定量的空間経済学に基づく空間経済分析手法の開発
Development of spatial economic approach based on quantitative spatial economics

杉本 達哉[1]，杉山 雅也[2]，高山 雄貴[3]，髙木 朗義[4]
Tatsuya SUGIMOTO[1], Masaya SUGIYAMA[2], Yuki TAKAYAMA[3] and Akiyoshi TATAKAGI[4]

本研究では，社会基盤整備・技術革新等が地域経済に与える影響を評価できる，定量的空間経済学（QSE）に基づく手法の開発を目的とする．QSE アプローチは，これまで経済モデルの特徴に関する研究が中心であり，実空間を対象とした分析に応用するには問題点が多く存在する．特に，結果に本質的な影響を与える都市・地域間輸送網のモデルが極めて単純なこと，利用可能なデータに応じたパラメータ設定手法が未完成なことが挙げられ，応用上，これらの改善・発展が必要である．これに応えるため，本研究では，QSE を複数の輸送モードを考慮した分析枠組みとし，それに対応するパラメータ設定手法を提示する．そして，その分析枠組みにより，日本全国を対象に反実仮想実験を行い，異なる輸送モードの輸送費用低下が地域経済へ与える影響を分析する．

Keywords: 新経済地理学，定量的空間経済学，集積の経済，輸送費用，地域政策評価

１．はじめに

我が国では，人口減少や東京圏への一極集中が進行する中，地域経済の衰退が深刻化している[1)]．これに対する政策の一つとして社会基盤整備（e.g., 高速道路網整備）が挙げられる．社会基盤整備は，輸送費用を低下させることで，短期的には物流・人流の効率を改善し，地域経済を活性化する正の効果が期待される．一方で，長期的には地方の人口や経済活動を大都市に流出させ，地域経済を衰退させる負の効果が懸念される．輸送費用の低下に係る地域政策を評価するには，このような正・負の効果の両方を把握できる分析枠組みが必要である．

これまで，地域政策評価を可能とする手法として，空間的応用一般均衡（SCGE）モデル等に関する研究・開発がされてきた[2)]．SCGE モデルはミクロ経済理論と整合的に構築されており，合理的な政策評価が可能である．しかしながら，SCGE 分析は人口移動が生じない期間を対象としており，比較的短期の影響を分析している．つまり，前述のような人口および経済活動への長期的な影響を把握する分析枠組みとなっていない．

輸送費用の低下に伴う，人口および経済活動への影響に関する理論的な研究は，新経済地理学（New Economic Geography : NEG）分野で蓄積されてきた[3)]．NEG では，その影響の主たる要因に，集積によってもたらされる集計的な規模の経済（集積の経済）を挙げて，長期的分析には集積の経済を考慮することが重要であるとしている．このことから，輸送費用の低下に係る地域政策評価には，集積の経済を考慮した長期的な視点が必要であることが分かる．

近年，NEG 理論の計量分析への応用が進められており，これらは定量的空間経済学（Quantitative Spatial Economics : QSE）と呼ばれている[4)]．QSE アプローチでは，集積の経済および地域間の人口移動を考慮するため，地域政策評価に有用な手段となる可能性がある．直近では，Mori and Osawa[5)]が 1970 年から 2015 年の人口変化から，我が国の実人口分布の変化の特徴を明らかにしており，それと整合した現象を説明できる経済モデルの数理構造の特徴も明らかにされたところである[6),7)]．

先行研究である高山・杉山[7)]では，実空間上でのモデルの特徴を分析することを目的としているため，そこで用いられるフレームワークを地域政策評価に適用するには問題がある．具体的には，道路網の物流しか扱っておらず，極めて単純な都市・地域間輸送網を想定している．しかしながら，実際の交通ネットワークには，道路網，鉄道網，航空網といった多様なネットワークが異なる形状で存在するため，実空間を対象とする地域政策評価ではその違いを考慮する必要がある．また，製造業などの第二次産業では物流が経済活動に大きく影響する一方で，サービス業などの第三次産業では生産に対する労働投入比率が高いため，人流も軽視できない．高山・杉山[7)]が用いた手法では，複数の輸送モードに対応した分析ができず，フレームワーク上の限界がある．

本研究では，社会基盤整備・技術革新等が地域経済に

1　正会員，修士（工学），八千代エンジニヤリング株式会社　技術創発研究所
〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー　e-mail: tt-sugimoto@yachiyo-eng.co.jp　Phone: 03-5822-6216
2　非会員，修士（工学），株式会社 JR 西日本コミュニケーションズ
3　正会員，博士（情報科学），金沢大学　理工研究域　地球社会基盤学系
4　正会員，博士（工学），岐阜大学　社会システム経営学環

与える影響を評価できる，定量的空間経済学（QSE）に基づく空間経済分析手法の開発を目的とする．このために，QSE を複数の輸送モードを考慮した分析枠組みとする．具体的には，都市・地域間輸送網のモデルを，乗用車，貨物車，バス，鉄道，航空，船舶といった複数の輸送モードの物流・人流を考慮したものとする．併せて，この枠組みによる実空間を対象とした分析を可能とするためのパラメータ設定手法を提示する．開発した手法により，日本全国を対象とした反実仮想実験を実施することで，異なる輸送モードで輸送費用が低下した場合の影響について分析し，実空間を対象とした地域政策評価が可能な手法を構築したことを示す．

本稿では，輸送費用が一律に低下した条件での反実仮想実験を行うが，本手法は交通網整備のみならず技術革新による影響分析も可能である．具体的には，トラックの隊列走行や新幹線の貨物輸送等といった技術革新による影響が一定の仮定の下で分析できる．このような影響分析を可能とすることも本研究の貢献の一つと考える．

本稿の構成は以下のとおりである．まず，第 2 章では，本研究で用いる，我が国の実人口分布変化の特徴を表現可能な Pflüger and Tabuchi [8]に基づくモデルを説明する．第 3 章では，複数の輸送モードに対応するパラメータの設定方法を示す．第 4 章では，都市・地域間輸送網のデータを整備した上で，異なる輸送モードでの輸送費用低下が地域経済（i.e., 人口分布）へ与える影響を分析する．最後に，第 5 章で本論文の成果と今後の課題を述べる．

２．モデル

本章では，本研究で用いる，実人口分布の変化の特徴を表現可能な Pflüger and Tabuchi [8]に基づくモデルを示す．

2.1　地域・経済環境の設定

地域は離散的にK箇所存在すると仮定し，全ての地域の集合を$\mathcal{K} \equiv \{1,2,\cdots,K\}$と表現する．地域$i \in \mathcal{K}$の面積は$A_i$とする．次に，この経済には，消費者と企業が存在する．消費者は，地域全体としてH存在し，居住する地域iを選択することができる．各地域$i \in \mathcal{K}$に立地する消費者の数を$h_i \geq 0$と表現する．これらの消費者は自地域の企業に労働を非弾力的に 1 単位供給する．企業は，収穫逓増の技術により，労働と土地を生産要素として，差別化された財を生産する．

2.2　主体の行動

(1)消費者行動

消費者が居住することによる効用を Cobb-Douglas 型の効用関数により表現する:

$$U_i = \bar{u}_i \left(\frac{a_i}{\alpha}\right)^{\alpha} \left(\frac{Q_i}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha}, \tag{1a}$$

$$Q_i = \left[\sum_{j\in\mathcal{K}} \int_0^{n_j} q_{ji}(k)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \mathrm{d}k\right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}. \tag{1b}$$

ここで，$\alpha \in (0,1)$は土地への支出割合を表すパラメータ，$\bar{u}_i$は地域iのアメニティ水準（e.g., 気候，地形条件）を表す所与の定数，a_iは土地の消費量，Q_iは差別化財の消費により得られる部分効用を表す．n_jは地域jで生産される差別化財のバラエティ（種類）数，$q_{ji}(k)$は地域jで生産され地域iで消費される財バラエティkの消費量である．$\sigma > 1$はこれらの財バラエティ間の代替の弾力性である．

消費者の予算制約は次のとおりである:

$$y_i = r_i a_i + \sum_{j\in\mathcal{K}} \int_0^{n_j} p_{ji}(k) q_{ji}(k) \mathrm{d}k. \tag{2}$$

ここで，r_iは地代，$p_{ji}(k)$は地域jで生産されて地域iで消費される財バラエティkの価格を表す．

消費者の所得y_iは賃金w_iと地代収入$\bar{w}^R$からなる:

$$y_i = w_i + \bar{w}^R. \tag{3}$$

ここで，全ての土地が全消費者により均等に所有されていると仮定する（i.e., public ownership）．よって，消費者の地代収入は以下で与えられる:

$$\bar{w}^R = \frac{\sum_{i\in\mathcal{K}} r_i a_i h_i}{H}. \tag{4}$$

効用最大化問題から，土地，財の消費量a_i，$q_{ji}(k)$と財消費の部分効用Q_iが得られる．

$$a_i = \alpha \frac{y_i}{r_i}, \tag{5a}$$

$$q_{ji}(k) = \left(\frac{p_{ji}(k)}{P_i}\right)^{-\sigma} Q_i, \tag{5b}$$

$$Q_i = (1-\alpha)\frac{y_i}{P_i}. \tag{5c}$$

ここで，P_iは財の価格指数であり，以下で定義される:

$$P_i = \left[\sum_{j\in\mathcal{K}} \int_0^{n_j} p_{ji}(k)^{1-\sigma} \mathrm{d}k\right]^{\frac{1}{1-\sigma}}. \tag{6}$$

式(1a)に式(5a)，式(5c)を代入すると，地域iに居住する消費者の間接効用v_iは次のように表される:

$$v_i = \bar{u}_i r_i^{-\alpha} P_i^{-(1-\alpha)} y_i. \tag{7}$$

(2)企業行動

企業は，Dixit and Stiglitz 型の独占的競争市場下で，土地・労働を投入して財を生産する．すなわち，自由に参入・撤退できると仮定した企業が収穫逓増の技術により差別化された財を生産する．規模の経済，消費者の多様性選好，ならびに供給できる財のバラエティ数に制限が無いことから，どの企業も必ず他企業とは異なるバラエティの財を生産する．このため，地域iで生産を行う企業数は，供給する財のバラエティ数n_iと等しくなる．以降では，地域iでバラエティkを生産する企業を地域iの企業kと呼ぶ．

地域iにおいて企業kが財バラエティkを生産するには，土地・労働からなる Cobb-Douglas 型の合成財を固定的に 1 単位と，生産量$s_i(k)$に応じて$\psi s_i(k)$単位投入する必要がある:

$$1+\psi s_i(k)=\left(\frac{a_i^F(k)}{\beta}\right)^{\beta}\left(\frac{l_i(k)}{1-\beta}\right)^{1-\beta}. \tag{8}$$

ここで，$\beta\in(0,1)$は土地の投入割合を表すパラメータ，$a_i^F(k)$，$l_i(k)$は，各々，地域の企業が投入する土地，労働量である．

財の地域間輸送には氷塊型の輸送費用がかかると仮定する．すなわち，地域iから地域jへ 1 単位の財を輸送すると，最初の 1 単位のうち$1/\tau_{ij}<1$単位だけが実際に到着し，残りは解けてしまうと考える．このため，地域iで生産された財バラエティkの地域jにおける需要量$q_{ij}(k)$と供給量$s_i(k)$との間に，次の関係が成立する:

$$s_i(k)=\sum_{j\in\mathcal{K}}\tau_{ij}q_{ij}(k)h_j. \tag{9}$$

地域iの企業kは，独占的競争を仮定していることから，地域jの消費者の需要関数$q_{ij}(k)$を所与として，生産する財バラエティkの価格$\boldsymbol{p}_i(k)=(p_{ij}(k))_{j\in\mathcal{K}}$と土地・労働の投入量$a_i^F(k)$，$l_i(k)$を設定する．その利潤最大化行動は，次のように定式化できる:

$$\max_{\boldsymbol{p}_i(k),a_i^F(k),l_i(k)}\pi_i(k), \tag{10a}$$

$$\text{s.t. (5b), (8), (9).} \tag{10b}$$

ここで，$\pi_i(k)$は利潤であり，収入から土地・労働の費用を引いた，以下の形で与えられる:

$$\pi_i(k)=\sum_{j\in\mathcal{K}}p_{ij}(k)q_{ij}(k)h_j-r_ia_i^F(k)-w_il_i(k). \tag{11}$$

この利潤最大化問題を解くと，財バラエティの価格$p_{ij}(k)$，土地・労働の投入量$a_i^F(k)$，$l_i(k)$が得られる:

$$p_{ij}(k)=\frac{\sigma}{\sigma-1}\psi\tau_{ij}m_i, \tag{12a}$$

$$a_i^F(k)=\frac{\beta}{r_i}\left\{1+\psi\sum_{j\in\mathcal{K}}\tau_{ij}q_{ij}(k)h_j\right\}m_i, \tag{12b}$$

$$l_i(k)=\frac{1-\beta}{w_i}\left\{1+\psi\sum_{j\in\mathcal{K}}\tau_{ij}q_{ij}(k)h_j\right\}m_i, \tag{12c}$$

$$m_i=r_i^{\beta}w_i^{1-\beta}. \tag{12d}$$

ここで，m_iは生産要素の価格を表す．この結果から，財バラエティのマークアップ率が$\sigma/(\sigma-1)$で与えられることが確認できる．価格指数P_iは式(6)に式(12a)を代入することで得られる:

$$P_i=\left[\sum_{j\in\mathcal{K}}n_j\left\{\frac{\sigma}{\sigma-1}\psi\tau_{ji}m_j\right\}^{1-\sigma}\right]^{\frac{1}{1-\sigma}}. \tag{13}$$

式(12a)で示されているとおり，財バラエティkの価格$p_{ij}(k)$は財の種類kに依存しない．したがって，財バラエティkの需要量$q_{ij}(k)$，供給量$s_i(k)$，生産要素の投入量$a_i^F(k)$，$l_i(k)$も種類kに依存しない．以降では各変数のkを省略し，$p_{ij},q_{ij},s_i,a_i^F,l_i$と表記する．

以上の結果から，地域iの企業の利潤π_iは，次のように表される:

$$\pi_i(k)=m_i\left(\frac{\psi}{\sigma-1}s_i-1\right). \tag{14}$$

利潤ゼロ条件より，財バラエティの供給量は，

$$s_i=\frac{\sigma-1}{\psi} \tag{15}$$

となり，企業の中間要素投入量が次のとおり得られる:

$$1+\psi s_i=\sigma. \tag{16}$$

2.3 均衡条件

本モデルでは，均衡条件として短期均衡と長期均衡を扱う．短期均衡では，消費者が居住地を変更できないほどの短期に，土地・財・労働市場が均衡すると仮定する．長期均衡では，消費者が効用を最大化する居住地を選択することができると仮定する．すなわち，均衡状態を，消費者の空間分布（i.e., 人口分布）$\boldsymbol{h}=(h_i)_{i\in\mathcal{K}}$を与件とした状況下で土地・財・労働市場が均衡する短期均衡状態と，消費者の居住地選択均衡条件を満たす長期均衡状態の 2 段階に分ける．各条件について順に示す．

(1)短期均衡条件

短期的には，消費者が地域間を移動できないという条件下で，土地・財・労働市場が均衡する．この短期均衡状態を満たす条件は，各市場の清算条件から与えられる．土地市場の清算条件は以下で与えられる:

$$\begin{cases}a_ih_i+a_i^Fn_i=A_i & \text{if}\quad r_i>0,\\ a_ih_i+a_i^Fn_i\le A_i & \text{if}\quad r_i=0.\end{cases} \tag{17}$$

式(17)，式(5a)，式(12b)から，清算条件を満たす地代r_iは以下となる:

$$r_i=\frac{\alpha y_ih_i+\beta\sigma m_in_i}{A_i}. \tag{18}$$

財市場の清算条件は，式(9)に式(5b)，式(15)を代入することで，以下で表される:

$$n_im_i=\frac{1-\alpha}{\sigma}\sum_{j\in\mathcal{K}}\frac{n_im_i^{1-\sigma}\tau_{ij}^{1-\sigma}}{\sum_{k\in\mathcal{K}}n_km_k^{1-\sigma}\tau_{kj}^{1-\sigma}}y_jh_j. \tag{19}$$

労働市場の清算条件を示す．地域iにおける労働供給量は消費者数h_iで与えられ，労働需要量はl_in_iとなる．したがって，この条件は以下で表される:

$$w_ih_i=(1-\beta)\sigma m_in_i. \tag{20}$$

以上の関係から，$r_i,m_i,P_i,\overline{w}^R$は，$w_i$を用いることで，次のように表される:

$$r_i=\frac{1}{A_i}\left(\alpha y_ih_i+\frac{\beta}{1-\beta}w_ih_i\right), \tag{21a}$$

$$m_i = \left[\frac{\alpha \overline{w}^R h_i + \left(\alpha + \frac{\beta}{1-\beta}\right) w_i h_i}{A_i}\right]^{\beta} w_i^{1-\beta}, \tag{21b}$$

$$P_i = \frac{\psi\sigma}{\sigma - 1}\left[\frac{1}{(1-\beta)\sigma}\sum_{j\in\mathcal{K}} w_j h_j m_j^{-\sigma} \tau_{ji}^{1-\sigma}\right]^{\frac{1}{1-\sigma}}, \tag{21c}$$

$$\overline{w}^R = \frac{\alpha + \frac{\beta}{1-\beta}}{1-\alpha}\sum_{i\in\mathcal{K}} \frac{w_i h_i}{H}. \tag{21d}$$

さらに，総所得は以下の関係を満たす:

$$\sum_{i\in\mathcal{K}} y_i h_i = \frac{1}{(1-\alpha)(1-\beta)}\sum_{i\in\mathcal{K}} w_i h_i. \tag{22}$$

式(19)，式(20)より，w_iは以下の賃金方程式を満たすことがわかる:

$$w_i h_i = (1-\beta)(1-\alpha)\sum_{j\in\mathcal{K}} \frac{w_i h_i m_i^{-\sigma} \tau_{ij}^{1-\sigma}}{\sum_{k\in\mathcal{K}} w_k h_k m_k^{-\sigma} \tau_{kj}^{1-\sigma}} y_j h_j. \tag{23}$$

以上の条件を用いることで，間接効用v_iが人口分布$\boldsymbol{h}$の関数で与えられる．具体的には，間接効用$v_i(\boldsymbol{h})$は式(7)に，式(13)，式(21)，式(23)により定まるP_i, r_i, m_i, w_iを代入することにより得られる:

$$v_i(\boldsymbol{h}) = \bar{u}_i A_i^{\alpha} P_i^{-(1-\alpha)}\left(\alpha y_i h_i + \frac{\beta}{1-\beta} w_i h_i\right)^{-\alpha} y_i. \tag{24}$$

(2)長期均衡条件

長期的には，消費者は効用の高い地域に移動することができ，その居住地選択行動が定まる状態を長期均衡状とする．具体的には，長期均衡状態は，どの消費者も自らの居住地を変更するだけでは効用を改善できない状態と定義する．この長期均衡状態は，以下の非線形相補性条件を満たす状態$\boldsymbol{h}^*$である:

$$\begin{cases} v^* = v_i(\boldsymbol{h}) & \text{if} \quad h_i > 0, \\ v^* \geq v_i(\boldsymbol{h}) & \text{if} \quad h_i = 0, \end{cases} \tag{25a}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{K}} h_i = H. \tag{25b}$$

ここで，v^*は均衡効用水準を表す．

Pflüger and Tabuchi [8]でも示されているとおり，長期均衡状態には安定・不安定な状態が複数存在する．安定的な均衡状態を得るために，長期均衡の安定性を次の replicator dynamic によって判定する:

$$\dot{h}_i = F_i(h) \equiv h_i\{v_i(\boldsymbol{h}) - \bar{v}(\boldsymbol{h})\}, \tag{26a}$$

$$\bar{v}(\boldsymbol{h}) = \sum_{i\in\mathcal{K}} v_i(\boldsymbol{h})\frac{h_i}{H}. \tag{26b}$$

このダイナミクスの下での均衡状態$\boldsymbol{h}^*$の安定性は，$F(\boldsymbol{h}^*) = (F_i(\boldsymbol{h}^*))_{i\in\mathcal{K}}$の Jacobi 行列$\nabla F(\boldsymbol{h}^*)$の固有値により判定できる．より具体的には，均衡状態$\boldsymbol{h}^*$は$\nabla F(\boldsymbol{h}^*)$の固有値の実部が全て負であれば安定であり，実部が正の固有値が存在すれば不安定である．

(3)均衡状態の解析手順

本研究で用いるモデルには，安定・不安定な複数種類の均衡状態が存在し得る．このため，本節ではパラメータを変化させた場合に創発する安定的な均衡状態を導出する手順を示す．

短期均衡状態の地代r_i，賃金w_i，価格指数P_i，生産要素の価格m_iは，式(21)，式(23)の非線形連立方程式を解くことで得られる．ただし，ワルラス法則の存在により，これらの条件式は$4K-1$の独立な方程式にしかならず，r_i, w_i, P_i, m_iは一意に定まらない．これらが定まるように，総賃金をWとして外生的に与えて基準化する条件を式(27)のとおり与える:

$$\sum_{i\in\mathcal{K}} w_i h_i = W. \tag{27}$$

これは，経済全体の金銭の量が一定であるという制約と解釈できる．

パラメータの変化に伴い創発する安定的な均衡状態は，前述の式(26)の微分方程式により得られる．しかし，式(26)を直接解くことは不可能であるため，高山・杉山 [7]と同様に，ダイナミクス方向に徐々に人口分布$\boldsymbol{h}$を更新することで，安定均衡状態を調べる．具体的には，n回目の更新で得られた人口分布を$\boldsymbol{h}^{(n)} = (h_i^{(n)})_{i\in\mathcal{K}}$と表記すると，人口分布の更新は以下の形で表される:

$$h_i^{(n+1)} = h_i^{(n)} + \zeta F_i\left(\boldsymbol{h}^{(n)}\right). \tag{28}$$

ここで，ζはダイナミクス方向への人口分布の変化の度合いを表す正のパラメータである．

３．パラメータの設定方法

本章では計量分析を実施するために必要となる，輸送費用に関するパラメータ$\tau_{ij}^{1-\sigma}$およびアメニティ水準$\bar{u}_i$の設定方法を説明する．

3.1　輸送費用に関するパラメータ

輸送費用に関するパラメータ$\tau_{ij}^{1-\sigma}$は，実データから直接設定することができないため，Redding and Venables[9]の方法を参考に，パラメータ設定を行う．この際，先行研究 [7]では出来なかった複数の輸送モードを考慮するために，本節では，都市・地域間輸送網のモデルを，乗用車・貨物車・バス・鉄道・航空・船舶における物流・人流を考慮したものとし，それに対応するパラメータ設定方法を示す．具体的には第一段階で輸送モードの選択に関する推定を行い，第二段階で輸送費用の推定を行う．$\tau_{ij}^{1-\sigma}$は，これらから得られる推定値を用いて設定する．

(1)第一段階：輸送モード選択に関する推定

第一段階として，各輸送モードでの選択確率から，各々の選択効用に関するパラメータを推定する．

選択効用は地域内（i.e., $i=j$），地域間（i.e., $i \neq j$）別に以下のように定義する:

$$V_{t,ij}^{L} = \begin{cases} \mu^{L} \ln\left(\mathrm{time}_{ij}^{L}\right) & \text{if} \quad i=j\ , \\ \mu_{t}^{L} \ln\left(\mathrm{time}_{t,ij}^{L}\right) + \xi_{t}^{L} & \text{if} \quad i \neq j\ , \end{cases} \tag{29a}$$

$$V_{t,ij}^{P} = \begin{cases} \mu^{P} \ln\left(\mathrm{time}_{ij}^{P}\right) & \text{if} \quad i=j\ , \\ \mu_{t}^{P} \ln\left(\mathrm{time}_{t,ij}^{P}\right) + \nu_{t}^{P} \mathrm{freq}_{t,ij}^{P} + \xi_{t}^{P} & \text{if} \quad i \neq j\ . \end{cases} \tag{29b}$$

ここで，tは輸送モードの種類であり，L, Pは各々，物流・人流を表す．μ, ν, ξはパラメータ，time_{ij}は地域i, j間の所要時間，freq_{ij}は地域i, j間の運行頻度である（ただし，運行本数が存在しない輸送モードは除く）．なお，地域内では主要な輸送モード 1 種類のみを想定し（i.e., 乗用車，貨物車），輸送モードの選択は無いものとする．

この選択効用を用いて，地域間における輸送モードの選択確率および尤度関数は以下で表せる:

$$\theta_{t,ij}^{L} = \frac{\exp\left(V_{t,ij}^{L}\right)}{\sum_{k \in T} \exp\left(V_{k,ij}^{L}\right)}, \tag{30a}$$

$$\theta_{t,ij}^{P} = \frac{\exp\left(V_{t,ij}^{P}\right)}{\sum_{k \in T} \exp\left(V_{k,ij}^{P}\right)}, \tag{30b}$$

$$\lambda^{L} = \prod_{M \in ij} \prod_{k \in T} \left\{\theta_{k,ij}^{L}\right\}^{N_{k,l}^{L}}, \tag{31a}$$

$$\lambda^{P} = \prod_{M \in ij} \prod_{k \in T} \left\{\theta_{k,ij}^{P}\right\}^{N_{k,l}^{P}}. \tag{31b}$$

ここで，θは選択確率，Tは選択モードの集合，λは尤度関数，N_lはサンプルMにおける地域i, j間の交易シェアである．

各輸送モードの選択効用に関するパラメータ$\mu_t^L, \mu_t^P, \nu_t^L, \nu_t^P, \xi_t^L, \xi_t^P$は，式(31)を用いて最尤推定法により推定する．

(2)第二段階：輸送費用の推定

第二段階として，地域i, j間の交易額X_{ij}と地理的な輸送費用の関係から輸送費用の推計式を構築する．

本稿で用いるモデルでは，地域i, j間の交易額X_{ij}と$\tau_{ij}^{1-\sigma}$の関係が次のように表されることを利用する:

$$\ln\left[X_{ij}\right] = \mathrm{FX}_i + (1-\sigma)\ln\left[\tau_{ij}\right] + \mathrm{FM}_j. \tag{32}$$

ここで，FX_iは生産地iに関する項，FM_jは需要地jに関する項を表す．次に，$\tau_{ij}^{1-\sigma}$は地域i, j間の物流および人流の選択効用から決定されると仮定する．これは，輸送費用を最小化する輸送モード選択行動から得られる選択効用を用いて輸送費用を推計する，Allen and Arkolakis[10]と同様の考えである．この仮定より，$\tau_{ij}^{1-\sigma}$は第一段階で推定した選択効用を用いて以下で与えられると考える:

$$\tau_{ij}^{1-\sigma} = \begin{cases} \left[\exp\left(V_{1,ij}^{L}\right)\right]^{\Theta^{L}} \left[\exp\left(V_{1,ij}^{P}\right)\right]^{\Theta^{P}} & \text{if} \quad i=j, \\ \left[\sum_{k} \exp\left(V_{k,ij}^{L}\right)\right]^{\Theta^{L}} \left[\sum_{k} \exp\left(V_{k,ij}^{P}\right)\right]^{\Theta^{P}} & \text{if} \quad i \neq j. \end{cases} \tag{33}$$

ここで，はV_1^L, V_1^P乗用車および貨物車の選択効用，Θ^L, Θ^Pは物流項および人流項に関するパラメータである．式(33)により，式(32)は次のように表される:

$$\ln\left[X_{ij}\right] = \begin{cases} \mathrm{FX}_i + \Theta^{L}\mu^{L}\ln\left[\mathrm{time}_{ij}^{L}\right] \\ \quad + \Theta^{P}\mu^{P}\ln\left[\mathrm{time}_{ij}^{P}\right] + \mathrm{FM}_j \quad \text{if} \quad i=j\ , \\ \mathrm{FX}_i + \Theta^{L}\ln\left[\sum_{k} \exp\left(V_{k,ij}^{L}\right)\right] \\ \quad + \Theta^{P}\ln\left[\sum_{k} \exp\left(V_{k,ij}^{P}\right)\right] + \mathrm{FM}_j \\ \qquad \text{if} \quad i \neq j\ . \end{cases} \tag{34}$$

式(34)の重回帰分析から$\Theta^L\mu^L, \Theta^P\mu^P, \Theta^L, \Theta^P$を推定する．

以上，第一段階，第二段階のパラメータ推定結果および式(33)より，$\tau_{ij}^{1-\sigma}$を設定する．

3.2 アメニティ水準

アメニティ水準$\bar{u}_i$の設定は，データにより与えられる$\boldsymbol{h}$が基準均衡状態（i.e., 政策を実施していない状況下での均衡状態）となるように設定する．この方法は，QSE 研究が採用しているものと同様のアプローチである．具体的には，$\alpha, \beta, A_i, h_i, W$が与えられた下で式(23)，式(27)を満たすように賃金w_iを設定する．アメニティ水準$\bar{u}_i$は，これまでに得られたw_iとh_iから，式(25)の長期均衡条件を満たすように設定する．ただし，この条件のみでは$(\bar{u}_i)_{i \in \mathcal{K}}$が一意に定まらないため，$\bar{u}_1 = 1$と基準化する．

4．影響分析

本章では第 2 章で説明したモデルにより，異なる輸送モードの輸送費用の低下が地域経済（i.e., 人口分布）へ与える影響を分析する．そのためにまず，対象とする地域区分とネットワークを説明する．次に，第 3 章で説明したパラメータ推定に必要な都市・地域間輸送網データの整備内容およびパラメータ推定結果を示す．最後に，輸送費用が一律に低下した場合の影響を分析する．

4.1 対象とする地域区分とネットワーク

対象とする地域区分は，高山・杉山[7]と同様に，日本国内を対象に都市雇用圏を基準として分割した 432 地域区分（**図 1**）を用いた．ネットワークは，道路網，鉄道網，航空網，航路網を対象とした．ただし，航路網は道路網と一体と捉えて，道路網による輸送が不可能な地域間のみを航路網利用の対象とした．

4.2 パラメータの推定・キャリブレーション結果

(1)使用データ

モデルによる実空間を対象とした分析を可能とするために，公的データ・民間データを収集・加工することでデータを整備した．使用したデータを**表 1** に示す．

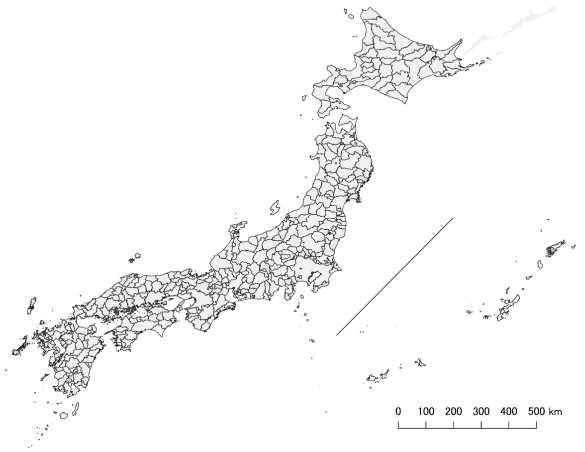

図 1　地域区分

表 1　使用データ

項目	使用データ
消費者数h_i	国勢調査
面積A_i	国土数値情報　土地利用 3 次メッシュ
所要時間 time_{ij}	デジタル道路地図（DRM）
	ナビタイムジャパン提供の経路データ
	国土数値情報　海上経路，定期旅客航路
運行頻度 freq_{ij}	ナビタイムジャパン提供の経路データ
	国土数値情報　港湾間流通量･海上経路，定期旅客航路
交易シェアN_{ij}	全国貨物純流動調査（物流センサス）
	全国幹線旅客純流動調査
交易額X_{ij}	全国貨物純流動調査（物流センサス）

消費者数h_iは，国勢調査の就業者数を使用して，都市雇用圏で集計した値とした．

面積A_iは，国土数値情報の土地利用 3 次メッシュを使用して，このうち，経済活動に利用可能な土地利用用途（i.e., 田，その他の農用地，建物用途）の面積を都市雇用圏で集計した値とした．

所要時間は，デジタル道路地図（DRM）および国土数値情報の海上経路・定期旅客経路，総合ナビゲーションアプリ『NAVITIME』を運営するナビタイムジャパン提供の代表地点間経路データを用いて設定した．具体的には，輸送モードのうち，乗用車・貨物車（船舶含む）については，DRM の高速道路・国道および海上経路・定期旅客航路を対象に，都市雇用圏の代表地点間で所要時間が最短となる経路をダイクストラ法で探索し，当該経路の所要時間を用いた．このとき，各都市雇用圏の代表地点は，都市雇用圏内の最も人口が多い市区町村の役所とした．輸送モードのうち，バス・鉄道・航空の所要時間は，ナビタイムジャパン提供の経路データに基づき設定した．具体的には，代表地点間における所要時間を優先した最適経路の値を用いた．

運行頻度は，バス・鉄道・航空を対象に，ナビタイムジャパン提供の経路データのうち，最適経路における平日の一日当たりの運行本数を用いた．

交易シェアN_{ij}は，全国貨物純流動調査（物流センサス），全国幹線旅客純流動調査を用いて設定した．具体的には，物流の交易シェアは物流センサスの輸送機関別の輸送量のシェア，人流の交易シェアは全国幹線旅客純流動調査の移動人数の輸送機関別のシェアとした．

交易額X_{ij}は，432 都市雇用圏間の交易額のデータが存在しないことから，物流センサスの輸送量を代用した．交易額と輸送量の関係性として，地域間産業連関表の 9 ブロック間ではあるものの，地域間産業連関表の金額シェアと物流センサスの重量シェアは相関係数0.94 と高い相関が存在する [11]．これより，交易額を輸送量で代用する妥当性は一定程度あると判断し使用した．

(2)パラメータの設定値

分析にあたり，$\alpha, \beta, \sigma, \tau_{ij}^{1-\sigma}, \bar{u}_i$のパラメータを設定する必要がある．このうち$\alpha, \sigma$は，実証研究の知見と整合する値に設定した．具体的には，土地の支出割合であるαは，家計の住宅への支出割合を基礎に$\alpha = 0.3$とした．代替弾力性σは$\sigma = 9.0$と設定した．土地の供給割合であるβは，先行研究 [7]で明らかにされた，我が国の実人口分布の変化の特徴を表現できる$\beta = 0.6$とした．

輸送費用に関するパラメータ$\tau_{ij}^{1-\sigma}$は，前述の方法により推定を行った．推定にあたり，説明変数に関するデータは最小値で正規化したものを使用した．なお，地域内に用いる所要時間は物流・人流で共通のものを使用するため，式(34)を以下のように変更した上で推定を行った:

$$\ln[X_{ij}] = \begin{cases} \mathrm{FX}_i + (\Theta^L + \Theta^P)\mu \ln[\mathrm{time}_{ij}] + \mathrm{FM}_j & \text{if} \quad i = j, \\ \mathrm{FX}_i + \Theta^L \ln\left[\sum_k \exp\left(V_{k,ij}^L\right)\right] + \Theta^P \ln\left[\sum_k \exp\left(V_{k,ij}^P\right)\right] + \mathrm{FM}_j & \text{if} \quad i \neq j. \end{cases} \tag{35}$$

ここで，$\mu = \mu^L = \mu^P$である．

第一段階の推定結果である選択効用パラメータを**表 2,3** に示す．表より，所要時間に関するパラメータは負の値，運行頻度に関するパラメータは正の値であることが確認できる．これは，所要時間の増加により効用が低下すること，運行頻度の増加により効用が増加することを意味しており，妥当な結果と言える．物流に関する結果より，所要時間の推定値は$|\mu_1^L| > |\mu_4^L| > |\mu_3^L|$であり，かつ，鉄道と航空の定数項が負であることが確認できる．これは，所要時間が短い OD では道路が利用されて，所要時間が長くなるにつれて航空や鉄道を利用する傾向にあることを表しており，直観と合った違和感の無い推定結果を得た．人流に関する結果では，所要時間の推定値は，$|\mu_1^P| > |\mu_3^P| > |\mu_2^P| > |\mu_4^P|$であり，定数項の推定値も踏まえると，所要時間の短い OD は，物流と同様に，道

表２　第一段階の推定結果（物流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
所要時間	道路＋航路	μ_1^L	- 2.35	- 30.2
	鉄道	μ_3^L	- 0.386	- 3.88
	航空	μ_4^L	- 1.16	- 6.28
定数項	鉄道	ξ_3^L	- 14.1	- 40.6
	航空	ξ_4^L	- 10.7	- 12.7

表３　第一段階の推定結果（人流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
所要時間	道路＋航路	μ_1^P	- 3.56	- 58.1
	バス	μ_2^P	- 2.61	- 24.4
	鉄道	μ_3^P	- 3.19	- 39.6
	航空	μ_4^P	- 1.65	- 10.5
運行頻度	バス	ν_2^P	1.33E-2	2.65
	鉄道	ν_3^P	6.09E-3	11.9
	航空	ν_4^P	1.52E-2	5.25
定数項	バス	ξ_2^P	- 5.31	- 10.4
	鉄道	ξ_3^P	- 2.92	- 12.8
	航空	ξ_4^P	- 9.10	- 13.1

表４　第二段階の推定結果

変数	パラメータ	推定値	t 値
物流の選択効用	Θ^L	7.41E-1	38.8
人流の選択効用	Θ^P	8.75E-2	4.97
地域内の所要時間	$(\Theta^L+\Theta^P)\mu$	- 4.21E-1	- 3.95

路が利用され，所要時間が長くなるにつれて，鉄道，バス，航空の利用が増加する傾向にあることを表している．次いで，運行頻度の推定値は，航空が最も大きい．これは，運行本数の増加に対する効用の増加分が大きいことを表しており，航空は運行頻度が相対的に少なく運行頻度の重要度が高いことを踏まえると，直観に合った結果と言える．

第二段階の推定結果である物流・人流の選択効用，地域内の所要時間に関するパラメータを**表４**に示す．表より，物流・人流ともに推定値は正の値となった．これは選択効用が増加するにつれて交易が増加することを示しており，妥当な結果であると言える．次いで，地域内の所要時間の推定値の符号は負となり，所要時間が増加するにつれて交易が減少することを示している．こちらも直観に合った結果であり，妥当な推定結果を得た．

アメニティ水準$\bar{u}_i$も同様に，前述のパラメータ設定方法によりキャリブレーションを行った．紙面の都合上，結果を示すことは割愛する．

4.3　シミュレーション

前述のパラメータ設定値を用いて，輸送費用が一律に低下した際の人口分布に与える影響を分析する．具体的には，$\delta_{\hat{t}}^L, \delta_{\hat{t}}^P \in [0,1]$を用いて，式(29)における選択効用のうち，所要時間を次のように減衰させて，各地域の人口シェア変化を調べた:

$$V_{t,ij}^L = \begin{cases} \mu \ln\left[(1-\delta_{\hat{t}}^L)\mathrm{time}_{ij}^L\right] & \text{if} \quad i=j\ , \\ \mu_t^L \ln\left[(1-\delta_{\hat{t}}^L)\mathrm{time}_{t,ij}^L\right] + \xi_t^L & \text{if} \quad i\neq j\ , \end{cases} \tag{36a}$$

$$V_{t,ij}^P = \begin{cases} \mu \ln\left[(1-\delta_{\hat{t}}^P)\mathrm{time}_{ij}^P\right] & \text{if} \quad i=j\ , \\ \mu_t^P \ln\left[(1-\delta_{\hat{t}}^P)\mathrm{time}_{t,ij}^P\right] + \nu_t^P \mathrm{freq}_{t,ij}^P + \xi_t^P & \\ & \text{if} \quad i\neq j\ . \end{cases} \tag{36b}$$

ここで，$\delta_{\hat{t}}^L, \delta_{\hat{t}}^P$は対象とする輸送モード$\hat{t} \in t$における輸送費用の減衰程度を示す．また，人口シェア変化は$(h_i^\omega - h_i^*)/H \times 100$で表す．ただし，上付き添字$*$は基準均衡状態，$\omega$は輸送費用変化後の均衡状態を表す．

輸送費用低下の条件として，$\delta = 0.2$とした場合のシミュレーションのうち，物流（i.e., $\delta_1^L, \delta_3^L, \delta_4^L = 0.2$），人流（i.e., $\delta_1^P, \delta_2^P, \delta_3^P, \delta_4^P = 0.2$），道路（i.e., $\delta_1^L, \delta_1^P = 0.2$），バス（i.e., $\delta_2^P = 0.2$），鉄道（i.e., $\delta_3^L, \delta_3^P = 0.2$），航空（i.e., $\delta_4^L, \delta_4^P = 0.2$）の結果を**図２**に示す．

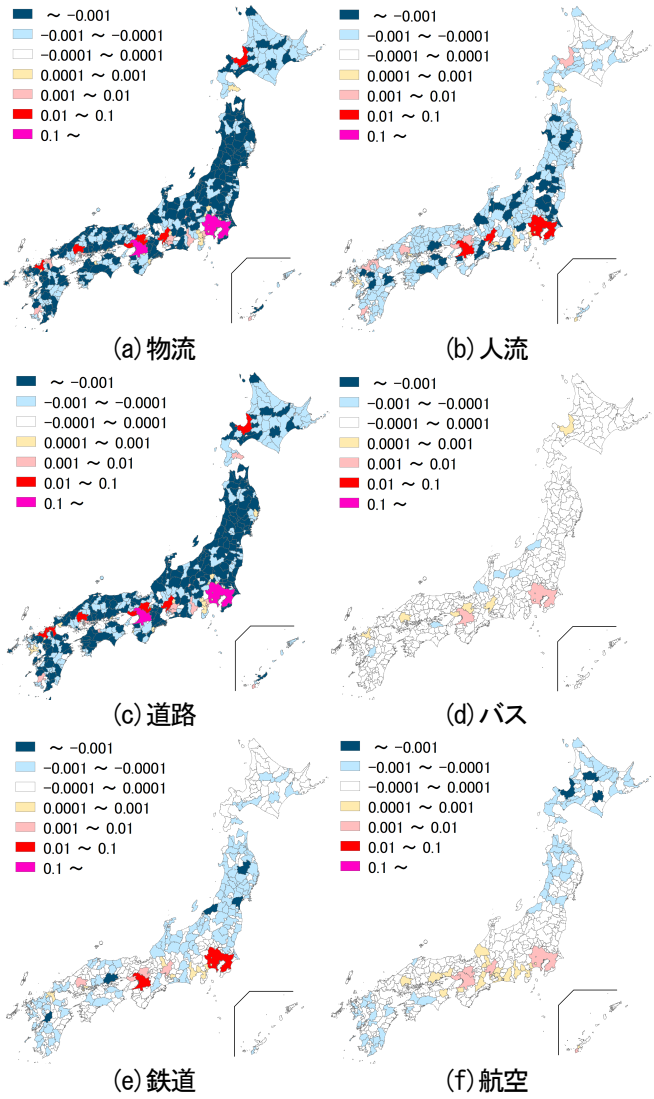

図２　輸送費用が一律低下した場合の人口シェア変化

図 2(a),(b)の物流・人流の結果から，共通して，輸送費用の低下は，東京，大阪といった大都市への人口集積をもたらす影響があることが分かる．これは高山・杉山[7]で示された同種の影響分析（i.e., $\beta = 0.6, \alpha = 0.3, \delta = 0.2$）の結果と整合している．これに加えて，本研究の結果から，人流よりも物流の方が人口集積・分散に与える影響が大きいこと，地域のうち長崎のように，物流と人流で人口シェアの増減傾向が異なる地域が存在し得ることを知ることができる．この点は，高山・杉山[7]の分析枠組みでは把握できない結果である．

図 2(c),(d),(e),(f)の各輸送モードの結果から，道路の輸送費用の低下の影響が最も大きいことが確認できる．これは，道路が地域間のリンク接続が最も多く，かつ，所要時間のパラメータの絶対値が大きいことで，δによる選択効用への影響が大きくなったためと思われる．バス・鉄道・航空では，共通して東京，大阪に人口集積が生じていることが分かる．一方，例えば，札幌に着目すると，バスでは増加，航空では減少となっており，沖縄に着目すると，鉄道では減少，航空では増加となっている．すなわち，人口分布に与える影響は，輸送費用を低下させる輸送モードによって異なることが分かる．このような輸送モードによる違いは，複数の輸送モードを考慮した本枠組みだからこそ捉えることのできる結果である．

以上の結果から，輸送費用を低下させる輸送モードの違いによって，人口分布へ与える影響が異なることを把握できた．すなわち，実空間を対象とした地域政策評価が可能な手法を構築したと言える．なお，本手法を用いることで，上述のシミュレーションのほか，道路物流の輸送費用のみが低下した場合や鉄道物流の輸送費用のみが低下した場合，といったより細かな影響分析も可能である．これは，トラックの隊列走行や新幹線の貨物輸送といった，技術革新による影響分析への適用も可能であることを意味している．

５．おわりに

本研究では，QSE に基づく空間経済分析手法を開発した．具体的には，都市・地域間輸送網のモデルを，乗用車，貨物車，バス，鉄道，航空，船舶の各輸送モードの物流・人流を考慮したものとした．併せて，それに対応するパラメータ設定手法を提示した．さらに，その設定手法によりパラメータ推定を行い，計量分析が可能なモデルを構築した．構築したモデルを用いて，日本全国を対象とした反実仮想実験を実施した結果，人口分布へ与える影響は，輸送費用が低下する輸送モードによって異なることを確認できた．これより，実空間を対象とした地域政策評価が可能な手法を構築したことを示した．

本稿では，パラメータ推定結果として一定程度妥当な結果を得ることができたものの，推定に使用した都市・地域間輸送網データの改善は課題である．具体的には，地域間交易データとして輸送量を用いたが，交易額のデータがより望ましく，別途推計したデータを用いることが考えられる．また，地域内輸送に関するデータを拡充することで，地域内の推定結果の妥当性を高めることができると考える．

謝辞

本研究は，国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発：公共交通ターミナル整備の空間経済分野に関する研究開発（代表者：高山雄貴金沢大学准教授）」の研究の一環として実施したものである．ここに記して謝意を表したい．

参考文献

1) 内閣府：第２期「まち・ひと・しごと創生総合戦略」（2020 改訂版），2020.
2) 石倉智樹，小池淳司：特集『土木計画学における空間的応用一般均衡分析―現在の到達点―』，土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol. 76, No.2, pp.63-71, 2020.
3) 小出博之訳『空間経済学　都市・地域・国際貿易の新しい分析』，東洋経済新報社, 2000.
4) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E.：Quantitative spatial economics, *Annual Review of Economics*, Vol. 9, pp.1-47, 2017.
5) Mori, T. and Osawa, M.: Cities in a world of diminishing transport costs, *arXiv preprint arXiv: 2012.12503*, 2020.
6) Akamatsu, T., Mori, T., Osawa, M. and Takayama, Y.：Endogenous agglomeration in a many-region world, *arXiv preprint arXiv: 1912.05113*, 2019.
7) 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.
8) 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.
9) Redding, S. J. and Venables, A. J.: Economic geography and international inequality, *Journal of International Economics*, Vol. 62, No. 1, pp.53–82, 2004.
10) Allen, T. and Arkolakis, C.: Trade and the topography of the spatial economy, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 129, No. 3, pp. 1085-1140, 2014.
11) 佐藤啓輔，菊川康彬，小池淳司：交易・物資流動に関する既往統計と企業間取引データの特性比較，土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_201-I_211, 2016.