本企業、全業種の L と Y の散布図である。我々は労働生産性として $c = \frac{Y}{L}$ を考えているので、散布図に $Y \leftrightarrow cL$ という対称性があれば c には L 依存性が無くなる。そして、散布図に $Y \leftrightarrow cL^\theta$ ($\theta \neq 1$) の対称性があるとき c に L 依存性が生じる。このパラメータ θ は L と Y の散布図の対称軸の傾きなので、 L と Y のパレート指数 μ_L と μ_Y を用いて $\theta = \mu_L/\mu_Y$ と表現できる。現在のところ、従業員数と営業収益のパレート指数の差が大きくなると、労働生産性分布の従業員数依存性が大きくなるということが定性的に観測できている。今後の課題は、労働生産性分布の従業員数依存性を $\theta = \mu_L/\mu_Y$ という形で定量的に確認し、その起源を明らかにすることである。

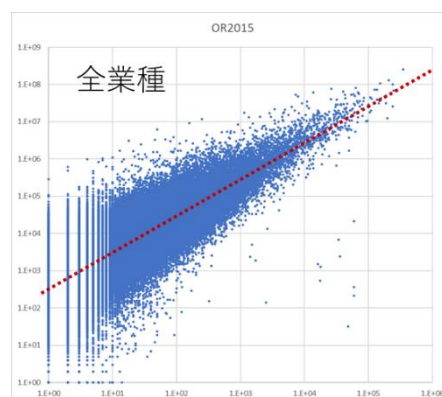


図 3：2015 年における日本企業、全業種の労働者数と営業収益の散布図。横軸は労働者数（単位：人）、縦軸は営業収益（単位：千 US ドル）。

SNS におけるエコーチェンバー現象への数理的アプローチ

立正大データサイエンス 家富 洋, 相馬 亘

Mathematical Approach to Echo Chamber Phenomena in the SNS Networks

Rissho University Hiroshi Iyetomi, Wataru Souma

ソーシャル・ネットワーキング・サービス (SNS) は、人々のコミュニケーション能力を大きく向上させ、情報の共有化・普遍化を促進し、グローバル化を一層加速している。他方で、SNS において特定の情報や考え (しばしば偏向的) が異常に増幅される現象であるエコーチェンバーが観測されている。SNS が、人に生来内在する同類意識 (類が友を呼ぶ式の同胞感情、共感) や確証バイアス (自分にとって都合のよい情報のみを受け入れる排他的性向) を呼び覚ましている可能性がある。もし対立する意見についてそれぞれのエコーチェンバーが形成されれば、その中の人々は、異なる意見に触れる機会を逸してしまい、ひいては大きな社会的分断を導く。SNS の発展とともに、政治的分断が一層強化されているのは、皮肉である。

本講演では、そのようなエコーチェンバーの特性および形成・成長メカニズムについて、実際の SNS ネットワークを解析することにより、数理的に明らかにした結果を報告した。その際に、最新のネットワーク解析技術 (蝶ネクタイ構造分解, Helmholtz-Hodge 分解, コミュニティ抽出など) を用いる。エコーチェンバーについての基礎的知見が得られれば、SNS のあり方についての規範を整える際に大いに役立つと期待される。

蝶ネクタイ構造分解は、有向ネットワーク上の流れ構造を粗視化する。まずネットワーク中の強連結成分 (任意のノード対が双方向にたどれるノードの集合) を探索する。もしとりわけ大きなもの (GSCC) があればそれを中心として、情報が GSCC へ一方通行で入力される成分 (IN), 情報が GSCC から一方通行で出力される成分 (OUT) に分解する。IN, GSCC, OUT の三成分を模式的に図示すると蝶ネクタイのように描けるため、蝶ネクタイ構造分解と呼ばれる。Helmholtz-Hodge 分解は、有向ネットワーク上の流れを勾配流成分 (高所から低所へ向かう水の流れと同様に、流れの階層性を抽出) と循環流成分 (各ノードの流入・流出量がバランスし、流れの循環性を抽出) へユニークに分解する。GSCC が主要なエコーチェンバーを表す。また、Helmholtz-Hodge 分解から得られる循環流成分の分布の構造や時間発展を調べることで、エコーチェンバーの特性の詳細や成長過程を知ることができる。

参考文献 [1] では、2010 年米国中間選挙時に Twitter の retweet 機能を通じて有権者間でどのように選挙情報が伝搬したかについてネットワーク分析が行われ、保守系 (右派) とリベラル系 (左派) との間でのコミュニケーション・チャンネルは細く、SNS 上での政治的分断の発生が示された。我々は、このリツイートネットワーク (ノード数 18,470, リンク数 61,157) に対して bow-tie 構造分解を行い、任意のノードが双方向につながっている巨大強連結成分 GSCC (ノード数 1,457, リンク数

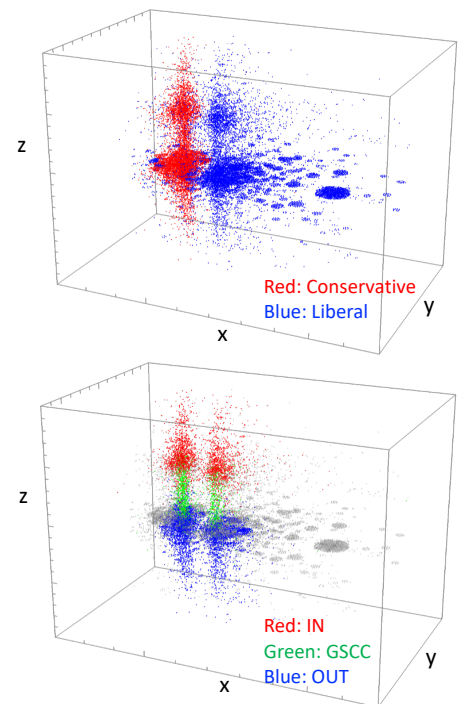


図 1 2010 年米国中間選挙時の retweet ネットワーク

12,367)においてもその閉鎖的傾向は非常に強く、巨大強連結成分が両陣営のエコーチェンバーの核となっていること見出した。

その解析結果の一例を図1に示す。これは、retweet データ [1] から構築された情報伝搬ネットワークを3次元空間中で可視化したものである。 z 軸方向には、Helmholtz-Hodge 分解から与えられるポテンシャル値を用いてノードが配置されている。 z 軸正方向が上流、負方向が下流である。一方、 $x-y$ 面内では、バネ電気モデルを用いて、ノードの位置を決めている。つまり、ノード同士が密接に関係すればするほど、互いに近くに配置される。また、上図では政治的ポジションの違いが、下図では bow-tie 構造が異なった色でイルミネートされている。政治的分断が2つの蝶ネクタイ構造（トポロジ的には1つ）によって形作られていることが一目瞭然である。

図2は、エコーチェンバーをつくる GSCC に含まれるループのサイズ分布である（ループのサイズは構成ノード数）。右派、左派とも三角ループは少なく、サイズが4から6のループが主要であることがわかる。この結果は、同じく米国における政治的分断が観測されるブログネットワーク [2] と対比的である。ブログネットワークの GSCC では三角ループが重要である。また、GSCC において各陣営内部でリンクの接続をランダム化した場合の結果と比較すると、ループのサイズ分布へのランダム化による影響は微弱である。つまり、構造的には、リツイートネットワークにおいてリンクはランダムに張られていると言える。しかし、ループの因果性などネットワーク上での情報伝搬に特徴がある可能性がある。リンクのタイムスタンプについてランダム化を行い、形成される因果的ループの統計性を調べたところ、左派のエコーチェンバーは、リンクのタイムスタンプの入れ替えで得られたランダムネットワークと区別できない。他方、右派のエコーチェンバーはランダムの場合に比べ、サイズ4,5のループの因果性が高い（特にサイズ5のループにおいて）。この結果は、右派の方が話題のダイバシティが小さいことを示唆する。

なお、本研究の予備的成果は参考文献 [3] ですでに報告されている。また、本研究は JSPS 科研費 18K03451, 21K03385 によって支援を受けている。

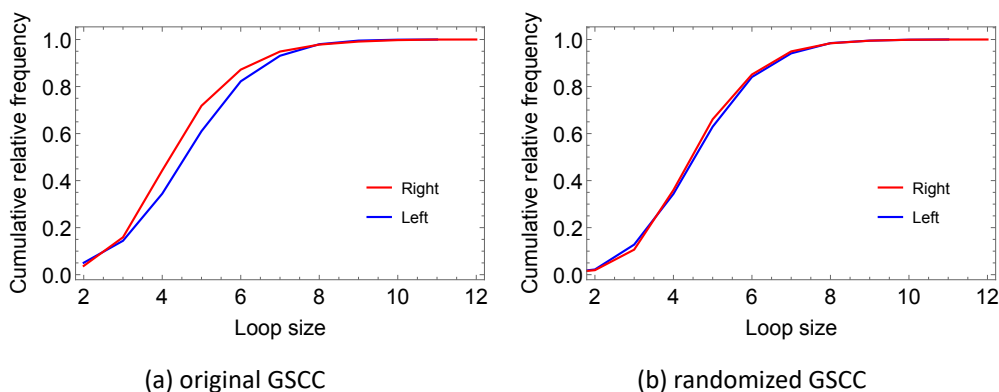


図2 retweet ネットワーク [1] の巨大強連結成分 (GSCC) に含まれるループのサイズ分布

- [1] M. D. Conover, J. Ratkiewicz, M. R. Francisco, B. Gonçalves, F. Menczer, and A. Flammini, Political Polarization on Twitter, in Proceedings of the 5th Int'l AAAI Conf. on Weblogs and Social Media (2012).
- [2] Lada A. Adamic and Natalie Glance, The political blogosphere and the 2004 US Election, in Proceedings of the WWW-2005 Workshop on the Weblogging Ecosystem (2005).
- [3] Hiroshi Iyetomi, Beyond “Evidence-Based” Policymaking, in *Big Data Analysis on Global Community Formation and Isolation* (Springer, Singapore, 2021), pp. 501-511.

RMT テストの応用：価格揺動の乱数度急低下後に起きる価格急落の観測

田中 美栄子（明治大学 OSRI）、井倉 S. 弓彦（明治大学総合数理学部）

価格変動は基本的にランダムウォーク（酔歩）であるというバシュリエによる仮説(1900)はどこまで正しいのか？ を明らかにすべく、実データ、特に秒単位の高頻度価格データを直接解析した．高頻度価格のように高度にランダムで大規模なデータから意味抽出を行う場合には、データから作成した相関行列の固有値分布のランダム行列理論（RMT）からの差分を利用する手法が便利である．差分がゼロとみなせるほど小さいならば、酔歩仮説が正しいことになる．

我々は差分を数値化する指標として、データから求めた相関行列の最大固有値 λ_{max} が RMT のランダム極限の最大値 λ_+ を超える場合にその超過分、 $\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_+$ を乱数度の劣化分とみなし、2010 年以來の TOPIX 総合指数の 1 秒足の価格データを解析し、 $\Delta\lambda$ を算出した．その結果、Fig.1 に示すように、2010 年 10 月～2013 年 9 月の期間は目立ったピークが 3 個観測される以外は基本的に $\Delta\lambda=0$ に近く、価格の秒足揺ぎはほぼ酔歩とみなせることになる．

3 個のピークの第 1 は 2011 年 3 月 7 日～17 日の期間に起き、2011 年 3 月 11 日の東北大地震とそれに続く東京電力福島原発の事故の後の株価急落と同時期に一致する．一秒足揺ぎは予兆なく突発的に発生し、直ぐに回復することが Table 1 から読み取れる．これは外生的な要因に基づく増加であり、秒足揺ぎの乱数度下落($\Delta\lambda$ 増加)と指数の価格急落は同時に起きる．

これに対し、第 2 と第 3 の小さなピークは 2011 年 11 月 4 日～15 日と 2012 年 3 月 23 日～4 月 3 日に起き、価格下落はいずれも $\Delta\lambda$ が急増した結果として、後から比較的ゆっくりと起きる．これらの小さなピークは、現れてすぐ消えるが、その後でゆっくりと起きる価格下落の予兆となるシグナルの役割を果たす．つまりこのような価格下落は内生的な要因によるものであり、指数価格の下落を予知する指標として使える可能性がある． $\Delta\lambda$ の急増加は乱数度の急減少を意味するが、このような現象を引き起こすメカニズムとして考えられるのは、平時に於いて投資家の行動は各自バラバラであり、価格揺ぎはほぼランダム・ウォーク（酔歩）となっている時期に、何らかの理由で投資家の不安を掻き立てるような、暴落予想のニュースが流れたりすることにより、投資家心理が揃って冷却し、一斉に売りに向かうためであると考えられる．

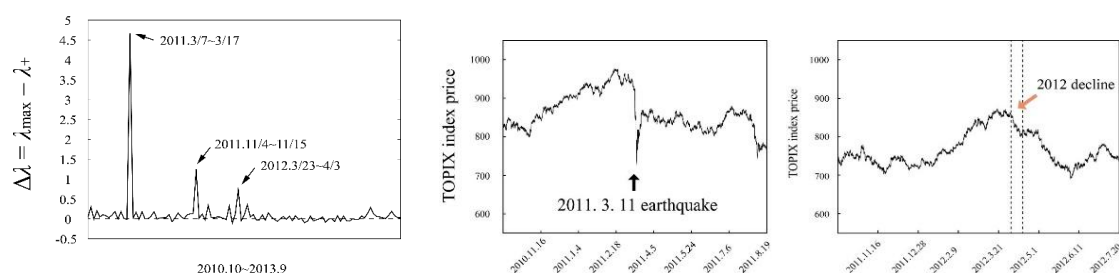


Fig.1 $\Delta\lambda$ の変化の 3 個のピーク，及びその第 1 と第 3 に対応する TOPIX 指数価格を示す．下表には

2011.3.11前後	$\Delta\lambda$	Price
2011.2.14 – 2.24	0.00	-
2011.2.24 – 3.7	0.00	-
2011.3.7 – 3.17	4.67	Decline
2011.3.17 – 3.29	0.02	-

2012 年 4 月 の 下 落	$\Delta\lambda$	Price
2012.3.13 – 3.23	0.12	
2012.3.23 – 4.3	0.73	
2012.4.3 – 4.11	0.00	decline
2012.4.11 – 4.20	0.10	

非マルコフ確率過程の標準解法は何か？：非線形ホークス過程とその一般化

金澤 輝代士（筑波大学システム情報系，JST さきがけ），Didier Sornette（ETH Zurich）

自然現象・社会現象の多くの観察結果は時系列データとして与えられ，それらをモデル化する数学的な道具が確率過程である．たとえば，物理学では水中のブラウン粒子の軌跡は時系列データとして与えられ，その軌跡はランジュバン方程式と呼ばれる確率微分方程式に従うとされる．また，金融商品の価格時系列はブラック・ショールズ方程式と呼ばれる確率微分方程式でモデル化されることが多い．このような確率過程モデルを解析的に取り扱うとき，「マルコフ過程か非マルコフ過程か」が分類上の焦点となる．

マルコフ過程とは，モデルが未来予測をする上で現時点の情報のみを参照する確率過程のクラスを指す．一方，非マルコフ過程とは，モデルが過去全ての時系列情報を参照する確率過程のクラスを指す．マルコフ過程については数学的な道具が非常に整理されてきた．例えば，1 変数マルコフ過程には標準形があり，確率微分方程式はドリフト項・ガウスノイズ項・複合ポアソンノイズ項に分解できる．更に，確率微分方程式と等価なマスター方程式（確率分布関数の時間発展方程式）についても標準形があり，一意に分解できる．解析計算を行う上では，一般に非線形になる確率微分方程式ではなく，分布関数について必ず線形なマスター方程式を扱うのが一般に便利とされる．事実，マスター方程式は関数空間の線形代数の範疇に入っており，理論物理レベルでの形式的な解析方法はかなり確立している．

一方，非マルコフ過程については標準的な解法が今まで殆ど確立していない．非マルコフ確率微分方程式の標準形・マスター方程式の標準形といった理論は存在せず，従って，原理的にもどのように解析すべきかの指針が立っていない．更に不都合なことに，自然現象・社会現象の多くは非マルコフ過程に従うことも知られている．例えば水中のブラウン運動は一般化ランジュバン方程式と呼ばれる非マルコフ過程のモデルに従うことが知られている．更には，金融のイベント発生モデリングではホークス過程と呼ばれる非マルコフ過程のモデルが使われている．こういった現実的な問題を数理的に解決するためには，非マルコフ過程の理論を整理していくことが重要だと我々は考える．

そこで本講演では，非マルコフ点過程の解法を整理する我々の研究進捗について報告する．点過程とは，イベントの発生をモデル化する確率過程のクラスを指す．我々は任意の1 変数非マルコフ点過程を解析的に扱う手法を考えた．具体的には，1 次元の非マルコフ点過程を高次元のマルコフ点過程に埋め込むことで，無理やりマルコフ化する手法（マルコフ埋め込みと呼ばれる）を最大限に拡張した．結果，1 変数非マルコフ点過程のマスター方程式の標準形を導出した．本手法を用いて，以下2つの結果を得た：まず，非線形ホークス過程の漸近分布を導出した．次に，非マルコフ点過程を漸近的に粗視化していくと，一般化ランジュバン方程式が普遍的に現れることをシステムサイズ展開の一般化として示した．本手法を発展させることで，より広いクラスの非マルコフ過程を体系的に解析することが出来るようになるのではないかと，我々は考えている．

Institute of World Highest Intensity LASER Emerging in Romania
ルーマニアに出現する世界最高強度レーザー研究所

ELI-NP (Extreme Light Infrastructure: Nuclear Physics)

Scientific Director Kazuo A Tanaka

極限レーザー核科学研究所長 田中和夫

Gerard Mourou 博士（エコールポリテクニク、仏）らの主導で、ルーマニア、ハンガリー、チェコに大型のレーザー研究所を立ち上げる構想が提案された。2012 年に欧州機構の予算承認が得られ、それぞれ 300 億円以上の予算で建設が開始された。その間、2018 年には、Gerard Mourou 博士らに、このレーザー装置のキーエレメントである発明にノーベル物理学賞が与えられ、一気に三カ国のレーザー研究所に注目が集まることとなった。ルーマニアの ELI-NP では、10 PW (10^{16} W(ワット)) のレーザー出力を目指す装置建設が順調に進み、2020 年には、所定の目標出力を実際のレーザー出力運転の実演を含む国際シンポジウムが 300 人以上の世界の研究者の参加を得て、ズームで開催された。こうした大型の超高強度レーザー装置は、その最高性能を出すために、F1 レーシングカーの場合に類似する以上のチューニングが必要となる。無事こうした関門をクリアして、この装置は、ほぼ毎日最高性能でレーザーを出射できる状態になっている。こうした極限強度を持つレーザー光で何をするのかというのは誰でも持つ疑問である。レーザー光線は、曲面ミラーで集光して固体やガス状の物体に照射して、実験を行う。照射を受けた固体やガスは、瞬間的に原子を構成する電子がレーザー光の電界に剥ぎ取られ、さらに電界で加速されて、光速にまで達する。光速を超えようとするほどのレーザー光の電界の力が作用すると、相対論の法則により、電子は、質量を増加させるので、光速を超えることは無い。つまりレーザー光により相対論領域が出現することになる。アインシュタインは、質量は、エネルギーに相当すると言ったが、それに類する状況が実験で実現出来ることになる。実験では、レーザー光を固体ターゲットに照射し、電子を光速にまで加速する。質量を増やした電子は、固体ターゲットの中を伝播する際に、高エネルギーの x 線であるガンマ線を放出することが予測されている。真空中にこのレーザー光線を集光するとその強度が高いために、ダークマター（暗黒物質）を探り当て、そこからレーザー光線が異なる波長の散乱光を誘起し、観測されるかその可能性を探る。こうした未知の物理現象を追求する提案が、80 件程度世界から寄せられており、2022 年から、本格的な実験に入る。既にレーザー性能を確認する予備実験では、電子加速・イオン加速などが予測以上のデータとして得られており、世界の研究者の期待が集まっている。



ウイルス、ワクチン、感染症の問題の数理科学的考察

明治学院大学教養教育センター 黒田正明

明治大学 MIMS 共同研究会 (2022 年 3 月 3 日)

「Data-driven Mathematical Sciences : 経済物理学とその周辺」

1. ウィルスについて

- ウィルスは生物か

「生物」の定義次第であるが、普通は、代謝系を持たないものは生物と考えない。ウィルスは増殖能力をもち、遺伝能力もあるが、代謝系がないので、自分で増殖することはできない。他の生物の代謝系を利用して増殖する。

- ウィルスの分類

ウィルスには表面（カプシド）を覆う被膜（エンヴェロープ）を持っているものと、持っていないものがある。また、遺伝情報として RNA を持っているものと、DNA を持っているものがある。さらに、RNA, DNA が一本鎖か二本鎖かで構造的に分類される。多くのウィルスはエンヴェロープを持っている。もっていないウィルスは石鹸、アルコール、熱処理などに強く、厄介な存在となる。

被膜	RNA ウィルス	DNA ウィルス
あり	インフルエンザウィルス、 コロナウィルス 麻疹ウィルス、エボラウィルス	天然痘ウィルス ヘルペスウィルス
なし	ポリオウィルス、ノロウィルス、ロタウィルス	アデノウィルス

2. コロナウィルス

- コロナウィルス

1965 年風邪の患者のウィルスを電子顕微鏡で見ると王冠のようなスパイクがついていたので、コロナウィルスと命名された。ヒトに感染するコロナウィルスは 7 種類が知られている。コロナウィルスの共通祖先は約 10000 年前にコウモリのコロナウィルスと野鳥のコロナウィルスに分かれた。野鳥のコロナウィルスはヒトには感染しない。

	タイプ	宿主	ヒトに感染するコロナウィルス
コウモリ	α	ヒト、ネコ、イヌ、ブタ	229E, NL63
	β	ヒト、ウシ、ウマ、マウス	OC43, HKU1, SARS, MERS, COVID-19
野鳥	γ	野鳥、ニワトリ、イルカ	
	δ	野鳥、ブタ	

- コロナウィルスの特徴

- － エンヴェロープウィルス
- － 一本鎖 mRNA ウィルス (+ssRNA)
- － 約 30000 個の塩基対からなる。酵素 nsp-14 を持っているので、一本鎖にもかかわらず安定である（変異が起こりづらい）。

- 風邪コロナウィルス

4 種類の風邪コロナウィルスが知られている (229E, NL63, OC43, HKU1)。

- 重症急性呼吸器症候群コロナウィルス

SARS(SARS-Cov), MERS(MERS-Cov), および Covid-19

これらも、いずれは普通の風邪コロナウィルスになるとされている。

3. ワクチン

加藤茂孝氏の youtube: <https://youtube.be/rL6GCK19YPQ>

- 抗原タンパク質（の一部）あるいは、その DNA, RNA を体内に投与して、目的の抗体を人工的につくらせる。
- 副反応（ワクチンなど、健康体にうつと発生するもの。抗体反応の結果発生）
副作用（治療薬など病気を治すために使うと副次的に発生）

従来型ワクチン		新世代ワクチン	
（弱毒化）生ワクチン	BCG	ウィルスベクター	エボラ、Covid-19
不活化ワクチン	ポリオ、麻疹	DNA	
成分ワクチン	インフルエンザ	RNA	Covid-19
ウィルス様粒子ワクチン	HPV		

- **DNA ワクチン:**
病原体の特定の構成成分（Covid-19 ではスパイクタンパク質）に対する遺伝子をプラスミドベクターに組み込んで大量に作り、筋肉注射によってヒトに投与。体内でこの病原体由来のタンパク質をつくらせて、それに対する免疫反応をおこさせる（抗体を作らせる）。
- **mRNA ワクチン**
病原体の特定の構成成分（Covid-19 ではスパイクタンパク質）の mRNA を脂質でくるんで、筋肉注射によってヒトに投与、体内でスパイクタンパク質をくつらせ、その抗体を産生させる。（ファイザー、モデルナ）
- **ウィルスベクターワクチン**
病原性のないウィルス（たとえば、風邪を引き起こすウィルスであるアデノウィルスを増幅できないようにしたもの）に標的のウィルスの DNA の一部（たとえば、スパイクタンパク質の DNA）を組み込んで投与し、細胞内で複製させる。（アストロセネカ）

4. 感染症の数値モデル

基本的には SIR モデル。 感染症の拡大と収束に関する古典的なモデル (1927)。

$$\begin{aligned}
 S(\text{susceptible}) : \text{未感染者数} & \quad \frac{dS}{dt} = -\beta SI, \\
 I(\text{infected}) : \text{感染者数} & \quad \frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, \\
 R(\text{recovered}) : \text{回復者数、死亡者数} & \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I,
 \end{aligned} \tag{1}$$

パラメーター $\beta > 0$ は感染率であり、 $\gamma > 0$ は回復率である。

モデルの問題点

- β, γ の時間依存性
- 未発見の感染者の存在
- 感染してから、他人に感染させるまでの時間のずれ（潜伏期間の問題）
- ワクチン接種の効果
- 再感染の考慮

これらの問題点を改良した多数のモデル (SEIR, SIQR, ...) が提案されている。いずれも非線形連立微分方程式であるから、

- 解析解はない。（位相空間における phase portrait などを使うと定性的な議論ができる。）
- 数値計算が必要。
- 複雑系特有のカオス現象、Hopf 分岐現象、周期解などがありうる。

本研究では内閣官房 IT 戦略室が「行政事業レビューシート」をもとに作成し公表しているシステムに関する政府調達（契約種別、金額など）のデータを用いて、一者応札は競争性を阻害しているのか否かをテーマに数理統計的な分析を試みた。

内閣に設置された行政改革推進本部は、わが国中央政府全体の調達改善活動を取りまとめた「調達改善の取組に関する点検結果報告」を年 2 回公表している。この報告では、競争入札において応札者が一者になる、いわゆる「一者応札」に関して、定性的であるが様々な原因分析を行っている。しかしながら、それらの分析は、実際には仮説にすぎない「一者応札は競争性を阻害している」ということを暗黙裡の前提としており、その是非をデータで検証する試みは行っていない。

一者応札が頻発するような状況を放置することは、「競争入札制度で期待される事業者間での競争性が確保できなくなる恐れがあり問題である」との認識に基づいてわが国中央政府はその「点検結果報告」において様々な一者応札改善の施策を実施している。しかしながら、一者応札が実際に競争性を阻害しているということを、データ等の客観的な証拠を用いて論証したことはなかった。

今回の研究は、一者応札に比較して応札者が複数以上の場合にはでより強い競争性が働いてより低い金額を提示していることを、実際に公表データを用いて示した。つまり、応札者が複数以上の場合に得られる価格低減効果には、複数の応札者からより低い金額を提示した応札者を選択することで得られる効果のみならず、各応札者間の競争を促進することで各応札者により低い金額を提示させる効果もあることがわかった。

またオークション理論との関係では以下のことが考察される。

オークション理論によれば「一位価格入札方式での均衡戦略における“ビッド・シェイディング”（評価額からの乖離値）は、応札者の数 N に依存し、 N が大きくなるほどゼロに近づく。すなわち、評価額 E に対する入札額（落札率） $X = \beta(E)$ は、 N が大きくなると $X \rightarrow E$ に漸近する」のだが、本分析からは、三者以上の場合でも、二者とはほぼ同様に、入札額の平均は約 0.9 程度であり応札者数 N によってあまり変化しないとの結果を得た。この結果の解釈については、以下の 2 つの仮説が考えられよう。

① 評価額の分布関数の形状のため

落札額の分布関数は $X=1$ で急激に立ち上がるベータ関数で記述されることから、その評価額 E の分布関数も同様に $E=1$ に偏った形状をしていることが予想できる。この分布関数

の形状のため“ビッド・シェイディング”の効果が小さくなり、今回のデータからは応札者数 N への依存性が検出できなかった可能性がある。

② 複数者応札の場合、応札者が事前に応札者数を予想できないため

オークション理論によれば、応札者は競合他者を考えて提示する入札額（落札率）を戦略的に変化させる。ここまでの分析結果から、応札者は「一者応札」となるか、競合者のいる「複数者応札」になるかはついては予想できており、その予想に基づいて一者応札の場合は平均落札率 0.96 程度で、複数者応札の場合は平均落札率 0.9 前後と入札額を変化させていると考られる。しかしながら、複数者応札が予想されるときに、実際に何者ぐらいの競合が現れるかまでを事前に正確に予想することは、封印入札方式（Sealed-bid Auction）を採用している我が国では難しい。このように応札者数 $N(\geq 2)$ が不確定である場合、その均衡入札額は「応札者の数が全員に知られているときの均衡入札額を、応札者が N である推定確率を $P(N)$ を使って、加重平均したもの」となるモデルが知られている。つまり、このモデルのように応札者が事前に応札者数 $N(\geq 2)$ を予想できないことで、応札者数 $N(\geq 2)$ への依存性がなくなった可能性もある。

わが国の政府調達現場状況からは、おそらくは、②の「事前に応札者数を予想できない」ほうがより現実的ではないかと推測するが、今後より詳細なデータが積み上がり Bid Shading の効果が観測される可能性も捨てきれない。

（以上）