

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20154

研究課題名（和文）波及効果とその構造変化の機械学習的手法による推定

研究課題名（英文）Machine learning approach to the estimation of spillover effects and their structural changes

研究代表者

奥井 亮 (Okui, Ryo)

東京大学・大学院経済学研究科（経済学部）・教授

研究者番号：20563480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、パネルデータを用いて経済主体間の波及効果とその連関構造がどのように変化しているかを捕捉する計量経済学的手法の開発を行った。どの経済主体がどの経済主体に影響をあたえるのかという波及効果の連関構造が未知であり、さらにそれらが未知の構造変化点において変化する状況を考える。波及効果とその連関構造そして構造変化点を推定する手法を機械学習の手法を発展させることで開発し、漸近理論とシミュレーションによって、その性質を調した。関連して、より大局的に、パネルデータ分析と機械学習を組み合わせるために必要な理論の発展にも寄与した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

経済主体間の波及効果とその連関構造がどのように変化しているかを捕捉することは、学術的にも政策上も重要な問題である。例えば、研究開発の国際的な影響を調べることは、どのような国の研究開発から日本が影響を受けており、またどのような国に影響を与えているか明確にし、政策上も有用な情報を提供する。さらに、そのような連関構造は時間を通じて変化する可能性が高く、構造変化を捉える必要もある。この研究では、連関構造とその構造変化をデータから捉えるための計量経済学的手法を開発した。さらに、手法の開発のために、計量経済学と機械学習の両者にまたがる統計理論の発展を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed an econometric method for panel data to estimate spillover effects among economic units and the evolution of their interconnections. Our approach addresses scenarios where the linkage structure of spillover, that is, the specific interactions among agents, is not pre-specified, and these interactions may change at an unknown point of structural change. To address these issues, we devised a novel method based on machine learning techniques to estimate spillover effects, their network structures, and the structural change point. We analyzed the performance of our method through asymptotic theory and extensive simulations. Additionally, this project has advanced the theoretical framework necessary to integrate panel data analysis with machine learning.

研究分野：計量経済学

キーワード：パネルデータ 波及効果 連関構造 機械学習 構造変化

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、これまで応用分野の研究者とともに、経済主体間の相互作用の影響についての研究を行っており、そのなかで本研究課題の問題意識を得た。現在も、サプライチェーンネットワークのあり方が銀行融資にどのように影響するか分析を共同研究として行っている。その中で、これらの研究では、説得的な実証分析を行うことが難しいことが分かった。特に、企業間の業績の関連をデータから明確に示す方法や、サプライチェーンの変化を捉える手法に確立したものがないことが問題である。

既存の文献では、完全に確立した方法はまだないものの、安定的な連関構造を持つ場合には、未知の連関構造を推定する手法がいくつか開発されている。ただ、どのように時間とともに変化する構造を取り扱うかについては、未解決であった。研究代表者は近年、パネルデータでの構造変化点の研究を進めている。そこで、構造変化点を導入したモデル化を行えば、時間を通じて変化する連関構造も高い精度で推定できるのではないかとこの着想を得た。さらに、近年の計量経済学での機械学習的手法の発展に触れ、未知の連関構造の推定も改善できることが分かった。

本研究課題は、潜在的な社会的ネットワークの解明に関する目下急成長の分野に貢献すると考えている。波及効果の推定では、地理的距離 (Ertur and Musolesi, 2017) などの情報を利用して連関構造は既知とするものが主流である。しかし、連関構造が既知というのは強い仮定であり、その限界を乗り越えるため、近年では、連関構造は疎であると仮定し、罰則付き推定を用いることで、連関構造そのものも推定する手法も提案されてきた (Manresa, 2016; Audrino and Tetereva, 2019; de Paula, Rasul and Souza, 2023)。本研究課題のモデルは、構造変化を除いては、Manresa (2016)に近い。しかし、これらの研究はすべて、連関構造が時間的に一定であることを前提としている。これに対して、本研究課題では構造変化の検出法を開発し、未知の波及効果の連関構造を解明する新しいアプローチを提供する。

なお、問題意識は共有するが、全く異なる手法の研究として、Han et al. (2021) が挙げられる。Han et al. (2021) は連関構造が確率的に変化するモデルを採用し、連関構造やその変化についてパラメトリックにモデル化して、ベイズ推定を行うことを提唱している。本研究の提案する手法では、このようなパラメトリックにモデル化は必要ないが、連関構造が疎であるという仮定を課す必要がある。

さらに、本研究課題は、パネルデータ分析における構造変化の分野への貢献もある。この分野の既存の研究では、推定すべき係数の数は少なく機会学習の方法で係数推定を行う必要がなかった。一方で、本研究課題では、高次元パラメータの機械学習的推定を行う。

また、パネルデータ分析への機械学習の応用についても貢献ができると考えている。本研究課題はパネルデータ分析への機械学習の応用の一例と見なすこともできる。一方で、そのような応用を行う研究は学界として、緒についたところと比べてよく、この研究課題に直接関わるところもよりむしろ一般的な視点から問題の解決を図る方が問題の整理がしやすく、また有用性が高いと考えている。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、パネルデータを用いて経済主体間の波及効果とその連関構造がどのように変化しているかを捕捉する計量経済学的手法の開発を目的とする。どの経済主体がどの経済主体に影響をあたえるのかという波及効果の連関構造が未知であり、さらにそれらが未知の構造変化点において変化する状況を考える。波及効果とその連関構造そして構造変化点を推定する手法を機械学習の手法を発展させることで開発し、漸近理論とシミュレーションによって、その性質を調べる。関連して、より大局的に、パネルデータ分析と機械学習を組み合わせるために必要な理論の発展にも寄与できるようにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、提案する手法の性質を理論とシミュレーションの両面から解明する。特に、構造変化点の推定量の漸近的性質と、構造変化がある場合の二重機械学習法の正当化が重要である。

連関構造と構造変化の推定法を開発する。連関構造が疎である場合に有用な手法である、LASSOを元にした手法を提案した。提案する手法は、3段階推定量である。LASSOを一回適用するだけでは、推定量が望ましい性質をもたない。そこで、LASSO推定量を一段階目とし、構造変化点を最小二乗法で再推定する第二段階をおく。さらに、第三段階として、連関構造を二重機械学習法によって再推定する。

推定量の漸近理論は、推定の各段階において考える。まず、第一段階の罰則付き最小二乗法の性質を調べる。この部分は、Lee, Seo and Shin (2016) と Lee, Liao, Seo and Shin (2018) で展開された議論が参考になる。これらの論文では、高次元回帰モデルにおける変化点推定の漸近的性質を取り扱っている。本研究は、パネルデータ分析を行っているという点で違いがある。

次に、第二段階で得られた構造変化点の推定量の性質を調べる。第二段階で最小二乗法を用いて変化点推定の更新を行うことは Lee, Liao, Seo and Shin (2018) でも考えられている。本研究課題では、パネルデータを用いるため、構造変化点の推定量が真値と一致する確率が一に収束するという、より強い結果が期待できる。

そして、第三段階の二重機械学習法による係数推定量の性質を調べる。既存の研究とは、構造変化がある点が異なる。しかし、構造変化がある場合でも、サンプル分割を、構造変化点の前後でそれぞれ行い、それらを組み合わせることで、通常の二重機械学習法の状況と同じような結果を得ることができるかと予想される。

提案した手法の有限標本での性質を調べるために、モンテカルロシミュレーションを行う。特に、どの程度の長さの時系列があれば、信頼できる推定値を得ることができるかを調べる。

#### 4. 研究成果

連関構造と構造変化の推定法を開発し、シミュレーションによって、推定量の計算時間に大きな問題はなく、また有限標本での性質も満足のいくものであったことを確認した。

理論面では、第二段階で得られる構造変化点の推定量が非常に速い収束速度において一致性を持つことを証明した。これは、高次元データにおける構造変化点推定の文献で得られたものよりも速い収束速度であり、パネルデータの特性を利用することにより可能となったものである。また、3段階目の二重機械学習法による連関構造の推定量の漸近的性質を調べた。

実証例を用いて提案手法が実際のデータでどのように機能するかを調べる。国レベルのパネルデータを使用し、各国の研究開発がどのような波及効果を持つのか、その連関構造に構造変化があるのかを調べた。

論文執筆を進め、学会やセミナーで発表した。研究発表は今後も続ける予定である。また、近日中に論文を国際的な学術雑誌に投稿する予定である。これらは Okui, Sun and Wang (2024) としてまとめている。

また、関連して、高次元パネルデータモデルへの機械学習法の応用や統計的推測 (Dzemski and Okui, 2024) についての研究も進めることができた

1. “Regression Shrinkage and Selection via the Lasso,” Tibshirani, R., *Journal of the Royal Statistical Society. Series B* 58(1), 267-288 (1996).
2. “Double/debiased Machine Learning for Treatment and Structural Parameters,” Chernozhukov, V., D. Chetverikov, M. Demirer, E. Duflo, C. Hansen, W. Newey, and J. Robins., *The Econometrics Journal* 21, C1-C68 (2018).
3. “Weak and Strong Cross-sectional Dependence: A Panel Data Analysis of International Technology Diffusion,” Ertur, C., and A. Musolesi, *Journal of Applied Econometrics* 32, 477-503 (2017).
4. “Estimating the Structure of Social Interactions Using Panel Data,” Manresa, E., Working Paper, MIT Sloan, (2016).
5. “Sentiment Spillover Effects for US and European Companies,” Audrino, F., and A. Teterova, *Journal of Banking & Finance* 106, 543-567 (2019).
6. “Identifying Network Ties from Panel Data: Theory and an Application to Tax

- Competition,” de Paula, A., I. Rasul, and P. Souza, Forthcoming in the Review of Economic Studies, (2023).
7. “The Lasso for High Dimensional Regression with a Possible Change Point,” Lee, S., M. H. Seo, and Y. Shin., Journal of the Royal Statistical Society. Series B 78, 193-210 (2016).
  8. “Oracle Estimation of a Change Point in High-Dimensional Quantile Regression,” Lee, S., Y. Liao, M. H. Seo, and Y. Shin., Journal of the American Statistical Association 113, 1184-1194 (2018).
  9. “Recovering latent linkage structures and spillover effects with structural breaks in panel data models,” Okui, R., Y. Sun, and W. Wang., Unpublished manuscript. (2024).
  10. “Confidence Set for Group Membership,” Dzemski, A. and R. Okui., forthcoming in Quantitative Economics, (2024+)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Andreas Dzemski and Ryo Okui	4. 巻 -
2. 論文標題 Confidence Set for Group Membership	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Quantitative Economics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ryo Okui
2. 発表標題 DETECTING STRUCTURAL BREAKS IN SPATIAL PANEL DATA MODELS WITH UNKNOWN NETWORKS
3. 学会等名 Asian Meeting of the Econometric Society in East and South-East Asia（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Okui
2. 発表標題 DETECTING STRUCTURAL BREAKS IN SPATIAL PANEL DATA MODELS WITH UNKNOWN NETWORKS
3. 学会等名 The 9th Annual Conference of the International Association for Applied Econometrics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Okui
2. 発表標題 Latent group structure in linear panel data models with endogenous regressor
3. 学会等名 Japanese Economic Association
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Okui
2. 発表標題 Instrumental Variables Estimation for Infinite Order Panel Autoregressive Processes
3. 学会等名 The 28th International Panel Data Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Okui
2. 発表標題 RECOVERING LATENT LINKAGE STRUCTURES AND SPILLOVER EFFECTS WITH STRUCTURAL BREAKS IN PANEL DATA MODELS
3. 学会等名 The 17th International Symposium on Econometric Theory and Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥井亮
2. 発表標題 Recovering latent linkage structures and spillover effects with structural breaks in panel data models
3. 学会等名 関西計量経済学研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------