多産業空間経済モデルの予測能力の検証

森　智輝[1]・瀬木　俊輔[2]

[1]非会員　神戸大学　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-0013　神戸市灘区六甲台町 1）
E-mail: 224t138t@stu.kobe-u.ac.jp

[2]正会員　工博　神戸大学准教授　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-0013　神戸市灘区六甲台町 1）
E-mail: segi@people.kobe-u.ac.jp

本研究は，複数産業を考慮した空間経済モデルを構築し，過去の日本の都道府県別・産業別就業者数と道路網のデータを適用してその説明力を検証する．構築するモデルは，地域間の交通費用を与件として，地域別・産業別の就業者数と賃金を出力する体系となっている．1985 年から 2005 年までのデータを用いてモデルのパラメータを推定したうえで，2015 年の道路網から評価される交通費用を与件として 2015 年のデータを予測し，説明力を検証する．さらに，モデルを用いた With-Without 分析により，高速道路の整備が地域経済に与える影響を産業ごとに評価することを試みる．

Key Words: *stock effect, Quantitave Spatial Economics, traffic assignmet, Tomei Expressway*

1. はじめに

これまで日本では，1962 年の全国総合開発計画（一全総）から 1998 年の 21 世紀の国土のグランドデザイン（五全総）までに渡る五次の全国総合開発計画が策定され，それらに基づいて全国にインフラ整備がなされてきた．特に高速道路を始めとする幹線道路網の整備は沿線の人口集中や地方への工場の進出等の経済活動の拡大を促し，太平洋ベルト地域を中心とする現在の国土軸を形成した．2009 年の国土形成計画 [1]からは，国土は成熟を迎え人口減少や地方の過疎化という課題に対して，量的な「開発」を基調とした国土計画からより質的な向上を目指す方針に転換した上で，引き続きインフラ整備が行われている．現在では高規格幹線道路（一般にいう高速道路）が地方圏を中心に整備が進められており，2023 年時点で計画の 88%が整備済となっている [2]．

このような高速道路を始めとする道路整備は，人やモノの地域間の移動時間（旅行時間）を短縮させ日本全体の経済に影響があるとされる．しかしながら，道路整備事業の実施の可否を判断する基準として用いられている費用便益比（B/C）による評価において，便益として計上されているものは，走行時間短縮便益，走行経費減少便益，交通事故減少便益の 3 便益であり [3]，公共事業実施による雇用創出や地域経済の活性化，新規交通網の整備による人口分布や産業構造の変化など，事業実施による中長期的なマクロ経済的な効果が一切考慮されていない．社会資本の整備によって整備直後から継続的にかつ中長期にわたって得られる，人口や企業の分布など経済への効果をストック効果と呼ぶが，国土交通省が 2016（平成 28）年に策定した「ストック効果の最大化に向けて～その具体的戦略の提言～」[4]において，発現した様々なストック効果を把握し「見える化」することが国民理解の醸成に必要であるとしている．また 2020（令和 2）年の「2040 年，道路の景色が変わる」[5]（道路政策ビジョン）では，道路政策がもたらしてきたストック効果を狭義の経済効果だけでなく，人口や産業の配置等広い視点から実証し示すべきであるとしている．しかしながら，道路整備の便益評価を費用便益分析マニュアルに基づいて行う現状では，インフラのストック効果を十分に反映できていないとの指摘がなされており [6][7]，これまでのインフラ整備の国全体への波及効果が適切に認識されていない可能性がある．このような状況において，道路整備がもたらすストック効果を定量的に評価することは，効果的にかつ円滑に国土計画を策定，遂行するために重要である．こうした背景から，道路インフラの整備効果を人口分布や産業配置の観点から評価する分析手法の重要性が大きくなっている．

これらを踏まえ，本研究では多産業を設定した空間経

済モデルを用いて道路インフラ（高速道路）の整備効果（ストック効果）を推定し，その予測能力と適用性を検証することを目的とする．

以下，2 章で既往研究についてレビューし本研究の位置づけについて明示する．3 章では，本研究で用いられる空間経済モデルについて説明し，解を求めるべき連立方程式を示す．4 章では，本研究で用いられる地域間の交通費用の算出手法やその前提となる交通量配分について説明する．5 章では，本研究で用いる各データについて述べる．また，産業連関表を用いてキャリブレートするパラメータについて，その定義を説明する．6 章では，3 章で設定したモデルの各パラメータの推定手法について概説する．

2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

(1) 定量的空間経済学発展の背景

インフラ整備の効果等の政策評価手法として，空間的応用一般均衡（SCGE）分析が代表的に用いられてきた．SCGE はミクロ経済学の理論との整合性があることが利点の一つとして挙げられるが，一般に集積の経済や人口移動を仮定していないため，これらの影響を通じた長期的な効果を評価することが出来ない．

一方で，空間経済学分野では近年，詳細な経済・交通データが利用可能になったこと，計算機の能力が向上したことを背景に定量的空間経済学（Quantitative Spatial Economics；QSE）と呼ばれる分野が発展してきた [8]．QSE は空間経済学の理論に基づく数理モデルと実データを統合することで，現実の空間・交通ネットワークを対象とした経済現象の計量分析を行うことを目指している．QSE による計量分析の結果は，人口分布や産業集積の変化による経済効果など，政策の長期的効果の予測・評価に対して有用となりうるものである．QSE に基づくモデルは物流や人流・商取引等の空間的な相互作用，また集積の経済を考慮できる点で，SCGE 分析や統計学的な分析手法よりも実世界をより正確に表現できるとされる．

瀬木 [9]は Redding and Rossi-Hansberg のモデル [8]をベースに空間経済モデルを構築し，そのパラメータの推定を最尤推定法（MLE）を用いて行っている．このモデルおよび推定手法を日本の実データに適用し，空間経済モデルが賃金や人口分布といった経済活動の地理的分布をよく表現しており，MLE による推定結果を用いた分析が現実を表現するにあたって効果的であるとしている．

(2) QSE によるシナリオ分析

以下では，QSE モデルを採用して交通インフラ整備や政策実施の影響を評価した既往研究について述べる．

高山・杉山 [10]は，Pflüger and Tabuchi[11]に基づいて QSE モデルを構築し，地域間の輸送費用の減少や道路整備に関する反実仮想シミュレーションを実施している．企業が財を生産するために投入する土地の要素シェアを表すパラメータの値によって，モデルが表現できる集積のパターンが異なることを示している．広がりを持つ集積が複数箇所に形成されるパラメータ値を採用した場合，1960 年から 2005 年までの交通基盤整備によって，地方の中心地域から大都市への人口集中がもたらされることを確認している．

杉本ら [12]は，高山・杉山 [10]の QSE モデルの枠組を改良し，地域間の交通費用や輸送手段の運行頻度が変化した際の影響を評価した．この研究では，複数の鉄道や航空，バスといった輸送モード（交通手段）による物流・人流の利便性を反映して地域交通網を表現し，それらの輸送費用等が変化するシナリオを仮定したシミュレーションを実施している．対象とする輸送手段によって人口分布が異なる結果となり，一部では大都市への人口集積（ストロー現象）が見られたとした．

長谷川・福田 [13]は，QSE モデルを用いて 2012 年から 2014 年までの Place-Based Policy（地域雇用開発助成金等の地域雇用を創出するための補助金分配政策を指す）の影響評価を行った．多くの研究で企業の生産要素が労働のみである一方で，生産要素を労働・土地・中間財としている．また，単一産業ではなく 32 産業を設定した枠組を採用し実現象をより正確に表現可能としている．

森・瀬木 [12]は，瀬木 [9]に基づいて QSE モデルを構築し高速道路の整備効果を推定している．地域単位は市区町村とし，既往の研究よりもより詳細な地域単位で人口や賃金の変化を見ている一方で，資本を考慮していない，道路ネットワーク上の混雑を考慮していない，といった課題を挙げている．

(3) 本研究の位置付け

これまで交通インフラ整備効果の分析手法として統計学的・計量経済学的な手法と数理経済モデルを使用した手法の二つの方法が採用されてきた．既往研究でも指摘されているように，統計的な手法では地域間の空間的な相互作用（物流，人流，商取引等）を無視しており，経済的な波及効果を考慮できないという問題点がある．また，集積の経済の効果を考慮できないとされる．一方で CGE に代表される数理経済モデルを使用した手法では，モデル内のパラメータをアドホックに設定していること，観測データに関する説明力が不明であることが問題点として挙げられている．小池ら [15]は応用一般均衡モデル（CGE）を用いた分析においては，一般にパラメータの決定は経済データからキャリブレーション手法によって決定されるためほぼ完全な現況再現性を有する一方で，

統計的な推定手法を用いないため統計的に検証することが不可能であり，このことは応用一般均衡分析の欠点であると述べている．また，政策分析における代表的手法である SCGE 分析では，集積の経済と人口移動を無視している．

一方で，これまで交通インフラ整備によるストック効果の分析には様々な指標が用いられ，より適切に評価できるように改良されてきた．しかし上記で挙げたの既往研究の多くは，交通インフラの整備効果を産業活動，経済活動，人口移動の観点から論じているものの，その評価対象は交通インフラの整備地域内および隣接地域に限ったものであり，より広域的な範囲における効果を評価しているものは少ない．QSE を用いた既往研究の多くは企業の生産要素が労働のみであり，単一産業のモデルを仮定している．しかしこれは現実世界を正確に表現するうえでは不適切である．また，地域間の距離として最短経路探索により求められる最短旅行時間を用いている．しかし，交通基盤整備の有無を比較する際には渋滞等の交通量の変化を考慮して，地域間の交通費用を評価する必要があると考えられる．

以上を踏まえ，本研究では資本を考慮し多産業を設定した定量的空間経済モデルを用いて道路インフラ（高速道路）の整備効果（ストック効果）を推定し，その予測能力と適用性を検証することを目的とする．本研究の定式化するモデルは，産業連関表と整合的な経済活動，地域別・産業別の就業者数と賃金を，基準均衡として再現可能なものとなっている．このような特徴を有する QSE モデルは筆者らの知る限り存在しない．また，交通量配分により求められる一般化旅行時間を採用する．これにより，より現実に即して道路インフラの整備効果を評価できると考られる．

3. 空間経済モデル

本章では，分析に使用する空間経済モデルについて説明する．

(1) 環境の設定

資本を考慮した小国開放経済を仮定する．rで表されるN地域からなる経済システムを考える．地域rの面積は定数$\bar{G}_r$で与えられる．この経済における家計（消費者）の総数は外生的に与えられ$\bar{L}$で表され，家計は居住する地域rおよび就業する産業jを自由に選択することができる．$\lambda_{r,j}$が地域rに居住し産業jに就業する人口シェアを示すとする．すなわち$\sum_{j=1}^{n}\lambda_{r,j}\bar{L}$は地域$r$の人口を表す．これら家計は，居住する地域の企業に労働力を非弾力的に 1 単位供給する．企業は労働力・土地・土地を除く資本・中間財を生産要素として差別化された財を独占競争的に生産する．以下では単に資本と書いた場合，それは土地を含まない．生産された財は，家計・資本家・外国ぞれぞれにおいて消費，または中間財として財の生産に投入される．

資本家は地代収入を含めた資本所得を受け取り，消費活動を行う仮想的な主体である．資本所得は国民全体では賃金所得の半分程度の大きさであるが，そのほとんどは少数の国民に帰属する．地域間の賃金格差は家計の地域間移動の主要な要因の一つであると考えられるが，資本所得を全ての家計に均等に配分すると，賃金所得の重要性が相対的に弱まり，家計の地域間移動を上手く説明できなくなると考えられる．そこで本研究では，資本所得を受け取る資本家という主体を仮定し，これを普通の家計（単に家計と呼ぶ）と区別する．簡単のため，資本家は外国に居住している（不在資本家）と考え，その居住地選択は考えない．

4 つの産業を設定し，農林水産業，鉱工業，サービス業，不動産産業とする．各産業を示すインデックスをそれぞれ$j = 1,2,3,4$とし産業数を$n = 4$とする．

本研究のモデルは，産業連関表と整合的な枠組みになっており，多くのパラメータは全国レベルの産業連関表によりキャリブレートできるようになっている．産業連関表において，家計の土地への支出は帰属家賃などの不動産サービス業への支出として表現されている．この様式に倣い，本研究のモデルにおいても不動産産業が生産する不動産サービスを家計が消費するという形で，間接的に家計の土地への支出を表現する．不動産サービスは地域間取引が不可能であるとする．そのため，家計は居住する地域の不動産サービスを購入せざるを得ない．よって，居住者が多く地価や不動産サービスの価格が高い地域においては，家計の効用が低下するという分散力が生じることになる．

(2) 家計行動

モデル内の全ての家計は均質であり，家計の所得は賃金のみからなるとする．その効用$v_{r,j}$は次に示すような財iの消費$c_{r,j,i}$に対して定義される．

$$v_{r,j} = \sum_{i=1}^{n}\beta_i \ln\frac{c_{r,j,i}}{\beta_i} + \varepsilon_{r,j}^{B} = \ln w_{r,j} - \sum_{i=1}^{n}\beta_i \ln q_{r,i} + \varepsilon_{r,j}^{B} \quad (1)$$

ここで$w_{r,j}$は地域r・産業jの賃金，$q_{r,i}$は地域rにおける財iの価格指数，$\varepsilon_{r,j}^{B}$は地域別・産業別の人口の現況を再現するための定数である．β_iは消費額に占める財iのシェアパラメータであり，$\sum_{i=1}^{n}\beta_i = 1$を満たす．

家計は効用$v_{r,j}$を最大化するように居住地域・就業産

業を選択するが，現実には必ずしも効用水準が高い居住地域・就業産業を選択するとは言えない．そのため家計の居住地域・就業産業選択をネスティッドロジットモデルを用いて表現する．居住地域の代替性が就業産業の代替性よりも大きいと考え，次のようなモデルを採用する．

$$\lambda_j^J = \frac{e^{\theta^J v_j^J}}{\sum_{j'=0}^{n-1} e^{\theta^J v_{j'}^J}} \tag{2}$$

$$\lambda_{r,j} = \lambda_j^J \cdot \frac{e^{\theta_j^R v_{r,j}}}{\sum_{r'=1}^{N} e^{\theta_j^R v_{r',j}}} \tag{3}$$

$$v_j^J = \frac{1}{\theta_j^R} \ln\left(\sum_{r'=1}^{N} e^{\theta_j^R v_{r',j}} \right) \tag{4}$$

λ_j^Jは産業jに就業する人口シェア，v_j^Jは産業jに就業することで得られる効用，θ^J，θ_j^Rはそれぞれ就業産業，居住地域に関するロジットモデルの分散パラメータを意味する．θ_j^Rは産業ごとに異なる値を取り得る．

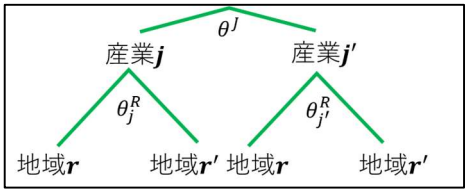


図-1　就業産業・居住地域選択モデル

(3)　企業行動

各地域の企業は，資本・土地・労働力・中間財を投入して差別化された財を独占競争的に生産する．地域rにおける産業jにおける基本生産物の生産量$Y_{r,j}$はコブ・ダグラス型の生産関数を用いて次のように書ける．

$$Y_{r,j} = K_{r,j}^{\alpha_j^K} G_{r,j}^{\alpha_j^G} \left(A_{r,j} L_{r,j}\right)^{\alpha_j^L} \prod_{i=1}^{n} x_{r,j,i}^{\alpha_{j,i}^I} \tag{5}$$

$K_{r,j}$は地域r・産業jの資本投入，$G_{r,j}$は地域r・産業jの土地投入，$A_{r,j}$は地域r・産業jの（全要素）生産性，$L_{r,j}$は地域r・産業jの労働力投入，$x_{r,j,i}$は地域r・産業jの中間財iの投入を表す．$\alpha_j^K, \alpha_j^G, \alpha_j^L, \alpha_{j,i}^I$は各生産要素の投入割合を示すシェアパラメータであり，$\alpha_j^K + \alpha_j^G + \alpha_j^L + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{j,i}^I = 1$を満たす．また，地域$r$・産業$j$の生産性$A_{r,j}$は次にように表現する．

$$A_{r,j} = \bar{A} e^{\varepsilon_{r,j}^A} \tag{6}$$

ここで$\bar{A}$は定数である．$\varepsilon_{r,j}^A$は地域別・産業別の賃金の現況を再現するための定数である．

基本生産物の価格（限界費用）$p_{r,j}^Y$は次のように書ける．

$$p_{r,j}^Y = \left(\frac{\bar{p}^K}{\alpha_j^K}\right)^{\alpha_j^K} \left(\frac{p_r^G}{\alpha_j^G}\right)^{\alpha_j^G} \left(\frac{w_{r,j}}{A_{r,j}\alpha_j^L}\right)^{\alpha_j^L} \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{q_{r,i}}{\alpha_{j,i}^I}\right)^{\alpha_{j,i}^I} \tag{7}$$

ここで$\bar{p}^K$は資本価格，p_r^Gは地域rの土地価格（地価），$w_{r,j}$は地域r・産業jの賃金，$q_{r,i}$は地域rにおける財iの価格指数を示す．資本価格$\bar{p}^K$は世界市場で外生的に決定されると考え，地域によらず$\bar{p}^K = 1$と設定する．

$\tilde{p}_{r,j}^Y(\omega)$を地域$r$・産業$j$のバラエティ$\omega$の生産者価格，とし，$s_{r,r',j}(\omega)$，$s_{r,ROW,j}(\omega)$，$s_{r,CAP,j}(\omega)$をそれぞれ地域$r'$，外国，資本家における地域$r$・産業$j$のバラエティ$\omega$の需要量とすると，地域$r$・産業$j$におけるバラエティ$\omega$を生産する独占的競争企業の利潤$\Pi_{r,j}(\omega)$は次のように書ける．

$$\Pi_{r,j}(\omega) = \left(\tilde{p}_{r,j}^Y(\omega) - p_{r,j}^Y\right)\left[s_{r,ROW,j}(\omega) + s_{r,CAP,j}(\omega) + \sum_{r'=1}^{N} \delta_{r,r',j} s_{r,r',j}(\omega) \right] - p_{r,j}^Y \tag{8}$$

$\delta_{r,r',j}$は産業jにおける地域rとr'間の氷塊輸送費を表し，生産地の価格と消費地の価格（輸送費込みの価格）の比を表す．本研究では，

$$\delta_{r,r',j} = 1 + \varphi_j \mathrm{cost}_{r,r',j} \tag{9}$$

とする．ただし，$\mathrm{cost}_{r,r',j}$は産業jにおける地域rとr'間の地域間交通費用（一般化費用や一般化旅行時間を想定している）を表す定数，φ_jは地域間交通費用と産業jの氷塊輸送費の関係を規定する係数パラメータである．ただし，$j = 4$（不動産産業）の場合には$\delta_{r,r,j} = 1$，$\delta_{r,r',j} = \infty\ (r \neq r')$とする．外国と資本家は輸送費ゼロで財を購入できると仮定する．産業が同じである全ての企業は同一の価格と生産量を選択するため，以後では財のバラエティを表すωを省略する．

σ_jを産業jの代替の弾力性として，式(8)の利潤最大化問題を解くと，

$$\tilde{p}_{r,j}^Y = \frac{\sigma_j}{\sigma_j - 1} p_{r,j}^Y \tag{10}$$

となる．

企業の参入，撤退が自由であるとすると企業のゼロ利潤条件は次のように表される．

$$s_{r,ROW,j} + s_{r,CAP,j} + \sum_{r'=1}^{N} \delta_{r,r'} s_{r,r',j} = \sigma_j - 1 \tag{11}$$

これらの条件により，地域r・産業jのバラエティ数すなわち企業数を$\mu_{r,j}$とすると，基本生産物の需給均衡条件は次のように表される．

$$\mu_{r,j} = \frac{Y_{r,j}}{\sigma_j} \tag{12}$$

地域rにおける産業jの国内産の財の合成関数は次の式で表される．

$$S_{r,j} = \left[\sum_{r'=1}^{N} \mu_{r',j} s_{r',r,j}^{\frac{\sigma_j - 1}{\sigma_j}}\right]^{\frac{\sigma_j}{\sigma_j - 1}} \quad (13)$$

また，地域rにおける産業jの国内産の財の価格指数$P_{r,j}$は次の式で表される．

$$P_{r,j} = \left[\sum_{r'=1}^{N} \mu_{r',j} \left(\delta_{r',r} \tilde{p}_{r',j}^{Y}\right)^{1-\sigma_j}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_j}} \quad (14)$$

式(13)，(14)より，地域rにおける地域r'で生産された産業jの財の需要量$s_{r',r,j}$は次の式のようになる．

$$s_{r',r,j} = \left(\frac{P_{r,j}}{\delta_{r',r} \tilde{p}_{r',j}^{Y}}\right)^{\sigma_j} S_{r,j} \quad (15)$$

一方で，外国における国内産の産業jの財の価格指数$P_{ROW,j}$は次の式で表される．前述のように，外国は輸送費ゼロで財を購入できると仮定している．

$$P_{ROW,j} = \left[\sum_{r'=1}^{N} \mu_{r',j} \left(\tilde{p}_{r',j}^{Y}\right)^{1-\sigma_j}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_j}} \quad (16)$$

地域r'が外国へ輸出する産業jの財の需要量$s_{r',ROW,j}$は次の式のようになる．

$$s_{r',ROW,j} = \left(\frac{P_{ROW,j}}{\tilde{p}_{r',j}^{Y}}\right)^{\sigma_j} \frac{E_j}{P_{ROW,j}} \quad (17)$$

ただしE_iは産業jの輸出総額であり，外生的に与える．

資本家にとっての国内産の産業jの財の合成関数は次の式で表される．

$$S_{CAP,j} = \left[\sum_{r'=1}^{N} \mu_{r',j} s_{r',CAP,j}^{\frac{\sigma_j - 1}{\sigma_j}}\right]^{\frac{\sigma_j}{\sigma_j - 1}} \quad (18)$$

地域r'が資本家へ供給する産業jの財の需要量$s_{r',CAP,j}$は次の式のようになる．

$$s_{r',CAP,j} = \left(\frac{P_{ROW,j}}{\tilde{p}_{r',j}^{Y}}\right)^{\sigma_j} S_{CAP,j} \quad (19)$$

産業連関表との整合性を保つため，資本家は外国に住んでいるものの，不動産産業の財も購入できると考える。

地域rにおける産業jの財の需要量$Z_{r,j}$は，$S_{r,j}$と地域rにおける外国産の産業jの財の需要量$M_{r,j}$に関するコブ・ダグラス型の関数で表される．

$$Z_{r,j} = S_{r,j}^{\gamma_j} M_{r,j}^{1-\gamma_j} \quad (20)$$

ここで，γ_jはパラメータであり外生的に与えられる．

このとき，地域rにおける産業jの財の価格指数$q_{r,j}$は次のように表される．

$$q_{r,j} = \left(\frac{P_{r,j}}{\gamma_j}\right)^{\gamma_j} \left(\frac{\bar{P}_j^M}{1-\gamma_j}\right)^{1-\gamma_j} \quad (21)$$

$\bar{P}_j^M$は外国産の産業jの財の価格指数を表す．$\bar{P}_j^M$は世界市場で外生的に決定されると考える．また，輸入に必要な輸送費は考慮せず，地域によらず$\bar{P}_j^M = 1$と設定する．

資本家による産業jの財の需要量$Z_{CAP,j}$は，$S_{CAP,j}$と資本家による外国産の産業jの財の需要量$M_{CAP,j}$に関するコブ・ダグラス型の関数で表される．

$$Z_{CAP,j} = S_{CAP,j}^{\gamma_j} M_{CAP,j}^{1-\gamma_j} \quad (22)$$

資本家にとっての産業jの財の価格指数$q_{CAP,j}$は，

$$q_{CAP,j} = \left(\frac{P_{ROW,j}}{\gamma_j}\right)^{\gamma_j} \left(\frac{P_j^M}{1-\gamma_j}\right)^{1-\gamma_j} \quad (23)$$

と表される．

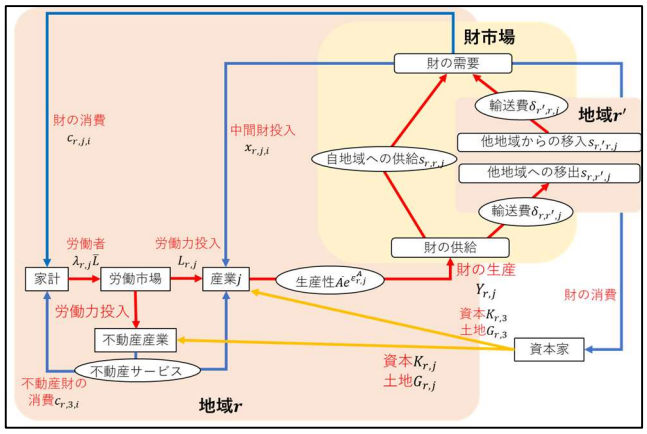


図-2　家計・企業行動

(4)　市場均衡

財・労働市場・土地市場は，家計が居住する地域を変更できないほど短期に均衡すると考える．短期的な市場均衡の条件は，式(12)に加えて以下のように表される．

[国内の財iの需要均衡]

$$Z_{r,i} = \sum_{j=1}^{n} \left(\lambda_{r,j} \bar{L} c_{r,j,i} + x_{r,j,i}\right) \quad (24)$$

[土地市場均衡]

$$\bar{G}_r = \sum_{j=1}^{n} G_{r,j} \quad (25)$$

[労働市場均衡]

$$\lambda_{r,j} \bar{L} = L_{r,j} \quad (26)$$

[国内の資本家の財iの需要均衡]

$$Z_{CAP,i} = \frac{\beta_i (\bar{\Omega} + \sum_{r=1}^{N} p_r^G \bar{G}_r)}{q_{CAP,i}} \quad (27)$$

ただし，$\bar{\Omega}$は資本家の（土地による所得を除く）総資本所得であり，外生的に与えられる．

(5)　誤差項の役割

本研究のモデルは，誤差項（$\varepsilon_{r,j}^A$および$\varepsilon_{r,j}^B$）の値を適切にキャリブレートすることにより，人口$\lambda_{r,j}$と賃金$w_{r,j}$に関する観測データを均衡状態として完全に再現できる．ただし，正確に述べると賃金については，各産業の地域間の相対賃金$w_{r,j}/w_{N,j}$のみが再現可能である．産業間の相対賃金$w_{r,j}/w_{r,j'}$は再現できない．この理由

は，産業間の相対賃金は効用関数と生産関数のシェアパラメータ$\boldsymbol{\alpha}$，$\boldsymbol{\beta}$によって規定され，誤差項による調整ができないためである．また，不動産産業のように地域間取引が無い財の産業jについては$w_{r,j}/w_{N,j}$も再現できない．

4. 地域間交通費用

本章では，式(9)における地域間交通費用$\mathrm{cost}_{r,r',j}$の算出手法について説明する．

(1) 地域間交通費用

現実世界において，財は道路交通だけではなく鉄道や飛行機，船舶等の他の交通機関でも輸送される．道路インフラを整備しても他の交通機関の交通費用には影響しないため，地域間交通費用に道路上の一般化旅行時間を用いた場合，道路インフラ整備の影響を過大評価する可能性がある．これを避けるために，道路交通と他の交通機関の分担率を考慮して地域間の交通費用を算出する必要がある．そこで，交通機関選択モデルをロジットモデルとして表現し，これを用いて交通機関別の交通費用を合成した地域間交通費用を求める．以下では，道路交通による交通費用（一般化旅行時間）を$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}$，その他の交通機関による交通費用を$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{other}$とする．

(2) 道路上の般化旅行時間$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}$

道路上の一般化旅行時間$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}$を算出には，交通量配分を利用する．交通量配分に利用する道路ネットワークは，全ての高速道路，都市高速道路，自動車専用国道，一般国道および一部の都道府県道，指定市道から構成される．今回の分析では，北海道と沖縄本島を除き，本州と直接的に道路ネットワークで接続されていない離島は無視する．沖縄本島へのアクセスや，陸上の道路よりもフェリー航路の利用が優位性を持つと考えられる区間を考慮するために，一部のフェリー航路を道路ネットワークとして組み込む．パラメータ推定に使用する 3 時点（1985 年，1995 年，2005 年）とモデルを用いた予測を行う 2015 年時点の，合計 4 時点の道路ネットワークを用意した．図 3 に，例として 2015 年時点の道路ネットワークを示す．また，ネットワークに加えた航路リンクを表 1 に示す．

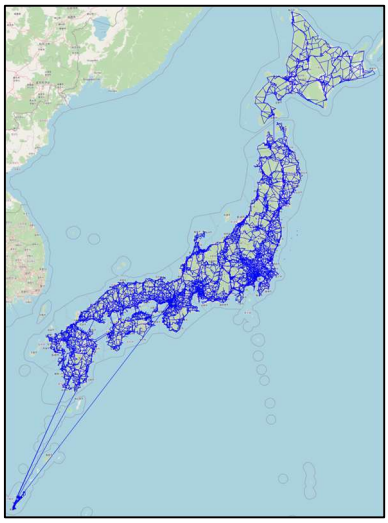


図-3 道路ネットワーク

表-1 航路リンク

航路名	港湾名		旅行速度(km/h)
青函	青森港	函館港	10
南海	和歌山港	徳島港	10
明石	明石港	岩屋港	30
宇高	宇野港	高松港	10
呉松山	呉港	松山港	10
広島松山	広島港	松山港	10
竹原波方	竹原港	波方港	10
周防灘	徳山港	竹田津港	10
国道九四	佐賀関港	三崎港	10
八幡浜臼杵	臼杵港	八幡浜港	10
三原生口島	須波港	沢港	30
三原因島	三原港	重石港	30
宮島	宮島口	宮島港	7
志布志那覇	志布志港	那覇新港	35
大阪那覇	大阪港	那覇新港	33
鹿児島那覇	鹿児島港	那覇新港	33

(3) 交通量配分

交通量配分は利用者均衡配分によって行う．有料道路の通行料金を考慮する．車種は，普通乗用車・バス・小型貨物トラック・普通貨物トラックとする．リンクパフォーマンス関数にはBPR関数を仮定し，以下の式を採用する．

$$t_a(x_a) = t_{a0}\left\{1 + \alpha\left(\frac{x_a}{c_a}\right)^{\beta}\right\} \tag{28}$$

ただし，t_aはリンクaの通過時間，x_aはリンクaの交通量（PCE），t_{a0}はリンクaの自由流旅行時間，αおよびβはパラメータである．αおよびβは土木学会において推定された値[16]を用い，$\alpha = 0.48$，$\beta = 2.82$とする．時間価値としては，普通乗用車には41.02円/分/台，バスには386.16円/分/台，小型貨物トラックには52.94円/分/台，普通貨物トラックには76.94円/分/台の値を利用する．

OD交通量を定義する行政区分には，全ての時点において，2005年時点の市区町村（政令指定都市は区単位，

東京は特別区単位，それ以外は市町村単位）を用いる．各時点の車種別OD交通量には，国土交通省実施の「全国道路・街路交通情勢調査　自動車起終点調査（道路交通センサス）」のODデータを2005年の行政区分単位に集計したものを使用する．

セントロイドは各市区町村の役所とする．セントロイド周辺のリンクには発生・集中交通量の殆どが流れるため，旅行時間を過大に予測する可能性が高い．そのため，リンクの通過時間が自由流旅行時間の4倍となるリンクが存在する場合には，そのリンクに並行して容量無限大，自由流旅行時間が当該リンクの4倍となるリンクを設置する．

本研究の空間経済モデルの分析は都道府県単位で行うため，市区町村単位で予測された一般化旅行時間を都道府県単位に集計する．その際は以下の式のように，その都道府県に所属する市区町村のOD交通量を重みとした加重平均により，都道府県間の一般化旅行時間$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}$を算出する．ここで、農林水産業・鉱工業（$j=1,2$）には普通貨物自動車の一般化旅行時間を，サービス業（$j=3$）には乗用車の一般化旅行時間を用いる．

A県（県内の市区町村をa_nで表す）からB県（県内の市区町村をb_mで表す）への一般化旅行時間$\mathrm{cost}_{A,B,j}^{road}$は以下の式により求める．

$$\mathrm{cost}_{A,B,j}^{road}=\frac{\sum_{a_n\in A,b_m\in B}\left(\mathrm{cost}_{a_n,b_m,j}^{road}\times Q_{a_n,b_m,j}\right)}{\sum_{a_n\in A,b_m\in B}Q_{a_n,b_m,j}} \quad (29)$$

ここで，$Q_{a_n,b_m,j}$はa_n，b_m間の産業jの車種のOD交通量，$\mathrm{cost}_{a_n,b_m,j}^{road}$は$a_n$，$b_m$間の産業$j$の車種の一般化旅行時間とする．

ただし，$\sum_{a_n\in A,b_m\in B}Q_{a_n,b_m,j}=0$のときは次の式を用いる．これは$AB$間の交通需要の潜在性を考慮した一般化旅行時間と言える．

$$\mathrm{cost}_{A,B,j}^{road}=\frac{\sum_{a_n\in A,b_m\in B}\left(\mathrm{cost}_{a_n,b_m,j}^{road}\times O_{a_n,j}\times D_{b_m,j}\right)}{\sum_{a_n\in A,b_m\in B}\left(O_{a_n,j}\times D_{b_m,j}\right)} \quad (30)$$

ここで，$O_{a_n,j}$はa_nからの産業jの車種の総発生交通量，$D_{a_n,j}$はb_nへの産業jの車種の総集中交通量とする．

(4) 交通費用の合成

本研究では，その他の交通機関の交通費用$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{other}$は地域間の直線距離$\mathrm{dist}_{\mathrm{r,r'}}$に比例するとする．交通機関の選択モデルに集計ロジットモデルを採用すると，地域rとr'間の道路交通の流動量$q_{r,r',j}^{road}$は，全交通機関合計の流動量を$Q_{r,r',j}$として次のように表される．

$$q_{r,r',j}^{road}=\frac{\exp(-a_j\,\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}+c_j)}{\exp(-a_j\,\mathrm{cost}_{rr'}^{road}+c_j)+\exp(-b_j\,\mathrm{dist}_{\mathrm{r,r'}})}Q_{r,r',j} \quad (31)$$

ここで，a_j,b_j,c_jはパラメータである．

$q_{r,r',j}^{othe}=Q_{r,r',j}-q_{r,r',j}^{road}$を他の交通機関の流動量とすると，

$$\ln\left(\frac{q_{r,r',j}^{road}}{q_{r,r',j}^{other}}\right)=-a_j\mathrm{cost}_{rr'}^{road}+c_j-b_j\mathrm{dist}_{\mathrm{r,r'}} \quad (32)$$

と書ける．この方程式に最小二乗法を適用してパラメータ推定を行う．

パラメータを推定したら，合成された地域間交通費用$\mathrm{cost}_{r,r',j}$をログサム変数として次のように求める．

$$\mathrm{cost}_{r,r',j}=-\frac{1}{a_j}\ln\left\{\exp\left(-a_j\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}+c_j\right)+\exp\left(-b_j\mathrm{dist}_{\mathrm{r,r'}}\right)\right\}+\frac{1}{a_j}\ln\{\exp(c_j)+1\} \quad (33)$$

定数項$(1/a_j)\cdot\ln\{\exp(c_j)+1\}$は，$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}=0,\mathrm{dist}_{\mathrm{r,r'}}=0$のとき，$\mathrm{cost}_{r,r',j}=0$となるようも導入される調整項である．

農林水産業・鉱工業（$j=1,2$）のパラメータを推定する際には，全国貨物純流動調査（物流センサス）[17]に掲載の，代表交通機関別の都道府県間流動表（重量単位）を使用する．よって，農林水産業と鉱工業の$\mathrm{cost}_{r,r',j}$は等しくなる．サービス業（$j=3$）のパラメータを推定する際には，$q_{r,r',j}^{road}$と$q_{r,r',j}^{other}$として，全国旅客幹線旅客純流動調査[18]に掲載の，代表交通機関別の都道府県間流動表を使用する．

a_j,b_j,c_jのパラメータ推定は2005年の1時点のデータを用いて推定する．他の年次の（合成された）地域間交通費用を算出する際には，$\mathrm{cost}_{r,r',j}^{road}$には年ごとに異なる数値を用いるものの，$a_j,b_j,c_j$には2005年のデータで推定されたパラメータ値を使用する．

5. キャリブレーション

本研究のモデルに含まれるパラメータは、φ_j，θ^J，σ_j，θ_j^Rを除き，全国レベルの産業連関表を用いたキャリブレーションにより求める．本章では，3章および4章において，パラメータの推定やシミュレーションを実施するために使用されるデータの出典や整理手法について説明する．

(1) パラメータ推定に使用されるデータ

1985年，1995年，2005年のデータを使用する．すなわち$T=3$とする．分析対象の地域は日本の都道府県単位であり，$N=1733$となる．産業別・都道府県別の人口データには国勢調査[19]によるものを使用する．産業別・都道府県別の賃金データには賃金構造基本統計調査[20]か

ら使用する．地域の面積$\bar{G}_{r,j}$は政府統計[21]のうち，森林・湖沼などを除いた可住地面積を使用する．地域間交通費用$\mathrm{cost}_{r,r',j}$は4章で述べたとおりである．

(2) 産業連関表からキャリブレートされる外生変数

$\alpha_j^K, \alpha_j^G, \alpha_j^L, \alpha_{j,i}^I, \beta_i, \gamma_i, E_i, \bar{\Omega}_i$は2005年産業連関表（取引基本表）[22]を用いてキャリブレートする．

$\alpha_j^K, \alpha_j^G, \alpha_j^L, \alpha_{j,i}^I$は以下の式で算出される．

$$\alpha_j^K = \frac{K_j}{K_j + L_j + \sum_{i'=1}^{n} X_{j,i'}} \cdot \pi_j^K \tag{34}$$

$$\alpha_j^G = \frac{K_j}{K_j + L_j + \sum_{i'=1}^{n} X_{j,i'}} \cdot \pi_j^G \tag{35}$$

$$\alpha_j^L = \frac{L_j}{K_j + L_j + \sum_{i'=1}^{n} X_{j,i'}} \tag{36}$$

$$\alpha_{j,i}^I = \frac{X_{j,i}}{K_j + L_j + \sum_{i'=1}^{n} X_{j,i'}} \tag{37}$$

K_jは産業jの（営業余剰＋資本減耗引当），L_jは産業jの（家計外消費支出＋雇用者所得），$X_{j,i}$は産業jの財i投入額とする．また，資本投入のうち土地以外への帰属割合をπ_j^K，土地への帰属割合をπ_j^Gとし，$\pi_j^K + \pi_j^G = 1$が成り立つ．アメリカ合衆国を対象としたデータ[23]によると，農業：$\pi_j^G = 1/3, \pi_j^K = 2/3$，水産業・鉱業：$\pi_j^G = 0, \pi_j^K = 1$，建設業：$\pi_j^G = 1/7, \pi_j^K = 6/7$，製造業：$\pi_j^G = 1/11, \pi_j^K = 10/11$，サービス業：$\pi_j^G = 3/17, \pi_j^K = 14/17$であるから本研究においてもこの値を使用する．

β_iは次の式で算出される．

$$\beta_i = \frac{C_i}{\sum_{i'=1}^{n} C_{i'}} \tag{38}$$

ただし，C_iは財iの国内最終需要計である．

γ_iは次の式で算出される．

$$\gamma_i = \frac{D_i - M_i}{D_i} \tag{39}$$

D_iは財iの国内需要合計，M_iは財iの輸入計である．

E_iは，財iの輸出計の値を用いる．

これらのパラメータの値は産業連関表の値から，本研究で用いる産業区分に集計し直した上で使用する．

$\bar{\Omega}$は次の式で算出される．

$$\bar{\Omega} = \sum_{i=1}^{n} C_i - \sum_{j=1}^{n} L_j - \sum_{j=1}^{n} K_j \cdot \frac{\alpha_j^G}{\alpha_j^K + \alpha_j^G} \tag{40}$$

これは，国民の総支出額から労働所得と地代収入を除いたものを意味する．

6. パラメータ推定

本章では，3 章で定式化した方程式において用いられるパラメータの推定手法について説明する．

(1) 最尤推定法による推定

財の代替の弾力性σ_jおよび居住地域に関するロジットモデルの分散パラメータθ_j^Rは，瀬木 [9][14]の提案している最尤推定法を用いて推定する．これは，地域別・産業別の人口$\lambda_{r,j}$と賃金$w_{r,j}$に関する観測値の尤度を最大化するように未知パラメータを推定するものである。本研究では，1985 年，1995 年，2005 年の全産業の人口シェア$\lambda_{r,j}$と，鉱工業とサービス業（$j = 2, 3$）の地域間相対賃金$w_{r,j}/w_{r',j}$の観測値の尤度を考えた。

(2) 産業連関表と旅行時間から算出するパラメータ

地域間交通費用$\mathrm{cost}_{r,r',j}$と産業jの氷塊輸送費の関係を規定するパラメータφ_jは，産業連関表 [22]および 4 章で予測した一般化旅行時間を用いて算出する．ここではその算出方法について述べる．ただし，本節で用いる変数の定義は，本論文の他の部分とは異なる．

財の生産額と輸送費の関係は次のように表される．

$$\left(X_j - 365C_j\right)\left(1 + \varphi_j \frac{T_j}{D_j}\right) = X_j \tag{41}$$

ただし，X_jは産業jの財の総生産額（円/年），C_jは産業jの車種の一般化総費用（円/日），T_jは産業jの車種の一般化総旅行時間（分・台/日），D_jは産業jの車種の総交通量（台/日）であり，産業jの車種の時間価値（円/分/台）をv_jとすると，$C_j = T_j v_j$と表される．X_jは 2005 年の産業連関表の国内総生産額の産業ごとの和を用いる．T_jは 4 章において予測した値，D_jは道路交通センサスの値を用いる．本研究では農林水産業・鉱工業（$j = 1, 2$）のパラメータを算出する際には，T_j, D_j, v_jには普通貨物トラックの値，X_jには農林水産業・鉱工業（$j = 1, 2$）の生産額の総和を用いる．よって，農林水産業と鉱工業のφ_jは等しくなる．サービス業（$j = 3$）のパラメータを算出する際には，T_j, D_j, v_jには普通乗用車の値，X_jにはサービス業（$j = 3$）の生産額の総和を用いる．

7. おわりに

本稿では，複数産業を考慮した QSE モデルを構築し均衡の条件を定式化した．また，交通費用に代表される各変数の算出手法について述べた．今後，実際にパラメータ推定を実施し，推定したパラメータを用いて 2015 年のデータを予測する予定である．

REFERENCES

1) 国土交通省：国土形成計画（広域地方計画），https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudokeikaku_tk5_000029.html （最終閲覧日 2023/10/5）
2) 全国高速道路建設協議会：高規格幹線道路網の現況，

http://www.zenkousoku.com/maintenance/%E9%AB%98%E8%A6%8F%E6%A0%BC%E5%B9%B9%E7%B7%9A%E9%81%93%E8%B7%AF%E3%81%AE%E7%8F%BE%E6%B3%81/（最終閲覧日 2023/10/5）
3) 国土交通省道路局：費用便益分析マニュアル，https://www.mlit.go.jp/road/ir/hyouka/plcy/kijun/ben-eki_h30_2.pdf（最終閲覧日 2022/1/30）
4) 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～その具体的戦略の提言～，https://www.mlit.go.jp/common/001170260.pdf（最終閲覧日 2023/10/5）
5) 国土交通省 社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会：2040 年、道路の景色が変わる，https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf（最終閲覧日 2023/10/5）
6) 小池敦司：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
7) 藤井聡：土木計画学，学芸出版社，2008
8) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E.：Quantitative spatial economics，*Annual Review of Economics*，Vol.9，pp.21-58，2017
9) Segi, S.：Maximum likelihood estimation of quantitative spatial economic models，SSRN working paper 4212844，2022
10) 高山雄貴・杉山雅也：新経済地理学に基づく交通基盤整備の影響評価：モデル構造と人口分布変化の関係，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.76，No.2，pp.100-113，2020
11) Pflüger, M. and Tabuchi, T.：The size of regions with land use for production, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.40, No.6, pp.481-489, 2010
12) 杉本達哉，杉山雅也，高山雄貴，高木朗義：地域間公共交通機関の利便性向上の長期的影響評価：定量的空間経済学に基づく空間経済分析，交通工学論文集，第 8 巻，第 2 号，pp.222-231，2022
13) 長谷川啓太，福田大輔：近年の我が国の地域間配分政策の事後評価：QSE アプローチによる検討，第 65 回土木計画学研究発表会・講演集，2022
14) 森智輝，瀬木俊輔：定量的空間経済モデルのストック効果評価への応用，第 65 回土木計画学研究発表会・講演集，2022
15) 小池敦司・上田孝行・伊藤克彦：社会資本ストック整備効果計測に関する研究－生産関数アプローチと応用一般均衡分析による理論的・実証的比較－，土木学会研究・論文集，Vol.19，No.1，pp.123-128，2002
16) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編 利用者均衡配分の提要に向けて，2003
17) 国土交通省：全国貨物純流動調査，https://www.mlit.go.jp/sogosesaku/transport/ssei_transport_fr_000074.html（最終閲覧日 2023/10/11）
18) 国土交通省：全国幹線旅客純流動調査，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_sokou_fr_000008.html（最終閲覧日 2023/10/11）
19) 内閣府：市区町村別 人口・経済関係データ，https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/keizai-jinkou_data.html（最終閲覧日 2023/10/11）
20) 厚生労働省：賃金構造基本統計調査，https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00450091&tstat=000001011429（最終閲覧日 2023/10/11）
21) 総務省統計局：統計で見る市区町村のすがた 2007，https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200502&cycle=0&metadata=1&data=1（最終閲覧日 2023/10/11）
22) 総務省：平成 17 年（2005 年）産業連関表，https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001026283&cycle=0&tclass1val=0（最終閲覧日 2023/10/11）
23) Ákos Valentinyi, Berthold Herrendorf：Measuring factor income shares at the sectoral level，*Institute of economics, Hungarian Academy of Sciences Budapest*，2008