

社会基盤の統計的因果探索によるストック効果の検証

広島大学 学生会員 ○杉原 豪
 広島大学 正会員 塚井 誠人

1. 背景・目的

1990年代以降、社会基盤整備の意思決定は、費用便益分析に基づいて行われてきた。費用便益分析は、経済学的な省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、事業効果の予測値と事業後の観測値の間では、常に乖離が生じる。これは多くの場合、技術水準や施設立地等に関する予測の前提が崩れるためである。一方で実際に発現した効果を計測し、想定した因果構造の妥当性を事業後に検証することは、これまで行われていない。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、ストック効果を積極的に把握し、「見える化」することで、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。

本研究では道路整備による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 & Turner⁷⁾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

キーワード ストック効果、アクセス性、経済成長、統計的因果探索、LiNGAMモデル

連絡先 〒739-0046 広島県東広島市鏡山1丁目4-1 A2-543 広島大学大学院工学研究科 地球環境計画学研究室

TEL 082-424-7825

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計量経済学の手法は、分析に先立って仮定される経済学的知見や経済理論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、因果構造の妥当性は検証できない。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として論じられることの多いアクセス性の向上と経済成長の関係を中心にして、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。

統計的因果探索は統計的因果推論を構成する手法であり、近年では因果グラフが推測できる手法 LiNGAM

(Liner Non-Gaussian Acyclic Model 線形非ガウス非巡回モデル) が提案されている。LiNGAM の推定手法では、まず変数間の因果的順序を求め、それに基づいて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。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 は、因果が循環的に発生する変数組を、許容しないことを表す。また Non-Gaussian とは、「誤った因果的順序でモデルを推計すると、説明変数と残差が非独立となる」という Darmois-Skitovich の定理 (以下 DS 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} は推計される係数、 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

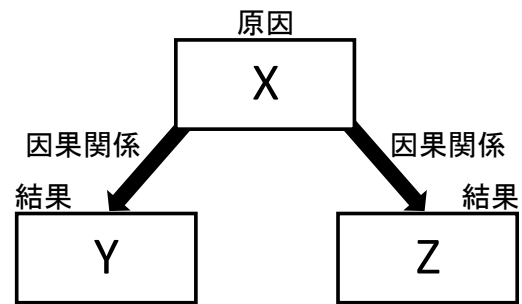


Fig.1 因果グラフの例

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。例を Fig.1 に示す。同図では、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、DS 定理によると x_j と残差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ムティックに抽出できる ICA を用いれば、効率的に因果構造を探索できる。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、 $\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}$ 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。ただし ICA は、行の順序に不定性がある。また変数の尺度は係数の大きさに影響される¹⁰⁾。そこで、 $\mathbf{A}$ から変数の因果的順序を得るには、変数の順序を定める置換行列 $\mathbf{P}$ と、行の尺度を調整する対角行列 $\mathbf{D}$ を探索して、 $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{DPA}$ 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。このため、 $\mathbf{B}$ の要素は、 x_i と $x_j (j \neq i)$ 真の関係が独立でも、その部分の係数が正しく 0 となるとは限らない。そこで、 $\mathbf{B}$ の係

数推定値を因果グラフの係数とするのではなく、以下の手順によりまず変数を因果的順序に並び替える。その上で、目的変数よりも因果的順序が上流の全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。一連の手順のよって得られた **B'** に基づき、因果グラフとその係数を得る。なお、推計には Python のプログラムを使用した。アルゴリズムとして、ICA の推定に代表的な FastICA を、置換行列の探索には munkres ライブラリのハンガリアン法を、Lasso は scikit-learn ライブラリのパッケージを、それぞれ使用した。

4. 分析対象及び使用データ

平成 27 年 3 月に全線開通した尾道松江線を分析対象とする。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。路線計画は昭和 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。推計に用いたデータの詳細を **Table.1** に示す。なお、地域 i のアクセス指標 AC_i は式(4)で定義する。

$$AC_i = \frac{P}{t_i^2} \quad (4)$$

ここで、 i は地域、 P は尾道市の人口、 t_i は i から尾道市への自動車での所要時間である。

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 時点分作成し、その差分を推計に使用する。なお、地域 i から尾道市への所要時間の 1.00% の減少は、以下の式(5)より、アクセス指標の 2.03% の上昇をもたらすことがわかる。

$$\frac{\Delta AC_i}{AC_i} = \frac{\frac{P}{(t - \Delta t)^2}}{\frac{P}{t^2}} = \frac{t^2}{(t - \Delta t)^2} \cong 1.0203 \quad (5)$$

5. 因果グラフの推計と考察

作成したデータ行列を用いて LiNGAM モデルの推計を行った。得られた結果を **Table.2** に示す。なお、表の 1 列目は Lasso を適用する回帰モデルの目的変数であり、因果的順序に従って並んでいる。2 列目は決定係数、3 列目以降が説明変数と、その下の値が

Table.1 データの詳細

期間※	平成 22 年と平成 27 年
範囲	鳥取県, 島根県, 岡山県, 広島県のデータ欠損のない 61 市町村
変数***	就業者数 (国勢調査) 人口 (国勢調査) 総生産 (市町村民計算) 地価 (住宅) (公示地価) 地価 (商業) (公示地価) 地価 (全用途) (公示地価) 固定資産税 (地方財政状況調査) 市町村民税 (地方財政状況調査) 事業所数 (経済センサス) アクセス指標

※観測年次が異なるデータは直近のデータとして平成 21 年、

平成 28 年の値を用いている

※※括弧内はデータの出典を表す

目的変数に対する偏回帰係数である。**Table.2** に基づいて作成した因果グラフを **Fig.2** に示す。図中の黒矢印は正、青の矢印は負の偏回帰係数を、それぞれ示す。なお、同図は矢印を見やすくするため、変数を囲む四角を省略している。

Fig.2 より、アクセス指標は因果的順序の上流側に位置し、かつアクセス指標に入る矢印がない。また、アクセス指標を原因とする (アクセス指標から出る) 全ての偏回帰係数は、正である。つまり、アクセス指標の改善は他の変数を増加させる原因だが、その逆はおこらないことが明らかとなった。アクセス指標から出る因果グラフは、市町村民税を除くすべての変数につながっている。

Table.2, **Fig.2** から、アクセス指標の変化が他の変数に与える影響を推計する。影響の大きさは、アクセス指標からある変数につながる全てのパスの積の和を求める。例えば、アクセス指標から人口への影響は、アクセス指標から就業者への偏回帰係数と、就業者から人口への偏回帰係数の積である。結果を **Table.3** に示す。4 列目の値が必要な偏回帰係数の積の和であり、5 列目は、地域 i から尾道市への所要時間が 1.00% 減少した際の各変数の変化量である。**Table.3** は、アクセス性の向上は、市町村民税及び総生産以外の変数、特に事業所数を増加させること、総生産を減少させること、市町村民税の増減に関わらないことを示している。

Table.2 LiNGAM モデルによる推計結果

目的変数	決定係数	説明変数と偏回帰係数									
アクセス指標		アクセス指標									
市町村民税	0	0	アクセス指標								
就業者	0.239	0.448	0.013	アクセス指標							
人口	0.940	0.820	0.08	0	アクセス指標						
事業所数	0.609	0.036	0	-0.692	0.054	アクセス指標					
地価(全用途)	0.123	0	0	0	0.233	0.079	アクセス指標				
総生産	0.856	0	-0.526	0	0.088	0.301	0	アクセス指標			
地価(商業)	0.510	0	0.614	0.035	0	-0.048	0	0	アクセス指標		
固定資産税	0.748	0	-0.083	0	0.686	0	0.124	0.062	アクセス指標		
地価(住宅)	0.596	0.173	0.011	0	0.643	0	0	0	0.019	アクセス指標	

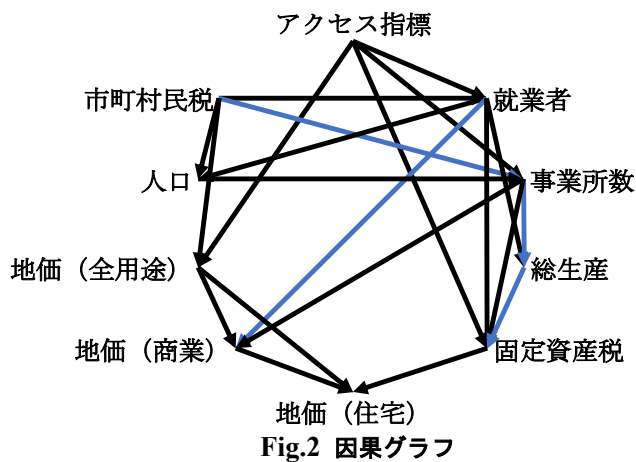


Table.3 アクセス指標から各変数への影響の大きさ

変数	パス	各パスの値	合計	変化量(%)
就業者	アクセス指標→就業者	0.013	0.013	0.02639
人口	アクセス指標→人口	0.011	0.011	0.02164
事業所数	アクセス指標→事業所数	0.054	0.054	0.110399
地価(全用途)	アクセス指標→地価(全用途)	0.079	0.079	0.16037
総生産	アクセス指標→就業者→総生産	0.001	-0.027	-0.05534
地価(商業)	アクセス指標→地価(全用途)→地価(商業)	0.049	0.050	0.101064
固定資産税	アクセス指標→事業所数→地価(商業)	0.002	0.062	0.209459
地価(住宅)	アクセス指標→固定資産税	0.002	0.051	0.140466
	アクセス指標→就業者→固定資産税	0.002	0.001	
	アクセス指標→事業所数→固定資産税	0.037	0.018	
	アクセス指標→総生産→固定資産税	0.002		
	アクセス指標→地価(全用途)→地価(住宅)	0.051		
	アクセス指標→地価(商業)→地価(住宅)	0.001		
	アクセス指標→固定資産税→地価(住宅)	0.018		

6. 結論

本研究では、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行った。その結果、アクセス指標は他の変数から決定される内生変数ではなく、因果グラフ上では外生変数に当たること、また市町村民税以外の変数を左右する要因となっていることが明らかになった。また、アクセス性の向上は、市町村民税および総生産以外の変数を増加させること、総生産を減少させることが明らかになった。

本研究では、アクセス性の向上は総生産の減少をもたらす、という結果となったが、これは一般的な経済理論に反する。今後の課題として、推計を行うプログラムの精度向上、他の変数選択法を適用してその結果を比較し、一般的な経済理論と照らし合わせることで最良の手法を選択することが挙げられる。

参考文献

- 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～。
- 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.

- Aschauer, D.A.: Is public expenditure productive?, Journal of Monetary Economics, Vol.23, pp.177-200, 1989.
- 林正義：社会資本の生産性と同時性, ESRI Discussion Paper Series, No.21, 2002.
- 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.
- 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.
- Duranton, G., Turner, M.A.: Urban Growth and Transportation, The Review of Economic Studies, vol.79, Issue 4, pp.1407-1440, 2012.
- Holl, A.: Highways and productivity in manufacturing firms, Journal of Urban Economics, vol.93, pp.131-151, 2016.
- 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.
- 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.
- 保科架風：Baysian 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.