

空間経済学に基づく輸送技術進展の影響評価手法の開発

高田 観月 *¹ 高山 雄貴 *²
金沢大学 大学院自然科学研究科 *¹
金沢大学准教授 理工研究域 *²

近年、空間経済学に基づく理論の計量分析への応用が進められている。しかしその分析枠組は、我が国の長期的な人口分布変化の傾向 (e.g., 大都市の人口増加) とは真逆の“輸送技術進展は必ず地方都市の人口を増加 (大都市の人口を減少) させる”という結果しか出力しない¹⁾。これは、輸送技術進展の影響の適切な予測が不可能であることを意味する重要な課題である。本研究は、企業間の価格競争を考慮できる最新の経済理論⁶⁾を応用することで、この課題を解決する計量分析手法を開発する。

A spatial computable general equilibrium approach for evaluating the impact of technological progress in transportation

Mizuki TAKADA *¹ Yuki TAKAYAMA *²
Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University *¹
Institute of Science and Engineering, Kanazawa University *²

Abstract Recently, the theory based on spatial economics has been applied to quantitative analysis. However, a quantitative analysis using this framework can only yield that “the development of intercity transportation networks increases the population of local cities (decreases the population of large cities)”, which is inconsistent with the changes in population distribution in Japan¹⁾. This is an important issue because it means that an appropriate prediction of the impact of transportation technology development is impossible. The purpose of this study is to solve this problem by applying the latest spatial economy theory⁶⁾ which can consider the price competition among firms.

Keyword: *Quantitative Spatial Economics, advanced transportation technology, population distribution*

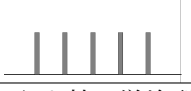
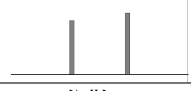
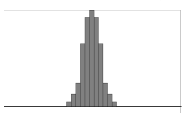
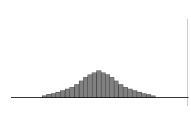
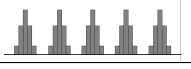
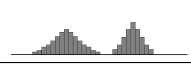
1. はじめに

我が国の 2018 年における人口移動の動向の中で、特に愛知県、大阪府、福岡県に着目すると、東京圏へ転出超過である一方で、それ以上に近隣県を中心とした転入超過であった (国土交通白書, 2020)。人口減少社会に突入していることに加え、東京圏と同時に愛知県、大阪府、福岡県等への人口集中が進み、地方衰退が深刻な社会問題となりつつある。このような人口の空間的偏りを軽減させる政策の一つとして、交通基盤整備が挙げられる。輸送技術が進展することで、輸送費用が低下し物流・人流の効率が向上するため、短期的には地方活性化が期待できる。しかし、人口・経済活動の空間的集積・分散メカニズムは複雑かつ多様であり、長期的には期待通りの効果が得られない可能性がある

(e.g., ストロー効果による地方衰退)。土木計画学分野において、上記のような地域・都市政策案の長期的影響 (e.g., 人口分布・経済集積の変化やそれに伴う経済効果) の評価に応用可能な分析を行うための理論的枠組み・モデルの構築が、重要な課題の一つとなっている。

この背景のもと、新経済地理学 (New Economic Geography: NEG) 分野で膨大に蓄積されてきた、経済活動の空間的集積現象を説明できる一般均衡モデルに関する理論研究が注目されている。近年では、計量分析への NEG 理論の応用が急速に進められ、それら一連の研究が定量的空間経済学 (Quantitative Spatial Economics: QSE) と呼ばれるようになってきている⁷⁾。QSE で用いられる NEG 理論に基づくモデルは、“経済活動の空間的集積メカニズム”と“人口の地域間移動”の両者を考慮

Table 1 NEG モデルの類型化 (高山・杉山²⁾ から一部抜粋)

モデルクラス	集積パターン	輸送費低下の影響
クラス I e.g., Krugman ³⁾	広がりを持たない多峰型 	集積の発達 
クラス II e.g., Helpman ⁴⁾	広がりを持つ単峰型 	分散 
クラス III e.g., Pflüger and Tabuchi ⁵⁾	広がりを持つ多峰型 	集積の発達+集積内の分散 

しているという特徴を有する。したがって、その研究成果は交通基盤整備や地域・都市政策の長期的効果の予測・評価にも応用できる可能性がある。

また、Akamatsu et al.¹⁾ は、既存の NEG モデルが経済活動の“分散メカニズム”の種類に依存して3つの種類に類型化できることを明らかにしている。具体的には、“集積からなるべく離れたい”ことを意味する分散力のみがモデル化されているものはクラス I，“集積している地点に居たくない”ことを意味する分散力のみがモデル化されているものはクラス II，両者を考慮したモデルはクラス III に分類される¹⁾。さらに、モデルクラスごとに“説明可能な人口集積パターン”と“輸送費用の変化が人口分布に与える影響”が大きく異なることがわかっている(表1)。さらに、Akamatsu et al.¹⁾ は、クラス III のモデルで見られる輸送費用低下に伴う人口集積パターンの変化の特徴が、1970～2015年の日本の人口変化傾向と整合することを確認している。

一方で、NEG 分野の理論研究¹⁾により、QSE で実施されている分析の問題点が指摘されている。具体的には、QSE 研究における分析結果は“輸送技術進展は必ず地方都市の人口を増加(大都市の人口を減少)させる”という結果しか出力せず、これは先述した我が国の長期的な人口分布変化の傾向と真逆の結果である。分析結果が実現象と整合しない要因として、QSE で採用されている NEG モデルに関して、分散力のモデリングが限定的であることが挙げられる。つまり、実用性の観点から、クラス II に分類されるモデルを採用しているためである。

上記の問題を解決するため、本研究では、最新の経済理論⁶⁾を用いて政策効果分析に応用可能な都市集積モデルの構築を行う。方向性としては、QSE 研究で採用

されている、クラス II に分類されるモデルの分散力のモデリングを拡張し、実現象と整合の取れるクラス III モデルに改良する²⁾。ここで、本研究が着目した分散力は、価格競争効果である。価格競争効果とは、価格競争を避けるため企業同士ができるだけ離れようとすることを意味するが、既存のクラス II モデルはこの挙動を考慮できていない。本稿では、構築した理論モデルの概要と、このモデルを用いた計量分析に必要なパラメータの推定方法について説明する。分析手法を簡潔にまとめることは、今後 QSE 研究において、実都市を対象とした反実仮想実験を行う際に大いに役立つ。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では、本研究で構築した、Helpman⁴⁾に基づくモデルの概要を説明する。第3章では、均衡状態を定式化した上で、輸送費の低下に伴い創発する安定均衡状態の導出方法を示す。第4章では、計量分析を実施するために必要となるパラメータの設定方法を説明する。第5章では、本論文の結論と今後の展開について述べる。

2. モデル

本章では、解析に使用する Helpman⁴⁾に基づくモデルを示す。

2.1 地域・経済環境の設定

本モデルでは、 K か所の離散的な地域が存在する経済システムを考える。企業は、独占的競争下で収穫逓増の技術により、労働を生産要素として、差別化された財を生産する。本モデルでは、規模の経済、消費者の多様性選好、並びに供給できる財の種類(バラエティ)に制限がないことから、どの企業も必ず他企業とは異なる種類の財を生産する。そのため、地域 i で生産を行

¹⁾ Akamatsu et al.¹⁾ で示されているように、モデルクラスの種類は、モデル化されている経済活動の集積メカニズム(集積力)ではなく、分散メカニズム(分散力)の種類のみ依存して決まる。クラス I、クラス II の持つ分散力は、それぞれ大域的分散力、局所的分散力と呼ばれ、クラス III は両方の分散メカニズムを持つ。

²⁾ 本研究では、クラス I に分類されるモデルの改良は行わない。これは、表1で示している通り、クラス I モデルには“広がりを持たない集積”が形成されるという特徴があるためである。この特徴は、理論解析上は問題にならないものの、計量分析には適さない極端な(e.g., わずかなパラメータ値の変化で殆どの地域の人口がゼロとなる)結果を出力する要因になる。

う企業数は、供給される差別化財の種類数 n_{ij} に等しい。そこで以降では、地域 i において財 k を生産する企業を地域 i の企業 k と呼ぶ。またこの財は、地域間輸送ネットワークにより任意の地域に供給でき、その際の輸送費用は氷塊費用の形をとる。

消費者は、地域全体に固定的に N 存在し、また、居住する地域 $i \in \mathcal{K} \equiv \{1, 2, \dots, K\}$ 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 $h_i \geq 0$ で表現する。これらの消費者は、所有する 1 単位の労働を非弾力的に供給する。

2.2 消費者行動

本研究では、地域 $i \in \mathcal{K}$ に居住する消費者の効用関数が Cobb-Douglas 型であると仮定する：

$$U_i = \left(\frac{a_i}{\alpha}\right)^\alpha \left(\frac{Q_i}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha}. \quad (1)$$

ここで、 $\alpha \in (0, 1)$ は土地への支出割合を表すパラメータ、 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。Helpman⁴⁾ はこの部分効用 Q_i を財バラエティ間の代替弾力性 σ を用いて $Q_i = \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} q_{ji}(k)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} dk\right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$ と表現している。本研究では、Translog 型⁶⁾ であると仮定することで、価格競争効果をモデルに導入することができる。しかし、これは直接的に決まらず、消費者の支出関数 E_i を満たす関数として以下のように定義される：

$$\begin{aligned} \ln E_i = \ln Q_i + \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji}} \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} \ln p_{ji}(k) dk \\ - \frac{\beta}{2} \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} (\ln p_{ji}(k))^2 dk \right. \\ \left. - \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji}} \left(\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} \ln p_{ji}(k) dk \right)^2 \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

消費者の予算制約式は以下の通りとなる：

$$y_i = r_i a_i + \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} p_{ji}(k) q_{ji}(k) dk. \quad (3)$$

ここで、 r_j は地代、 $q_{ji}(k)$ 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 の消費量を表す。本研究では、すべ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)。このとき、消費者の土地収入は以下で与えられる：

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

効用最大化問題は、次の 2 段階の問題へと変換できる：

[下位問題]

$$E_i = \min_{q_{ij}(k)} \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} p_{ji}(k) q_{ji}(k) dk \quad \text{s.t. } Q_i = Q_i^*. \quad (5)$$

[上位問題]

$$\max_{a_i, Q_i} \left(\frac{a_i}{\alpha}\right)^\alpha \left(\frac{Q_i}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha} \quad \text{s.t. } y_i = r_i a_i + P_i Q_i. \quad (6)$$

ここで、 P_i は地域 i での差別化財の価格指数であり、 $P_i Q_i = E_i$ が成立する。

shephard の補題より、補償需要関数 $q_{ji}(k)$ は以下のような関係を持つ：

$$q_{ji}(k) = \frac{\partial E_i}{\partial p_{ji}(k)}. \quad (7)$$

これを用いると、地域 j で生産され地域 i で消費される財 k への支出シェア $s_{ji}(k)$ は

$$s_{ji}(k) = \frac{\partial \ln E_i}{\partial \ln p_{ji}(k)} = \frac{p_{ji}(k)}{E_i} q_{ji}(k). \quad (8)$$

となる。したがって、 $q_{ji}(k)$ は以下のように求められる：

$$\begin{aligned} q_{ji}(k) &= \frac{E_i}{p_{ji}(k)} s_{ji}(k), \\ &= \frac{E_i}{p_{ji}(k)} \{c_i - \beta \ln p_{ji}(k)\}. \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 c_i は財 k の種類に依存しない項であり、次のように定義する：

$$c_i \equiv \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji}} \left(1 + \beta \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_{ji}} \ln p_{ji}(k) dk \right). \quad (10)$$

さらに、上位問題より、差別化財の支出額 E_i は以下で与えられる：

$$E_i = (1 - \alpha) y_i. \quad (11)$$

2.3 企業行動

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、労働を固定的に 1 単位と、生産量 $x_i(k)$ に応じて $\psi x_i(k)$ 単位投入する必要がある。地域 i の企業 k の労働需要量を $l_i(k)$ で表すと次の関係が成立する：

$$l_i(k) = 1 + \psi x_i(k). \quad (12)$$

財の地域間輸送には、氷塊型の輸送費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仮定する。そのため、地域 i で生産された財 k の地域 j における需要量 $q_{ij}(k)$ と供給量 $x_i(k)$ との間に、次の関係が成立する:

$$x_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(k) h_j. \quad (13)$$

このとき、地域 i の企業 k の利潤最大化行動は、次のように定式化できる:

$$\max_{p_{ij}(k), l_i(k)} \pi_i(k), \quad (14a)$$

$$\text{s.t. (9), (12), (13), } q_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{K}. \quad (14b)$$

ここで、 $\pi_i(k)$ は地域 i の企業の利潤を表し、収入から労働の費用を引いた、以下の形で表される:

$$\pi_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{K}} p_{ij}(k) q_{ij}(k) h_j - w_i l_i(k). \quad (15)$$

利潤最大化問題と (11) より、次の関係が得られる:

$$p_{ij}(k) \frac{(1-\alpha) y_j h_j}{\{p_{ij}(k)\}^2} [\psi w_i \tau_{ij} \{c_j - \beta \ln p_{ij}(k)\} + \beta \psi w_i \tau_{ij} - \beta p_{ij}(k)] = 0. \quad (16)$$

本研究では、支出関数が translog 関数であるため、必ず $p_{ij} > 0$ である。これをふまえて (16) を整理すると、以下の関係が得られる:

$$c_j - \beta \ln p_{ij} = \beta \frac{p_{ij} - \psi w_i \tau_{ij}}{\psi w_i \tau_{ij}}. \quad (17)$$

この関係で示されているように、財 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 k の需要量 $q_{ij}(k)$ 、生産量 $x_i(k)$ 、生産要素の投入量 $l_i(k)$ もパラエティ k に依存しない。そこで以降では、各変数の k を省略し、 p_{ij} 、 q_{ij} 、 x_i 、 l_i と表記する。

ここで、(9)、(17) の関係から明らかなように、 q_{ij} はゼロとなる可能性がある。具体的には、

$$q_{ij} = \frac{(1-\alpha) y_j}{p_{ij}} \beta \frac{p_{ij} - \psi w_i \tau_{ij}}{\psi w_i \tau_{ij}} \begin{cases} > 0 & \text{if } p_{ij} > \psi w_i \tau_{ij}, \\ = 0 & \text{if } p_{ij} = \psi w_i \tau_{ij}. \end{cases} \quad (18)$$

これは、輸送費が非常に高い場合、財の都市間輸送が行われない可能性があることを示している。

3. 均衡条件

3.1 短期・長期均衡条件

差別化財・労働市場は、消費者が居住地を変更できないほど短期で均衡し、長期的には消費者は効用を最大化する居住地を選択できると仮定する。すなわち、均衡状態を、消費者の空間分布 (i.e., 人口分布) $\mathbf{h} = (h_i)_{i \in \mathcal{K}}$ を与件とした状況下で差別化財・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。そこで本節では、これらの均衡状態が満足する均衡条件を順に示す。

3.1.1 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、差別化財・労働市場が均衡する。この短期均衡条件を満たす条件は、各市場の清算条件・企業の利潤ゼロ条件から与えられる。まず、差別化財の価格 p_{ij} は財市場の清算条件 (13) の下での利潤最大化行動の結果として定まる。この条件は、(16) より、 $\Delta p_{ij} \equiv p_{ij} - \psi w_i \tau_{ij}$ と定義すると、以下のように表される:

$$\begin{cases} \psi w_i \tau_{ij} [c_j - \beta \ln(\Delta p_{ij} + \psi w_i \tau_{ij})] - \beta \Delta p_{ij} = 0 & \text{if } \Delta p_{ij} > 0, \\ \psi w_i \tau_{ij} [c_j - \beta \ln(\Delta p_{ij} + \psi w_i \tau_{ij})] - \beta \Delta p_{ij} \leq 0 & \text{if } \Delta p_{ij} = 0. \end{cases} \quad (19a)$$

この結果から、 $p_{ij} = \Delta p_{ij} + \psi w_i \tau_{ij}$ が得られる。

労働市場の清算条件は、地域 i における労働供給量は h_i で与えられ、需要量は $\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} l_i$ となることから、次の条件で与えられる:

$$\begin{cases} h_i - \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} + (1-\alpha) \psi \sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} \tau_{ij} \frac{c_j - \beta \ln p_{ij}}{p_{ij}} y_j h_j \right] = 0 & \text{if } w_i > 0, \\ h_i - \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} + (1-\alpha) \psi \sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} \tau_{ij} \frac{c_j - \beta \ln p_{ij}}{p_{ij}} y_j h_j \right] \geq 0 & \text{if } w_i = 0. \end{cases} \quad (19b)$$

条件 (19b) は、供給と需要が一致するなら賃金が正となり、供給が需要を上回る場合は賃金がゼロになることを意味している。最後に、企業の利潤ゼロ条件より、(11)、(15)、を用いて次の関係が得られる:

$$\begin{cases} (1-\alpha) \frac{\Delta p_{ij}}{p_{ij}} (c_j - \beta \ln p_{ij}) y_j h_j - w_i = 0 & \text{if } n_{ij} > 0, \\ (1-\alpha) \frac{\Delta p_{ij}}{p_{ij}} (c_j - \beta \ln p_{ij}) y_j h_j - w_i \leq 0 & \text{if } n_{ij} = 0. \end{cases} \quad (19c)$$

条件 (19c) は、利潤がゼロとなるまで企業が参入し続けるため $n_{ij} > 0$ であれば $\pi_{ij} = 0$ 、利潤が負となる場合は企業が参入しないため $n_{ij} = 0$ であれば $\pi_{ij} < 0$ となることを意味している。

以上の関係より、 $\Delta \mathbf{p} = (\Delta p_{ij})_{i,j \in \mathcal{K}}$ 、 $\mathbf{w} = (w_i)_{i \in \mathcal{K}}$ 、 $\mathbf{n} = (n_{ij})_{i,j \in \mathcal{K}}$ は、(19a)、(19b)、(19c) の連立方程式から定まる。なお、ワルラス法則の存在により、これらの条件式は $2K^2 + K - 1$ の独立な方程式にしかならないため、 $\Delta \mathbf{p}$ 、 \mathbf{w} 、 \mathbf{n} は一意には定まらない。そこで、

本研究では消費者の土地収入 \bar{w}^R を 1 に基準化する:

$$\bar{w}^R = \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}} r_i a_i h_i}{H} = 1. \quad (20)$$

以上の関係から得られる \mathbf{p} , \mathbf{n} を用いて (2) の支出関数を変形すると, 地域 i の部分効用 Q_i が, 人口分布 $\mathbf{h} = (h_i)_{i \in \mathcal{K}}$ の関係で間接的に与えられる:

$$\ln Q_i(\mathbf{h}) = \ln(1 - \alpha)y_i + \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji}} \sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} \ln p_{ji} - \frac{\beta}{2} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} (\ln p_{ji})^2 - \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji}} \left(\sum_{j \in \mathcal{K}} n_{ji} \ln p_{ji} \right)^2 \right\}. \quad (21)$$

この部分効用を用いると, 地域 i の効用水準 (間接効用) v_i は人口分布 $\mathbf{h} = (h_i)_{i \in \mathcal{K}}$ の関係で与えられる. より具体的には, 間接効用 v_i は (1) に (21) を代入することにより得られる:

$$v_i(\mathbf{h}) = -\alpha \ln \frac{h_i}{A_i} + (1 - \alpha) \ln Q_i(\mathbf{h}). \quad (22)$$

ここで, A_i は地域 i の土地面積である.

3.1.2 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落ち着く状態が長期均衡状態である. 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 \mathbf{h}^* である:

$$\begin{cases} v^* = v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i > 0, \\ v^* \leq v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i = 0, \end{cases} \quad (23a)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{K}} h_j = H. \quad (23b)$$

ここで, v^* は均衡効用水準を示す.

本モデルにおける長期均衡状態には, 安定・不安定なものも複数存在する. そこで, 長期均衡の安定性を次の replicator dynamic³ によって判定する:

$$\dot{h}_i = F_i(\mathbf{h}) \equiv h_i \{v_i(\mathbf{h}) - \bar{v}(\mathbf{h})\}, \quad (24a)$$

$$\bar{v}(\mathbf{h}) = \sum_{j \in \mathcal{K}} v_j(\mathbf{h}) \frac{h_j}{H} = \sum_{j \in \mathcal{K}} v_j(\mathbf{h}) h_j. \quad (24b)$$

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

³この方法は, 微分可能, 消費者の人口増加率が効用と正の相関を持つ, という望ましい性質を持つため, 新経済地理学分野で標準的に利用されている.

3.2 均衡状態の解析手順

本研究で解析するモデルには, 安定・不安定な複数種類の均衡状態が存在し得る. そこで本節では, 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ための手順を示す.

前述した通り, 短期均衡状態における財の価格 \mathbf{p} , 差別化財のパラエティ数 \mathbf{n} , 賃金率 \mathbf{w} は, 非線形連立方程式 (19) を解くことにより得られる. ただし, ワルラス法則の存在により, これらの条件式は $2\mathcal{K}^2 + \mathcal{K} - 1$ の独立な方程式にしかならないため, \mathbf{p} , \mathbf{n} , \mathbf{w} は一意には定まらない. そこで, 本研究では (20) のように, 消費者の土地収入を 1 に基準化した. これはニュメールであることを意味している.

パラメータの変化に伴い創発する安定的な均衡状態は, 微分方程式 (24) により得られる. しかし, (24) を直接解くことは不可能であるため, 高山・杉山²⁾ と同様, ダイナミクス方向に徐々に人口分布 \mathbf{h} を更新することで, 安定均衡状態を調べることとする. 具体的には n 回目の更新で得られた人口分布を $\mathbf{h}^{(n)} = (h_i^{(n)})_{i \in \mathcal{K}}$ と表記すると, 人口分布の更新は以下で表される形で行う:

$$h_i^{(n+1)} = h_i^{(n)} + \zeta F_i(\mathbf{h}^{(n)}). \quad (25)$$

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示す正のパラメータである.

4. パラメータの設定方法

2, 3 章で説明した理論モデルは, 政策効果分析手法として有効な, 実都市を対象とした反実仮想実験にも応用することが可能である. ただし, 計量分析を実施するにあたり, いくつかのパラメータを設定しなければならない. 本章では, 分析に必要なパラメータ $h_i, A_i, \alpha, \tau_{ij}, \bar{u}_i$ の設定方法を説明する.

上記のパラメータのうち, h_i, A_i, α は, 既に過去の分析例から妥当な値がわかっているものである. 各地域の消費者数 h_i , 土地面積 A_i は, 国勢調査データから得られる就業者数・面積により与える. 土地への支出シェアを表すパラメータ α は, Allen and Arkolakis¹⁰⁾ で用いられる, 実証研究の知見と整合する値に設定する. 具体的には, 家計の住宅への支出割合を基礎に設定された, $\alpha = 0.3$ を使用する.

一方で, 交通ネットワークに関わる輸送費用 τ_{ij} と, アメニティ水準 \bar{u}_i は実データから直接推定することができない. しかし, 本研究には, 杉本ら⁸⁾ で用いられている方法を引用することで, これらのパラメータを簡単に推定できるという分析上のメリットが存在する. 以下の節では, その具体的な方法について説明する.

4.1 輸送費用パラメータの推定

本節では, 複数の輸送モード (道路, 鉄道, 航空) を考慮した輸送費用パラメータ τ_{ij} を考える. 先述したように, このパラメータは実データから直接推定できない. そこで, 本研究では Redding and Venables⁹⁾ による推定方法を参考にした. 具体的には, まず, 輸送モードの選択に関する推定 (第一段階) を行い, 次に,

輸送費用の推定(第二段階)を行う。また、複数の輸送モードを考慮すると同時に、物流・人流を考慮した輸送費用の推定を行う。

4.1.1 第一段階: 輸送モード選択に関する推定

各輸送モードの選択確率を推定する。物流($t = F$), 人流($t = P$)における各輸送モードの選択効用 $V_{m,ij}^t$ を次のように定義する:

$$V_{m,ij}^t = a_m^t \text{dist}_{m,ij}^t + b_m^t. \quad (26)$$

ここで、 m は輸送モードの種類であり、 $m = 1, 2, 3$ はそれぞれ道路、鉄道、航空を表している。また、 $\text{dist}_{m,ij}^t$ は地域 i, j 間の距離に関する項であり、物流では総距離、人流では所要時間を表す。

次に、物流、人流における各輸送モードの選択確率 $\pi_{m,ij}^t$ 、尤度関数 L^t を次の式で定義し、最尤推定法を用いて各輸送モードのパラメータ a_m^t, b_m^t を推定する:

$$\pi_{m,ij}^t = \frac{\exp(V_{m,ij}^t)}{\sum_k \exp(V_{k,ij}^t)}, \quad (27)$$

$$L^t = \prod_k \{\pi_{m,ij}^t\}^{N_{m,ij}^t}. \quad (28)$$

ここで、 $N_{m,ij}^t$ は輸送モード m による地域 i, j 間の交易シェアを表し、物流では物流センサスによる交易量、人流では旅客純流動調査による旅客量を用いて推定する。

4.1.2 第二段階: 輸送費用の推定

地域 i, j 間の取引額 X_{ij} と距離に関する項の以下の関係により、重回帰分析を行うことで輸送費用に関するパラメータ $\Theta^t \equiv 1/\theta^t$ を推定する:

$$\begin{aligned} \ln[X_{ij}] = & FX_i + \Theta^F \ln \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^F) \right] \\ & + \Theta^P \ln \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^P) \right] + FM_j. \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、 FX_i は生産地 i に関する項、 FM_j は需要地 j を表す項である。また、 $\sum_k \exp(V_{k,ij}^t)$ は地域 i, j 間のアクセシビリティの高さを表している。

以上の方法で推定したパラメータを用いて、地域間輸送費用 τ_{ij} を以下の式から求める:

$$\tau_{ij} = \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^F) \right]^{\Theta^F} \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^P) \right]^{\Theta^P}. \quad (30)$$

4.2 アメニティ水準のキャリブレーション

各地域のアメニティ水準 \bar{u}_i は、データにより与えられる h が基準均衡状態(i.e., 政策を実施していない状態での均衡状態)となるように設定する。なお、この方法は、QSE研究と同様のアプローチである。具体的に

は、既に与えられている α, A_i, h_i の下で、条件(19b)を満たすように賃金 w_i を設定する。そして、すでに得られている h_i, w_i が長期均衡条件(23)を満たすようにアメニティ水準 \bar{u}_i を設定する。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。

5. おわりに

本稿では、集積経済理論、特に都市間の人口移動を表現可能なNEG理論の枠組みを応用した近年の実証分析の課題の指摘と、政策効果分析に応用可能な都市集積モデルの構築を行った。具体的には、既存のHelpman⁴⁾にThisse and Ushchev⁶⁾の支出関数を導入することで、価格競争効果を考慮可能なモデルに改良した。また、杉本ら⁸⁾と同様の、モデルに物流・人流および複数の輸送モード(道路、鉄道、航空)を考慮した都市間輸送ネットワークを導入し、交通基盤整備や技術革新に伴う輸送効率の向上効果を分析するための手法をまとめた。この枠組みは、様々な地域・都市政策の長期的影響を合理的に評価するための有効な基礎となることが期待される。

構築した理論モデルの特徴と実現象との整合性を確認するため、今後は、本稿で示した手法に倣い、輸送効率向上に影響を与えうるいくつかの状況を想定した反実仮想実験を行う。

参考文献

- 1) Akamatsu, T., Mori, T., Osawa, M. and Takayama, Y.: Endogenous agglomeration in a many-region world, *arXiv: 1912.05113v*, pp.1-53, 2020.
- 2) 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.
- 3) Krugman, P. R.: Increasing returns and economic geography, *Journal of Political Economy*, Vol. 99, No. 3, pp.483-499, 1991.
- 4) Helpman, E.: The size of regions, in Pines, D., Sadka, E. and Zilcha, I. eds. *Topics in Public Economics: Theoretical and Applied Analysis*, Cambridge University Press, pp.33-54, 1998.
- 5) 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.
- 6) Thisse, J.-F., and Ushchev, P.: Monopolistic Competition Without Apology, in *Ch 5 in Handbook of Game Theory and Industrial Organization*, Vol. I, pp.93-136, 2018.
- 7) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E.: Quantitative spatial economics, *Annual Review of Economics*, Vol.9, pp.1-47, 2017.
- 8) 杉本達哉, 杉山雅也, 高山雄貴, 高木 朗義: 定量的空間経済学に基づく空間経済分析手法の開発, 交通工学研究発表会論文集, Vol.41, pp.637-644, 2021.
- 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.