

統計的因果探索による 社会基盤整備の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

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。本研究では特に道路整備による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

1990年代以降の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、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、基本的には同一のロジックに基づいている。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、実際には予期しない事象や、別の事業の間接的な波及効果等の影響のため、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。

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、これまでほとんどなかった。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、モデル構造を根本的に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べき、と考えられる。ただしその実現には、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。具体的には、1)経済モデルによる将来便益の算出、2)実証モデルから得られる知見の照査と、3)両実証モデルから得られる便益の精査、という一連のプロセスが必要である。本研究ではこの中でも特に、実証モデルから経済理論が想定する因果構造を再検証する2)のステップに関して、検討を行う。

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、州間高速道路が1983 から 2003 年のアメリカの都市の成長に与える影響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、Holl⁷⁾は、1997-2007 年のスペインの製造業に関わる企業を対象に、企業の生産性に対して高速道路へのアクセスが及ぼす影響について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は集積の効果以上に企業レベル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という高速道路の影響の著しい不均一性を示した。Redding and Turner⁸⁾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。その結果、高速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、交通インフラの効果は分析の規模や対象都市の経済状況に影響を受けにくいこと、交通インフラの変化の影響は交通機関・産業に

よって様々であることなどを明らかにした。

操作変数法に代表される統計的因果推論は、主として変数の内生性などに起因して起こる計量経済学的な問題の解消を目指している。その際に実証分析で用いられるモデルは、経済学的知見や経済理論上の妥当性に基づいて設定される。しかしながら、たとえば投入要素の固定性・可変性の議論から明らかなように、短期または長期では、変数の外生・内生の別は異なる可能性がある。しかし短期、長期とはどの程度かは、少なくとも経済理論に基づいて明らかにすることはできない。さらに複数の変数間の因果関係について、実証モデルから発見的に複数の変数間因果の同定を行う場合は、従来の統計的因果推論の枠組みでは、モデル構造に対する先験的な仮定が強すぎると思われる。同様の限界は、差の差法などの計量経済手法に対しても指摘できる。

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。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、「説明変数と残差が独立ならば、推計は正しい因果的順序で行われている」という Darmois-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。例を図-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 (Independent Component Analysis, 以下 ICA) 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ム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、 $\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}$ 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、以下の手順により、まず変数を因果的順序に並び替える。非巡回の仮定より式(2)の $\mathbf{B}$ は、因果的順序に従って変数が並んでいる場合、対角及び上三角成分が0となる。あるいは、対角及び上三角成分の絶対値の和が最小となる時、変数は因果的順序に従って並んでいる。

しかし、本研究で使用したアルゴリズムの性質上、変数順序の初期配置によって結果が変化するため、初期配置の候補全て (n 変数の場合、 $n!$ 通り) で推計し、その頻度分布に基づいて因果的順序を決定する。

以上の手順で求めた因果的順序を基に、目的変数よりも因果的順序の早い全変数を説明変数にとって、Lasso

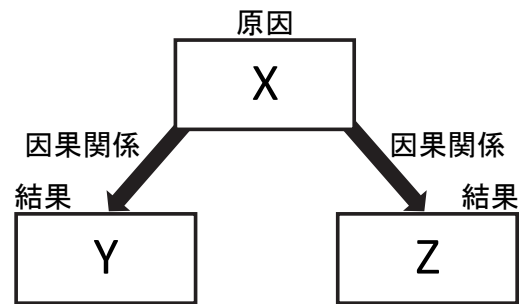


図-1 因果グラフの例

表-1 データの詳細

期間*	平成 17 年, 22 年, 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 事業所数/経済センサス 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 域内アクセス指標/NITAS 域外アクセス指標/NITAS Δ域内アクセス指標/NITAS

*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 年の値を用いる

**※以下はデータの出典を表す

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。

なお本論文は社会基盤整備のストック効果を統計的に検証する手法の提案と実証的な知見の獲得を目的としている。一方で結果の妥当性については、データおよび手法の両面から、本アプローチの妥当性について、さらなる研究蓄積の必要性があることに留意いただきたい。

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

表-2 Lasso 回帰の結果 (平成 17 年-22 年)

目的変数	決定係数	説明変数と偏回帰係数								
		就業者	Δ 域内アクセス	人口	地価(商業)	地価(住宅)	域内アクセス	総生産	事業所数	域外アクセス
就業者		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ 域内アクセス	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
人口	0.990	0.900	0	0	0	0	0	0	0	0
地価(商業)	0.764	0.724	0.184	0	0	0	0	0	0	0
地価(住宅)	0.753	0	0.238	0	0.642	0	0	0	0	0
域内アクセス	0.677	-0.248	0.247	0	0	0.586	0	0	0	0
総生産	0.983	0	0	0.897	0	0	0	0	0	0
事業所数	0.987	0.898	0	0	0	0	0	0	0	0
域外アクセス	0.268	0	0	0	0.033	0	0	0	0.398	0

表-3 Lasso 回帰の結果 (平成 22 年-27 年)

目的変数	決定係数	説明変数と偏回帰係数								
		就業者	Δ 域内アクセス	人口	総生産	地価(商業)	事業所数	域外アクセス	地価(住宅)	域内アクセス
就業者		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ 域内アクセス	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
人口	0.990	0.900	0	0	0	0	0	0	0	0
総生産	0.983	0	0	0.897	0	0	0	0	0	0
地価(商業)	0.704	0.070	0.014	0	0.674	0	0	0	0	0
事業所数	0.987	0.898	0	0	0	0	0	0	0	0
域外アクセス	0.268	0	0	0	0	0.033	0.398	0	0	0
地価(住宅)	0.685	0	0.055	0	0	0.723	0	0	0	0
域内アクセス	0.661	0	0	0	0	0	-0.308	-0.057	0.773	0

表-4 Lasso 回帰の結果 (平成 17 年-27 年)

目的変数	決定係数	説明変数と偏回帰係数								
		就業者	域外アクセス	人口	Δ 域内アクセス	総生産	事業所数	地価(商業)	域内アクセス	地価(住宅)
就業者		0	0	0	0	0	0	0	0	0
域外アクセス	0.251	0.411	0	0	0	0	0	0	0	0
人口	0.990	0.900	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ 域内アクセス	0.006	0	0	0.027	0	0	0	0	0	0
総生産	0.915	0	0	0.862	0	0	0	0	0	0
事業所数	0.986	0.746	0	0.152	0	0	0	0	0	0
地価(商業)	0.793	0	0.007	0	0.235	0	0.710	0	0	0
域内アクセス	0.426	0	0	0	0.561	0	0	0	0	0
地価(住宅)	0.827	0	0	0	0	0	0	0.619	0.338	0

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。推計には、表-1 にデータの詳細を示す変数を用いる。なお、地域 i のアクセス指標 AC_i は、以下の式(4)で定義する。

$$AC_i = \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{t_{ij}^2} \quad (4)$$

ここで、 ij : 地域、 t_{ij} : i から j への自動車での所要時間、 n : 地域数、 P_j : 地域 j の人口である。

また、域内アクセス指標は推計を行う市町村間のアクセス性、域外アクセス指標は西日本の県庁所在地へのアクセス性、Δ域内アクセス指標は 2 時点の域内アクセス指標の差分である。以上のデータを用いてデータ行列を

3 時点分作成し、推計に使用する。以上の手順から明らかのように、LiNGAM モデルは純粋に統計的な手法のため、実施手順を通じて経済モデルの改善に資する知見を得るには、分析者自身が作業仮説を設定する必要がある。そこで本研究では、分析に用いる変数のうち、就業者、人口、事業所を地域特性を表す社会経済変数、総生産、地価(住宅)、地価(商業)を経済パフォーマンス変数、その他をアクセス関連変数と分類したうえで、基本的に社会経済変数→経済パフォーマンス変数の因果の下で、アクセス関連変数→社会経済変数、またはアクセス関連変数→経済パフォーマンス変数の因果関係が得られる、という因果仮説の検証を行う。

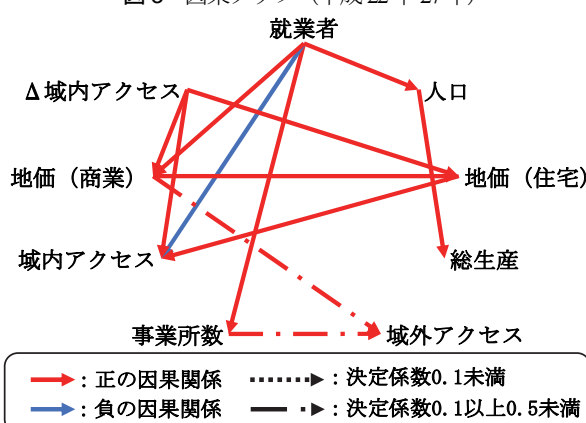
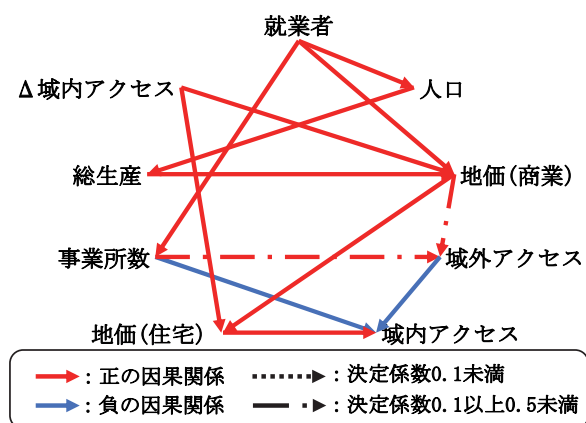
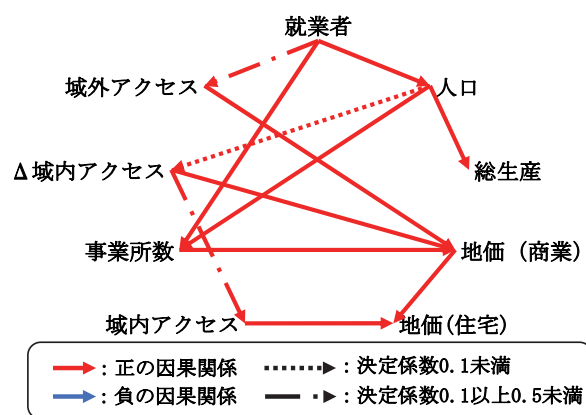
5. 因果グラフの推定と考察

作成したデータ行列を用いて LiNGAM モデルの推計を行う。本研究では平成 17 年—22 年間、平成 22 年—27 年間、平成 17 年—27 年間の 3 パターンで推計を行った。なお、データが入手できた平成 22 年—27 年について、全データの差分を用いて同様の手順でモデル推計を行ったところ、Lasso 回帰モデルの決定係数が極めて低くなり、統計的な安定性が確保できないことが判明した。この結果は、読者の便のために付録にまとめて示す。

以下の分析では、アクセス改善が経済パフォーマンスの改善につながることを明らかにするため、域内他都市へのアクセス改善のみ、前時点との差分を取り、その他の変数は後時点の値をそのまま用いることとして、実証分析を行った。域内アクセスのみを差分とする分析であっても、 Δ 域内アクセスから他の変数へのパスは、道路整備の効果の大小が現在の指標を左右する要因となっていることを表すため、道路整備の効果と解釈することが可能である。なお第一段階で推計する ICA は、その係数の絶対値の大きさが因果的順序を大きく左右する。この点を考慮して本分析では、全変数をあらかじめ基準化（各観測から標本期待値を差し引き、標本分散で除する）することによって、変数のスケールに起因する ICA 係数の問題を回避した。またこの操作により、全変数の期待値はゼロとなるため、後段の Lasso 回帰モデルには、定数項は付さないこととした。

因果的順序は、初期配置の異なる推計を繰り返し、結果的に現れた因果的順序を記録し、出現回数が最多の因果的順序を採用した。なお、出現回数が同数となっている因果的順序は、Lasso 回帰を行い、最も決定係数が高くなる因果的順序を採用した。推定結果を表-2、表-3、表-4 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 列目以降は説明変数であり、表中の係数値は、対応行の目的変数に対する、対応列の説明変数に関する偏回帰係数である。すなわち同表において回帰モデルは、各行ごとに推計する。表-2、表-3、表-4 に基づいて作成した因果グラフをそれぞれ図-2、図-3、図-4 に示す。図中の赤矢印は正、青の矢印は負の効果であることを、それぞれ示す。なお、同図は矢印を強調するため、変数を囲む四角を省略している。

図-2、図-3、図-4 には、「就業者→人口→総生産」、「 Δ 域内→地価」へのパスが共通して見られる。前者は、社会経済変数→経済パフォーマンス変数という因果仮説を支持している。一方で後者は、アクセス関連変数→経済パフォーマンス変数の因果仮説を支持している。一方で、アクセス関連変数→社会経済変数の因果関係は支持されず、アクセス関連指標は外生か、あるいは同時点の



アクセス性については、内生変数の可能性が示唆された。またいずれの因果グラフにおいても、総生産への影響要因は、就業者と人口のみが現れており、アクセス関連変数の変化による総生産の変化は起こらないことを示している。

地価の向上は将来の期待収益の上昇によるものであることを踏まえると、「 Δ 域内→地価」の因果関係は、内→総生産」の関係は認められなかったため、本研究で示された結果は社会基盤の整備と経済成長の因果関係の存在を支持しない。

アクセス指標の変化が、地価には影響するものの、経済成長の指標となり得る総生産に影響しないという結果

は、先に述べたように地価が将来の期待収益の現在価値に左右される指標であるのに対して、総生産は実体経済の活動水準を表す指標であることが影響している可能性がある。すなわち、外的要因の変化に対して素早く反応する変数と、やや遅れて反応する変数の違いが現れた可能性がある。

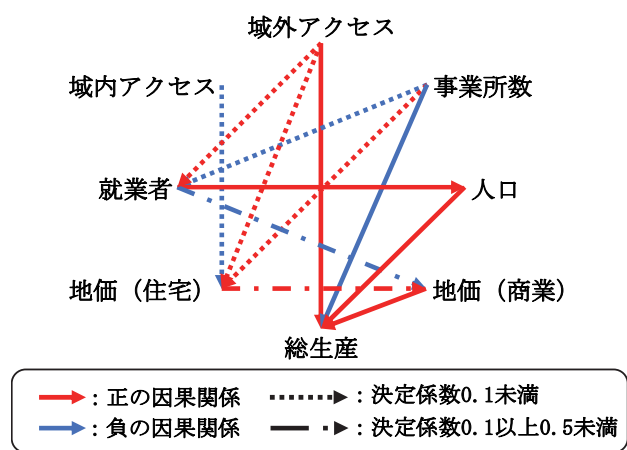
6. おわりに

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試みた。その結果、アクセス性の改善は地価の向上をもたらし、総生産の増減に関係しないこと、総生産の増減は人口・就業者の増減のみに影響されるという因果関係を統計的手法により示した。

本研究では、LiNGAMモデルの推計のため、因果的順序を得るアルゴリズムを作成したが、初期配置が順序推計に影響するという課題が解消できなかった。このため、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、投入する変数の選択など、検討が必要な問題が多く存在する。課題としては、時間的・空間的なデータの拡充が挙げられる。今回の推計では、域内アクセス指標は、推計を行う地域内のみでのアクセス性を考慮しており、境界付近の市町村のアクセス性が低く評価されるという問題がある。また、今回の推計では経済成長の指標として総生産を用いているが、全要素生産性等の他の指標の使用の検討や、就業者が増える要因の推察も必要である。さらに、推計期間は、5年と10年で推計を行ったが、この期間でストック効果が発現していない可能性が考えられる。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。

付録：全データの差分を用いたモデル推計

平成22年—27年について、全データの差分を用いて同様の手順でモデル推計を行い、結果に基づいて作成した因果グラフを付図-1に示す。



付図-1 因果グラフ（全変数差分：平成22-27年）

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～，2020/1/8 アクセス，<https://www.mlit.go.jp/common/001157163.pdf>
- 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，内閣府経済社会総合研究所，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, pp. 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，土木学会論文集，Vol. 75, No. 5, pp. I_1-I_15, 2019.
- 7) Duranton, G. and 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：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.

(Received June 21, 2019)

(Accepted January 14, 2020)

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.