

2023 年度 明治大学「現象数理学研究拠点」共同研究集会

Data-driven Mathematical Sciences

経済物理学とその周辺

アブストラクト集

日時：2023 年 9 月 1 日～2 日

場所：明治大学中野キャンパス 6F 研究セミナー室 3

主催：明治大学「現象数理学研究拠点」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の視点から経済学を見直すとの目標のもとに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ため形を変えつつ4半世紀の期間、4期にわたって継続してきた。

1998-2003の第1期は総合研究大学院大学・教育研究交流センターの主催する「新分野の開拓」、続く2003-2017の第2期は統計数理研究所・共同利用の主催による「経済物理学とその周辺」研究会、そして現在の明治大学「現象数学」共同利用・共同研究拠点の主催による年次研究集会「Data-driven Mathematical Sciences：経済物理学とその周辺」である。コロナ禍の2020-2022は遠隔開催とし、2022年11月末は遠隔と対面のハイブリッド開催、今回2023年度は対面開催に戻り9月1日～2日の2日間で11件の発表講演が行われた。

初日は午後12:30開始で、まず、荻林(千葉工大)がエージェントベース・モデリング(ABM)によるマクロ社会現象の因果メカニズム解明の基本原則を述べると共にABMのシミュレーションプログラムの紹介を行った。2番目に家富(立正大)が、SNSネットワークにおける蝶ネクタイ構造分解の効用についての話題を提供し、3番目に田中(鳥取大/明治大)が最近出版した書籍と来年出版予定となった論文の内容を解説し、提案手法であるRMTテストを用いた乱数度測定を価格暴落の予測に利用使用とする試みについて紹介した。4番目に名倉(大和大)が政府調達品の落札に際して生ずる問題に対しての定量的解析結果を述べた。5番目の前野(明治大)は初日の最終講演で、拡散過程の逆問題を解決するための機械学習技術いくつかに関する最近の研究成果を述べた。2日目午前には2件の講演があり6番目講演は金子(ICU)が企業間の信用ネットワークの話題を提供し、7番目講演は石川(金沢学院大)がメッシュ統計を用いたアメリカの地震統計的研究の発表を行った。午後には8番目講演を藤本(金沢学院大)が自然言語深層学習モデルを利用した人の移動軌跡の予測に関する研究成果を、9番目講演では水野(NII)による、生成系AIによる補間と生成についての研究を人の移動軌跡や融時系列に対して行った最近の成果について述べた。10番目の石崎(福岡県大)は局所情報量に基づく金融時系列データの特徴抽出と分析手法について述べ、最終11番目の有賀(中央大)は故J. Barkley Rosserの経済理論を披露した。

プログラム

◆9月1日(金)

- 12:30 「エージェントベースによる知の蓄積方法論の提案と簿記会計を内包した経済シミュレーションプログラムの紹介」
萩林成章（千葉工業大学）
- 13:30 「SNS ネットワークの蝶ネクタイ構造」
家富洋（立正大学）
- 14:30 「株価指数の秒足揺らぎの乱数度から予測する価格下落」
田中美栄子（明治大学）
- 15:30 「政府調達における落札率と事務コストの均衡」
名倉賢（大和大学）
- 16:30 「機械学習と拡散問題への取り組み」
前野義晴（明治大学）

◆9月2日(土)

- 10:00 「株価推移に基づく企業間の信用ネットワークと RMT との関係性について」
金子拓也（国際基督教大学）
- 11:00 「メッシュ統計を用いたアメリカの地震に観られる統計性-経済物理学観点より-」
石川温（金沢学院大学）
- 13:00 「自然言語深層学習モデルを利用した人の移動軌跡の予測」
藤本祥二（金沢学院大学）
- 14:00 「生成系 AI による補間と生成 - 人の移動軌跡, 金融時系列 -」
水野貴之（国立情報学研究所）
- 15:00 「局所情報量に基づく金融時系列データの特徴抽出と分析手法」
石崎龍二（福岡県立大学）
- 16:00 「Inference logics around economics in memory of Prof.J. Barkley Rosser Jr.」
有賀裕二（中央大学）

エージェントベースによる知の蓄積方法論の提案と簿記会計を内包した
経済シミュレーションプログラムの紹介

荻林成章（千葉工大）

本論のタイトルにある A B Mとは Agent-Based Modeling の略称である。その詳細は後述する。

一般に諸問題を解決するためには問題となっている諸現象についてその因果メカニズムを明らかにすることが不可欠である。理工系分野では自然システムに関わる諸理論が実験を通じて検証された結果として因果メカニズムに関する知見が蓄積されており、それらが継続的な技術発展の好循環を生み出している。それに対し、社会経済分野では諸現象の原因は人間の行動とその相互作用であり、人間の行動は時代と地域（国や民族を含む）によって変化するために、一般にコントロールされた実験は事実上実行不可能であり、メカニズムに関する諸理論の検証がされないまま今日に至っている。

社会科学の方法論は、方程式ベースの諸理論（経済学理論等）と統計データ解析やアンケート調査に大別される。前者は社会の諸現象に関わる因果メカニズムに関する仮説であり、後者はリアルな社会からのデータに基づく因果メカニズムの推論である。いずれも因果メカニズムは類推されるが、それらは観察者の解釈に依存し完全に客観的なものにはならない。

このように社会経済分野では自然科学のようなコントロールされた実験が事実上不可能であるために因果メカニズムに関する知の蓄積が実現されていない。例えば景気対策としての金融緩和が効果ありか否かについては P.Krugman の経済学教科書 (ECONOMICS, WorthPublishers, 2009)にも書かれているように時代と共に社会的コンセンサスが変化している、言い換えれば因果メカニズムは社会的に決定されている。また日本が30年以上の長期経済停滞から今なお脱却できていないことも、政策決定過程が国民のメカニズム理解不在のまま利害の調整主体で行われていることに大きな原因があると考えられる。

社会の諸問題を合理的に解決していくためには、あるべき論に基づく政策決定が必要であり、そのためには社会の諸現象における因果メカニズムに関する客観的な知識の蓄積が必要である。しかしながら、これまでの社会学経済学では上述のごとく自然科学のようなコントロールされた実験が事実上不可能であるために因果メカニズムに関する

知の蓄積が実限されていない。このことが、現代社会は貧富の差や地球温暖化、核の問題等、今なお問題が山積し、それらは解決に向かうどころか寧ろ複雑化・深刻化しているように見える、ことの一つの重大な原因になっていると考えられる。

一方ABMはボトムアップに人工社会を構築する社会シミュレーション手法であるために原理的に社会経済分野における諸現象の因果メカニズムの解明を実現するための方法論となることが可能である。本論ではその方法論と妥当性を説明しその実現のためのプログラムを紹介する。

本論で主張する「ABMによるマクロ社会現象の因果メカニズム解明の基本原則」は以下のとおりである。

1. すべての社会現象は人間の行動とその相互作用の結果として生じ、かつそれらの創発には原因がある。100%ボトムアップなABMであれば現実社会と同じ原理（同じ因果メカニズム）で動作する人工社会を構築することが原理的に可能である。
2. 着目する社会現象の定性的特徴を定義し、それをABMで再現するための必要不可欠な要因（意思決定主体の行動ルール集合と変数の集合、以下モデル構造と称す）を系統的な計算機実験によって明らかにする。得られた必要不可欠な要因群は着目する社会現象の特徴を創発する原因である。得られた結果は、(エージェントの多様性が保証されている限りにおいて) モデル構造のみに依存するので完全に客観的であり、かつ世界的規模で計算結果の追認が可能。
3. 必要不可欠な要因が何故必要不可欠であるか、は計算結果を分析すれば必ず明らかにでき、これによって、人工社会における因果メカニズムを明らかにできる。
4. 次に人工社会について得られた因果メカニズムを現実社会に置き換えることにより現実の社会現象の因果メカニズムについての知見が得られる。
5. 上記1～4を種々の社会現象について繰り返すことにより広範囲の社会現象の因果メカニズムについて知見が得られ、一旦必要不可欠なモデル構造が明らかとなれば、そのモデルを用いて政策効果等の実験的確認（what if 分析）が可能となる。推奨すべき政策が実施されて結果が得られれば、ABMに基づく政策案の妥当性が検証されることになる。なお、上記2においてエージェント数等のシステム変数に関わるパラメータは多様性が担保できる範囲内で大きな値として

おけばパラメータの数字には依存しない。

また上記手続きによって社会現象を定性的に説明しうるモデル構造が明らかになれば、そのモデルを用いてパラメータ条件に関する系統的实验を行うことにより、将来的には定量モデルも原理的に可能である。

上記原理の妥当性を集合論的記述によって数学的に示した。また上記原理によって因果メカニズム解明が可能であることを過去に行ったABM研究事例（景気循環、所得税減税効果、法人税減税効果、等の経済モデル事例、いじめモデル、パンデミックモデル等）によって示した。

上記方法論はこれまでに報告されてきたABMの考え方とは異なる筆者オリジナルなものである。これまでのABMの考え方は主に以下のようにまとめられる。

1. ABMはアブストラクトなモデルであっても実システムに関わる何らかの知見が得られればそれ自体価値がある。
2. ABMの妥当性はモデルの精緻さによって異なる。(Abstract, Middle range, Facsimile model)
3. ABMの特徴には100%ボトムアップなモデル構築が可能であることの他に、意思決定主体の多様性や非合理性等を導入できるという特徴があり、その意義が大きい。
4. ABMの計算結果はパラメータの値に鈍感であり、したがって計算結果は予測に使えるような信頼性のあるものではない。

しかしながら、上記考え方には根本的問題が存在する。まず、ABMの最大の特徴は100%ボトムアップなモデリングが可能である点である。この点を欠けばABMが現実システムの模型であることを保証できない。次にABMの計算結果はパラメータ値に鈍感であるが、モデル構造には敏感であり、マクロ社会現象ごとにそれをABMで再現するための必要不可欠なモデル構造が存在する、更に、ABMの妥当性はモデルが実現象の特徴を定性的に再現できるか否か、更には定性的に再現できるモデル構造を前提として実現象の定量的特徴を再現できるかどうか、で判断されるべきであって、AbstractからFacsimileという分類は定性と定量の明確な区分がされておらず合理性に欠ける。この点で、ABMは実現象の忠実な模型であるべきと

考える。このため経済モデルにおいては実システムと同じ方法で複式簿記会計が行われ、それに基づいて産業連関表が作成され、GDPが計算されることが必須要件となる。

本方法論のためのプログラムは、これまでのプログラムを誰にでも使いやすく、かつより汎用性の高いオブジェクト指向プログラムに作り替える作業を行っているものであり、以下の特徴を有する。

1. C++オブジェクト指向プログラム
2. クラス間の関係に関しては、継承はポリモルフィズムに限定し移譲関係を基本とする。
3. 各種モデルに共通な基本構成クラスと役割は以下の通り。
 - ・計算の全行程を管理するクラス
(各種オブジェクトの生成、初期設定、期首・期中・期末処理の繰り返し)
 - ・双方向参照を回避するために必要なクラスオブジェクト群構造体
 - ・パラメータ変数、入出力ファイルのパスを保有するクラス
 - ・各種乱数を生成する関数を保有するクラス
4. 各種モデルに特有のオブジェクトに関しては、それぞれクラスを設計し、各エージェントの行動を上記基本構成クラスから呼び出す形式とする。
5. 経済モデルに関しては、各エージェントの会計取引を記録し毎期決算処理をするクラス及び、それらを集計してシステム全体としての産業連関表及びGDPを計算するクラスを設ける。

本プログラムは完全オブジェクト指向のため汎用性、拡張性が優れていると考えている。将来的にはUGIを備えたアプリケーションソフトの開発への展開も研究スコープにいられている。経済モデルに関しては、現状は消費者、消費者用製品生産者、原料生産者からなる資金循環型モデルであるが、今後は企業の投資、銀行借入、政府の徴税と公共事業投資、金融市場等を考慮したモデルへの展開が可能であり、その潜在意義は極めて大きいといえる。このプロジェクトへの多くの研究者の参加を希望するものである。

株価指数の秒足揺ぎの乱数度から予測する価格下落

田中美栄子：鳥取大学 / 明治大学

株価などの価格変動はランダム性が高く予測が困難なことは広く知られている。このために金融工学では完全にランダムな極限を想定した確率数学が用いられる。しかし現実の価格変動の様相をビッグデータで調べると、ランダムさの度合は一定ではなく、状況次第でランダム度が増えていることがわかってきた。このランダム度を数値化する手法を我々は考え、ランダム行列理論 (Random Matrix Theory, RMT と略) の公式からの乖離度を利用する手法なので、RMT テストと呼び、これを用いて測定した局所的なランダム度の時間変化を追跡することによって深刻な価格下落を予測できるのではないかと考えた。この手法と応用結果の一部については最近の出版物 [1] に詳説したので参照されたい。本手法が深刻な市場の暴落の予測に役立つかどうかは今後の検証を待たねばならない。例えば 2011 年 3 月 11 日の北関東大地震の結果、福島第一発電所の原子炉が故障したことによる事故で東京電力の株価が急落したが、これは急な事故のため当然どこにも予兆はなく、急落の直後からランダム度が急変 (ランダム度が最大の状態から急落) し、比較的短期間で回復している様子を観察できる。その後、ランダム度は最大近くまで回復するが、同年 11 月頃には再び乱数度が急落し、その直後に価格下落が起きる。また、翌 2012 年 3 月末にもランダム度が急落するがその翌 4 月に価格の急落が観測される。これらは TOPIX 指数の 1 秒足データを調べた結果であり、「ランダム度が急落するとその後に価格が下落する」という仮説を立てることができる。2011 年 11 月と 2012 年 3 月のここで使った TOPIX 指数は東京市場全体の売買高の変動を示す指数であり、個々の商品の価格変動ではないが、1 秒毎に公表される価格指数で入手しやすいため利用した。この指数のランダム度は 2013 年以降、殆どが低いままで RMT との比較ができない。そこで別の指数で、超優良株 30 の重み付き平均価格である TOPIXcore30 の 1 秒足を調べると、2014 以降も比較的乱数度が高い結果となるため、この期間を調べると 6 例の大きな乖離の後で少なくとも 4 例は価格下落が起きることがわかり、さらに 2010-2013 の期間についても上記の TOPIX 指数の結果と矛盾しないことがわかった [1]。この結果を表す図表を改良して見やすくし、新たに発見した事例をまとめて、2022 年度の本研究会で田中が発表し、その後、EIER の特集号に掲載予定となっている [2]。

References

- [1] M. Tanaka-Yamawaki, Y. Ikura : “Principal Component Analysis and Randomness Tests for Big Data Analysis--Practical Applications of RMT-Based Technique--, Evolutionary Economics and Social Complexity Science Series, Springer (2023.5.30)
- [2] M. Tanaka-Yamawaki, Y. Ikura : “Market Declines Triggered by the deviation from the random walk“, to be published in the Special Issue of Evolutionary and Institutional Economics Review (2024.4)

政府調達における落札率と事務コストの均衡

大和大学 名倉 賢

(要旨) EBPM (Evidence Based Policy Making: データに基づく政策立案) への取り組みは日本政府内で本格化しつつあり、既に予算要求額 10 億円以上の新規事業では EBPM による説明が義務付けられている。しかしながら、現状では入手できるデータが不十分なため、「データ収集・分析を踏えたモデルを構築して、そのモデルに基づいた政策提言をする」という本来あるべき EBPM を実践できた事例はまだ少ない。

本講演では、まだ数少ないデータ分析を起点とした政府調達に係る政策を提案する。具体的には、政府情報システム支出に係る公表データから、①支出金額及び応札者が従う分布関数及び ②応札者別の落札率が従う分布関数を推定し、この分析結果を踏まえて③予算の分配モデル(綱引きモデル)を構築し、このモデルに基づき④「調達単位の細分化による競争促進とそれによる政府支出の削減」を目指す政策を提唱する。さらに、この過程で算出される政府支出の期待削減額と事務コストの関係についても議論する。

1. 政府情報システム支出に係る公表データの分析

①支出額とその応札者数は、ある対数正規分布と(制限付き)ポアソン分布を合成した分布に従っている。具体的には、

- ・ 支出件数 Y は“ $n \geq 1$ に制限したポアソン分布”
- ・ ポアソンパラメータ Λ は、支出金 X として、冪分布: $\Lambda = 8.35 \cdot X^{-0.25}$
- ・ 支出額 X は $\ln X = N(17.3, 2.13)$ の対数正規分布に従う。

②落札率(=実際の落札額/予定価格)はあるベータ分布で記述できる。応札者が 2 人以上のときは 1 者と比べて落札率が低下することが観測される(競争促進効果)。

2. 予算の分配モデル

・ 全予算の最終的な分配である支出額が従う対数正規分布を、組織間で予算を“綱引き”して分配するモデル(綱引きモデル)で説明する。具体的には、全支出件数 N をとして

- ・ $\ln X = 26.535 - 0.893 \cdot n + 0.632 \sqrt{n} \cdot \Phi(0, 1)$ 、ただし $n = \log_2 N = 10.543$

3. 調達単位の細分化による政府支出の削減

仮にもう 1 ステップ調達を細分化すれば(予算分配の手続きをもう 1 段階増やす)、つまり $n \rightarrow n+1$ ($N \rightarrow 2N$) とすれば、支出額 X の分布は以下に変化することが予想できる。

- ・ $\ln X = 16.228 + 2.147 \cdot \Phi(0, 1)$

このとき 1 者応札は 2,677 億円 (79.36%) から 2,590 億円 (76.78%) へ減少し、(より競争促進効果が期待できる) 2 者以上の応札は 697 億円 (20.64%) から 783 億円 (23.22%) へ増加すると推定される。仮に 1 者から 2 者以上へ改善することで約 20% 落札金額が低下するならば、 $3,340 \text{ 億円} \times 2.58\% \times \Delta 20\% \div 17.2 \text{ 億円}$ の節税効果が期待できる。

4. 期待削減額と事務コスト

この削減効果は1件当たり17.2億円/1492件=1.2百万円となる。もっとも効果的な政府支出は、民間への総支出額 P と事務コスト G の和 $T=P+G$ を最小にするべきであるから、上記の1件当たりの削減効果1.2百万円は限界的な（追加的に支出件数を1件増やす）事務コストと均衡すべきである。この「追加1件当たりの事務コスト」が1.2百万円という数値とバランスしていないならば調達案件の細分化を調整してトータルな行政コストを最適化する必要があるだろう。

(以上)

機械学習と拡散問題への取り組み

前野義晴（明治大学 総合数理学部）

本研究は、自然科学・社会科学の諸分野で関心が高まる機械学習技術をベースとして、反応拡散過程の逆問題を解決する4種類のソルバについて、有効性の分析を行う。特に、感染症の拡散現象における感染者分布から感染源を特定するという具体的な逆問題例において、最新の畳み込みニューラルネットワーク CNN が示す性能特性の分析を主なトピックとする。この問題は疫学的地理プロファイリングと呼ばれ、経験論的なソルバが提案されている。

正方格子に区切った2次元の地理空間での SIR コンパートメントモデルに従う感染者数分布のデータセットを合成して（図1）、ソルバの性能特性を定量化した。畳み込みニューラルネットワーク CNN は、単一の感染源を特定する逆問題に効果的に機能して、移動確率が不均一な地理空間での感染拡大の場面において最も高い特定精度を達成できることが分かった（図2）。この場合、時間が経過しても、ヒットスコアは理論限界に近い低い値に留まっていた性能劣化が少ないことも分かった。また、単一の感染源についてのデータセットを学習するだけで、複数の感染源を特定する逆問題にも同じように機能する見込みを得た。

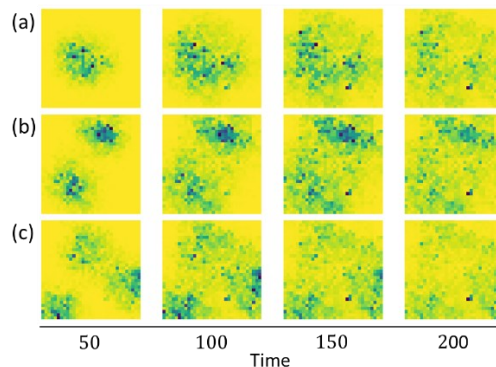


図1：データセットに含まれる感染者分布の例、(a) 単一の感染源、(b) (c) 複数の感染源

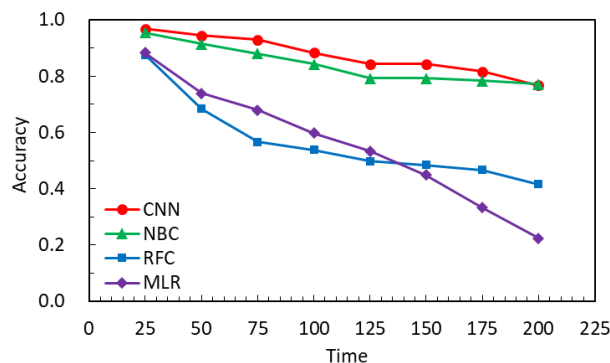


図2：畳み込みニューラルネットワーク CNN、ナীবベイズ NBC、ランダムフォレスト RFC、ロジスティック回帰 MLR の4種類のソルバが示す特定精度の時間変化

株価推移に基づく企業間の信用ネットワークと RMT との関係性について

金子拓也（国際基督教大学） 久門正人（野村証券）

本研究では、毎時の株価の収益率から得られる企業間の信用ネットワークと、ネットワークを作る際に利用した同じ株価データから、ランダム行列理論（RMT）に基づき抽出した最大固有値を比較し、両者の関係性を検討する。

企業同士の信用リスクに関する結びつきを示す信用ネットワークの構築プロセスは、まず Merton model (1974) を用いて各企業の倒産確率を計算し、つぎに久門・金子(2016)を用いて条件付き倒産確率を計算して企業同士の関係性を図示していく。簡単に倒産確率は、将来時刻 T における企業#1 のバランスシートの資産額を $A_1(T)$ 、負債総額を $D_1(T)$ 、条件 C が適合するときに 1 を返す指示関数を $1\{C\}$ と表記するとき、 $P(1)=E[1\{A_1(T)<D_1(T)\}]$ から得られる値とし、また条件付き倒産確率とは、ある企業 A が倒産した条件における企業 B の倒産確率のことを指し、これを $P(B|A)$ と表記する。このとき企業同士の結びつけ方は、 A をさまざまに変化させて $P(B|A)$ を最大とする企業(たとえば企業 C)から企業 B は最も影響を受けると考えて、企業 C から企業 B への矢印を付すことを全ての企業について繰り返す。一般に企業の倒産は単独で発生することは少なく連鎖的に発生することから、ネットワークを構築しておくことで、ある企業の倒産の次に影響を受け得る企業を推定する事が可能となり、与信側は連鎖倒産に備える等といった利用方法が考えられる。条件付き倒産確率は企業の総数が N 社あるときには、 $N(N-1)$ 回計算して、企業ごとに影響を受ける企業を選定してネットワークを構築することとなる。ネットワークの形状は、さまざまな企業に影響を与える企業を中心に放射状にクラスターが構成され、クラスターから排除される企業は、市場との連動性が弱く独立に株価が推移している企業であり、実際の株価データを用いた数値実験からは、倒産確率が特に高い企業がクラスターの外に位置付けられることが多い。

また、久門・金子(2023)によれば、株価の間で相関があるとき、株価収益率から得られるウィシャート行列の固有値はマルチェンコパスツール分布には従わずに、相関係数の値に応じた分布に従うことが示されているので、最大固有値の推移を観測していき、これを上で構築したネットワークの形状と比較することで両者の関係性を検討する。数値実験では、2023年3月から5月に破綻した3つの金融機関を含む米国の151の金融機関の株価データを破綻前の151個の収益率（株価は152日分）毎に分析した結果を発表では紹介する。下図はSVBやFirst Republic Bankが破綻前にクラスター外に配置されている様子を示す。またこのときの最大固有値は97.799と他の期間と比べ高いことが確認されている。

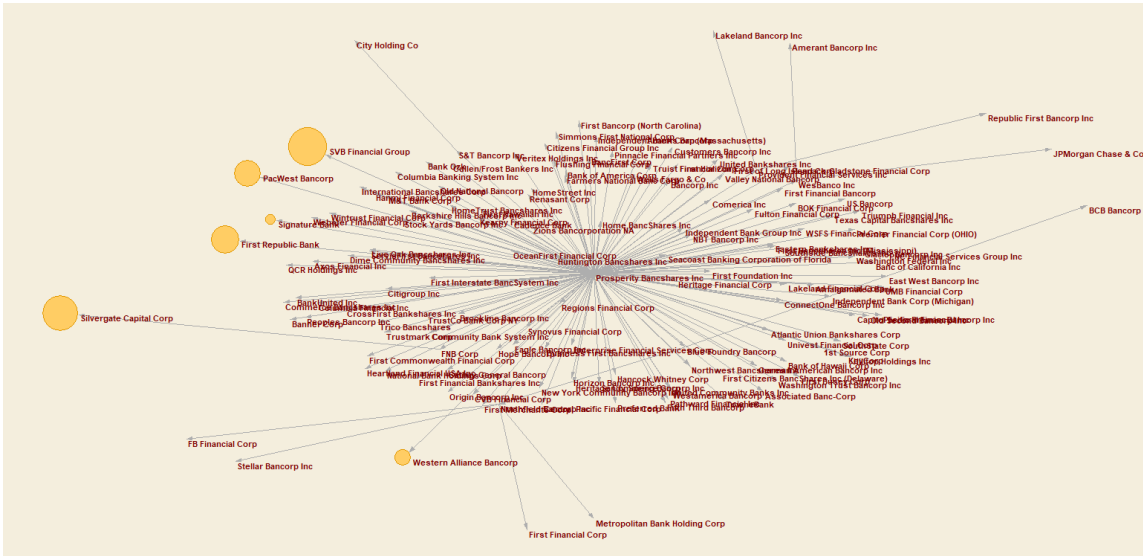


図 1 : 2023/2/10-3/10 11:00AM までの株価データから得られた信用ネットワーク

メッシュ統計を用いたアメリカの地震に観られる統計性

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)

本発表では、アメリカ地質調査所 (United States Geological Survey; USGS) が公開している地震データを用いて、1997 年より 2022 年までに米国本土で発生したマグニチュード 0 以上の地震を対象とし分析を行った。その際、地震のマクロな統計則の関係を明らかにするため、メッシュで地震を集計するメッシュ統計を行った。その結果、メッシュごとに集計された地震エネルギーおよび地震数にベキ分布 (ゲーテンベルグ・リヒター則) が観測されることを確認した。さらに、地震エネルギーと地震数に相関があることも確認した。そして、メッシュで集計した地震エネルギーおよび地震数の散布図には、時間反転対称性があることを確認した (図 1、2)。そして最後に、地震エネルギーの時間変化には大規模域でも初期値依存性がある (ジブラ則が無い) が、地震数の時間変化には大規模域で初期値依存性がない (ジブラ則がある) ことを確認した。

これまで我々は、企業規模量において、時間反転対称性とジブラ則よりベキ分布が導かれることを様々な実データで確認してきた。

今回我々は、地震エネルギーでは、ベキ分布 (ゲーテンベルグ・リヒター則) だけでなく、時間反転対称性が観測されることを示した。また同時に、ジブラ則が無いことも確認した。これは、時間反転対称性とジブラ則を拡張したものより、ベキ分布が導かれる仕組みが存在することを意味している。

また地震数については、ジブラ則が観測されたことより、企業規模量での議論と同様に、時間反転対称性とジブラ則より、ベキ分布が説明できることを意味している。

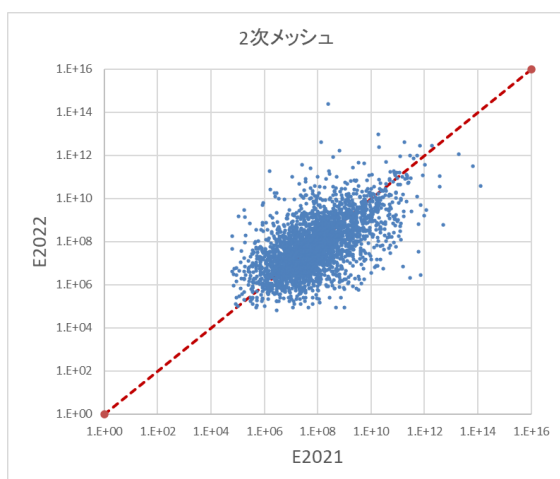


図 1 2次メッシュで集計した地震エネルギーの散布図

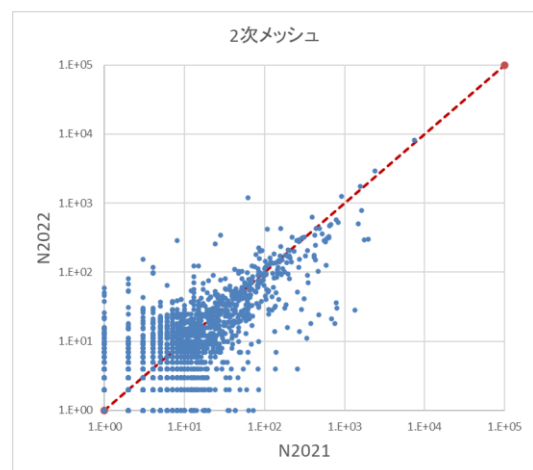


図 2 2次メッシュで集計した地震数の散布図