

都市間と都市内の交通改善による 経済活動の空間分布変化： 定量的空間経済学に基づく空間経済分析

杉本 達哉¹・高山 雄貴²

¹正会員 八千代エンジニアリング株式会社 (〒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 (Corresponding Author)

²正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: takayama.y.af@m.titech.ac.jp

地域経済の活性化を図るための政策の一つに、都市間と都市内それぞれでの交通基盤整備がある。これらの政策の効果を適切に分析し得る分析枠組として定量的空間経済学 (Quantitative Spatial Economics : QSE) がある。しかし、QSE 研究では、都市間と都市内の交通基盤整備を区別したような多様なケーススタディの蓄積がないことや、現況再現のためのモデルの説明力が十分でないといった問題点があった。そこで本研究では、QSE を基盤として、それらを解決するための空間経済分析枠組を提案した。そして、本分析枠組でモデル説明力が従来より向上することを示した。さらに、日本を対象にした反実仮想実験により、都市間や都市内の交通改善が人口分布に与える変化を分析し、その特徴を調べた。

Key Words: *quantitative spatial economics, population distribution, intra-urban transportation, inter-urban transportation, regional economy*

1. はじめに

地域経済の活性化を図るための政策の一つに、都市間と都市内それぞれでの交通基盤整備がある。実際、デジタル田園都市国家構想総合戦略¹⁾では地方創生を加速化・深化させて「全国どこでも誰もが便利で快適に暮らせる社会」を目指している。そこでは、東京圏への過度な一極集中の是正や多極化を図るための一つの策として、三大都市圏間等のアクセス利便性向上や地域公共交通網の再構築を挙げている。

このような政策が意図した効果 (ie., 東京圏への過度な一極集中の是正や地域経済の活性化) をもたらすには、都市間と都市内の交通改善のバランスが重要となる。これは、都市内の交通改善はその地域の経済活性化をもたらすことが期待できる一方で、都市間の交通改善は (短期的には) 地域活性化が期待できるものの、長期的にはストロー現象 (ie., 地方から大都市への人口・経済活動の流出) のような、期待とは異なる影響をもたらすためである。

近年、交通基盤整備などの長期的効果の予測・評価に

応用が期待される研究として、定量的空間経済学 (Quantitative Spatial Economics : QSE) がある²⁾。QSE モデルは、新経済地理学 (New Economic Geography : NEG) 分野で蓄積されてきた経済集積メカニズムに関する理論³⁾を計量分析に応用したもので、“経済活動の空間的集積メカニズム”と“人口の地域間移動”の両方を考慮しているという特徴を持つ。例えば、高山・杉山⁴⁾は、従来の QSE では不可能であった、ストロー現象を表現し得る QSE モデルを開発している。さらに、杉本ら⁵⁾では、高山・杉山⁴⁾を拡張し、モデルに地域間交通網の利便性を反映することで、実空間での計量分析を可能とする分析枠組を開発している。

しかし、これまでの QSE モデルには2つの問題が存在する。1つ目に、QSE 研究では、都市間と都市内の輸送抵抗を区別したような、多様なケーススタディが蓄積されていないという問題がある。これは、従来の QSE 研究での計量分析が、都市間・都市内の輸送費用が一律に変化するような、理論研究と同様の比較静学に焦点を当てているためである。したがって、都市間・都市内の交通改善に関する多様なケーススタディを蓄積するために、

都市間と都市内の輸送抵抗を分離して扱える分析枠組を開発することが課題となる。

2 つ目に、QSE モデルは現況再現のための説明力が十分でないという問題がある⁹⁾。具体的には、外生的に与えられるアメニティ水準によって各地域の人口をほとんど説明する形となり、モデル自体は現実の人口分布をほとんど説明できていないことが示唆されている。これは、パラメータ設定法に関する研究蓄積が不足していることに起因している。したがって、モデルの説明力向上のためのパラメータ設定法の確立が課題となる。

本研究では、都市間の輸送抵抗と都市内の輸送抵抗を分離して扱うことを可能とし、かつ、モデルの説明力を向上させる、空間経済分析枠組を提案する。そのために、QSE を基盤として、都市内交通基盤水準を反映したモデル説明力を向上させるパラメータ設定法を提示する。そして、実際にモデルの説明力が向上することを示す。さらに、都市間・都市内の交通改善に関する反実仮想実験を実施することで、それらが人口分布に与える変化の特徴を調べる。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では、本研究で用いる、先行研究⁴⁾でストロー現象を表現できることが明らかとなっている Pflüger and Tabuchi⁷⁾に基づくモデルを説明する。第 3 章では、均衡状態の定式化と交通改善に伴って創発する安定均衡状態の導出方法を示す。第 4 章では、都市間と都市内の輸送抵抗を分離して表現して、モデルの説明力を向上し得るパラメータ設定方法を示す。そして、実際に設定したパラメータのもとで、モデルの説明力が向上することを示す。第 5 章では、日本を対象とした計量分析を実施し、都市間・都市内の交通改善の影響を示す。最後に、第 6 章において本論文の結論を述べる。

2. モデル

(1) 地域・経済環境の設定

地域は離散的に K 箇所存在し、地域の集合を $\mathcal{K} \equiv \{1, 2, \dots, K\}$ 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、地域全体に H 存在し、居住する地域 i を選択できる。各地域 i に立地する消費者の数を $h_i \geq 0$ と表現する。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) 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：

$$U_i = B_i \left(\frac{a_i}{\mu} \right)^\mu \left(\frac{Q_i}{1 - \mu} \right)^{1 - \mu}, \quad (1a)$$

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

ここで、 $\mu \in (0, 1)$ は土地への支出割合を表すパラメータ、 B_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、 $q_{ji}(\ell)$ は地域 j で生産され地域 i で消費される財バラエティ ℓ 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。

消費者の予算制約式は以下のとおりとなる：

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

ここで、 r_i は地代、 $p_{ji}(\ell)$ 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 ℓ の価格を表す。

また、消費者の所得 y_i は、賃金率 (労働 1 単位当たりの賃金) w_i と地代収入 \bar{w}^R からなる：

$$y_i = w_i + \bar{w}^R. \quad (3)$$

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し (i.e., public ownership)¹¹⁾、消費者の地代収入は以下で与えられる：

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

ここで、 a_i^f は企業が生産のために投入する土地の量である。

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

$$a_i = \mu \frac{y_i}{r_i}, \quad (5a)$$

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

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

ここで、 P_i は財の価格指数であり、以下で定義される：

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

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：

$$v_i = B_i r_i^{-\mu} P_i^{-(1 - \mu)} y_i. \quad (7)$$

(3) 企業行動

企業は、独占的競争市場下で土地・労働を投入して財を生産する。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 (i.e., 地域全体を見渡しても、同じバラエティの財

を生産する企業は存在しない)。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*ℓ*を生産する企業を地域*i*の企業*ℓ*と呼ぶ。

地域*i*の企業*ℓ*が財バラエティ*ℓ*を生産するには、1単位の固定的な投入と生産量*x_i(ℓ)*に応じた*ψx_i(ℓ)*の限界的な投入が必要となる。Cobb-Douglas型の生産技術を仮定するため、土地・労働の投入量との関係は以下となる：

$$1 + \psi x_i(\ell) = \left(\frac{a_i^F(\ell)}{\mu^F} \right)^{\mu^F} \left(\frac{l_i(\ell)}{1 - \mu^F} \right)^{1 - \mu^F} \quad (8)$$

ここで、 $\mu^F \in (0,1)$ は土地の投入割合を表すパラメータ、 $a_i^F(\ell)$ 、 $l_i(\ell)$ 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*ℓ*の地域*j*における需要量*q_{ij}(ℓ)*と供給量*x_i(ℓ)*との間に、次の関係が成立する：

$$x_i(\ell) = \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(\ell) h_j \quad (9)$$

地域*i*の企業*ℓ*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}(ℓ)*を所与として、地域*i*で生産されて地域*j*で消費される財バラエティ*ℓ*の価格*p_i(ℓ) = (p_{ij}(ℓ))_{j ∈ ℳ}*と地域*i*の土地・労働の投入量*a_i^F(ℓ)*、 $l_i(\ell)$ 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：

$$\max_{p_i(\ell), a_i^F(\ell), l_i(\ell)} \pi_i(\ell), \quad (10a)$$

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

ここで、 $\pi_i(\ell)$ 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：

$$\pi_i(\ell) = \sum_{j \in \mathcal{K}} p_{ij}(\ell) q_{ij}(\ell) h_j - r_i a_i^F(\ell) - w_i l_i(\ell). \quad (11)$$

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

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

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

$$l_i(\ell) = \frac{1 - \mu^F}{w_i} \left\{ 1 + \psi \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(\ell) h_j \right\} m_i, \quad (12c)$$

$$m_i = r_i^{\mu^F} w_i^{1 - \mu^F}. \quad (12d)$$

ここで、 m_i は生産要素の価格を表す。式(12a)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：

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

式(12a)で示されているとおり、財バラエティ*ℓ*の価格*p_{ij}(ℓ)*は財の種類*ℓ*に依存しない。以降では、各変数の*ℓ*を省略し、 $p_{ij}, q_{ij}, x_i, a_i^F, l_i$ と表記する。

財バラエティの供給量は、利潤ゼロ条件より、次のとおり得られる：

$$x_i = \frac{\sigma - 1}{\psi}. \quad (14)$$

3. 均衡条件

均衡条件は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かと仮定する。各々の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：

$$\begin{cases} a_i h_i + a_i^F n_i = A_i & \text{if } r_i > 0, \\ a_i h_i + a_i^F n_i \leq A_i & \text{if } r_i = 0. \end{cases} \quad (15)$$

式(15)、式(5a)、式(12b)から清算条件を満たす地代*r_i*は以下となる：

$$r_i = \frac{\mu y_i h_i + \mu^F \sigma m_i n_i}{A_i}. \quad (16)$$

財市場の清算条件は、式(9)に式(5b)、式(14)を代入することで、以下で表される：

$$n_i m_i = \frac{1 - \mu}{\sigma} \sum_{j \in \mathcal{K}} \frac{n_i m_i^{1 - \sigma} \tau_{ij}^{1 - \sigma}}{\sum_{k \in \mathcal{K}} n_k m_k^{1 - \sigma} \tau_{kj}^{1 - \sigma}} y_j h_j. \quad (17)$$

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：

$$w_i h_i = (1 - \mu^F) \sigma m_i n_i. \quad (18)$$

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

$$r_i = \frac{1}{A_i} \left(\mu y_i h_i + \frac{\mu^F}{1 - \mu^F} w_i h_i \right), \quad (19a)$$

$$m_i = \left[\frac{\mu \bar{w}^R h_i + \left(\mu + \frac{\mu^F}{1 - \mu^F} \right) w_i h_i}{A_i} \right]^{\mu^F} w_i^{1 - \mu^F}, \quad (19b)$$

$$P_i = \frac{\psi\sigma}{\sigma-1} \left[\frac{1}{(1-\mu^F)\sigma} \sum_{j \in \mathcal{K}} w_j h_j m_j^{-\sigma} \tau_{ji}^{1-\sigma} \right]^{\frac{1}{1-\sigma}}, \quad (19c)$$

$$\bar{w}^R = \frac{\mu + \frac{\mu^F}{1-\mu^F}}{1-\mu} \sum_{i \in \mathcal{K}} \frac{w_i h_i}{H}. \quad (19d)$$

さらに、総所得は以下の関係を満たす:

$$\sum_{i \in \mathcal{K}} y_i h_i = \frac{1}{(1-\mu)(1-\mu^F)} \sum_{i \in \mathcal{K}} w_i h_i. \quad (20)$$

式(17), 式(18)より, w_i は以下の賃金方程式を満たすことが分かる:

$$w_i h_i = (1-\mu^F)(1-\mu) \sum_{j \in \mathcal{K}} \frac{w_j h_j m_j^{-\sigma} \tau_{ij}^{1-\sigma}}{\sum_{k \in \mathcal{K}} w_k h_k m_k^{-\sigma} \tau_{kj}^{1-\sigma}} y_j h_j. \quad (21)$$

以上の条件を用いることで、間接効用 v_i が人口分布 \mathbf{h} の関数で与えられる。具体的には、間接効用 $v_i(\mathbf{h})$ は式(7)に、式(13), 式(19), 式(21)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:

$$v_i(\mathbf{h}) = B_i A_i^\mu P_i^{-(1-\mu)} \left(\mu y_i h_i + \frac{\mu^F}{1-\mu^F} w_i h_i \right)^{-\mu} y_i. \quad (22)$$

(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態とする。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:

$$\begin{cases} v^* = v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i > 0, \\ v^* \geq v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i = 0, \end{cases} \quad \sum_{i \in \mathcal{K}} h_i = H. \quad (23)$$

ここで、 v^* は均衡効用水準を表す。

Pflüger and Tabuchi⁷⁾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^{注2)}によって判定する:

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

$$\bar{v}(\mathbf{h}) = \sum_{i \in \mathcal{K}} v_i(\mathbf{h}) \frac{h_i}{H}. \quad (24b)$$

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 $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{h}^*)$ の固有値の実部が全て負となることにより、判定できる。

(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、短期均衡条件による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(25)のとおり与える:

$$\sum_{i \in \mathcal{K}} w_i h_i = W. \quad (25)$$

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(24)の微分方程式により得られる。しかし、式(24)を直接解くことは式の形からして不可能であるため、高山・杉山⁴⁾と同様にダイナミクス方向に徐々に人口分布 \mathbf{h} を更新して、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 $\mathbf{h}^{(n)} = (h_i^{(n)})_{i \in \mathcal{K}}$ と表記すると、人口分布の更新は以下の形で表される:

$$h_i^{(n+1)} = h_i^{(n)} + \varepsilon F_i(\mathbf{h}^{(n)}). \quad (26)$$

ここで、 ε 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。

4. パラメータ設定

本章では、都市間と都市内の輸送抵抗を分離して表現してモデルの説明力を向上し得るパラメータの設定方法を提示する。加えて、使用データとパラメータ設定結果を示したうえで、設定したパラメータにより、モデルの説明力が従来よりも向上することを示す。

(1) パラメータ設定方法

本節では、計量分析に必要となるパラメータ設定方法を提示する。なお、消費者の土地支出割合 μ は、Allen and Arkolakis⁸⁾と同様、家計の住宅への支出割合を基礎に $\mu = 0.3$ を用いる。さらに、企業の土地投入割合 μ^F は、先行研究⁴⁾と同様に 0.6 とした。

a) 輸送費用の推定

輸送費用 τ_{ij} は実データから推定することができないことから、Redding and Venables⁹⁾を参考にパラメータ設定を行う。具体的には、第1段階で交通機関分担率、第2段階で地域間輸送量を利用したパラメータ推定を行う。

第1段階

まず第1段階では、地域間 i, j の各輸送モード m の選択効用 (ただし、 $i \neq j$ のみ) に関するパラメータを推定する。本稿では、物流・人流の両方の輸送モード m の選択効用 $V_{m,ij}^L, V_{m,ij}^P$ を以下で定義する:

$$V_{m,ij}^L = \alpha_m^L \text{dist}_{m,ij}^L + \xi_m^L \quad \text{if } i \neq j, \quad (27a)$$

$$V_{m,ij}^P = \alpha_m^P \text{time}_{m,ij}^P + \phi_m^P \text{freq}_{m,ij}^P + \xi_m^P \quad \text{if } i \neq j. \quad (27b)$$

本稿では輸送モード m として、物流は貨物車 C , 鉄道 R , 航空 A , 人流はそれら (C は乗用車) に加えて高速バス B を考える。したがって、物流・人流の輸送モード集合

は、 $\mathcal{M}^L \equiv \{C, R, A\}$, $\mathcal{M}^P \equiv \{C, R, A, B\}$ で与えられる。また、 dist_{ij}^L は地域 i, j 間の距離、 time_{ij}^P は所要時間、 freq_{ij}^P は運行頻度である。

この選択効用で最尤法によりパラメータを推定する。このときに用いる尤度関数 λ^L, λ^P は以下で与えられる：

$$\lambda^L = \prod_{ij \in \mathcal{K} \times \mathcal{K}} \prod_{m \in \mathcal{M}^L} (\theta_{m,ij}^L)^{N_{m,ij}^L}, \quad (28a)$$

$$\lambda^P = \prod_{ij \in \mathcal{K} \times \mathcal{K}} \prod_{m \in \mathcal{M}^P} (\theta_{m,ij}^P)^{N_{m,ij}^P}, \quad (28b)$$

$$\theta_{m,ij}^X = \frac{\exp[V_{m,ij}^X]}{\sum_{n \in \mathcal{M}^X} \exp[V_{n,ij}^X]}. \quad (28c)$$

ここで、 $\theta_{m,ij}^X$ は地域 i, j 間の輸送モード m の分担率、 $N_{m,ij}^X$ は実データから与えられる地域 i, j 間の輸送モード m の分担率である。

第 2 段階

第 2 段階では、地域 i, j 間の交易量 X_{ij} を用いて、輸送費用を推定する。そのために、 $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ を以下で定義する：

$$\tau_{ij}^{1-\sigma} = \kappa (\hat{V}_{ij}^L)^{\theta^L} (\hat{V}_{ij}^P)^{\theta^P} \leq 1, \quad (29a)$$

$$\hat{V}_{ij}^L = \begin{cases} \exp[V_{ij}^L] & \text{if } i = j, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^L} \exp[V_{m,ij}^L] & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (29b)$$

$$\hat{V}_{ij}^P = \begin{cases} \exp[V_{ij}^P] & \text{if } i = j, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^P} \exp[V_{m,ij}^P] & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (29c)$$

ここで、 $\theta^L, \theta^P, \kappa$ はパラメータ、 V_{ij}^L, V_{ij}^P は同一地域内 ($i = j$) の輸送費用に関する効用であり、次のとおり、地域内の交通基盤の整備水準に依存すると仮定する：

$$V_{ij}^L = \zeta^L \text{infra}_i^L \quad \text{if } i = j, \quad (30a)$$

$$V_{ij}^P = \zeta^P \text{infra}_i^P \quad \text{if } i = j. \quad (30b)$$

ここで、 $\text{infra}_i^L, \text{infra}_i^P$ は地域 i の交通基盤の整備水準、 ζ^L, ζ^P はパラメータである。

さらに、パラメータ推定のため第 2 章で示したモデルの交易量 X_{ij} が次のように表されることを利用する：

$$\ln X_{ij} = \text{FX}_i + \ln \tau_{ij}^{1-\sigma} + \text{FM}_j + \text{const}. \quad (31)$$

ここで、 FX_i は生産地に関する項、 FM_j は需要地に関する項、 const は定数項を表す。

式(31)は、式(29)より次のように表される：

$$\ln X_{ij} = \begin{cases} \text{FX}_i + \theta^L \zeta^L \text{infra}_i^L + \theta^P \zeta^P \text{infra}_i^P \\ \quad + \text{FM}_j + \text{const} & \text{if } i = j, \\ \text{FX}_i + \theta^L \ln \left[\sum_{m \in \mathcal{M}^L} \exp\{V_{m,ij}^L\} \right] \\ \quad + \theta^P \ln \left[\sum_{m \in \mathcal{M}^P} \exp\{V_{m,ij}^P\} \right] \\ \quad + \text{FM}_j + \text{const} & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (32)$$

ただし、ここでの const は $\ln[\kappa]$ を含む。

式(32)を利用し、重回帰分析により $\theta^L, \theta^P, \theta^L \zeta^L, \theta^P \zeta^P$

を推定する。そして、推定値を用いて ζ^L, ζ^P を設定する。

ここで注意が必要なのは、上記の推定では式(29a)の κ が定まらない点である。ただし、 κ の水準は短期・長期均衡状態に何ら影響を与えないため、 κ は推定しない。

b) σ の設定

財バラエティ間の代替弾力性 σ は、Behrens et al.¹⁰⁾ を参考に、長期均衡状態における人口分布が実データ \mathbf{h}^{data} と最も近くなる水準に定める。具体的には、 σ と人口分布 \mathbf{h}^{data} を与件としたもとで得られたパラメータ値における $|F_i(\mathbf{h}^{\text{data}})/h_i^{\text{data}}|$ の総和 (ie., 長期均衡状態からの誤差) を最小とする σ を採用する。

c) B_i の設定

アメニティ水準 B_i は、実データ \mathbf{h}^{data} が基準均衡状態となるよう設定する。具体的には、 μ, μ^F, A_i, h_i, W が与えられた下で式(21)、式(25)を満たすように賃金 w_i を設定する。アメニティ水準 B_i は、これまでに得られた w_i と h_i から、式(23)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 $(B_i)_{i \in \mathcal{K}}$ が一意に定まらないため、 $B_1 = 1$ と基準化する。

最終的に設定した B_i を用いてキャリブレーションを行う。このため、以上の方法で設定したパラメータを用いることで、モデルの基準均衡状態 \mathbf{h} は実データ \mathbf{h}^{data} と完全に一致する。

(2) 使用データ

次章の反実仮想実験で対象とする地域区分は、高山・杉山⁹⁾と同様、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) を用いる。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。パラメータ設定および反実仮想実験に必要なデータは、2005 年を基準年に公的データ・民間データを収集・加工することで整備された、杉本ら⁹⁾と同様のデータを用いた。詳細は杉本ら⁹⁾を参照されたい。



図-1 地域区分

加えて、本稿では各地域の高速道路延長およびバス路線延長のデータを国土数値情報を用いて整備した。そして、物流に関する交通基盤整備水準に「地域面積あたりの高速道路延長」、人流に関する交通基盤整備水準に「地域面積あたりのバス路線延長」を用いた^{注3)}。

(3) パラメータ設定の結果

本節ではパラメータの設定結果を順に示す。まず、輸送費用推定の第1段階では、地域間交易シェア $\theta_{m,i,j}^X$ のデータ（ただし、 $i \neq j$ のみ）を使用した集計ロジット^{注4)}のパラメータを、R言語の `optim` 関数を用いて、最適化手法の一つである BFGS により推定した。第2段階では、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、推定にはR言語の `lm` 関数を用いた。

第1段階の推定結果の選択効用パラメータを表-1、表-2に示す。推定の結果、距離および所要時間に関するパラメータの符号が負、運行頻度に関するパラメータの符号が正となった。これは、輸送モードの選択効用が、距離・所要時間が増加するにつれて低下すること、また、運行頻度が増加するにつれて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（表-1）をより詳しく見ると、距離の推定値は $|\alpha_C^L| > |\alpha_A^L| > |\alpha_R^L|$ となっており、定数項 ξ_R^L, ξ_A^L の符号が負であることが分かる。これは、短距離ODほど道路が利用されて、長距離ODほど航空や鉄道が利用されることを表しており直観に合った結果を得た。

人流に関する結果（表-2）を見ると、所要時間の推定値は $|\alpha_R^P| \approx |\alpha_C^P| > |\alpha_A^P| > |\alpha_B^P|$ であった。これは、定数項も踏まえると、短時間ODほど道路が利用され、長時間ODほど高速バス、鉄道、航空の利用が増加する傾向があることを表しており、直観に合った結果を得た。また、運行頻度の推定値は、鉄道に比べて、高速バス・航空が大きい。これは、高速バス・航空の方が運行頻度の増加に対する効用の増加が大きいことを表しており、相対的に鉄道の運行頻度が多いことを踏まえると、妥当な結果と言える。

第2段階の推定結果を表-3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表しており、妥当な結果であると言える。また、交通基盤の整備水準に関しても推定値は正の値を得た。こちらも、交通基盤の整備水準が上がるほど交易が増加することを示しており、妥当な結果を得ることができた。

パラメータ σ, B_i も同様に、前節の方法により設定を行った。その結果、 $\sigma = 4.75$ となった。各 σ における長期均衡状態との誤差（i.e., $|F_i(\mathbf{h}^{\text{data}})/h_i^{\text{data}}|$ の総和）を図-2に示す。図より、4.75付近の誤差が最も小さくなっていることが分かる。 B_i は、紙面の都合上、結果を示す

表-1 第1段階の推定結果（物流）

変数	パラメータ	推定値[t値]
距離:貨物車	α_C^L	-6.17.E-03[-14.25]
距離:鉄道	α_R^L	-1.38.E-03[-3.40]
距離:航空	α_A^L	-3.71.E-03[-6.50]
定数項:鉄道	ξ_R^L	-5.43 [-81.55]
定数項:航空	ξ_A^L	-4.54 [-40.84]
ρ^2		0.8181

表-2 第1段階の推定結果（人流）

変数	パラメータ	推定値[t値]
所要時間:乗用車	α_C^P	-4.85.E-02[-50.94]
所要時間:高速バス	α_B^P	-1.73.E-02[-16.85]
所要時間:鉄道	α_R^P	-4.91.E-02[-32.20]
所要時間:航空	α_A^P	-3.96.E-02[-14.09]
運行頻度:高速バス	ϕ_B^P	1.32.E-02[2.78]
運行頻度:鉄道	ϕ_R^P	6.30.E-03[12.82]
運行頻度:航空	ϕ_A^P	1.16.E-02[3.97]
定数項:高速バス	ξ_B^P	-4.10 [-31.74]
定数項:鉄道	ξ_R^P	-1.84 [-32.35]
定数項:航空	ξ_A^P	-1.45 [-9.11]
ρ^2		0.5229

表-3 第2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	0.490 [22.24]
人流の選択効用	θ^P	1.029 [52.40]
物流の交通基盤水準 (高速道路延長)	$\theta^L \zeta^L$	0.698 [3.08]
人流の交通基盤水準 (バス路線延長)	$\theta^P \zeta^P$	0.077 [17.51]
R^2		0.5492

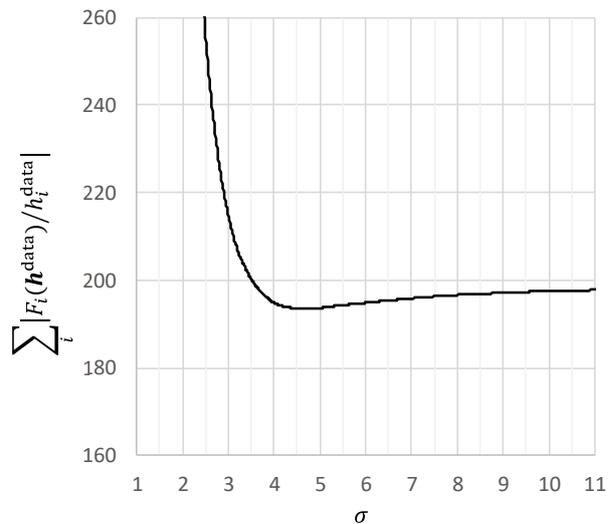


図-2 σ と長期均衡状態との誤差の関係

ことは割愛する。

(4) モデルの現況再現性

アメニティ水準 B_i と実データ h^{data} の関係を確認することで、現況の人口分布に対するモデルの説明力を確認する。具体的には、従来手法と提案手法を以下のとおり定義して、それぞれで設定された B_i と実データ h^{data} の関係を比較する。比較の結果、決定係数が小さいほど、外生的に与えられるアメニティ水準 B_i が人口分布へ与える影響が小さいため、モデルの説明力が高いことを意味する。

a) 提案手法

アメニティ水準 B_i は前節の結果を使用する。

b) 従来手法

STEP1：輸送費用の推定の第 1 段階は提案手法と同様に実施する。

STEP2：輸送費用の推定の第 2 段階は、同一地域内の輸送費用に関する効用 V_{ij}^L, V_{ij}^P に、交通基盤整備水準の変数 $\text{infra}_i^L, \text{infra}_i^P$ を考慮せず (i.e., V_{ij}^L, V_{ij}^P はゼロ) に推定したパラメータ θ^L, θ^P を使用する。

STEP3： σ の設定は先行研究⁴⁾⁵⁾と同様の設定 (i.e., $\sigma = 9.0$) を行う。

STEP4：アメニティ水準 B_i は、上記のSTEPで設定したパラメータを用いて、本章(1)節 c)の方法で設定する。

c) 比較結果

提案手法・従来手法の結果を図-3、図-4 に示す。図より、提案手法はプロットがバラついており、従来手法と比べて決定係数が小さいことが確認できる。

また、Berliant and Mori¹¹⁾で示されている、関連研究 (Redding and Sturm¹²⁾, Behrens et al.¹⁰⁾) でのアメニティ水準と人口の関係を図-5 に示す。図では、横軸がアメニティ水準、縦軸が人口規模であり、両者に強い相関が 2 事例ともあることが確認できる。また、各々の決定係数は、Redding and Sturm¹²⁾が 0.896、Behrens et al.¹⁰⁾が 0.933 であることが Berliant and Mori¹¹⁾で示されている。ここからも、提案手法のモデルの説明力が高いことが分かる。

以上より、提案手法を用いることで、従来手法や関連研究と比べて、モデルの説明力が向上したことを示した。

5. 反実仮想実験

前章に示したパラメータ値を用いて、日本を対象とした、都市間・都市内の交通改善による反実仮想実験を実施する。具体的には、次の 3 ケースについて、それらが人口分布に与える影響を分析して、その変化の特徴を把握する。

- 都市間の輸送費用が一律に低下する影響
- 都市内の交通基盤整備水準が一律に上昇する影響
- 上記の 2 つが同時に生じる影響

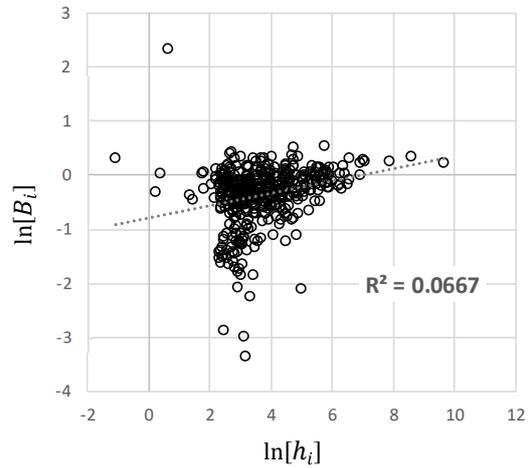


図-3 提案手法でのアメニティ水準と人口の関係

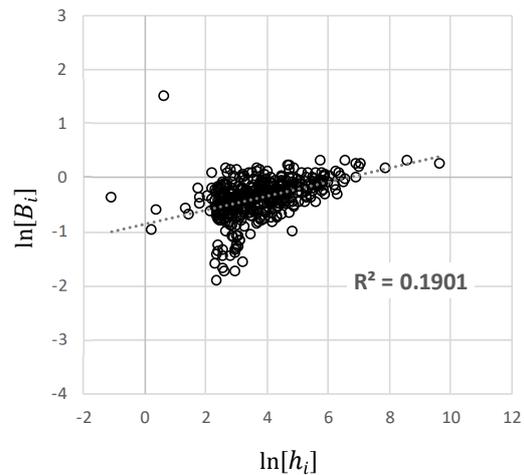


図-4 従来手法でのアメニティ水準と人口の関係

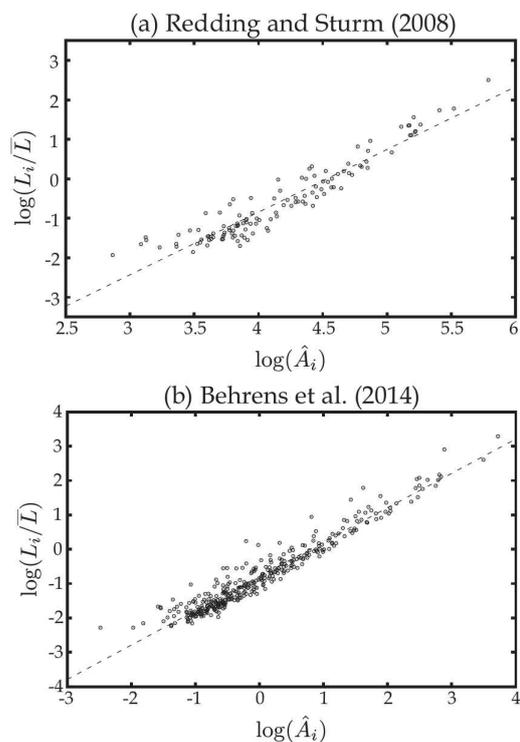


図-5 関連研究でのアメニティ水準と人口の関係¹¹⁾

(1) 都市間の輸送費用が一律に低下する影響

全ての都市間の距離・所要時間あたりの費用 (i.e., パラメータ α_m^L, α_m^P) を 10% 低下させた場合の各地域の人口シェア変化を図-6 に示す. 各地域の人口シェア変化は $(h_i^\omega - h_i^*)/H \times 100$ で計算される. ここで, 上付き添え字*は基準均衡状態, ω は輸送費用変化後の均衡状態を表す.

図-6 より, 都市間の輸送費用低下は, 東京圏・大阪圏・名古屋圏といった, 大都市圏に人口集積を生じさせる影響があることが確認できた. 加えて, それらの大都市圏の周辺に位置する都市圏 (e.g., 関東地方, 東海地方, 近畿地方) にも人口集積をもたらす傾向があることを把握した. このため, 都市間の輸送費用低下を伴う交通基盤整備等は, 大都市圏等の経済活性化に寄与する一方で, 地方 (e.g., 北海道, 東北, 中国, 四国, 九州) の都市圏の地域経済に留意が必要であると言える.

(2) 都市内の交通基盤整備水準が一律に上昇する影響

全ての都市内の交通基盤整備水準 (i.e., パラメータ ζ^L, ζ^P) を 10% 上昇させた場合の各地域の人口シェア変化を図-7 に示す.

図-7 より, 都市内の交通基盤整備水準は, 都市間の輸送費用一律低下と異なり, 東京圏・大阪圏・名古屋圏といった大都市圏の人口集積を分散させる影響があることが確認できた. 都市間の輸送費用一律低下と比較して, 北海道 (札幌圏等を除く) や東北地方の太平洋側, 中国地方, 四国地方, といった地方の都市圏へ人口集積させる傾向があることが分かった. このことから, 地方の都市圏の経済活性化には, 都市内の交通基盤整備水準の向上が重要になると言える.

(3) 都市間・都市内の交通改善が同時に生じる影響

全ての都市間の距離・所要時間あたりの費用を 10% 低下させて, かつ, 全ての都市内の交通基盤整備水準を 10% 上昇させた場合の各地域の人口シェア変化を図-8 に示す.

図-8 より, 本設定においては, 地方の都市圏 (e.g., 中国地方, 四国地方) への人口集積が生じる結果となった. これより, 交通改善 (輸送費用の低下, 交通基盤整備水準の上昇) の程度によっては, 都市間と都市内の交通改善を同時に実施した場合においても, 地域経済の活性化に寄与する可能性があることが示唆された.

以上より, 都市間の輸送費用低下は大都市圏やその周辺の都市圏への人口集積をもたらす特徴があることや, 都市内の交通基盤整備水準の上昇は地方の都市圏への人口集積をもたらす特徴があること等を把握することができた.

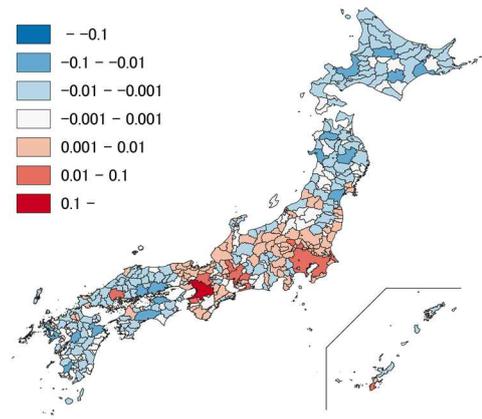


図-6 都市間輸送費用が一律低下：人口シェア変化

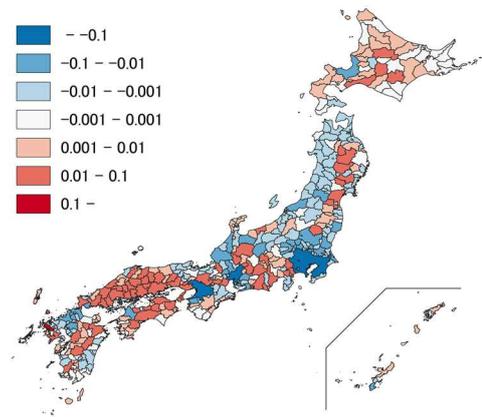


図-7 都市内交通基盤整備水準が一律上昇：人口シェア変化

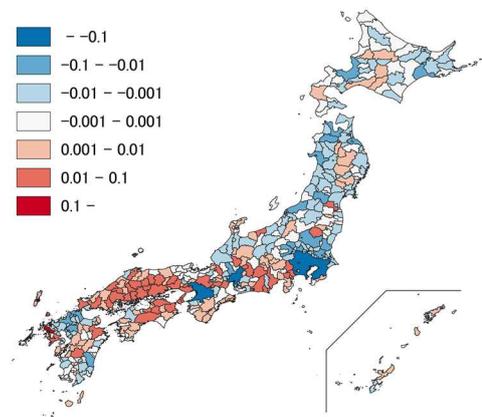


図-8 都市間・都市内の交通改善：人口シェア変化

6. おわりに

本研究では, 都市間の輸送抵抗と都市内の輸送抵抗を分離して扱うことを可能とし, かつ, モデルの説明力を向上させる, 空間経済分析枠組を提案した. そのために, Pflüger and Tabuchi⁷⁾を基盤に, 都市内の輸送抵抗として交通基盤整備水準 (i.e., 物流は高速道路整備延長, 人流はバス路線延長) を考慮した, モデルの説明力を向上させるパラメータ設定法を提示した. そして, 本分析枠組に

よって、モデルの説明力が従来手法や関連研究と比べて、向上していることを示した。さらに、日本を対象とした反実仮想実験により、以下の影響を分析した。

- A) 都市間の輸送費用が一律低下する影響
- B) 都市内の交通基盤整備水準が一律上昇する影響
- C) 上記 A), B) が同時に生じる影響

その結果、都市間の輸送費用低下は大都市圏やその周辺の都市圏への人口集積をもたらす特徴があることや、都市内の交通基盤整備水準の上昇は地方の都市圏への人口集積をもたらす特徴があること等を把握できた。

本稿では、都市圏を空間単位として分析した結果、上記の成果を得ることができた。しかし、今回のように都市圏内の集計値 (i.e., 地域面積あたりの高速道路整備延長, 地域面積あたりのバス路線延長) で交通基盤整備の水準を扱うことには限界がある。実際、脚注 3 に示したように、本設定では大都市圏での交通整備水準が高く位置づけられておらず、直観とは異なる設定であった。このため、都市圏内の輸送抵抗を適切に反映させるには都市圏内のネットワークを考慮した分析枠組が必要であり、そのための空間単位の詳細化 (e.g., 都市圏単位から市町村単位への詳細化) は今後の課題と言える。

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析に関する研究開発 (代表者：高山雄貴金沢大学准教授)」および JST 創発的研究支援事業 JPMJFR215M の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表したい。

NOTES

- 注1) 土地所有に関する仮定には、“各地域の土地が居住する消費者に均等に所有される(local ownership)”というものも存在する。しかし、本研究では、Pflüger and Tabuchi⁷⁾で採用されていることから、public ownership の仮定を採用した。
- 注2) 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。
- 注3) ここで、地域面積には、国土数値情報の土地利用 3 次メッシュを利用し、建物用地と幹線交通用地の合計値を使用した。その結果、大都市圏といえる東京圏・大阪圏・名古屋圏の「地域面積あたりの高速道路延長」は、432 都市圏中、265 位・245 位・228 位といった位置づけとなった。また、「地域面積あたりのバス路線延長」は、250 位・225 位・332 位といった位置づけとなった。
- 注4) 非集計ロジットによるモデル化も考えられるが、単純化のために集計ロジットモデルを採用した。

REFERENCES

- 1) 内閣官房：デジタル田園都市国家構想総合戦略，2022。[Cabinet Secretariat: *Comprehensive Strategy for the Vision for a Digital Garden City Nation*, 2022]
- 2) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E.: Quantitative spatial economics, *Annual Review of Economics*, Vol.9, pp.21–58, 2017.
- 3) Fujita, M., Krugman, P. R. and Venables, A. J.: *The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade*, MIT Press, 1999.
- 4) 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。[Takayama, Y. and Sugiyama, M.: Agglomeration patterns in new economic geography models to evaluate the impact of transport infrastructure improvements, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.76, No.2, pp.100-113, 2020.]
- 5) 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(特集号), Vol.8, No.2, pp.222–231, 2022。[Sugimoto, T., Sugiyama, M., Takayama, Y. and Takagi, A.: The long-run impacts of transportation improvements : spatial economic approach based on quantitative spatial economics, *JSTE Journal of Traffic Engineering*, Vol.8, No.2, pp.222-231, 2022.]
- 6) 大澤実：集積経済モデルの数理解析とその周辺, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.19-36, 2018。[Osawa, M.: An invitation to economic theories of spatial pattern formation: fruits of analyses in racetrack economy, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.74, No.5, pp.19-36, 2018.]
- 7) 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.
- 8) 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.
- 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) Behrens, K., Mion, G., Murata, Y. and Südekum, J.: Spatial frictions, *Journal of Urban Economics*, Vol.97, pp.40-70, 2017.
- 11) Berliant, M. and Mori, T.: Beyond urban form: How Masahisa Fujita shapes us, *International Journal of Economic Theory*, Vol.13, pp.5-28, 2017.
- 12) Redding, S. J. and Stum, D. M.: The cost of remoteness: Evidence from German division and reunification, *American Economic Review*, Vol.98, No.5, pp.1766-97, 2008.

CHANGES IN THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ECONOMIC ACTIVITY DUE
TO IMPROVEMENTS IN INTRA-URBAN AND INTER-URBAN
TRANSPORTATION SIMULTANEOUSLY: SPATIAL ECONOMIC APPROACH
BASED ON QUANTITATIVE SPATIAL ECONOMICS

Tatsuya SUGIMOTO and Yuki TAKAYAMA