

2020 年度 博士学位請求論文

Spatial Stochastic Frontier Models  
(空間確率フロンティアモデル)

塚本高浩

要約

本研究の目的は、生産活動が空間的に相互依存である状況下においても生産性・効率性・フロンティア関数（生産関数や費用関数）・空間的相互依存の大きさを推定できる計量経済学的な分析手法を開発することである。

生産活動は、集積の経済に代表されるような外部性の存在等によって空間的に相互依存関係であることが考えられる。しかしながら、計量経済学的な生産性・効率性分析手法である確率フロンティアモデルの基本モデルでは、生産活動の空間的な独立を仮定しており、推定値にバイアスが含まれる可能性がある。そこで、空間計量経済学の知見を導入することによって空間的相互依存関係を許容した確率フロンティアモデルが近年提案されている。これらのモデルは一般に「空間確率フロンティアモデル」と呼ばれており、2つの点で有用であると考えられる。

1つ目が、生産活動が空間的に相互依存している場合においても生産性・効率性・フロンティア関数を、従来の非空間確率フロンティアモデルよりも（仮定と矛盾せず）適切に推定できることである。2つ目が、生産活動が空間的に相互依存しているかどうかを統計学的に検定することや、空間的相互依存の大きさを推定することが可能になることである。

既存の空間確率フロンティアモデルの多くの研究では、1つ目の点に焦点が当てられており、経済学的にも重要な空間的相互依存の大きさが正しく推定できるかどうかに関しての議論がなされていない。このことは、空間的相互依存が存在するかどうかの統計学的な仮説検定の信憑性にも影響を及ぼすので問題である。そこで本研究では、空間的相互依存の大きさをより正しく推定できる空間確率フロンティアモデルを開発し、実際に我が国のデータを用いた実証分析を行う。本論文の構成と概要は下記の通りである。

第1章「Introduction」では、生産性・効率性分析をすることの意義や基本的な分析手法、生産活動の空間的相互依存の概念を導入したのちに、先述したような本研究の全体の意義に関して整理する。

第2章「Review of Existing Statistical Models」では、確率フロンティアモデル、空間計量経済学モデルに関して概説した上で、空間確率フロンティアモデルを体系的に整理し、特徴や問題点を明らかにする。

経済学で定義される生産関数は、生産要素のインプットと生産物の技術的可能な最大のアウトプットとの関係を表す関数であり、費用関数は一定のアウトプットを生産するために要する最小費用の関数である。よって生産関数も費用関数も実現可能集合のフロンティアであり、ミクロ経済学が仮定するような合理的行動を生産者がするならば、フロンティア上で生産活動が行われているはずである。しかしながら、実世界から得られた観測データを見ると、必ずしも生産者はフロンティア上で生産活動を行っていない。確率フロンティアモデルは、このフロンティアからの乖離を「非効率性」として明示的に取り入れることで、フロンティアと非効率性の推定を行う計量経済学的手法である。このモデルの特徴は、通常のノイズを捉える確率変数と非効率性を説明する確率変数を持つことである。

確率フロンティアモデルを含む多くの計量経済学モデルは、一般に、観察の対象になる経済主体が互いに独立した関係にあると仮定している。生産行動に関して効率性を分析しようとする場合、地理的に近接する生産者は様々な外部性の存在によって依存した関係にあることが考えられるならば、経済主体は互いに独立した関係にあるとするこの仮定は不適切である。空間計量経済学は、特に、経済主体が空間的に相互依存した関係にあることを前提としたうえで、それらの行動をモデルによって捉えて推定しようとする計量経済学のサブフィールドである。

空間計量経済学の基本モデルは、説明変数の空間構造を導入する spatial lag of X model (SLX)、被説明変数の空間的自己回帰構造を導入する spatial autoregressive model (SAR) と誤差項に空間構造を導入する spatial error model (SEM)の3つのモデルおよびそれらの統合モデルである。

確率フロンティアモデルに空間計量経済学モデルを導入したモデルがいくつか提案されている。本章では、これらのモデルを導入された空間計量経済学モデルの区分で体系的にまとめるとともに、各モデルの特徴と問題点を整理する。より具体的には、空間確率フロンティアモデルを、3つの空間計量経済学基本モデルの分類に沿って、空間説明変数ラグ確率フロンティアモデル (Spatial lag of X stochastic frontier models; SLXSF)、空間自己回帰確率フロンティアモデル (Spatial autoregressive stochastic frontier models; SARSF)、空間非効率性確率フロンティアモデル (Spatial inefficiency stochastic frontier models; SIESF)に整理し、それぞれの特徴を明らかにする。なお、通常の線形モデルでの誤差項は、経済学的な意味をほとんどもたないが、確率フロンティアモデルでは、誤差項を構成する1つである非負の確率変数が、非効率性という重要な意味を持つ。そこで本章では、ある地域の非効率性が周辺他地域の諸変数に与える影響も併せて議論する。

第3章「Spatial Autoregressive Stochastic Frontier Model for Panel Data Incorporating a Model of Technical Inefficiency: Application to Japanese Manufacturing Industry」は、空間自己回帰確率フロンティアモデルに関する研究であり、被説明変数の空間ラグ項および非効率性の決定要因モデルが導入された確率フロンティアモデルを提案し、提案モデルを用いて我が国の製造業において生産活動の空間的相互依存が存在しているか否かを分析したものである。

計量経済学的な生産性・効率性の分析手法である確率フロンティアモデルの既存モデルでは、空間的相互依存と非効率性の決定要因が同時に存在する場合、一致推定量が得られない。単純に空間計量経済学の空間自己回帰（SAR）モデルの構造を確率フロンティアモデルに導入したモデルでは、空間的相互依存する非効率性の要因変数の欠落により、空間的相互依存の大きさの過大推定を導くと考えられる。このことは、産業クラスター政策といった産業集積促進政策の根拠となる集積の外部効果を過大推定することにつながるため、問題である。よって本研究では、空間的相互依存と非効率性の要因の存在を考慮したより正しい生産性の分析手法を提供した。具体的には、Battese and Coelli (1995, *Empir. Econ.*)が提案した空間的相互依存を考慮しない確率フロンティアモデル（BC95）と空間計量経済学の知見を統合し、非効率性の要因モデルを導入した空間自己回帰確率フロンティアモデルを開発した。空間的相互依存に対処するために導入する被説明変数の空間ラグ項は内生的であるため、それに対処した最尤推定法を提示した。また提案モデルの妥当性を示すために、製造業の都道府県別データで生産関数を推定し、既存モデルと比較した。なお、空間的相互依存と非効率性の要因の存在を同時に考慮し、空間的相互依存の大きさを正しく推定しようとする本研究の試みは初である。また、BC95やGlass et al. (2016, *J. Econom.*)など多くの既存モデルを提案モデルは特殊形として包括し、容易にモデル選択のための統計学的な検定が行える特徴を有する。

実証分析の結果、統計学的に提案モデルが支持され、我が国の製造業の生産活動は地理的に近接している生産者間で生産性に対する正の効果を互いに与えていることが示された。このことは産業集積促進政策を支持するものである。また既存モデルは非効率性の要因モデルの欠落により空間的相互依存の大きさや規模の経済の指標の過大な推定を導き、効率性スコアの分布や順位にも影響を及ぼすことが示された。提案モデルはこうしたバイアスを除去し、より正しく生産性・効率性および空間的相互依存の大きさの推定・検定が可能である。我が国を含めた世界各国で産業集積誘導政策が推進されているが、提案モデルを用いて空間重み行列を工夫した上で分析を行うことにより、生産性向上に効果的な産業集積形態に関する分析が可能であると考えられる。

第4章「Endogenous Inputs and Environmental Variables in Battese and Coelli's (1995) Stochastic Frontier Model」は、確率フロンティアモデルにおける内生変数の対処方法に関する研究であり、BC95において投入量や非効率性の要因に内生変数が存在している場合

の対処モデルを提案し、モンテカルロ・シミュレーションを用いて提案モデルの妥当性の検証を行ったものである。

BC95 は、非効率性の分布に影響を与える変数（非効率性の要因変数）を導入したモデルであり、非常に多くの実証研究で用いられている。しかし、フロンティア関数の変数や非効率性の要因変数に内生性が存在する場合、正しく推定することができない。そこで、制限情報最尤法を確率フロンティアモデルの基本モデルに適用した Amsler et al. (2017, J. Econom.)の手法を応用し、BC95 の確率フロンティアモデルで内生変数が存在する場合の対処方法を提案した。モンテカルロシミュレーションを実施し、提案手法と既存手法との比較を実施した。なお、半正規分布よりもフレキシブルである切断正規分布を非効率性の分布に仮定した確率フロンティアモデルにおいて、内生変数に対処することは初の試みである。

モンテカルロ・シミュレーションの結果、提案モデルは内生変数の問題に対処出来ており、BC95 で生じるバイアスを除去していることが示された。また、提案モデルは推定すべきパラメーターの数が既存モデルと比べて増加するが、平均平方誤差も既存モデルよりも小さく、統計学的に提案モデルが支持された。提案モデルは、何らかの変数が効率性に与える因果効果を分析することが可能であり、効率性向上施策の立案に向けた分析に有用である。

第5章「Interpretable Spatial Inefficiency Stochastic Frontier Model: Application to Local Governments」は、空間非効率性確率フロンティアモデルに関する研究であり、生産者の非効率性が空間的に相互依存していることを検出できる確率フロンティアモデルを提案し、提案モデルを用いて我が国の地方公共団体においてヤードスティック競争等によって財政非効率性の空間的相互依存が存在しているか否かを分析したものである。

非効率性の空間的相互依存を考慮した確率フロンティアモデルは、いくつかのモデルが提案されているが、A：非効率性の負の空間的自己相関を許容できない、B：非効率性の分布における0近傍の密度が極めて小さく、推定されるフロンティアの解釈が困難になる、C：検出される非効率性の空間的自己相関が、空間的自己相関する非効率性の決定要因の欠落（非効率性の見かけ上のスピルオーバー）に依るのではなく、自身の非効率性が周辺の非効率性に影響を及ぼすこと（非効率性の真のスピルオーバー）に依るものであると識別できない、といった問題がある。そこで本研究ではこれらの問題を対処するために下記に示した条件を満たす新しい空間非効率性確率フロンティアモデルを提案する。①非効率性の正だけでなく負の空間的自己相関も検出できること、②非効率性は切断正規分布に従うこと、③検出される空間的自己相関が、非効率性の見かけ上のスピルオーバーではなく、真のスピルオーバーに依るものであると識別できること。そして、地方政府間のヤードスティック競争が費用非効率性の空間的相互依存を導くことを理論的に簡単に示した上で、提案統計モデルを用いて、日本の地方政府に費用非効率性の空間的相互依存関係が生

じていることを検証する。

実証分析の結果、地方政府間でヤードスティック競争等によって費用非効率性に空間的相互依存関係が存在することを支持するものとなった。財政や地方公共サービスの供給などを含めた地方政府の活動の情報の公開が効率性の向上を導く可能性を認めるものである。提案モデルを地方政府間競争の事例に適用したが、他にも様々な分野での適用可能性を有する。例えば、地域経済学の分野では、知識のスピルオーバーによる模倣行動が産業集積地で促進されると考えられている。このような模倣行動は、非効率性の空間的相互依存を導くと考えられるので、提案モデルは有用であろうと考えられる。

第6章「Conclusions」では、第3章から第5章までのまとめ並びに本研究の限界や提案モデルの応用可能性や発展性、実世界データ循環のコンセプトを踏まえた潜在的な社会的価値に関して議論する。