

空間経済学に基づく 地域間輸送改善の影響評価手法の開発

杉本 達哉¹・高田 観月²・高山 雄貴³

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 3F)

E-mail: tt-sugimoto@yachiyo-eng.co.jp

²非会員 金沢大学 大学院理工研究科 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: tkdred@stu.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学准教授 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: ytakayama@se.kanazawa-u.ac.jp

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¹⁾ (e.g., 大都市の人口増加) とは真逆の“地域間輸送改善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²⁾。これは、輸送改善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独占的競争理論³⁾ 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。

Key Words : *Quantitative spatial economics, Variable elasticity of substitution, Population distribution*

1. はじめに

我が国では、人口減少社会に突入していることに加え、大都市圏 (e.g., 東京, 大阪, 名古屋) 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、交通基盤整備などが挙げられてきた。これは、地域間輸送費用の低下が物流・人流の効率向上をもたらし、その結果として (短期的には) 地方活性化が期待できるためである。しかし、長期的にはストロー効果等のような、期待とは異なる効果が生じてしまうケースが見られる。それゆえ、上記のような地域・都市政策の長期的影響 (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枠組の構築は、土木計画学分野の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) 分野で蓄積された、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きた。近年では、NEG 理論を計量分析に応用した研究が急速に進められ、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⁴⁾。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。

しかし、NEG 分野の理論研究²⁾ が指摘しているように、QSE の分析には、“地域間輸送費用の低下は地方都市の人口増加 (大都市の人口減少) をもたらす”という結果が必ず出力される」という本質的な問題が存在する。すなわち、QSE の枠組みでは、ストロー効果を表現することができない。これは我が国の長期的な人口分布変化¹⁾ と真逆の傾向を示すものであり、QSE に基づく計量モデルが実現象と定性的にも整合しないことを意味している。

その根本的な原因は、Akamatsu et al.²⁾ において示されているように、計量モデルで考えられている分散力 (経済活動が空間的に分散するメカニズム) が限定的である点にある。実際、QSE モデル (Helpman⁵⁾, Allen and Arkolakis⁶⁾) では、都市コストに代表される“空間的なスピルオーバー効果のない分散力”のみしか考えられていない。これは、実空間を対象とした解析を容易にする効果があるものの、上述した重要な問題をもたらす直接的な原因になっている。

この問題の解決には、“空間的なスピルオーバー効果のある分散力 (e.g., 企業間の近接立地に伴う商圈獲得/価格競争)”をモデルに導入する必要がある。しかし、そのための研究は、計量分析に利用可能なモデルの開発が困難なことから、未だ殆ど進んでいない。例外的に高山・杉山⁷⁾、杉本ら⁸⁾ がストロー効果を表現できる QSE モデルを開発しているものの、その結果は、非

現実的なパラメータ設定 (e.g., 企業の土地への支出割合が 60%) の下で得られた極めて特殊, かつ政策効果分析に直接利用できないものになっている¹.

そこで, 本研究では, 新たな独占的競争理論³⁾により表現できるようになった, 企業間の価格競争 (i.e., スピルオーバー効果のある分散力) を考慮した QSE モデルを構築する. そして, そのモデルがストロー効果を表現できることを, 日本を対象とした (非現実的なパラメータ設定をしない) 具体的な分析例により明らかにする.

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, Helpman⁵⁾ に基づくモデルを説明する. 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, 日本を対象とした計量分析を実施し, 構築したモデルがストロー効果を表現できることを具体的に示す. 最後に, 第 6 章において本論文の結論を述べる.

2. モデル

本章では, 新たな独占的競争理論³⁾ を Helpman⁵⁾ に導入したモデルを構築する. なお, Helpman⁵⁾ は, 様々な QSE モデルの基礎となる理論的枠組みであるとともに, 高山・杉山⁷⁾ により “ストロー効果を表現できない” ことが具体的に示されている. したがって, 構築したモデルがストロー効果を表現できるのであれば, 企業間の価格競争効果の実現象と (定性的に) 整合させるための重要な要素であることを意味する.

(1) 地域・経済環境の設定

離散的な K 箇所の地域が存在する経済システムを考える. 地域の集合は $\mathcal{K} \equiv \{1, 2, \dots, K\}$ と表す. 地域 $i \in \mathcal{K}$ の面積は固定的に A_i である. 消費者は, 地域全体に固定的に H 存在し, 居住する地域 $i \in \mathcal{K}$ 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, 1 単位の労働を所有しており, それを非弾力的に供給する.

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, なら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 $i \in \mathcal{K}$ で生産を行う企業の本数は, 供給される差別化財の種類数 N_i^C に等しい. そこで, 以降では, 地域 i においてバラエティ l を生産する企業を, 地域 i の企業 l 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.

(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:

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

ここで, $\mu \in (0, 1)$ 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, B_i はアメニティ水準を表す.

本研究では, 部分効用 Q_i が³⁾ (Helpman⁵⁾ と同じ CES ではなく) translog 型³⁾ であると仮定する²⁾. より具体的には, 次の支出関数が与えられる部分効用である:

$$\begin{aligned} \ln E_i = \ln Q_i + \frac{1}{N_i^C} \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} \ln p_{ji}(\ell) d\ell \\ - \frac{\beta}{2} \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} \{ \ln p_{ji}(\ell) \}^2 d\ell \right. \\ \left. - \frac{1}{N_i^C} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} \ln p_{ji}(\ell) d\ell \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (2a)$$

$$N_i^C \equiv \sum_{j \in \mathcal{K}} |\mathcal{N}_{ji}| \quad (2b)$$

ここで, \mathcal{N}_{ji} は地域 j から供給され, 地域 i で消費される差別化財のバラエティ (種類) ℓ の集合, $p_{ji}(\ell)$ 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 の価格, $\beta > 0$ は財の代替弾力性に関するパラメータである. また, N_i^C は地域 i で消費される総バラエティ数を表す.

消費者の予算制約式は以下の通りとなる:

$$y_i = r_i a_i + \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} p_{ji}(\ell) q_{ji}(\ell) d\ell. \quad (3)$$

ここで, r_i は地代, $q_{ji}(\ell)$ 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 の消費量を表す. 本研究では, 全ての土地が全消費者により均等に所有されると仮定する (i.e., public ownership)³⁾. それゆえ, 消

¹ より具体的には, 高山・杉山⁷⁾, 杉本ら⁸⁾ は, Helpman⁵⁾ を特殊ケースとして含む, 企業の土地消費を考慮した Pflüger and Tabuchi⁹⁾ に基づく計量モデルを開発している. そして, その支出割合が大きい場合, ストロー効果と整合した変化 (i.e., Helpman⁵⁾ に基づく QSE モデルでは表現できない経済集積の変化) が見られることを本稿と同様の計量分析により示している.

² Helpman⁵⁾ と本稿で示すモデルの本質的な違いは, この部分効用の仮定のみである.

³ 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, Helpman⁵⁾ で採用されていることから, public ownership の仮定を採用した.

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]

$$E_i = \min_{\{q_{ji}(\ell)\}} \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} p_{ji}(\ell) q_{ji}(\ell) d\ell \quad \text{s.t. } Q_i = Q_i^*, \quad (5a)$$

[上位問題]

$$\max_{a_i, Q_i} \left(\frac{a_i}{\mu} \right)^\mu \left(\frac{Q_i}{1-\mu} \right)^{1-\mu} \quad \text{s.t. } y_i = r_i a_i + P_i Q_i. \quad (5b)$$

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 のレンマより次の関係が得られる:

$$\begin{aligned} q_{ji}(\ell) &= \frac{\partial E_i}{\partial p_{ji}(\ell)} \\ &= \frac{E_i}{p_{ji}(\ell)} \{c_i - \beta \ln p_{ji}(\ell)\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$c_i \equiv \frac{1}{N_i^C} \left\{ 1 + \beta \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_{\mathcal{N}_{ji}} \ln p_{ji}(\ell) d\ell \right\}, \quad (7)$$

ここで、 c_i は財 ℓ の種類に依存しない項である。

さらに、上位問題より、 a_i, Q_i と差別化財の支出額 E_i は以下で与えられる

$$a_i = \frac{\mu y_i}{r_i}, \quad (8a)$$

$$Q_i = \frac{(1-\mu)y_i}{P_i}, \quad (8b)$$

$$E_i = (1-\mu)y_i. \quad (8c)$$

さらに、地代収入 \bar{w}^R は次のように表される:

$$\bar{w}^R = \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}} w_i h_i}{H}. \quad (8d)$$

(3) 企業行動

地域 i において企業 ℓ が財バラエティ ℓ を生産するには、労働を固定的に 1 単位と、生産量 $x_i(\ell)$ に応じて $\psi_i(\ell)x_i(\ell)$ 単位投入する必要がある。地域 i の企業 ℓ の労働需要量を $l_i(\ell)$ で表すと、次の関係が成立する:

$$l_i(\ell) = 1 + \psi_i(\ell)x_i(\ell). \quad (9)$$

本研究では、Behrens et al.¹⁰⁾ と同様、企業は地域 i に立地したのちに限界費用 $\psi_i(\ell)$ の水準を把握する (企業が参入するか否かの判断の際には、正確な限界費用の情報が得られない) と仮定する。この限界費用は、全ての企業にとって既知の連続・微分可能な分布 $G_i(x)$ から定まる。より具体的には、各企業の限界費用 $\psi_i(\ell)$ の逆数 $1/\psi_i(\ell)$ の分布が Pareto 分布で与えられると仮

定する。すなわち、 $\psi_i(\ell)$ の分布関数 $G_i(x)$ を以下で与える:

$$G_i(x) = \left(\frac{x}{\psi_i^{\max}} \right)^k. \quad (10)$$

ここで、 ψ_i^{\max} は地域 i の限界費用の最大値、 $k \geq 1$ は形状パラメータであり、両者とも外生的に与える。

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。そのため、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 $q_{ij}(\ell)$ と供給量 $x_i(\ell)$ との間に、次の関係が成立する:

$$x_i(\ell) = \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(\ell) h_j. \quad (11)$$

このとき、地域 i の企業 ℓ の利潤最大化行動は、以下で与えられる:

$$\max_{p_{ij}(\ell), l_i(\ell)} \pi_i(\ell) \quad \text{s.t.}, (6), (9), (11), q_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{K}. \quad (12)$$

ここで、 $\pi_i(\ell)$ は企業の利潤を表し、収入から労働の費用を引いた、以下の形で与えられる:

$$\pi_i(\ell) = \sum_{j \in \mathcal{K}} p_{ij}(\ell) q_{ij}(\ell) h_j - w_i l_i(\ell). \quad (13)$$

利潤最大化問題から、 $p_{ij}(\ell)$ に関する次の条件が得られる:

$$c_j - \beta \ln p_{ij}(\ell) = \beta \frac{p_{ij}(\ell) - \psi_i(\ell) w_i \tau_{ij}}{\psi_i(\ell) w_i \tau_{ij}}. \quad (14)$$

(6), (14) より、 $q_{ij}(\ell), p_{ij}(\ell)$ は次の条件を満たす:

$$q_{ij}(\ell) = \frac{(1-\mu)y_j}{p_{ij}(\ell)} \beta \ln \left[\frac{p_j^d}{p_{ij}(\ell)} \right], \quad (15a)$$

$$\ln \left[\frac{p_j^d}{p_{ij}(\ell)} \right] = \frac{p_{ij}(\ell) - \psi_i(\ell) w_i \tau_{ij}}{\psi_i(\ell) w_i \tau_{ij}}, \quad (15b)$$

$$p_j^d \equiv \exp \left[\frac{c_j}{\beta} \right]. \quad (15c)$$

この関係から明らかなように、 $p_{ij}(\ell) = \psi_i(\ell) w_i \tau_{ij} = p_j^d$ となる場合、財バラエティ ℓ は輸送されない (i.e., $q_{ij}(\ell) = 0$). これは、地域 i の企業 ℓ は、限界費用 $\psi_i(\ell)$ が以下で定義される ψ_{ij}^{\times} より高い水準であれば、財を地域 j に輸送しないことを意味している:

$$\psi_{ij}^{\times} \equiv \frac{p_j^d}{w_i \tau_{ij}}. \quad (16)$$

したがって、地域 j に立地する企業数を N_j^E と表すと、地域 i で消費される財バラエティ数 N_i^C は、以下で与えられる:

$$N_i^C = \sum_{j \in \mathcal{K}} N_j^E G_j(\psi_{ij}^{\times}). \quad (17)$$

ここで、(15b) を変形すると、次の関係が得られる:

$$\frac{p_{ij}(\ell)}{\psi_i(\ell)w_i\tau_{ij}} \exp\left[\frac{p_{ij}(\ell)}{\psi_i(\ell)w_i\tau_{ij}}\right] = \frac{\psi_{ij}^{\times} \exp[1]}{\psi_i(\ell)}. \quad (18)$$

したがって、Behrens et al.¹⁰⁾ と同様、Lambert W 関数⁴を用いると、 $p_{ij}(\ell)$ は、次のように表される:

$$p_{ij}(\ell) = \psi_i(\ell)w_i\tau_{ij}W_{ij}(\ell), \quad (19a)$$

$$W_{ij}(\ell) \equiv W\left(\frac{\psi_{ij}^{\times} \exp[1]}{\psi_i(\ell)}\right). \quad (19b)$$

この結果から、 $q_{ij}(\ell)$ 、 $\pi_i(\ell)$ は次のように表される:

$$q_{ij}(\ell) = \frac{\beta(1-\mu)y_j}{\psi_i(\ell)w_i\tau_{ij}} \{1 - W_{ij}(\ell)^{-1}\}, \quad (20a)$$

$$\pi_i(\ell) = \beta(1-\mu) \sum_{j \in \mathcal{K}} \left\{ W_{ij}(\ell) + \frac{1}{W_{ij}(\ell)} - 2 \right\} y_j h_j - w_i. \quad (20b)$$

なお、Lambert W 関数は $W(\exp[1]) = 1$ 、かつ任意の $x \geq 0$ に対して $W'(x) > 0$ を満たす。したがって、任意の $0 \leq \psi_i(\ell) \leq \psi_{ij}^{\times}$ に対して $W_{ij}(\ell) \geq 1$ が成立する。さらに、 $\partial p_{ij}(\ell)/\partial \psi_i(\ell)$ 、 $\partial q_{ij}(\ell)/\partial \psi_i(\ell)$ は次の直観と整合する性質を有する:

$$\frac{\partial p_{ij}(\ell)}{\partial \psi_i(\ell)} = w_i\tau_{ij} \frac{\psi_{ij}^{\times} \exp[1]}{\psi_i(\ell)} W_{ij}(\ell) W' \left(\frac{\psi_{ij}^{\times} \exp[1]}{\psi_i(\ell)} \right) > 0, \quad (21a)$$

$$\frac{\partial q_{ij}(\ell)}{\partial \psi_i(\ell)} = -\frac{\beta(1-\mu)y_j}{\psi_i(\ell)^2 w_i\tau_{ij}} \frac{W_{ij}(\ell)}{1 + W_{ij}(\ell)} < 0. \quad (21b)$$

ここで、Lambert W 関数が $x\{1+W(x)\}W'(x) = W(x)$ を満たす性質を利用した。また、マークアップ率 $\Lambda_{ij}(\ell)$ は以下で与えられる:

$$\Lambda_{ij}(\ell) \equiv \frac{p_{ij}(\ell)}{\psi_i(\ell)w_i\tau_{ij}} = W_{ij}(\ell) \geq 1. \quad (22)$$

したがって、 $\partial \Lambda_{ij}(\ell)/\partial \psi_i(\ell) < 0$ が成立することから、限界費用の高い企業のマークアップ率は低下する。

3. 均衡状態

a) 短期均衡条件

本節では、短期均衡状態を定義する条件を示す。この条件は、企業の利潤ゼロ条件、労働の需給均衡条件、各地域の収支均衡条件、土地の需給均衡条件で与えられる。そこで、これらの条件を順に整理する。なお、これらの条件で用いる地域 i の企業の期待利潤 π_i 、労働需要量 L_i 、地域 i で生産した財の地域 j での総消費額 T_{ij} の導出は、付録 I 参照。

企業の利潤ゼロ条件は、期待利潤 π_i がゼロになる条

⁴ Lambert W 関数は、 $z = x \exp[x]$ の逆関数 $x = W(z)$ である。

件で与えられ、以下の通りとなる:

$$\frac{\beta(1-\mu)\kappa_2}{(\psi_i^{\max})^k} \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j \left(\frac{p_j^d}{w_i\tau_{ij}} \right)^k - w_i = 0. \quad (23a)$$

労働の需給均衡条件は、各地域の労働需要量 L_i が供給量 h_i と一致する条件であり、以下の通りとなる:

$$N_i^E \left[1 + \frac{\beta(1-\mu)(\kappa_1 - \kappa_2)}{w_i(\psi_i^{\max})^k} \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j \left(\frac{p_j^d}{w_i\tau_{ij}} \right)^k \right] = h_i. \quad (23b)$$

各地域の収支均衡条件は、各地域の域内総生産（財の総生産額 $\sum_{j \in \mathcal{K}} T_{ij}$ 、地代収入 $\bar{w}^R h_i$ ）が総支出額（財の総支出額 $\sum_{j \in \mathcal{K}} T_{ji}$ 、土地の総支出額 $\mu y_i h_i$ ）に一致することを意味する条件である:

$$\begin{aligned} & \beta(1-\mu)\kappa_1 \frac{N_i^E}{(\psi_i^{\max})^k} \sum_{j \in \mathcal{K}} h_j y_j \left(\frac{p_j^d}{w_i\tau_{ij}} \right)^k + \bar{w}^R h_i \\ & = \beta(1-\mu)\kappa_1 h_i y_i \sum_{j \in \mathcal{K}} \frac{N_j^E}{(\psi_j^{\max})^k} \left(\frac{p_j^d}{w_j\tau_{ji}} \right)^k + \mu y_i h_i. \end{aligned} \quad (23c)$$

土地の需給均衡条件は、以下で表される:

$$\frac{\mu y_i h_i}{r_i} = A_i. \quad (23d)$$

ここで、 κ_1, κ_2 は Pareto 分布の形状パラメータ k のみに依存する定数であり、 $\kappa_1 > \kappa_2 > 0$ を満たす。

短期均衡条件 (23a), (23b) より、次の関係が与えられる:

$$N_i^E = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} h_i. \quad (24)$$

この条件は、人口の多い地域に多くの企業が立地することを意味している。さらに、この関係と (23a) を (17), (23c) に代入すると、

$$\sum_{j \in \mathcal{K}} \left(\frac{p_j^d}{w_j\tau_{ji}\psi_j^{\max}} \right)^k h_j = \frac{1}{\beta\kappa_2}, \quad (25a)$$

$$N_i^C = \frac{1}{\beta\kappa_1}. \quad (25b)$$

また、条件 (23d) から、地代 r_i が以下で与えられる:

$$r_i = \frac{\mu y_i h_i}{A_i}. \quad (26)$$

ここで、(25a) より、 $\sum_{j \in \mathcal{K}} \psi_{ji}^{\times} N_j^E / \psi_j^{\max} = 1/(\beta\kappa_1)$ が得られる。この関係と (18), (22) より、地域 j の企業数 N_j^E の増加がマークアップ率 $\Lambda_{ji}(\ell)$ を減少させることが示唆される。この性質は、Thisse and Ushchev³⁾ でも示されている、企業間の価格競争効果を表すものである。

以上より、短期均衡状態における $\mathbf{w} = (w_i)_{i \in \mathcal{K}}$ 、 $\mathbf{p}^d = (p_i^d)_{i \in \mathcal{K}}$ は、(23a), (25a) により、次の非線形連立方程

式から定まる:

$$\frac{1-\mu}{\gamma_i^k} \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j \left(\frac{p_j^d}{w_i \tau_{ij}} \right)^k - w_i = 0, \quad (27a)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{K}} \left(\frac{p_j^d}{w_j \tau_{ji} \gamma_j} \right)^k h_j = 1. \quad (27b)$$

ここで, $\gamma_i \equiv \psi_i^{\max}/(\beta \kappa_2)^{1/k}$ は企業の生産性の水準を反映したパラメータである. そして, w, p^d が求まれば, 短期均衡状態における間接効用 v_i が人口分布 $\mathbf{h} = (h_i)_{i \in \mathcal{K}}$ の関数として得られる:

$$v_i(\mathbf{h}) = \mu^{-\mu} (1-\mu)^{-(1-\mu)} \left(\frac{A_i}{h_i} \right)^\mu (Q_i)^{1-\mu}, \quad (28a)$$

$$Q_i = \xi (1-\mu) \frac{y_i}{p_i^d}. \quad (28b)$$

ここで, ξ は β, k のみに依存する定数である. なお, 財消費による部分効用 Q_i の導出は, 付録 I 参照.

b) 長期均衡条件

長期均衡状態では, $\lim_{h_i \rightarrow 0} v_i(\mathbf{h}) = \infty$ となることから, 全ての都市の効用水準が等しくなる:

$$v_i(\mathbf{h}) = v_j(\mathbf{h}) \quad \forall i, j \in \mathcal{K}. \quad (29)$$

この性質を利用すると, 長期均衡条件は次のように書き換えることができる:

$$F_i(\mathbf{h}) = \frac{\exp[\mu^{-1} \hat{v}_i(\mathbf{h})]}{\sum_{j \in \mathcal{K}} \exp[\mu^{-1} \hat{v}_j(\mathbf{h})]} H - h_i = 0, \quad (30a)$$

$$\hat{v}_i(\mathbf{h}) = (1-\mu) \ln y_i - (1-\mu) \ln p_i^d + \mu \ln A_i. \quad (30b)$$

さらに, 人口移動の調整ダイナミクスは次の logit dynamics で表現できる:

$$\dot{h}_i = F_i(\mathbf{h}). \quad (31)$$

4. パラメータ設定

本稿では, 構築したモデルを用いた反実仮想実験を実施する. 本章は, その解析に必要なパラメータの設定方法, 使用するデータ, パラメータ設定結果を示す.

(1) パラメータ設定方法

本節では, 計量分析を実施するために必要となるパラメータ設定方法を示す. なお, 消費者の土地支出割合 μ は, すでに様々な実証研究¹¹⁾により標準的な値が知られていることから, その値 $\mu = 0.25$ を用いる.

a) 輸送費用 τ_{ij} の推定

輸送費用 τ_{ij} は実データから直接推定することができないことから, Allen and Arkolakis⁶⁾と同様, 2段階に分けて推定する. 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 の各交通機関の選択効用に関するパラメータを推定する. 本稿では, 物流・人流の両方の交通機関 m の選択効用 $V_{m,ij}^L, V_{m,ij}^P$ を以下で定義する:

$$V_{m,ij}^L = \begin{cases} \alpha_m^L \text{dist}_{ij}^L + \zeta \text{dum}_{ij} & \text{if } i = j, \\ \alpha_m^L \text{dist}_{ij}^L + \zeta \text{dum}_{ij} + \xi_m^L & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (32a)$$

$$V_{m,ij}^P = \begin{cases} \alpha_m^P \text{time}_{ij}^P & \text{if } i = j, \\ \alpha_m^P \text{time}_{ij}^P + \phi_m^P \text{freq}_{ij}^P + \xi_m^P & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (32b)$$

本稿では交通機関 m として, 物流は乗用車 C , 鉄道 R , 航空 A , 人流はそれらに加えて高速バス B を考える. したがって, 物流・人流の交通機関集合は, $\mathcal{M}^L \equiv \{C, R, A\}$, $\mathcal{M}^P \equiv \{C, R, A, B\}$ 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. dum_{ij} は i, j が同一都道府県であれば1, そうでなければ0をとるダミー変数である. なお, 地域内の輸送は乗用車のみを用いると仮定する.

この選択効用を用いて, 最尤法によりパラメータを推定する. この時に用いる尤度関数 λ^L, λ^P は以下で与えられる:

$$\lambda^L = \prod_{ij \in \mathcal{K} \times \mathcal{K}} \prod_{m \in \mathcal{M}^L} (\theta_{m,ij}^L)^{N_{m,ij}^L}, \quad (33a)$$

$$\lambda^P = \prod_{ij \in \mathcal{K} \times \mathcal{K}} \prod_{m \in \mathcal{M}^P} (\theta_{m,ij}^P)^{N_{m,ij}^P}, \quad (33b)$$

$$\theta_{m,ij}^X = \frac{\exp[V_{m,ij}^X]}{\sum_{n \in \mathcal{M}^X} \exp[V_{n,ij}^X]}. \quad (33c)$$

ここで, $\theta_{m,ij}^X$ は地域 ij 間の輸送機関 m の分担率, $N_{m,ij}^X$ は実データから与えられる地域 ij 間の輸送機関 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, 輸送費用 $\tau_{ij}^{-(k-1)}$ を以下で定義する:

$$\tau_{ij}^{-(k-1)} = \kappa \left(\hat{V}_{ij}^L \right)^{\Theta^L} \left(\hat{V}_{ij}^P \right)^{\Theta^P} \quad (34a)$$

$$\hat{V}_{ij}^L = \begin{cases} \exp[V_{C,ij}^L] & \text{if } i = j, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^L} \exp[V_{m,ij}^L] & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (34b)$$

$$\hat{V}_{ij}^P = \begin{cases} \exp[V_{C,ij}^P] & \text{if } i = j, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^P} \exp[V_{m,ij}^P] & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (34c)$$

これは, 同一地域内の輸送費用は道路のみを利用すると想定することを意味している. そして, 本稿で開発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して, 重回帰分析により Θ^L, Θ^P を推定する (導出



図-1 地域区分

過程は付録 I 参照):

$$\ln X_{ij} = \text{FX}_i + \ln \tau_{ij}^{-(k-1)} + \text{FM}_j + \text{const.} \quad (35)$$

ここで注意が必要なのは、上記の推定では 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、本稿では κ の推定は実施しない。

b) γ_i の設定

γ_i は短期均衡条件 (27) により設定する。具体的には、 μ, τ_{ij}, k が与えられているもとで、実データから得られる \mathbf{h}, \mathbf{w} を使うことにより、 \mathbf{p}^d と $\gamma = (\gamma_i)_{i \in \mathcal{K}}$ を得る。

c) k の設定

Pareto 分布の形状パラメータ k は、Behrens et al.¹⁰⁾ と同様、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、 k 、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 (i.e., 長期均衡状態からの誤差) を最小とする k を採用する。

d) アメニティ水準 B_i の設定

アメニティ水準 B_i は、実データ \mathbf{h}^{data} が長期均衡条件を満たす水準に設定する。この条件は、次のように書き換えられる:

$$B_i = \left(\frac{h_i^{\text{data}}}{A_i} \right)^\mu \left(\frac{p_i^d}{y_i} \right)^{1-\mu}. \quad (36)$$

(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⁷⁾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。

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、2005 年を基準年として公的データ・民間データを収集・加工することでデータを整備した。使用したデータは表-1 に示す通りである:

消費者数 h_i : 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 : 国土数値情報の土地利用 3 次メッシュから得られる、経済活動に利用可能な土地利用用途 (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。

距離・所要時間: デジタル道路地図 (DRM), 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⁵⁾。具体的には、輸送モードのうち、自動車 (船舶含む) については、DRM の高速道路・一般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、当該経路の距離・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。ただし、地域内の距離は、Redding and Venables¹²⁾と同様、地域の総面積 A_i に応じた、 $(2/3)\sqrt{A_i/\pi}$ と設定した。地域内の所要時間は、地域内距離を道路交通センサスにより設定する速度⁶⁾で除して設定した。輸送モードのうち、高速バス・鉄道・航空の距離・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⁷⁾。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。データ上、地域間の経路が無く、上記方法により距離・所要時間が設定できない場合は、地域間の経路無しと判断した。運行頻度は、高速バス・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 $\theta_{m,ij}^X$: 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⁸⁾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 (元データ⁹⁾ の移動人数の輸送機関別

⁵⁾ 各輸送モードのデータは、当該輸送モードを代表交通機関とする地域間移動データを利用した (よって、バスは主に高速バスであるが一部高速バス以外を含む)。また、アクセス・イグレス交通で利用する輸送機関は、旅客純流動調査の定義に準じた利用とした。つまり、自動車は自動車のみ、高速バスはバス (路線バス含む。以降同様)・徒歩、鉄道は鉄道・船舶・バス・徒歩、航空は航空・鉄道・船舶・バス・徒歩を利用する。

⁶⁾ 道路交通センサスの都道府県別旅行速度を用いて、属する都道府県の値を各地域の値として設定した。

⁷⁾ 当データは人流を対象としたものであるが、距離は人流に限らず適用できると判断して使用した。

⁸⁾ 本モデルでは全産業を対象としているため、観光などを区別せず全目的のデータを使用している。経済の基幹データである産業連関表では、観光業の人流は、交易にあたり財・サービスが移動するという意味において、通常の産業の物流と同様に扱っているため (i.e., 観光業は財・サービスの需要のために消費者が消費地・生産地間を往来し、通常の産業では財・サービスが生産地から消費地へ移動する), 本対応で問題は無い。なお、空間経済モデルである SCGE モデルで観光業を扱った小池・佐藤¹³⁾においても観光業を区別せずに扱っている。

⁹⁾ 元データは市町村単位のデータであるものの、全国旅客純流動調

表-1 使用データ

項目	出典
消費者数 h_i	国勢調査 (2005 年)
面積 A_i	国土数値情報 土地利用 3 次メッシュ (2005 年)
距離 $dist_{ij}$ 所要時間 $time_{ij}$	デジタル道路地図 (DRM) (2005 年)
	ナビタイムジャパン提供の経路データ (2019 年)
	国土数値情報 海上経路 (2011 年), 定期旅客航路 (2012 年)
運行頻度 $freq_{ij}$	ナビタイムジャパン提供の経路データ (同上)
	国土数値情報 港湾間流通量・海上経路 (同上), 定期旅客航路 (同上)
交易シェア N_{ij}	全国貨物純流動調査 (2005 年)
	全国幹線旅客純流動調査 (2005 年)
交易额 X_{ij}	全国貨物純流動調査 (同上)

のシェアとした¹⁰。ただし、輸送モード選択に関するパラメータが主な交易の傾向を捉えた推定値となるよう、輸送量や移動人数が微小な場合はゼロと見なしてシェアを算定した¹¹。

交易额 X_{ij} : 432 都市雇用圏間の交易额のデータが存在しないことから、物流センサスの輸送量 (重量) を代用した。なお、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ことが知られている¹⁴。したがって、交易额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。

(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、輸送費用推定の第一段階では、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¹² 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。第二段階では、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、距離・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、交通機関選択効用が、

査では都道府県内で完結する移動は対象としておらず、元データにも存在しないことから、第一段階の人流に関するパラメータ推定では、同一都道府県内の地域間は除外して推定した。

¹⁰ 日本全国の全般的な分担率を再現するために、輸送量ではなく輸送シェアを使用した。輸送量の場合、大都市を起終点とする OD の影響を大きく受けるため、それを回避するために輸送シェアを採用した。

¹¹ 輸送量は 1 トン未満、移動人数は 0.01 人未満を微小な値とした。なお、微小な値をゼロとせずパラメータ推定を実施した場合も、本結果と同様の符号条件および統計的有意性を持つ推定結果が得られた。

¹² 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。

表-2 第一段階の推定結果 (物流)

変数	パラメータ	推定値 [t 値]
距離: 道路	α_1^L	-3.79.E-03 [-8.76]
距離: 鉄道	α_3^L	-1.95.E-03 [-5.17]
距離: 航空	α_4^L	-2.91.E-03 [-5.69]
同一県間	ζ	3.17 [3.89]
定数項: 鉄道	ξ_3^L	-4.53 [-79.87]
定数項: 航空	ξ_4^L	-4.19 [-35.42]
Sample size		52,587
Null log likelihood		-4.31.E+04
Final log likelihood		-7.98.E+03
ρ^2		0.8148

距離・所要時間の増加により低下、運行頻度の増加により増加することを意味しており、妥当な結果と言える。

表-2 の物流に関する結果より、距離の推定値は $|\alpha_1^L| > |\alpha_4^L| > |\alpha_3^L|$ 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、距離が短い OD では道路が利用されて、距離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。表-3 の人流に関する結果では、所要時間の推定値は、 $|\alpha_3^P| \approx |\alpha_1^P| > |\alpha_4^P| \gg |\alpha_2^P|$ 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、道路が利用され、所要時間が長くなるにつれて、高速バス、航空、鉄道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、鉄道に比べて高速バス・航空が大きい。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、鉄道と比べて高速バス・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・人流の選択効用に関するパラメータを表-4 に示す¹³。表より、物流・人流

¹³ 物流項と人流項には一定程度の相関がある。しかしながら、多重共線性を示す VIF は 2.7 程度であり、基準となる 10 には満たないため、問題は無いと判断した。

表-3 第一段階の推定結果 (人流)

変数	パラメータ	推定値 [t 値]
所要時間: 道路	α_1^P	-2.61.E-02 [-51.29]
所要時間: 高速バス	α_2^P	-9.41.E-03 [-17.35]
所要時間: 鉄道	α_3^P	-2.65.E-02 [-32.42]
所要時間: 航空	α_4^P	-2.09.E-02 [-13.84]
運行頻度: 高速バス	ϕ_2^P	1.30.E-02 [2.740]
運行頻度: 鉄道	ϕ_3^P	6.30.E-03 [12.82]
運行頻度: 航空	ϕ_4^P	1.18.E-02 [4.010]
定数項: 高速バス	ξ_3^P	-4.09 [-31.90]
定数項: 鉄道	ξ_3^P	-1.84 [-32.32]
定数項: 航空	ξ_4^P	-1.51 [-9.433]
Sample size		23,117
Null log likelihood		-2.52.E+04
Final log likelihood		-1.20.E+04
ρ^2		0.5233

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	0.651 [47.35]
人流の選択効用	Θ^P	0.723 [38.94]
R^2		0.5632

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。パラメータ $\gamma_{i,k}, B_i$ 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結果、 $k = 3.68$ であった。

5. 反実仮想実験

前章に示したパラメータ値を用いて、輸送アクセスが改善した際の人口分布への影響を分析し、その結果から開発したモデルの特徴を確認する。具体的には、次の2種類の輸送アクセス改善について分析する:

- (1) 輸送費用が一律に低下する影響
- (2) 運行頻度が増加する影響

(1) 輸送費用が一律に低下する影響

最初に全ての地域間の距離/所要時間あたりの費用 (i.e., パラメータ α_m^X) を 8% 低下させた場合の分析結果を示す。ここでは、各地域の人口シェア変化 $(h_i^\omega - h_i^*)/H \times 100$ と、人口成長率 $(h_i^\omega - h_i^*)/h_i^* \times 100$ を、各々、図-2, 3 に図示する。なお、上付き添字 * 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-2 (a), (c) は、本研究において特に重要な挙動である。これは、既存の QSE モデルでは表現することのできない“地域間輸送費用の低下に伴う人口集積”が、これらの図において確認できるためである。この結果から、企業間の価格競争を考慮することによりストロー効果が発生したことがわかる。

一方、(b), (d), (e), (f) では、3大都市圏のすべての人口が減少するという、人口シェア変化に着目すると類似した結果が得られている。ただし、各地域の人口成長率を示した図-3 からは、質の異なる人口分布変化が生じたことが確認できる。より具体的には、鉄道と高速バスが類似した傾向 (三大都市圏以外は概ね人口増加) を示す一方、航空は異なる傾向 (本州中央部が全体的に人口減少) が見られる。これは、次のような路線網の質の違いが影響していると考えられる: 鉄道・高速バス網は網の目状のネットワークを形成している一方で、航空網はハブ&スポーク型である。

(2) 運行頻度が増加する影響

高速バス・鉄道・航空の人流を対象に、経路の存在する OD の運行頻度を 2 割増加させて、各地域の人口変化を調べる。その結果得られた人口シェア変化を図-4, 人口成長率を図-5 に示す。

図-4,5 より、運行頻度を増加させた場合においても、輸送費用を一律低下させた場合と類似の結果となることが確認できる。具体的には、高速バス・航空において、大都市の人口が減少し、地方都市の人口が増加する結果となった。高速バスに関しては、運行頻度 1 本増あたりの恩恵が大都市よりも地方都市のほうが強いために、このような結果となったと考えられる。一方で、輸送費用を一律低下させた場合と異なり、鉄道では東京の人口増加が起こることも確認できる。これは、東京を経由する新幹線の運行頻度が圧倒的に多いため、頻度を 2 割増やす影響が大きかったためであろう。

以上のシミュレーション結果から、本研究で構築したモデルを計量分析に応用することで、“輸送改善による大都市への人口集中現象”を確認することができた。また、輸送アクセスを改善させる輸送モードや物流・人流別、また距離・所要時間と運行頻度別による人口分布へ与える影響の違いを把握できた。今回実施した分析を拡張すれば、「自動運転車の普及や信号制御等の技術革新」などの影響を評価できる可能性がある。この方向のモデル・分析の拡張は、今後の重要な研究課題である。

6. おわりに

本稿では、大都市への人口集積を表現可能な NEG 理論の枠組みを応用した政策効果分析の基礎となりうる計量モデルの構築を行った。具体的には、既存の Helpman⁵⁾ に、企業間の価格競争³⁾ を導入した。さらに、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、輸送効率の向上効果を分析するための手法を

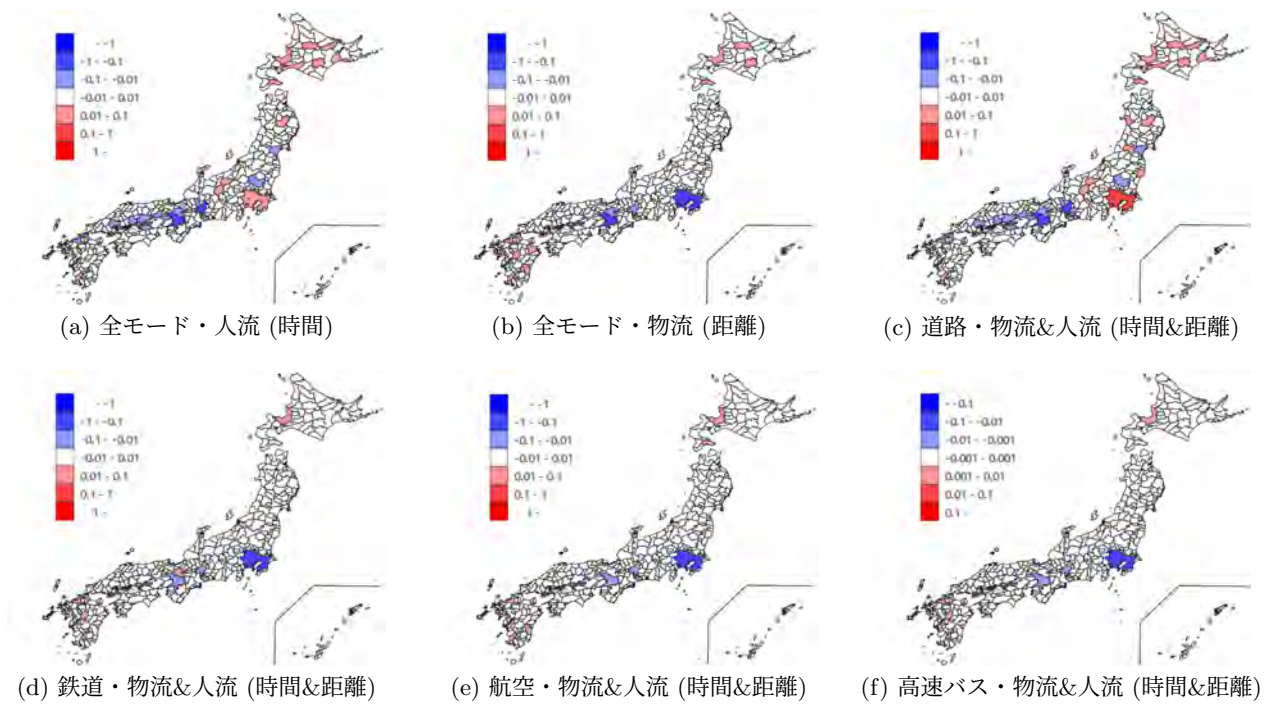


図-2 輸送費用が一律 8%低下した場合の人口シェア変化

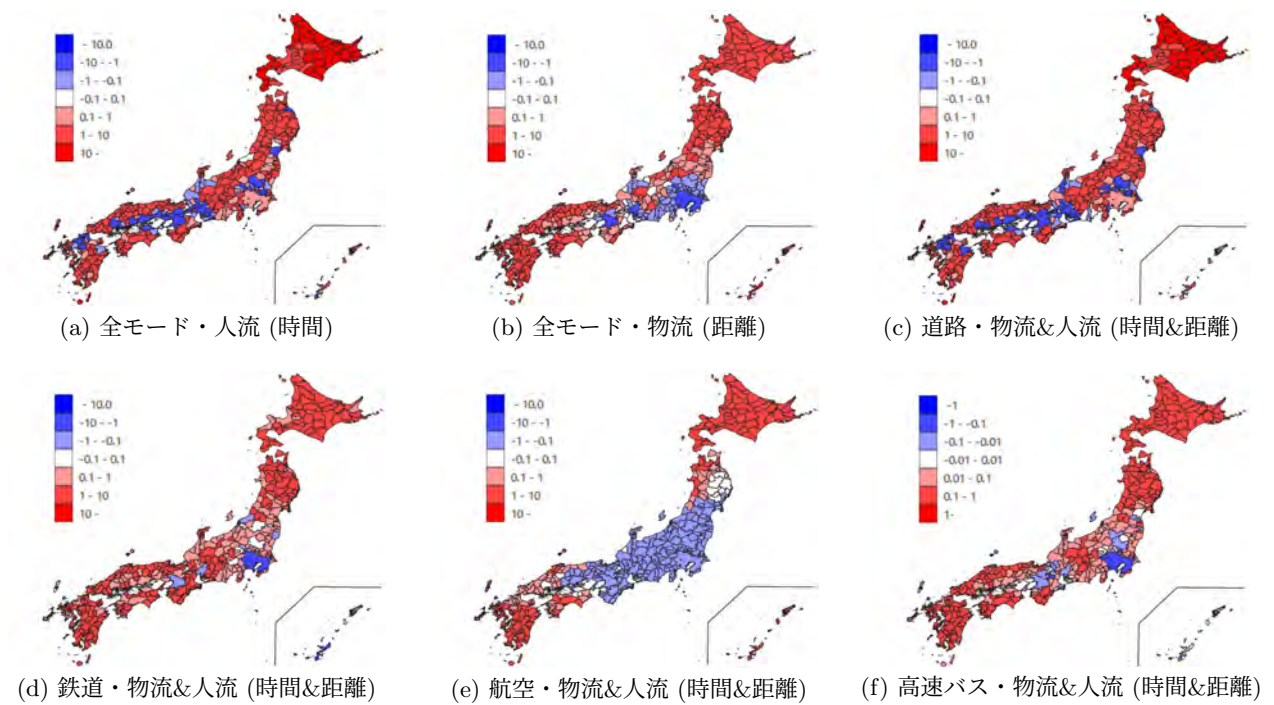


図-3 輸送費用が一律 8%低下した場合の人口成長率

提示した。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。

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する。

付録 I. Lambert W 関数の積分

短期均衡条件の導出のためには、Lambert W 関数を積分する必要がある。そこで、Behrens et al.¹⁰⁾と同様の手順で積分することを考える。そのために、 $z \equiv W(\exp[1]\psi_{ij}^x/x)^{-1}$ と定義すると、次の関係が得られる：

$$\frac{\exp[1]\psi_{ij}^x}{x} = z^{-1} \exp[z^{-1}]. \quad (I.1)$$

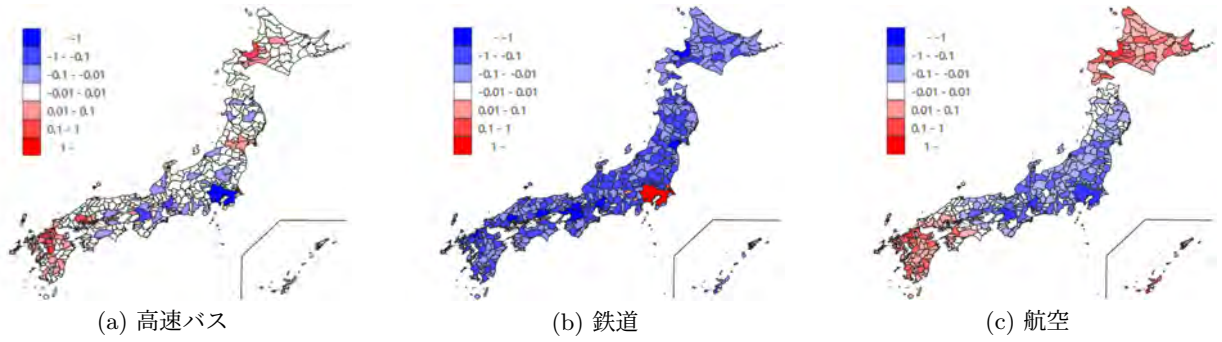


図-4 運行頻度が増加した場合の人口シェア変化

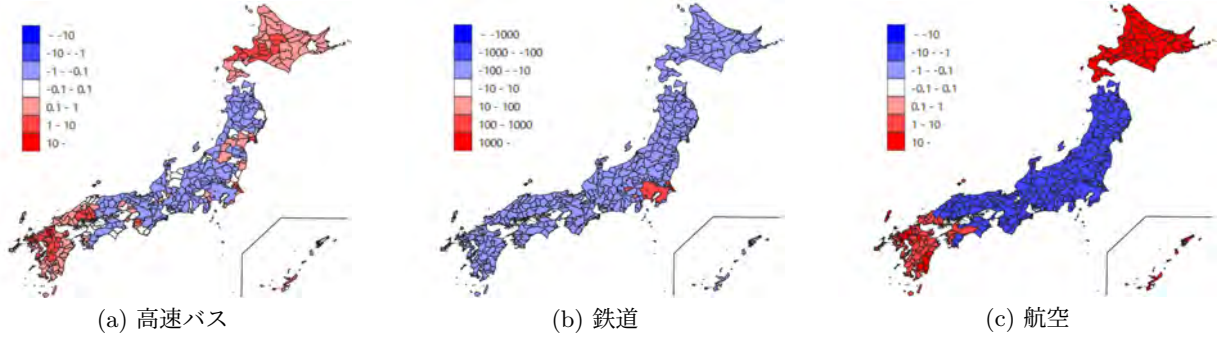


図-5 運行頻度が増加した場合の人口成長率

このとき、 $dx = \exp[1-z^{-1}](1+z)z^{-2}\psi_{ij}^x dz$ の関係が成立する。また、 $x \in [0, \psi_{ij}^x]$ の積分範囲は $z \in [0, 1]$ に変換される。さらに、以降では $dG_i(x) = k(\psi_i^{\max})^{-k}x^{k-1}dx$ を利用する。

財の総消費額

地域 i で生産され地域 j で消費される財の総消費額 T_{ij} は、以下で表される：

$$\begin{aligned} T_{ij} &= N_i^E h_j \int_0^{\psi_{ij}^x} p_{ij}(k) q_{ij}(k) dG_i(x) \\ &= \beta(1-\mu) N_i^E h_j y_j \kappa_1 (\psi_i^{\max})^{-k} (\psi_{ij}^x)^k, \end{aligned} \quad (I.2)$$

$$\kappa_1 \equiv k \int_0^1 z^{-4} (1-z)(1+z) (z \exp[1-z^{-1}])^k dz. \quad (I.3)$$

期待利潤

利潤ゼロ条件は、各地域の期待利潤 π_i がゼロとなる条件で与えられる。この期待利潤 π_i は、以下の通りとなる：

$$\begin{aligned} \pi_i &= \beta(1-\mu) \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j \int_0^{\psi_{ij}^x} S(x) dG_i(x) - w_i \\ &= \beta(1-\mu) \kappa_2 (\psi_i^{\max})^{-k} \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j (\psi_{ij}^x)^k - w_i, \end{aligned} \quad (I.4)$$

$$S(x) = W \left(\frac{\psi_{ij}^x \exp[1]}{x} \right) + W \left(\frac{\psi_{ij}^x \exp[1]}{x} \right)^{-1} - 2, \quad (I.5)$$

$$\kappa_2 \equiv k \int_0^1 z^{-4} (1+z)(1-z)^2 (z \exp[1-z^{-1}])^k dz. \quad (I.6)$$

ここで、 κ_1, κ_2 の定義より、 $\kappa_1 > \kappa_2$ が成立する。

労働の総需要

労働の需給均衡条件には、以下のように表される地域 i の労働総需要 L_i が必要となる：

$$\begin{aligned} L_i &= N_i^E \left\{ 1 + \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} h_j \int_0^{\psi_{ij}^x} x q_{ij}(k) dG_i(x) \right\} \\ &= N_i^E \left[1 + \frac{\beta(1-\mu)}{w_i} (\psi_i^{\max})^{-k} \kappa_3 \sum_{j \in \mathcal{K}} y_j h_j (\psi_{ij}^x)^k \right], \end{aligned} \quad (I.7)$$

$$\kappa_3 \equiv k \int_0^1 z^{-3} (1-z)(1+z) (z \exp[1-z^{-1}])^k dz = \kappa_1 - \kappa_2. \quad (I.8)$$

財消費の部分効用

地域 i の財消費による部分効用 Q_i は、(7) より $\sum_{j \in \mathcal{K}} N_j^E \int_0^{\psi_{ji}^x} \ln p_{ji}(k) dG_j(k) = N_i^C \ln p_i^d - \frac{1}{\beta}$ であることを利用すると、以下で与えられる：

$$\begin{aligned} \ln[Q_i] &= \ln[(1-\mu)y_i] \\ &\quad - \frac{1}{N_i^C} \sum_{j \in \mathcal{K}} N_j^E \int_0^{\psi_{ji}^x} \ln p_{ji}(k) dG_j(k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\beta}{2} \sum_{j \in \mathcal{K}} N_j^E \int_0^{\psi_{ji}^{\times}} \{\ln p_{ji}(k)\}^2 dG_j(k) \\
& - \frac{\beta}{2} \frac{1}{N_i^C} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{K}} N_j^E \int_0^{\psi_{ji}^{\times}} \ln p_{ji}(k) dG_j(k) \right\}^2 \\
& = \ln[(1 - \mu)y_i] + \frac{\kappa_1}{2} + \frac{\kappa_4}{2\kappa_1} - \ln[p_i^d], \quad (\text{I.9}) \\
\kappa_4 & \equiv k \int_0^1 \frac{(1-z)^2(1+z)}{z^5} (z \exp[1-z^{-1}])^k dz. \quad (\text{I.10})
\end{aligned}$$

ここで、上式の導出に Lambert W 関数の性質 $\ln W(x) = \ln x - W(x)$ を用いた。また、 κ_4 の定義から、 $\kappa_2 > \kappa_4 > 0$ が成立する。

財の総供給量

地域 i で生産され地域 j で消費される財の総供給量 X_{ij} は、以下の通りとなる：

$$\begin{aligned}
X_{ij} & = N_i^E h_j \tau_{ij} \int_0^{\psi_{ij}^{\times}} q_{ij}(k) dG_i(x) \\
& = \frac{\beta(1-\mu)N_i^E h_j y_j}{w_i} \kappa_5 (\psi_i^{\max})^{-k} (\psi_{ij}^{\times})^{k-1}, \quad (\text{I.11}) \\
\kappa_5 & \equiv k \int_0^1 z^{-3}(1-z)(1+z)(z \exp[1-z^{-1}])^{k-1} dz. \quad (\text{I.12})
\end{aligned}$$

参考文献

- 1) Mori, T. and Osawa, M.: Cities in a world of diminishing transport costs, *arXiv*, p. 2012.12503, 2020.
- 2) Akamatsu, T., Mori, T., Osawa, M. and Takayama, Y.: Multimodal agglomeration in economic geography, *arXiv*, No. 1912.05113, 2021.
- 3) Thisse, J.-F. and Ushchev, P.: Monopolistic competition without apology, in Corchón, L. C. and Marini, M. A. eds. *Handbook of Game Theory and Industrial Organization: Volume I Theory*, Edward Elgar, pp. 93–136, 2018.
- 4) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E.: Quantitative spatial economics, *Annual Review of Economics*, Vol. 9, pp. 21–58, 2017.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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) 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.
- 9) 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.
- 10) Behrens, K., Mion, G., Murata, Y. and Südekum, J.: Spatial frictions, *Journal of Urban Economics*, Vol. 97, pp. 40–70, 2017.
- 11) Davis, M. A. and Ortalo-Magné, F.: Household expenditures, wages, rents, *Review of Economic Dynamics*, Vol. 14, No. 2, pp. 248–261, 2011.
- 12) Redding, S. J. and Venables, A. J.: Economic geography and international inequality, *Journal of International Economics*, Vol. 62, No. 1, pp. 53–82, 2004.
- 13) 小池淳司, 佐藤啓輔：交通ネットワーク整備が観光産業の生産活動へ与える空間的影響の把握～鳥取・兵庫県の日本海地域における基礎自治体レベルの観光産業の付加価値推計を踏まえた検討～, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No. 5, pp. 349–361, 2012.
- 14) 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. 201–211, 2016.