

社会基盤の統計的因果探索による ストック効果の検証

杉原 豪¹・塚井 誠人²

¹学生会員 広島大学 工学部 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: b154101@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: mtukai@hiroshima-u.ac.jp

近年、限られた税収を効率的に投資するために、社会基盤整備では特にストック効果の高い事業への重点化が求められている。本研究では道路整備の効果の中でもストック効果に着目する。ストック効果の発現メカニズムについては、これまで経済理論に基づくモデル構造が仮定されることが多かったが、仮定した構造が実際の地域データにおいて成立するか否かに関する検証が行われることは、ほとんどなかった。本研究では、分析に統計的因果探索を用いて個別地域・主体での社会基盤の整備と経済成長の因果関係を明らかにすることを目的とする。分析対象地域は、平成 27 年 3 月に全線開通した尾道松江線として、経済成長とアクセス性向上の因果関係の同定を試みる。

Key Words: stock effect, accessibility, economic growth, causal relationship, causal discovery

1. はじめに

社会基盤整備の意思決定は、伝統的に費用便益分析に基づいて行われてきた。費用便益分析は、現在の費用便益マニュアルで標準化されている便益発生側での計測手法においても、近年実用的な計算手法の開発が進められてきた空間的な便益帰着側に着目した計測手法（応用空間一般均衡分析）においても、同一のロジックの上に組み立てられている、すなわち、経済学的な考察に基づく因果構造を前提として、統計学的な仮定の上で将来予測を行う手続き合理的な手法である。ただし、事業効果の事前予測値と事後の観測値の間では、常に乖離が生じる。この乖離は、事業実施前後での社会的経済的な情勢の変化によってもたらされると理解されてきた。

平成 28 年 11 月に国土交通省が策定した「ストック効果の最大化に向けて~その具体的戦略の提言~」¹⁾では、社会基盤整備のストック効果の最大化のために、発現した様々なストック効果を積極的に把握し、「見える化」することが推奨されている。さらにこの方針では、ストック効果に関して得られる知見を事業に有効活用するという、社会基盤のマネジメントサイクルの確立の必要性が述べられている。

社会基盤のストック効果が様々な面で発現することは論を俟たない。しかしその一方で、予測の基盤となる経済モデルのロジックやモデル構造そのものの妥当性や限界が再検討されることはほとんどなかった。標準的な経済モデルでは、関係主体の経済学的な行動指針を踏まえた最適化問題から演繹的にモデル構造を導出する。また実証分析の際は、入手可能なデータに適合するようにある程度簡略化したモデル構造を用いる。この一連のモデル同定手順では、モデル構造を省みる余地は少なく、せいぜいモデルパラメータの推定手順を見直すなどの修正が行われるに留まっていた。しかし「ストック効果に関して得られる知見を事業に有効活用する」ことには、本来モデルと現実との乖離が生じる原因をモデル構造に遡って検討し、新たな経済モデルを開発する手順も含まれるはずである。ただしその実現には、経済モデル実際に発現した効果を計測し、経済モデルが想定した因果構造の妥当性を事後的に検証する分析手法が必要である。

本研究では道路整備の効果の中でもストック効果に着目し、統計的因果探索を用いて個別地域・主体での社会基盤の整備と経済成長の因果関係を明らかにすることを目的とする。具体的には、道路アクセスに変化が見られた地域を対象に、統計的因果構造を経年的に推計する。

2. 既往研究及び本研究の位置付け

小池²⁾は、近年ストック効果が注目される理由として、費用便益分析の背景にある仮説的補償原理の仮定から逸脱するような地域開発効果を挙げている。社会基盤整備事業の優位性を判断するのであれば、個別地域・主体の効果の明示は必要ないことを指摘した上で、個別地域・主体の効果（帰着便益）は、社会的に望ましい分配に関する計画論を語る上で重要であるとしている。これを踏まえて小池は、帰着便益を明示することによって、その限界や活用方法について技術者や政策決定者がより深く議論することが重要と結論付けている。

社会基盤による生産力効果の測定には、一般的に Aschauer³⁾によって研究がはじめられた生産関数アプローチが用いられる。林⁴⁾は、我が国では地域間再分配の手段として、より多くの公共投資が生産や所得の低い地域へ投入されることを指摘した。江尻ら⁵⁾は、生産関数アプローチでは社会基盤と経済成長の間の因果関係が同定できないことを指摘したうえで、社会基盤の整備が経済成長の結果であるという、逆因果の可能性について言及した。その上で、因果構造の同定問題を、生産力効果計測上の課題としている。

複数の観測データ間の因果関係を明らかにする手法は統計的因果推論と呼ばれ、その代表的な手法の一つに操作変数法がある。Duranton & Turner⁶⁾は、高速道路ストックが 1983-2003 年のアメリカの都市人口・雇用の成長に与える因果効果について構造方程式を定式化して、操作変数法によってモデルを推定した。その結果、道路ストック 10%の増加が都市の雇用を 20 年間で約 1.5%上昇させるという推定結果を得ている。また、Holl⁸⁾は、1997-2007 年のスペインの製造業を対象に、高速道路整備への近接性が企業の生産性に及ぼす影響について固定操作変数法を用いて分析を行い、高速道路によるアクセス性の向上効果は企業レベルでは集積の効果以上に企業の生産性を向上させたことを明らかにした。さらに、高速道路に近接する郊外地域の企業で生産性が大きく向上する一方で、その周辺地域の企業の生産性が低下することにより、道路投資による便益の一部が相殺されることを示した。Redding and Turner⁹⁾は、交通基盤整備が経済活動の空間構造に及ぼす効果を、操作変数法などを用いて推定する研究についてレビューを行った。都市内 (intracity)、都市間 (intercity) で交通インフラを分類し、主に立地変化に着目してそれぞれについての既往研究を整理した。その結果、道路や鉄道までの距離が 2 倍になると、人口や雇用が 6-15% 低下すること、高速道路整備は都市人口や製造業の郊外化をもたらすこと、効果は経済発展の度合いには影響を受けないが、交通機関や産業によって異

なることなどを明らかにした。

本研究は、自治体単位のデータに基づいて、アクセス性の向上と経済成長の因果関係を明らかにする。操作変数法に代表される統計的因果推論の手法は、分析に先立って経済学的知見や経済理論上の妥当性に基づいて因果構造を仮定し、その効果を統計的に推定する手順をとる。しかし、この手順では逆因果の可能性が否定できない。本研究では、先験的な因果構造を仮定せずに、統計学的知見に基づいて因果構造を決定する。したがって、従来の手法と併用すれば因果関係の同定問題を解決できる可能性がある。

3. インフラストック効果の探索手法

本研究では、道路整備のストック効果に関して計測されることの多いアクセス性の向上と経済成長の因果関係を明らかにするため、統計的因果探索を用いる。統計的因果探索とは、未知の因果グラフを、データが示す分布特性に基づいて推測する手法である。

本研究では、統計的因果探索の中でも因果グラフが推測できる LiNGAM (Liner Non-Gaussian Acyclic Model (線形非ガウス非巡回モデル)) を用いる。LiNGAM の推定原理は、まず変数間の因果的順序を求め、その因果的順序に従う回帰分析を実行することによって、変数間の因果グラフを探索するという 2 段階で構成される。変数の因果的順序とは、その順序に従って変数を並べ替えると、後の変数が先の変数の原因となることが無いような、変数の順序である。なお Acyclic という表現に見られるように、因果的順序を仮定する場合は、因果が循環的に発生する変数組は、許容できない。また非ガウス分布は、「正しくない因果的順序でモデル推計を行った場合は、説明変数と残差が従属する」という Darrois-Skitovich の定理の対偶に基づく統計的性質を考慮するために必要な仮定である。

p 種の観測変数 x_1, x_2, \dots, x_p に関する LiNGAM モデルは、式(1)で定式化される。

$$x_i = \sum_{j \neq i} b_{ij} x_j + e_i \quad (i = 1, \dots, p) \quad (1)$$

ここで、 b_{ij} は推定される係数、 e_i は誤差変数をあらわす。 x_i は、 i 以外の観測変数 $x_j (j = 1, \dots, j \neq i)$ とその誤差変数 e_i の重み b_{ij} 付きの線形和である。なお、誤差変数 e_i は独立で、非ガウス連続分布に従うと仮定する。行列を使うと、式(1)は式(2)と表される。

$$\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (2)$$

\mathbf{x} , \mathbf{B} , \mathbf{e} は、それぞれ観測変数 x_i 、係数 b_{ij} 、誤差変数 e_i を表す。 \mathbf{B} のゼロ・非ゼロパターンから、変数間の因果

関係を表す因果グラフを作成する。同グラフでは、四角は観測変数を、矢印は因果を表しており、矢印の出る変数は原因、矢印の入る変数は結果である。

LiNGAM モデルの推計は、清水¹⁰⁾の提案した独立成分分析によるアプローチに則って行う。独立成分分析は、多変量系列を、非ガウス分布を持つ成分の混合によって記述する統計手法である。LiNGAM の推計は、本来変数間の独立性の検証によって行う方が自然だが、非ガウス成分をシステマティックに抽出できる ICA を用いることによって、効率的に因果構造を探索できるという利点がある。以下に推計手順の概要を示す。

式(2)の係数行列 \mathbf{B} を左辺に移項して、左から $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}$ を乗じて、式(3)を得る。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{e} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{A} = (\mathbf{B} - \mathbf{I})^{-1}$ である。 p 次元の誤差変数ベクトル \mathbf{e} の成分は独立で非ガウス分布に従うので、式(3)は独立成分分析（以下 ICA）の混合行列 \mathbf{A} から $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{A}$ を満たす行列として求められる。 $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{A}$ を満たすには、行の順序と尺度を一意に決定しなくてはならない¹⁰⁾。そこで、LiNGAM モデルの仮定に基づいて行の順序を決定する置換行列 \mathbf{P} と、行の尺度を決定する対角行列 \mathbf{D} を探索し、 $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{DPA}$ として係数行列 \mathbf{B} を得る。

ただし、ICA には推定誤差が存在するため、 \mathbf{B} の要素は、モデルに含まれる任意の 2 変数の真の関係が独立であっても、その部分の係数が正しく 0 となるとは限らない。そこで、 \mathbf{B} からゼロ・非ゼロパターンを得るため、変数を因果的順序に並び替え、目的変数よりも因果的順序が上流に位置する全ての変数を説明変数にとって、Lasso による回帰を行う。Lasso とは、線形回帰モデルの推定と変数選択を同時に実行する手法である¹¹⁾。以上の手順で LiNGAM モデルの推計を行う。さらに、推計した係数行列 \mathbf{B} のゼロ・非ゼロパターンに基づき、因果グラフを作成する。なお、推計には Python のプログラムを使用した。プログラムの作成では、ICA の推定法では代表的な FastICA を、置換行列の探索にはハンガリアン法を用いて割当問題を解く munkres ライブラリを、Lasso は scikit-learn ライブラリから、それぞれ使用した。

4. 分析対象及び使用データ

本研究では、平成 27 年 3 月に全線開通した尾道松江線を分析対象とした。尾道松江線は、広島県尾道市を起点とし、中国山地を横断して島根県松江市を終点とする延長約 137km の自動車専用道路であり、新直轄方式で整備された。その計画は昭和 62 年 9 月に始まり、平成 22

年 11 月から順次開通し、平成 27 年 3 月 22 日に全線開通した。この道路整備は、沿線地域の社会経済・生活文化の発展に大きく寄与することが期待されている。推計に用いたデータの詳細を以下に示す。

期間：平成 22 年と平成 27 年

範囲：鳥取県・島根県・岡山県・広島県の 61 市町村
変数：経済成長の指標として以下の 9 変数とアクセス指標を使用、就業者数／人口／総生産／地価（住宅）／地価（商業）／地価（全用途）／固定資産税／市町村住民税／事業所数

データの出典は、人口・就業者数：国勢調査、総生産：市町村計算、地価：公示地価、税金：地方財政状況調査、事業所数：経済センサスである。なお、一部のデータは観測年次が平成 22 年、27 年とは異なっていた。そこで直近のデータとして、平成 21 年、あるいは平成 28 年の値を用いている。以上のデータを用いて 61（市町村）×10（変数）のデータ行列を 2 年分作成した。

本研究ではアクセス指標について感度分析を行う。アクセス指標は、地域間所要時間の逆数を、分析対象とするその他全地域に関する和として定義した。分析に用いる微小な変化量は、「地域 i から j への所要時間の 1.00% の減少」とする。これによる指標上の感度の推計値は、式(4)から算出できる。

$$\frac{\Delta AC_i}{AC_i} = \frac{\sum \frac{1}{(t - \Delta t)^2}}{\sum \frac{1}{t^2}} = \frac{\sum t^2}{\sum (t - \Delta t)^2} \cong 1.0203 \quad (4)$$

式(4)より、「地域 i から j への所要時間の 1.00% の減少は、地域 i のアクセス指標の 2.03% の上昇をもたらす」ことが分かる。以下の分析結果では、この値に基づいて感度分析を行う。

5. 因果グラフの推定と考察

作成したデータ行列を用いて LiNGAM モデルの推計を行う。分析結果および得られた結果をもとに作成する因果グラフは、発表で示す。

6. おわりに

本研究は、統計的因果探索により、道路整備と経済成長の因果関係の検証を試みるものである。本研究では、プログラムを作成して LiNGAM モデルの推計を試みているが、出力される結果や使用する手法の妥当性、プログラムの精度など、検討が必要な問題が数多く存在する。この新たな分析手法の有用性および妥当性を判断するためにも、既存の問題に向き合いつつ、慎重に研究を進め

ていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省・社会資本整備審議会計画部会専門小委員会: ストック効果の最大化に向けて~その具体戦略の提言~.
- 2) 小池淳司: 道路のストック効果は計測可能なのか?, 高速道路と自動車, 第 59 巻, pp.5-8, 2016.
- 3) Aschauer, D.A.: Is public expenditure productive?, Journal of Monetary Economics, Vol.23, pp.177-200, 1989.
- 4) 林正義: 社会資本の生産性と同時性, ESRI Discussion Paper Series, No.21, 2002.
- 5) 江尻良, 奥村誠, 小林潔司: 社会資本の生産性と経済成長: 研究展望, 土木学会論文集 No.688/IV-53, 75-83, 2001.
- 6) 織田澤利守, 大平悠季: 交通インフラ整備効果の因果推論: 論点整理と展望, 第 58 回土木計画学研究発表会講演集 vol.58, S1, pp.1-13, 2018.
- 7) Duranton, G., Turner, M.A.: Urban Growth and Transportation, The Review of Economic Studies, vol.79, Issue 4, pp.1407-1440, 2012.
- 8) Holl, A.: Highways and productivity in manufacturing firms, Journal of Urban Economics, vol.93, pp.131-151, 2016.
- 9) Redding, S.J. and Turner, M.A., Transportation Costs and the Spatial Organization of Economic Activity, Handbook of Urban and Regional Economics, vol.5, pp.1339-1398, 2015.
- 10) 清水昌平: 機械学習プロフェッショナルシリーズ 統計的因果探索, 講談社, 2017.
- 11) 保科架風: Bayesian lasso によるスパース回帰モデリング, 計算機統計学, 第 25 巻・2 号, pp.73-85, 2012.

(2019.03.10 受付)

EVALUATION OF INFRASTRUCTURE STOCK EFFECT BY CAUSAL DISCOVERY

Go SUGIHARA and Makoto TSUKAI

In regional economic activities, the stock effect brought by road infrastructure may not always follow the fundamental economic theory since the technological innovation would surely occur after the investment. Therefore, finding on causal relationship between the actual regional characteristics is the big issue to understand how infrastructure stock effects appear. In the past studies, the causal structure of the variables was assumed on the basis of economic insights and validity of economic theory. In this study, the causal relationship between improvement of accessibility by road improvement and economic growth is found by the statistical characteristics of the data, called causal discovery. Causal discovery requires no assumption on causal structure, but purely investigate the independence among the variables. The proposed procedure in causal discovery is applied to confirm the validity.