

集積の経済を考慮した都市経済分析手法の開発

杉本 達哉¹・高山 雄貴²・高木 朗義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)
E-mail: tt-sugimoto@yachiyo-eng.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 金沢大学准教授 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: ytakayama@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 社会システム経営学環 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)
E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

本研究では、都市内スケールの社会資本整備の長期的効果を評価可能な都市経済分析手法を開発する。そのために、集積の経済を考慮し、かつ、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明可能なモデルを構築した。そして、安定均衡状態を効率的に得るための分析手法と、実空間での分析を可能とするための系統的なパラメータ設定方法を提示した。さらに、本分析手法が詳細・広域な実空間に適用可能であることを示すため、金沢都市雇用圏を対象に、通勤費用改善に関する反実仮想実験を行った。その結果から、モデル特性を反映した人口分布変化を確認することができた。

Key Words: agglomeration economies, polycentric urban configurations, potential function

1. はじめに

(1) 背景・目的

社会資本は、現在だけでなく、将来の社会経済活動の基盤となる。そのため、社会資本整備にあたっては、その長期的効果を事前 (e.g. 政策検討段階) に把握することが重要となる。そこで、わが国においても、社会資本のストック効果の最大化が課題となっている¹⁾。

長期的効果の計測には、経済活動の空間分布 (i.e., 人口分布, 企業立地分布) を把握することが必要である。これは、効果計測の対象期間が長期となると、その間に人口や企業立地の分布が変化し、効果の多寡や傾向に影響するためである。このような変化の主要因が集積の経済であることが、1970年代から蓄積された実証研究により示されている²⁾。そして、その実証結果を説明する理論モデルが検討されてきた³⁾。このことから、社会資本の長期的効果を計測するためには、集積の経済を考慮することが重要となる。

長期的効果の計測に用いるモデルは、観測される特徴的な空間分布変化を表現できる必要がある。このことは、Dingel and Tintelnot⁴⁾をはじめとする既往研究⁵⁾で指摘されている。わが国の地方都市では、特徴的な空間分布変化として、中心市街地の空洞化や都心の郊外化が観測されている。したがって、社会資本の長期的効果の計測には、

企業が集中して立地する“都心”が都市内に複数箇所存在するといった、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明できるモデルが必要となる。しかし、これまでの研究において、この現象を説明できるモデルによる効果計測は行われていない (第1章(2)節 b)項で詳述)。

そこで本研究は、都市内スケールの社会資本整備の長期的効果を評価可能な都市経済分析手法の開発を目的とする。具体的には、集積の経済を考慮し、かつ、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明可能な Fujita and Ogawa⁶⁾、中村・高山⁸⁾を基盤とした立地モデルを構築する。そして、構築したモデルにポテンシャル関数が存在することを示し、安定均衡状態を効率的に得るための分析手法を提示する。加えて、仮想都市を対象とした数値計算により、本モデルでも複数都心の内生的形成・崩壊現象が説明可能であることを確認する。さらに、Ahlfeldt et al.⁹⁾に基づく、実空間データを利用した系統的なパラメータ設定方法を提示する。そのうえで、本手法が詳細・広域な実空間に適用可能であることを示すために、金沢都市雇用圏を対象とした反実仮想実験を実施する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では Fujita and Ogawa⁶⁾、中村・高山⁸⁾に基づくモデルを構築し、均衡条件を定式化する。さらに、ポテンシャル関数が存在することを示したうえで、数値計算を行う準備をする。第3章では、数値計算により本モデルの特性を把握する。

第4章では、パラメータ設定方法を示し、金沢都市雇用圏を対象にパラメータ設定を行う。第5章では、構築したモデルと設定パラメータにより、反実仮想実験を行う。最後に第6章で本論文の成果と今後の課題を述べる。

(2) 関連研究と本研究の位置づけ

a) 短中期の効果を対象とした関連研究

土木計画学分野では、短中期の効果を対象とした、集積の経済を考慮しない都市政策評価手法として、応用都市経済 (Computable Urban Economic) モデルに関する研究が蓄積されている¹⁰⁾。CUE モデルは、Anas¹¹⁾から影響を受けた、土地利用と交通の相互作用を考慮したモデルであり、多くの開発・実用事例がある^{例えば 12),13),14)}。例えば、山形ら¹⁴⁾は、東京都市圏内の22,368町丁目といった、詳細・広域な実空間への適用が可能なモデルを構築し、空間詳細なシナリオ分析を可能としている。このように、CUE モデルは、政策実務にも適用可能な分析ツールとして精緻化が進んでおり、後述の長期的効果を対象としたモデルと比べて、手法として成熟しつつある。

b) 長期的効果を対象とした関連研究

長期的効果を対象とした、集積の経済を考慮したモデルによる定量分析に関しては、土木計画学分野や都市経済学分野で研究が進んでいる。

土木計画学分野では、集積の経済を考慮した CUE モデルがいくつか存在する (eg, 石倉ら¹⁵⁾)。しかしながら、そのほとんどが、大規模な数値解析を容易にするために、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明できない数理構造を仮定している。具体的には、そこで扱われるモデルは、Akamatsu et al.¹⁶⁾で示されている分散力 (ie., 経済活動が空間的に分散するメカニズム) に着目したモデル類型のうち、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”のみを扱ったモデルクラスに含まれる。このクラスのモデルは、上述の現象を説明できない数理構造であることが明らかにされている。

都市経済学分野では、近年、集積の経済を考慮した定量分析が盛んになりつつある^{例えば 9),17)}。しかしながら、これらの研究は、以下に示す2点の問題がある。

1点目として、これらの研究では、モデルが複数都心の内生的形成・崩壊現象を表現できるかは明らかにしていない。本研究を含む、これらの研究が採用する構造推定アプローチでは、実空間を対象とした分析結果は、モデル特性を反映した結果しか示さない。このため、モデル特性を見極めることが極めて重要^{註1)}であり、モデル特性を把握しないままに定量分析を行っていることは重大な問題である。

2点目として、これらの研究では、複数均衡解が存在するなかで均衡状態を求める際に、効率的な解法を示していない。すなわち、詳細・広域な実空間を対象とした

場合に必然的に生じる、大規模な計算に対する提案がされていないため、幅広い応用は期待できない。また、得られた均衡状態が安定均衡であるかの確認もされておらず、安定均衡が保証されていない。このため、得られた均衡状態が実際には起こり得ない不安定均衡状態である可能性が否定できない。

一方、近年の都市経済学分野の理論研究では、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明可能なモデルの数理構造の特徴が明らかにされるまでになっている^{8),16),18)}。このうち、中村・高山⁸⁾、Osawa and Akamatsu¹⁸⁾は、Fujita and Ogawa⁷⁾に基づく都心形成モデルを構築している。Fujita and Ogawa⁷⁾は、集積の経済を考慮した理論モデルで、複数都心の内生的形成・崩壊現象を表現できることが知られていたものの、均衡状態の安定性について明らかにされていなかった。中村・高山⁸⁾、Osawa and Akamatsu¹⁸⁾では、構築したモデルを用いて安定性解析を実施することにより、企業と家計が立地選択に関して相互作用するモデルの特性として、複数都心が安定的な均衡状態として創発することを明らかにしている。しかしながら、この理論的知見を応用する研究は、大規模な数値解析が困難なこと、モデルのパラメータ設定方法が未確立であることを根本的な原因として、ほとんど進んでいない。

c) 本研究の位置づけ

本研究は、先行研究⁸⁾のモデルを基盤に、集積の経済を考慮し、かつ、複数都心の内生的形成・崩壊現象が説明可能なモデルを構築して、そのモデルが詳細・広域な実空間に適用できることを示している点に最大の特長がある。そのために、詳細・広域な実空間を対象とすることで必然的に生じる大規模計算を効率的に行うための鍵となるポテンシャル関数の存在を示し、かつ、系統的なパラメータ設定方法を提示している点も特長である。

本研究は、都市内スケールの社会資本整備の長期的効果を分析できる方法論を構築したものである。この方法論は、今後の研究進展により、コンパクト・プラス・ネットワークのための都市政策 (eg, 公共交通整備, 都市機能誘導, 居住誘導) の分析や、さらには、自動運転などの新たな交通による影響分析、オンライン会議などの新たなコミュニケーション普及による影響分析にも適用可能になると考えられる。

2. モデル

本章では、Fujita and Ogawa⁷⁾、中村・高山⁸⁾に基づいた、集積の経済および、家計と企業の立地選択の相互作用を考慮したモデルを構築する。そして、均衡条件を定式化したうえで、本モデルにポテンシャル関数が存在することを示す。

(1) 都市内の状況設定

本モデルでは、離散的な I 箇所の立地点が存在する都市を考える。この立地点の集合を $\mathcal{L} \equiv \{1, 2, \dots, I\}$ と表す。立地点間は、道路ネットワークにより接続されており、立地点 a, i 間の距離は τ_{ai} であると仮定する。

この都市には、立地主体である家計と企業に加えて、それらに床面積を供給するデベロッパーが存在する。

(2) 家計の行動

家計の総数は固定的に N である。立地点 $a \in \mathcal{L}$ に居住し、立地点 $i \in \mathcal{L}$ に通勤する家計数を $h_{ai} \geq 0$ と表す。このとき、居住地が立地点 a の家計数 n_a 、就業地が立地点 i の家計数 m_i （本章(3)節で示すように、 m_i は地区 i の家計数で表される企業数^{注2)}である）は以下で与えられる：

$$n_a = \sum_{i \in \mathcal{L}} h_{ai}, \quad m_i = \sum_{a \in \mathcal{L}} h_{ai}. \quad (1)$$

家計は、財消費に関して同一の効用関数を有し、合成財・床面積の消費量と各立地点のアメニティ水準に応じた効用を得る。ただし、Fujita and Ogawa⁷⁾と同様、家計が消費する床面積は固定的に s^H である。したがって、居住地 $a \in \mathcal{L}$ 、就業地 $i \in \mathcal{L}$ の家計の効用水準 u_{ai} は、合成財消費量 z_{ai} と立地点 a のアメニティ水準 A_a に応じて定まる。具体的には、本研究では、家計の効用は以下で与えられると仮定する：

$$u_{ai} = z_{ai} + A_a. \quad (2)$$

また、合成財の価格を1に基準化するため、予算制約は以下で与えられる：

$$w_i = z_{ai} + r_a s^H + t \tau_{ai}. \quad (3)$$

ここで、 w_i は就業地の賃金率、 r_a は居住地 a の単位床面積の価格、 t は単位距離あたりの通勤費用である。以上より、 u_{ai} は次のように表される：

$$u_{ai} = w_i - r_a s^H - t \tau_{ai} + A_a. \quad (4)$$

(3) 企業の行動

企業は、参入や撤退が自由であり、完全競争下で財を生産する。財の生産には、 s^F 単位の床面積と1単位の労働を投入する必要がある。また、立地点 i の生産額 Prod_i は、以下に示すように、他企業とのコミュニケーション外部性の水準 $F_i(\mathbf{m})$ と、立地点 i 固有の効果 B_i に応じて定まると仮定する：

$$\text{Prod}_i = \alpha F_i(\mathbf{m}) + B_i, \quad (5)$$

$$F_i(\mathbf{m}) = \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[-\rho \tau_{ij}] m_j. \quad (6)$$

ここで、コミュニケーション外部性 $F_i(\mathbf{m})$ は企業間における集積の経済を考慮しており、多くの企業がより近くにより高密度で立地するほど、生産額が高まると仮定している。また、 $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_I]^T$ であり、 α はコミュニケーション外部性の大きさを表すパラメータ、 ρ は距離減衰パラメータである。このとき、立地点 i の利潤

π_i は次のように与えられる：

$$\pi_i = \alpha F_i(\mathbf{m}) + B_i - r_i s^F - w_i. \quad (7)$$

このとき、企業の利潤ゼロ条件より、立地点 i の企業の賃金 w_i は次のように表される：

$$w_i = \alpha F_i(\mathbf{m}) + B_i - r_i s^F. \quad (8)$$

(4) デベロッパーの行動

デベロッパーは、各立地点で不在地主から借りた単位面積の土地と資本を開発し、完全競争の下で床面積を家計と企業に供給する。Ahlfeldt et al.⁹⁾と同様、生産関数はCobb-Douglas型であると仮定することから、立地点 a の土地を開発するデベロッパーの利潤最大化行動は次のように表される：

$$\max_{M_a, K_a} \Pi_a = r_a S_a - P M_a - (R_a + C) K_a, \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } S_a = M_a^\mu K_a^{1-\mu}. \quad (9b)$$

ここで、 $\mu \in (0, 1)$ は資本の投入割合、 S_a は床面積の供給量、 M_a は資本量、 R_a はデベロッパーが不在地主に支払う単位面積あたりの土地に対する地代、 C は土地開発に伴う単位面積あたりの機会費用、 K_a は利用可能な土地面積である。また、 P は資本の価格であり、立地点によらず同一の水準となる。ここで、 P は M_a の単位を基準化するために、これ以降、 $P = 1$ とする。

利潤最大化問題の一階条件および利潤ゼロ条件から、 M_a, S_a, r_a は、各々、以下で与えられる：

$$M_a = \frac{\mu}{1-\mu} (R_a + C) K_a, \quad (10a)$$

$$S_a = (\mu r_a)^{\frac{\mu}{1-\mu}} K_a, \quad (10b)$$

$$r_a = \frac{(R_a + C)^{1-\mu}}{\mu^\mu (1-\mu)^{1-\mu}}. \quad (10c)$$

立地点 a の床面積需要量は $s^H n_a + s^F m_a$ であることから、需給均衡条件（ie., $S_a = s^H n_a + s^F m_a$ ）より、 r_a, R_a が次のように表される：

$$r_a = \frac{1}{\mu} \left(\frac{s^H n_a + s^F m_a}{K_a} \right)^{\frac{1-\mu}{\mu}}, \quad (11a)$$

$$R_a = \frac{1-\mu}{\mu} \left(\frac{s^H n_a + s^F m_a}{K_a} \right)^{\frac{1-\mu}{\mu}} - C. \quad (11b)$$

(5) 立地均衡状態

家計は効用 u_{ai} が最大となる居住地 a 、就業地 i を選択する。この効用 u_{ai} は、式(8)、式(11a)を式(4)に代入することにより、家計の居住地・就業地分布 $\mathbf{h} = (h_{ai})_{a,i \in \mathcal{L}}$ （ie., 家計と企業の立地パターン）の関数で表せる：

$$u_{ai} = \alpha F_i(\mathbf{m}) + B_i - s^F \frac{1}{\mu} \left(\frac{s^H n_i + s^F m_i}{K_i} \right)^{\frac{1-\mu}{\mu}} - s^H \frac{1}{\mu} \left(\frac{s^H n_a + s^F m_a}{K_a} \right)^{\frac{1-\mu}{\mu}} - t \tau_{ai} + A_a. \quad (12)$$

本研究では、財消費に関して同一の効用関数を仮定する一方で、家計の居住地・就業地選択には異質性がある

と仮定する. 具体的には, 家計 ℓ の効用 $v_{ai}(\ell)$ は以下で与えられる:

$$v_{ai}(\ell) = u_{ai}(\mathbf{h}) + \epsilon_{ai}(\ell). \quad (13)$$

ここで, $\epsilon_{ai}(\ell)$ は, 家計 ℓ に固有の確定効用であり, 家計の集団全体に渡る $\{\epsilon_{ai}(\ell)\}$ の分布が, 家計が十分多く存在することで連続分布で近似でき, 互いに独立・同一な Weibull 分布に従うと仮定する.

以上の条件のもとで, 立地均衡状態における居住地 a , 就業地 i を選択する家計数 h_{ai} は, 次の Logit 型の関数で与えられる¹⁹⁾:

$$h_{ai} = \frac{\exp[\theta u_{ai}(\mathbf{h})]}{\sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[\theta u_{bj}(\mathbf{h})]} N \quad \forall a, i \in \mathcal{L}. \quad (14)$$

ここで, θ はスケールパラメータである.

(6) ポテンシャル関数

本モデルは, 集積の経済を考慮していることから, 式(14)を満たす均衡状態が複数存在する⁸⁾. このため, 詳細・広域な実空間を対象とした場合, 均衡状態を求めるには大規模な計算が必要となる. 加えて, 求まる均衡状態には不安定均衡も含まれる. そこで, 効率的に安定均衡状態を得るために, ポテンシャル関数を利用する.

ポテンシャル関数とは, Sandholm²⁰⁾により示されているように, 非負条件および人口保存則を満たす (ie., $h_{ai} \geq 0 \quad \forall a, i \in \mathcal{L}$, $\sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}} h_{ai} = N$) 任意の \mathbf{h} に対して, 次の条件を満たす関数である:

$$\frac{\partial f(\mathbf{h})}{\partial h_{ai}} = u_{ai}(\mathbf{h}) - \frac{1}{\theta} \ln h_{ai} + \zeta \quad \forall a, i \in \mathcal{L}. \quad (15)$$

ここで, ζ は任意の定数である.

本モデルでは, 式(12)より, 次のポテンシャル関数が存在する:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{h}) = & \sum_{i \in \mathcal{L}} \left\{ \frac{\alpha}{2} F_i(\mathbf{m}) + B_i \right\} m_i \\ & - \sum_{a \in \mathcal{L}} (s^H n_a + s^F m_a)^{\frac{1}{\mu}} K_a^{-\frac{1-\mu}{\mu}} \\ & - t \sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}} \tau_{ai} h_{ai} + \sum_{a \in \mathcal{L}} A_a n_a \\ & - \frac{1}{\theta} \sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}} h_{ai} \ln h_{ai}. \end{aligned} \quad (16)$$

ポテンシャル関数が存在する場合, 立地均衡状態は, 次の最適化問題の Karush-Kuhn-Tucker 条件を満たす \mathbf{h} と一致する²⁰⁾:

$$\max_{\mathbf{h}} f(\mathbf{h}), \quad (17a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}} h_{ai} = N, \quad h_{ai} \geq 0, \quad \forall a, i \in \mathcal{L}. \quad (17b)$$

立地均衡状態のうち安定均衡状態は, ポテンシャル関数が有する性質を利用することで, 容易に得ることができる. 具体的には, 高山²⁰⁾で示されているように, 状態 \mathbf{h}^0 を初期状態とした際来实现する安定均衡状態は, ポテンシャル関数を局所的に最大化する \mathbf{h}^* を \mathbf{h}^0 から探索

することにより得られる. すなわち, 式(17)の簡単な最適化問題を局所的に解くだけで, 容易に安定均衡状態を得ることができる.

3. モデル特性の把握

本章では, 仮想都市を対象として, 安定均衡状態における家計と企業の立地パターンを数値的に調べる. そして, モデルで表現した集積の経済 (ie., 集積力) や地代 (ie., 分散力) の影響や, 本モデルが複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明できることを確認する.

(1) 条件設定

本章の数値計算では, 離散的な 21 箇所の立地点 (ie., $I = 21$) が線分上に並ぶ都市を考える. そして, 隣接する立地点間の距離 d は均等であると仮定する.

数値計算の手順としては, まず, 通勤費用が $t = 0$ で, 初期分布 h_{ai} は立地点間で $h_{ai} \cong 0$, 立地点内で $h_{ai} \cong N/I$ のとき^{注3)}の均衡状態を求める. 次に, その均衡状態を入力値として, t を 0.01 増加させて次の均衡状態を求める. これを繰り返して, 順次計算を行う.

ここでは, 数値計算結果のうち, モデルの特性 (ie., 複数都心の内生的形成・崩壊現象) を分かりやすく表すパラメータ値での結果を示す. 具体的には, $N = 100$, $d = 1$, $K_a = 1$, $s^H = 1$, $s^F = 1$, $A_a = 1$, $B_i = 1$, $\alpha = 1$, $\rho = 2$, $\mu = 0.5$, $\theta = 1$ のときの結果を示す.

(2) 数値計算結果

通勤費用 t を変化させた際の家計と企業の立地分布を図-1に示す. 図では, 企業数の立地分布を黒の棒グラフ, 家計数の立地分布を白の棒グラフで表現している.

図より, 家計の立地パターンは, 通勤費用が低くなるにつれて, 立地点内の通勤が, より移動を伴う, 郊外からの通勤に変化する結果となった. これは, モデルの分散力を反映した分散挙動と言える.

また, 企業の立地パターンは, 通勤費用が高い場合は分散した立地であり, 通勤費用が低下するにつれて, 都心 (ie., 企業数が平均を大きく上回る立地点) が形成された. これは, モデルの集積力を反映した集積挙動と言える. さらに, 通勤費用が低下すると, 都心となる立地点が変化し (ie., 都心の崩壊), 最終的には, 都心が全て連坦して, 一つの大規模な都心が形成された.

以上より, 本モデルが複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明できることを確認した. 本結果は, 家計と企業といった, 2種類の主体の立地を同時に扱ったモデルの特性を示したものである. この特性は, Akamatsu et al.¹⁹⁾でも明らかになっておらず^{注4)}, 重要な知見と言える.

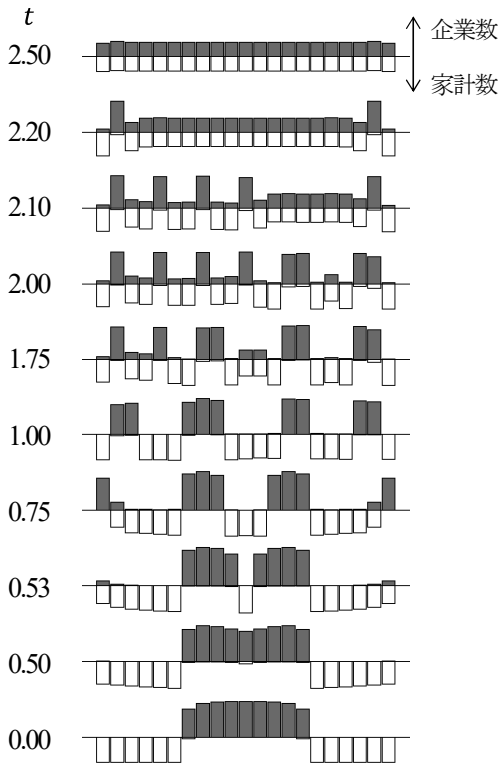


図-1 各通勤費用での家計と企業の立地分布

4. パラメータ設定

本章では、本モデルの均衡状態が実データと整合するような、系統的なパラメータ設定方法を提示する。そして、次章の金沢都市雇用圏を対象とした反実仮想実験を可能とするために、必要となるデータを整理して、提示した方法によりパラメータを設定する。

(1) 設定方法

本研究では、Ahlfeldt et al.⁹⁾と基本的に同様の方法を用いてパラメータの設定を行う。この方法を用いることで、複数均衡状態が存在するモデルのパラメータを定めることができる。このパラメータ設定方法の具体的な手順を以降に示す。

a) STEP1：床面積に関するパラメータの設定

床面積の建設費用のうち土地に必要な費用の割合 $1 - \mu$ は、Ahlfeldt et al.⁹⁾と同様に、既往研究で推定された値と等しくなるように設定する：

$$1 - \mu = 0.25. \quad (18)$$

b) STEP2：地代パラメータおよび単位当たり床面積・単位当たり床面積価格の設定

家計の単位あたり床面積 s^H および企業の単位あたり床面積 s^F の設定を行う。まず、 $(s^H)^{1/\mu}$, C を推定する。具体的には、式(11b)を用いて、データより得られる $R_a, s^F/s^H, n_a, m_a, K_a$ を外生値として回帰分析を行う：

$$R_a = \frac{1 - \mu}{\mu} (s^H)^{1/\mu} \left(\frac{n_a + \frac{s^F}{s^H} m_a}{K_a} \right)^{\frac{1}{\mu}} - C. \quad (19)$$

推定された $(s^H)^{1/\mu}$ および STEP1 で得られる μ を用いて s^H を設定する。そして、外生値である s^F/s^H を用いて、 s^F を設定する。

次に、これまで得られた s^H, s^F, μ 、および、実データから得られる n_a, m_a, K_a を外生値として式(11a)に代入することにより、 r_a を設定する。

c) STEP3：通勤費用項の推定

通勤費用項 θt を推定するために、立地均衡条件に重力方程式の固定効果法を利用する。具体的には、立地均衡条件式(14)において、両辺で自然対数をとる。さらに、居住地に関する変数と就業地に関する変数をそれぞれダミー変数に置き換える：

$$\ln[h_{ai}] = -\theta t \tau_{ai} + D_a + D_i + \text{const}. \quad (20)$$

ここで、 D_a は居住地 a に関するダミー変数、 D_i は就業地 i に関するダミー変数、 const は定数項を表す。ここで、 h_{ai} のデータは、本稿で対象とする金沢都市雇用圏では得られないため、町丁目間の OD 交通量 trip_{ai} のデータを用いて推定する。

上記の式を用いて、データより得られる h_{ai} ($= \text{trip}_{ai}$)、 τ_{ai} を外生値として、重回帰分析を行う。ただし、推定式(20)の都合上、 $h_{ai} \geq 1$ となるデータを用いて推定する。

d) STEP4：アメニティ水準に関する項、賃金項の設定

アメニティ水準に関する項 $\theta(A_a - r_a s^H)$ および賃金項 θw_i を設定するために、式(1)および立地均衡条件式(14)を利用して得られる以下の式を用いる：

$$n_a = \sum_{i \in \mathcal{L}} \frac{\exp[\theta(A_a - r_a s^H) - \theta t \tau_{ai}]}{\sum_{b \in \mathcal{L}} \exp[\theta(A_b - r_b s^H) - \theta t \tau_{bi}]} m_i, \quad (21a)$$

$$m_i = \sum_{a \in \mathcal{L}} \frac{\exp[\theta w_i - \theta t \tau_{ai}]}{\sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[\theta w_j - \theta t \tau_{aj}]} n_a. \quad (21b)$$

これより、実データから得られる n_a, m_i, τ_{ai} および θt を外生値として、非線形方程式(21)を解くことで、 $\theta(A_a - r_a s^H), \theta w_i$ を得ることができる。ただし、解を一意に求めるには自由度が1足りないため、基準化を行う。

e) STEP5：家計の居住地・就業地分布の設定

立地均衡条件式(14)を満たす h_{ai} を設定する。具体的には、データより得られる τ_{ai} および STEP3,4 で求まる $\theta t, \theta(A_a - r_a s^H), \theta w_i$ を外生値として、立地均衡条件式を変形した次の式を計算することで設定する：

$$h_{ai} = \frac{\exp[\theta(A_a - r_a s^H) + \theta w_i - \theta t \tau_{ai}]}{\sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[\theta(A_b - r_b s^H) + \theta w_j - \theta t \tau_{bj}]} N. \quad (22)$$

f) STEP6：スケールパラメータの設定

スケールパラメータ θ は、モデルの w_i の分散がデータと一致するように設定する。具体的には、STEP4 で得られる θw_i の分散 s_{model}^2 とデータから得られる w_i の分散

s_{data}^2 を外生値として、 θ を以下で与える:

$$\theta = \sqrt{\frac{S_{model}^2}{S_{data}^2}} \quad (23)$$

g) STEP7: アメニティ水準, 生産性に関する変数選択およびパラメータ推定

居住地のアメニティ水準 A_a と生産性 $Prod_i$ は, これまでのSTEPで得られた $s^H, s^F, r_a, \theta(A_a - r_a s^H), \theta w_i, \theta$ より求まる. つまり, アメニティは $\{\theta(A_a - r_a s^H)\}/\theta + r_a s^H$, 生産性は $(\theta w_i)/\theta + r_i s^F$ により設定される.

次に, $A_a, Prod_i$ を被説明変数とした以下の式(24)を用いて, パラメータ α の推定とともに, アメニティ水準 A_a および立地点固有の効果 B_i に関する変数選択とパラメータ推定を行う. ここで, 空間的自己相関に対処するために, 固有ベクトル空間フィルタリング (eigenvector spatial filtering) アプローチ²²⁾を採用する. このアプローチは, 地点間距離の逆数 $1/\tau_{ai}$ を要素を持つ空間重み行列の固有ベクトル Z を説明変数に導入するだけで空間的自己相関に対処できる. それゆえ, 詳細・広域な都市内空間を対象とした分析であっても, 容易にパラメータ推定を実施できるという利点を持つ.

推定式は次のとおりである:

$$A_a = \kappa^{AME} X_a^{AME} + \nu^{AME} Z_a + \text{const}_A, \quad (24a)$$

$$Prod_i = \alpha \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[-\rho \tau_{ij}] m_j + \kappa^{UNI} \cdot X_i^{UNI} + \nu^{UNI} Z_i + \text{const}_P. \quad (24b)$$

ここで, X_a^{AME} は立地点のアメニティ水準に関する変数, κ^{AME} はそのパラメータ, X_i^{UNI} は立地点 i の固有の効果に関する変数, κ^{UNI} はそのパラメータ, $\text{const}_A, \text{const}_P$ は定数項を表す. また, 説明変数に加える空間重み行列の固有ベクトル Z は, Tiefelsdorf and Griffith²³⁾に基づき, 正の固有値に対応した固有ベクトルのみを用いる. これは, これらの固有ベクトルが正の空間相関を捉えることが知られているためである.

推定式(24)を利用するにあたり問題点がある. 具体的には, 式(24b)の右辺第1項は2つのパラメータ α, ρ を有しているため, 1項につき1つのパラメータを推定するような一般化線形モデルをそのまま利用することができない. これに対して, Ahlfeldt et al.⁹⁾のように一般化モーメント法 (GMM) を利用することで, 1項に含まれる2つのパラメータを同時に推定することは可能である. しかし, 本稿では簡単な方法として, 距離減衰パラメータ ρ を特定化する. そのうえで, 式(24)を利用した重回帰分析によって, 変数選択およびパラメータ推定を行う.

h) STEP8: 観測されないアメニティ水準, 生産性

アメニティ水準, 生産性のうち, モデルや準備したデータからは観測されないものは, 次に示す残差 $\delta_a^{AME}, \delta_i^{UNI}$ に含まれる:

$$\delta_a^{AME} = A_a - \kappa^{AME} X_a^{AME}, \quad (25a)$$

$$\delta_i^{UNI} = Prod_i - \left\{ \alpha \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[-\rho \tau_{ij}] m_j + \kappa^{UNI} \cdot X_i^{UNI} \right\}. \quad (25b)$$

$\delta_a^{AME}, \delta_i^{UNI}$ を用いて, $A_a, Prod_i$ のキャリブレーションを行うため, 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は実データと一致する.

(2) 分析対象圏域および使用データ

本研究では, 金沢都市雇用圏を分析対象とする. 具体的には, 図-2に示す金沢都市雇用圏を国勢調査の調査区である小地域に分割した空間を扱う. つまり, 地区数が1,656地区の詳細・広域な実空間を分析対象とする.

前節で説明したパラメータ設定方法に使用するデータの出典を表-1に示す. 分析対象圏域におけるこれらのデータを整備し, パラメータ設定に用いる. なお, データは, 2015年を基準として, 収集できるデータのうち最も近い時点のものを使用した.

地点 a から地点 i への OD 交通量 $trip_{ai}$ は, 道路交通センサスのBゾーン単位のOD交通量²⁴⁾を, 国勢調査の就業者数および経済センサスの従業者数により設定した按分値²⁵⁾を用いて按分することで設定した.

居住地別家計数 n_a は, 国勢調査の就業者数とした. 立地分布を図-3に示す.

就業地別家計数 m_i (企業数) は, 経済センサスから設定した対象圏域内の全従業者数に対する当該地区の従業者数の比率に総家計数 $\sum_a n_a$ を乗じた値とした. 立地分布を図-4に示す.

地代は, 公示地価に10年国債利回りを乗じた値を用いた.

家計に対する企業の土地使用比率 s^F/s^H は, 単位あたりの就業者に対する延床面積と, 単位あたりの従業者に対する延床面積の比で算出した. データは, 建築物ストック統計から得られる住宅用・法人用の延床面積と, 国勢調査・経済センサスで得られる就業者数・従業者数を用いた. 石川県の各データから, $s^F/s^H = 0.429$ を得た.

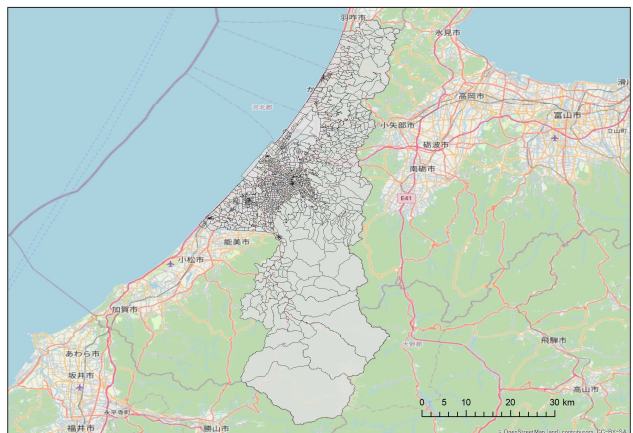


図-2 対象圏域と地区分割

表-1 使用データ

項目	出典
OD交通量 $trip_{ai}$ [人]	道路交通センサス OD 交通量 (2015年), 国勢調査 就業者数 (2015年), 経済センサス 従業者数 (2014年)
居住地別家計数 n_a [人]	国勢調査 就業者数 (2015年)
就業地別家計数 m_i [人]	国勢調査 就業者数 (2015年), 経済センサス 従業者数 (2014年)
地代 R_i [万円/m ² ・年]	公示地価 (2015年), 10年国債利回り (2015年)
家計に対する企業の土地 使用比率 s^F/s^H	建築物ストック統計 延床面積 (2013年), 国勢調査 就業者数 (2015年), 経済センサス 従業者数 (2014年)
土地面積 K_a [m ²]	国勢調査 土地面積 (2015年)
地域間の距離 τ_{ai} [km]	DRM (2019年), 国勢調査境界データ (2015年)
賃金 w [万円/年]	賃金構造基本統計調査 所得等 (2015年)
アメニティ水準・立地点固有の 効果に関する変数 $[m^2], [km]$	国土数値情報 道路密度メッシュデータ (2010年), 同 鉄道時系列 (2015年), 同 高速道路時系列 (2015年), 同 用途地域 (2019年)

土地面積 K_a は、国勢調査の地区の土地面積を用いた。地区間の移動距離 τ_{ai} は、DRMの基本道路による地区間の最短経路の道路延長を用いた。ただし、地区内の移動距離 τ_{aa} は、既往研究²⁴⁾と同様、 $2/3\sqrt{K_a/\pi}$ とした^{注7)}。また、コミュニケーション外部性における移動距離は、自身が取引先へ移動するコストと取引相手が自社まで移動するコストを考慮するため、次のように設定した。

$$\tau_{ai} = \frac{\tau_{ai} + \tau_{ia}}{2} \tag{26}$$

賃金 w は、賃金構造基本統計調査の一般労働者のデータを用いた。

アメニティ水準・立地点固有の効果に関する変数のデータは、国土数値情報のデータを用いた。変数候補としてデータ整備した変数を以下に列挙する。

- 道路密度
- 金沢駅までの距離 (直線距離)
- 最寄り駅までの距離 (直線距離)
- 最寄りICまでの距離 (直線距離)
- 用途地域面積：住居系
- 用途地域面積：商業系
- 用途地域面積：工業系
- 土地面積に対する用途地域面積の割合：住居系
- 土地面積に対する用途地域面積の割合：商業系
- 土地面積に対する用途地域面積の割合：工業系

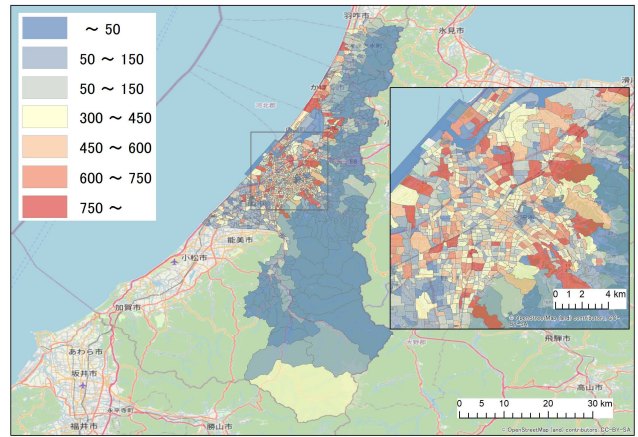


図-3 居住地別家計数

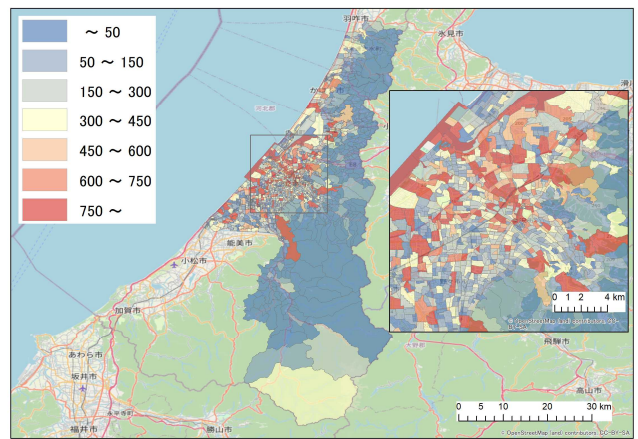


図-4 就業地別家計数 (企業数)

(3) パラメータ設定の結果

a) パラメータ設定の与条件

距離減衰パラメータ ρ は、既存研究⁹⁾で推定された値と整合するように $\rho = 1.0851$ とした。Ahlfeldt et al.⁹⁾では、徒歩による距離減衰パラメータを1分あたり0.3617と推定している。これを用いて、対象地域の空間的特徴を考慮し、企業間の移動モードが主に自動車となると仮定して上記の値を設定した。具体的には、自動車の走行速度20km/h (≈ 0.333 km/min)として、距離あたりの距離減衰パラメータ1.0851 ($\approx 0.3617 \div 0.333$)を設定した。

アメニティ水準、生産性に関する変数 X_a^{AME}, X_i^{UNI} は、有意確率5%として、ステップワイズ法により決定した。

b) パラメータ設定の結果

パラメータの設定値および決定係数は表-2に示すとおりである(残差 $\delta_a^{AME}, \delta_i^{UNI}$ については付録参照)。このうち、アメニティの推定式(24a)の決定係数が他と比べて低い値となった。アメニティをより説明する変数候補のデータ整備は今後の課題としたい。

地代パラメータ $(s^H)^{1/\mu}, C$ は、ともに有意に推定された。このうち、 C は理論と不整合な符号となった。しかしながら、分析結果への影響は全く無いため本設定値を用いることとし、理論と整合した符号となる設定は今後の課題としたい。

表-2 パラメータ設定値

項目	設定値	t値
$-C$	6.188.E-03	2.504
$(s^H)^{1/\mu}$	1.064.E+02	14.95
式(19)の決定係数	0.634	
s^F	1.422.E+01	—
s^H	3.312.E+01	—
const	1.589.E+00	48.78
$-\theta t$	-1.509.E-01	-447.7
式(20)の決定係数	0.528	
θ	8.061.E-03	—
t	1.872.E+01	—
κ^{AME} (道路密度)	2.376.E+07	7.896
κ^{AME} (金沢駅距離)	1.250.E+01	4.528
κ^{AME} (最寄駅距離)	-2.697.E+01	-5.251
κ^{AME} (住居系面積)	6.337.E-04	4.226
κ^{AME} (商業系面積)	3.707.E-03	4.357
κ^{AME} (商業系面積割合)	-3.200.E+02	-3.842
κ^{AME} (工業系面積割合)	-2.034.E+02	-4.062
式(24a)の決定係数	0.322	
α	1.334.E-02	5.756
κ^{UNI} (道路密度)	8.718.E+06	6.640
κ^{UNI} (金沢駅距離)	1.025.E+01	6.323
κ^{UNI} (最寄IC距離)	-6.814.E+00	-3.296
κ^{UNI} (住居系面積)	7.085.E-04	10.94
κ^{UNI} (商業系面積)	1.472.E-03	4.866
κ^{UNI} (工業系面積)	6.559.E-04	9.738
κ^{UNI} (住居系面積割合)	-1.362.E+02	-7.430
式(24b)の決定係数	0.539	

通勤費用項 θt は、有意に推定され、符号条件に合った結果を得た。

アメニティ水準に関する変数のパラメータ κ^{AME} は、おおむね直観と合った結果を得ることができた。しかしながら、以下の2点について解釈に注意が必要である。

1点目は、用途地域面積と用途地域面積割合である。用途地域面積は、当該地区に各用途地域がどの程度存在するかを示すものである。一方で、用途地域面積割合は、用途地域の混在の程度を示すものである。推定の結果、用途地域面積として住居系・商業系が正の推定値で採用された。これは、住居系・商業系の用途地域が存在するほどアメニティ水準が高いことを示しており、妥当な結果と言える。一方で、用途地域面積割合では商業系・工業系が負の推定値で採用された。これは、用途地域面積に住居系・商業系面積が正の符号で採用されていることを踏まえると、工業系が混在している地区のアメニティ水準が低いことを示しており、これは直観に合った妥当な結果と言える。

2点目は、金沢駅までの距離である。金沢駅までの距離の推定値は正となっており、直観とは逆の結果となっ

た。これは、昨今の郊外化傾向 (e.g., 郊外部での開発) を説明する変数として、金沢駅までの距離が採用されたためと考える。

生産性に関する変数のパラメータ κ^{UNI} に関しても、おおむね直観と合った結果を得ることができたが、アメニティ水準と同様に2点について注意が必要である。

1点目の用途地域面積・用途地域面積割合について、まず、用途地域面積では、全ての用途地域が正の推定値で採用された。これは、用途地域か否かが生産性に影響していることを示しており、直観に合った妥当な結果と言える。次に、用途地域面積割合では、住居系面積割合が負の推定値で採用された。これは、用途地域のうち、住居系の用途地域が混在しているほど生産性が低いことを示しており、こちらも妥当な結果と言える。

2点目の金沢駅までの距離について、アメニティ水準と同様に、金沢駅までの距離の符号が正となった。これは、企業の立地特性として、駅周辺に立地して生産性を高める企業 (e.g., サービス業) と、駅から離れた地区に立地して生産性を高める企業 (e.g., 製造業) の両方が存在するためだと考える。このうち、駅周辺に立地する企業の生産性を用途地域面積や用途地域面積割合の変数が説明し、駅から離れた地区に立地する企業の生産性を金沢駅までの距離の変数が説明したと思われる。実際に、用途地域外に重心点がある小地域の就業地別家計数を集計したところ、金沢都市雇用圏では用途地域外に圏域全体の約23%の就業者が存在し、一定程度の生産性が駅から離れた地区にあると想定できるため、本結果は妥当と考える。

以上より、提示した設定方法と整備したデータを用いて、次章の反実仮想実験に必要なパラメータを系統的に設定することができた。

5. 反実仮想実験

本章では、本分析手法が詳細・広域な実空間に適用可能であることを示すため、都市内の交通インフラ整備を想定した、反実仮想実験を実施する。そして、モデル特性を反映した結果が出力できることを確認する。

(1) 条件設定

都市内の交通インフラ整備を想定し、前章で設定された t が10%低下したケースについて、各地区における家計数および企業数のシェア変化を調べる。ここで、家計数のシェア変化は $(n_a^{\omega} - n_a^*)/N \times 100$ で表し、企業数のシェア変化は $(m_i^{\omega} - m_i^*)/N \times 100$ で表す。ここで、上付き添字 ω は基準均衡状態、 ω は通勤費用変化後の均衡状態である。

(2) 通勤費用低下に伴う立地分布変化

今回の反実仮想実験では、1,656の2乗個の未知数を扱った大規模な問題を解く必要がある。しかし、第2章(6)節に示す、ポテンシャル関数を利用した最適化問題を局所的に解くことで、その解を得ることができた。また、ここでの基準均衡状態が安定均衡状態であることは、数値解析により確認している。反実仮想実験の結果を図-5、図-6に示す。

図-5より、家計は金沢駅を中心とする都市雇用圏の中心部から転居して、かほく・宝達志水・津幡・白山・川北といった、都市雇用圏の郊外へ居住する結果となった。一方で、企業は図-6より、金沢駅周辺から撤退して、金沢市縁辺部もしくはその隣接自治体における、基準均衡状態である程度の企業が集積していた地区 (ie., 図-4 の750人以上の地区) への集積立地がみられた。

結果より、家計のシェア変化では、中心部から都市雇用圏の郊外への居住変化があり、「より遠くからの通勤を許容しやすくなる」といった、モデルの分散力を反映した分散挙動を確認できた。また、企業のシェア変化では、増加地区において、ある程度企業集積した地区やその隣接地区が増加する傾向があり、「企業が集中的に立地したい」といった集積力を反映した集積挙動を確認できた。

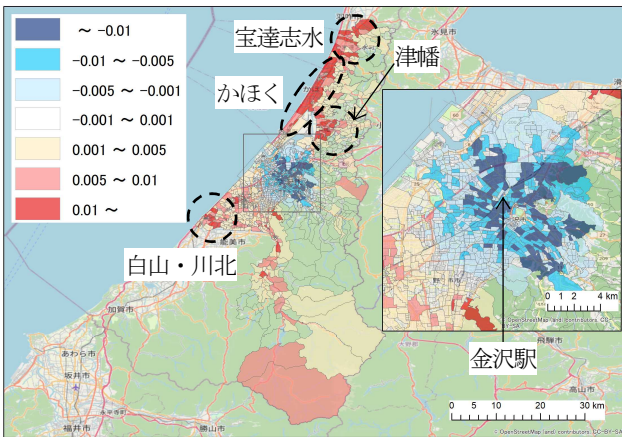


図-5 家計のシェア変化：通勤費用10%低下

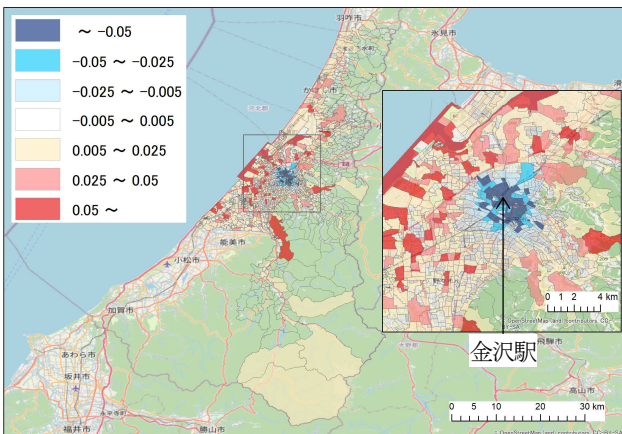


図-6 企業のシェア変化：通勤費用10%低下

なお、今回の結果は、日本のこれまでの人口分布変化と整合したものとなっており、実際の経済活動の空間分布変化から見ても妥当な結果と言える。具体的には、既往研究²⁹⁾では、1970年から2015年にかけて、日本の各都市の人口密度変化を整理しており、都市の中心部の人口密度が経年的に低下したことが報告されている。このような人口分布変化 (ie., 市街地の人口密度の低下) を今回の結果からも確認できた。

市街地の人口密度の低下を捉えることができた理由はモデル特性にあると考える。Fujita and Ogawa⁷⁾では、複数都心形成を表現できる一方で、人口密度の変化を捉えることができなかった。本モデルは、Fujita and Ogawa⁷⁾にデベロッパーを導入しており、人口密度の変化を捉えられる構造としている。上記の結果は、このモデル特性を反映した結果であり、本モデルが、複数都心形成を表現し、かつ、人口密度変化を捉えることに成功していることを示している。

以上より、反実仮想実験から、詳細・広域な実空間を対象とした大規模な問題の解を得ることができた。さらに、モデル特性を反映した結果を得ることができた。

6. おわりに

本研究では、社会資本整備の長期的効果を評価するための都市経済分析手法を開発した。具体的には、Fujita and Ogawa⁷⁾、中村・高山⁸⁾を基盤に、集積の経済を考慮し、かつ、複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明可能な立地モデルを構築した。そして、本モデルがポテンシャル関数を持つことを利用した、安定均衡状態を効率的に得るための分析手法を提示した。加えて、線分都市を対象とした数値計算を実施し、本モデルが複数都心の内生的形成・崩壊現象を説明できることを確認した。さらに、Ahlfeldt et al.⁹⁾に基づく実空間データを利用した系統的なパラメータ設定方法を提示した。その後、開発した手法により、金沢都市雇用圏を対象とした反実仮想実験を行った。その結果、詳細・広域な実空間を対象とした大規模な問題の解を得ることができ、さらに、モデル特性を反映した以下の結果を得ることができた。

- 中心部から都市雇用圏の郊外への居住変化：モデルの分散力を反映した分散挙動
- 企業集積地区およびその隣接地区での企業増加傾向：モデルの集積力を反映した集積挙動

以上のとおり、本稿では、集積の経済を考慮し、かつ、都心の内生的形成・崩壊現象を表現可能なモデルを構築することで、社会資本整備の長期的効果を分析可能な方法論を開発できた。今後の研究進展のために、課題を以下に挙げる。

まず、本モデルでは、家計の効用関数が線形であることから、家計の床面積に対する支出が収入に関わらず一定となっている。本来的には所得に応じて床面積に対する支出は変動すると思われるため、このことは課題である。解決策として、家計の効用関数を Cobb-Douglas 型とすることが考えられるが、素朴な変更ではポテンシャル関数が存在しないモデルとなるため、詳細・広域な実空間を対象とした計算が困難となる。これを解決するモデルの改良や安定性解析手法の開発が必要である。

次に、本研究で提示した Ahlfeldt et al.⁹⁾に基づくパラメータ設定方法では、設定されたパラメータによる基準均衡状態が不安定均衡となる場合もありうる。このため、パラメータにより設定された基準均衡状態が常に安定均衡となる、パラメータ設定方法の確立は課題である。

また、本研究では、モデルの特性が明らかとなっている Fujita and Ogawa⁷⁾を基盤としてモデルを構築した。このため、企業は業種の区別が無いものであった。しかしながら、パラメータ設定の結果(第4章(3)節 b)項)で触れたように、企業は業種によって立地特性が異なると考えられる。これに対処するための分析手法を開発するには、企業の業種の違いを考慮したモデルの特性把握が必要となり、理論研究の今後の発展が期待される。

最後に、本稿では正の外部効果として集積の経済の重要性を示し、それを考慮した分析手法を開発したが、社会資本整備の長期的効果を計測する際には、同様に、負の外部効果 (ie, 分散力) を考えることも重要である。これは、空間分布変化は集積力と分散力の相克の結果であるためである。本モデルでは、分散力のうち、地代は考慮しているが、交通混雑が考慮されておらず、実際よりも分散力が弱く働いている可能性がある。そのため、交通混雑を考慮したモデリング (eg, 交通均衡モデルの構築および立地モデルとの統合、統合モデルでの大規模計算を可能とする分析手法の開発) は今後の重要な課題である。

謝辞: 本研究は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の令和2年度研究助成(テーマ名: 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)と、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR215M の支援を受けたものである。また、本研究のパラメータ設定では、中央コンサルタンツ株式会社の堀越光氏(元金沢大学学生)から協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

付録 残差 δ_a^{AME} , δ_i^{UNI} の設定

式(25)で設定した残差 δ_a^{AME} , δ_i^{UNI} について、その空間分布を図-7、図-8 に示す。図より、 n_a, m_i の多い地区の残差が大きいなどの傾向は見られず、残差がモデルの挙

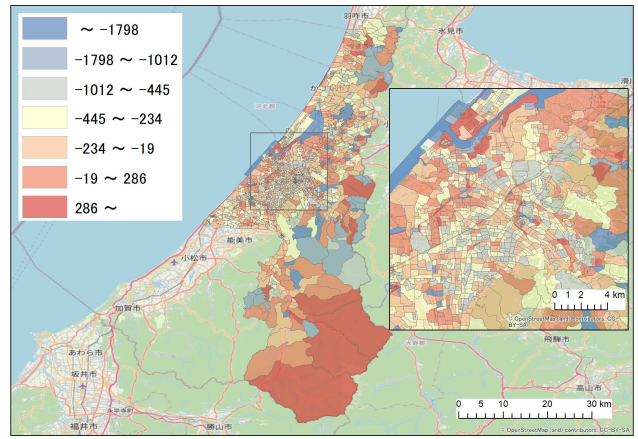


図-7 δ_a^{AME} の空間分布

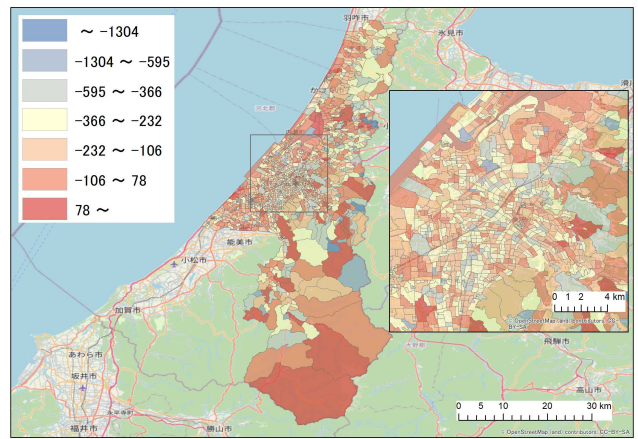


図-8 δ_i^{UNI} の空間分布

動に決定的な影響を与えているとは考えにくく、残差 δ_a^{AME} , δ_i^{UNI} は妥当な設定となっていると判断した。

NOTES

- 注1) Dingel and Tintelnot(2020, P.7)⁶⁾: “Researchers employing quantitative spatial models aim to provide a parsimonious general-equilibrium framework in order to predict counterfactual outcomes. The value of these quantitative models for policy analysis therefore depends largely on their ability to predict the spatial distribution of economic consequences of a shock.” Bryan, Glaeser, and Tsivanidis (2019, p.31)²⁶⁾: “If quantitative models are to provide useful policy insights, their results have to be trusted. First, researchers must establish that their model captures relevant features of the data or (ideally) can replicate the real-world response to a policy change.” より広義には、Kehoe (2005)²⁷⁾ は“it is the responsibility of modelers to demonstrate that their models are capable of predicting observed changes, at least ex post.”と主張している。
- 注2) 企業数は、既存の多くの研究と同様、就業者 1 人あたりで基準化したものである。このため、現実の企業数と定義が異なる。
- 注3) ここでは立地点内の通勤が支配的な分布を想定している。しかしながら、 $h_{ai} = 0$ とするとポテンシャル関数の値が求まらない。このため、以下のように初期値 h_{ai} を設定した:

$$\tilde{h}_{ai} = \begin{cases} N/I & \text{if } i = j, \\ 1.0 \times 10^{-10} & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (27a)$$

$$h_{ai} = \frac{\tilde{h}_{ai}}{\sum_{b \in L} \sum_{j \in L} \tilde{h}_{bj}} N. \quad (27b)$$

注4) Akamatsu et al.¹⁶⁾では、家計のみもしくは企業のみといった、単一の主体の立地を扱ったモデルを対象に、既存のモデルが3通りのクラスに類型化できること、そのクラス毎に“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を明らかにしている。

注5) h_{ai} のデータとしては、本来、交通目的別・交通モード別のデータが得られるPT調査のデータの利用が望ましい。しかしながら、PT調査は調査頻度が少なく地域が限定的であるといった限界がある。実際、金沢都市圏PT調査は最新が2007年調査で、対象が金沢市を含む2市3町であり今回の対象圏域を網羅していない。本研究では「対象の都市雇用圏を網羅するデータであること」、「基準年の2015年に近いデータを用いること」を重視し、道路交通センサスのOD交通量を活用した。しかしながら、道路交通センサスは全交通目的・自動車交通のみのデータであり、今回着目する「通勤トリップ・全交通モード」のみを扱っておらず、それによる影響(e.g.,他の目的トリップが含まれる、自動車以外の通勤トリップを含んでいない)を除外できていない。この点は課題である。

注6) 按分値は、以下のとおり設定した。ここで、就業者数は国勢調査のため居住地ベースの集計であり、従業者数は経済センサスのため従業地ベースの集計であるため、どちらか一方のみで按分値を設定すると偏りが生じる。このため、両方を用いて按分値を設定した：

$$\text{Weight} = (\text{Weight}_1 + \text{Weight}_2)/2. \quad (28)$$

ここで、 Weight_1 は対象圏域内の全就業者数に対する当該小地域の就業者数の比率、 Weight_2 は対象圏域内の全従業者数に対する当該小地域の従業者数の比率を表す。

注7) ここでは、円状の地区内の2地点間の平均距離として、このような地区内距離を設定している。

REFERENCES

- 国土交通省 社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会 計画部会 専門小委員会：ストック効果の最大化に向けて～その具体的戦略の提言～, 2016. [Expert Subcommittee, Planning Subcommittee, Transportation System Subcommittee, Council for Social Infrastructure Development and Council for Transport Policy, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Toward Maximizing Stock Effect ~Recommendations for Specific Strategies~*, 2016.]
- 国土交通省：第5次社会資本整備重点計画, 2021. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *The Fifth Priority Plan for Social Infrastructure Development*, 2021.]
- Rosenthal, S.S. and Strange, W.C.: Evidence on the Nature and Sources of Agglomeration Economies, In: *Handbook of Regional and Urban Economics* (Henderson, J.V., Thisse, J.-F. (eds.)), Vol.4, pp.2119-2171, 2004.
- Duranton, G. and Puga, D.: Micro-Foundations of Urban Agglomeration Economies, In: *Handbook of Regional and Urban Economics* (Henderson, J.V., Thisse, J.-F. (eds.)), Vol.4, pp.2063-2117, 2004.
- Fujita, M. and Thisse, J.-F.: *Economics of Agglomeration: Cities, Industrial Location, and Globalization*, Cambridge University Press, 2013.
- Dingel, J.I. and F. Tintelnot: Spatial economics for granular settings, NBER Working Paper, No.27287, 2020.
- Fujita, M. and Ogawa, H.: Multiple Equilibria and Structural Transition of Non-monocentric Urban Configurations, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.12, No.2, pp.161-196, 1982.
- 中村孝一, 高山雄貴：企業と家計の相互作用を考慮した都心形成モデルの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_555-I_569, 2018. [Nakamura, K. and Takayama, Y.: Development of an Agglomeration Model Considering Interactions Between Firms and Households, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.74, No.5, pp.I_555-I_569, 2018.]
- Ahlfeldt, G. M., Redding, S. J., Sturm, D. M. and Wolf, N.: The Economics of density: Evidence from the Berlin wall, *Econometrica*, Vol.83, No.6, pp.2127-2189, 2015.
- 堤盛人, 山崎清, 小池淳司, 瀬谷創：応用都市経済モデルの課題と展望, 土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.68, No.4, pp.344-357, 2012. [Tsutsumi, M., Yamasaki, K., Koike, A. and Seya, H.: Computable Urban Economic Models: Current Issues and Perspectives, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.68, No.4, pp.344-357, 2012.]
- Anas, A.: Discrete choice theory and the general equilibrium of employment, housing, and travel networks in a Lowry-type model of the urban economy, *Environment and Planning A*, Vol. 16, No. 11, pp.1489-1502, 1984.
- 武藤慎一, 上田孝行, 高木朗義, 富田貴弘：応用都市経済モデルによる立地変化を考慮した便益評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.257-266, 2000. [Muto, S., Ueda, T., Takagi, A. and Tomita, T.: The Benefit Evaluation Considering the Relocating Sectors with Computable Urban Economic Model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, No.17, pp.257-266, 2000.]
- 高木朗義, 武藤慎一, 太田奈智代：応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価, 河川技術論文集, Vol.7, pp.423-428, 2001. [Takagi, A., Muto, S. and Ohta, N.: Economic Evaluation of Flood Control Countermeasures by Using Computable Urban Economic Model, *Advances in River Engineering*, Vol.7, pp.423-428, 2001.]
- 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子：土地利用モデルを用いた東京都市圏の土地利用シナリオ分析, 環境科学会誌, Vol.24, No.3, pp.169-179, 2011. [Yamagata, Y., Seya, H. and Nakamichi, K.: Scenario Analysis of the Future Urban Land Use in the Tokyo Metropolitan Area, *Environmental Science*, Vol.24, No.3, pp.169-179, 2011.]
- 石倉智樹, 藤井修平, 辻裕之：集積外部性と建物床市場を考慮した応用都市経済モデル, 土木学会論文

- 集 D3(土木計画学), Vol.73, No.5, pp.95-103, 2017. [Ishikura, T., Fujii, S. and Tsuji, H.: A Computable Urban Economic Model Taking into Account of Agglomeration Externality and Floor Market, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.73, No.5, pp.95-103,2017.]
- 16) Akamatsu, T., Mori, T., Osawa, M. and Takayama, Y.: Spatial scale of agglomeration and dispersion: Theoretical foundations and empirical implications, *MPRA Paper*, University Library of Munich, Germany, 2018.
- 17) Brinkman, J. C.: Congestion, Agglomeration, and the Structure of Cities, *Journal of Urban Economics*, Vol.94, p.13–31, 2016.
- 18) Osawa, M. and Akamatsu, T.: Equilibrium refinement for a model of non-monocentric internal structures of cities: A potential game approach, *Journal of Economic Theory*, 187, 105025, 2020.
- 19) Anderson, S.P., de Palma, A. and Thisse, J.F.: *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, MIT Press, 1992.
- 20) Sandholm, W. H.: Potential games with continuous player sets, *Journal of Economic Theory*, Vol. 97, No. 1, pp.81-108, 2001.
- 21) 高山雄貴：始業時刻分布を内生化した住宅立地均衡モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.2, pp.59-69, 2019. [Takayama, Y.: A Residential Location Model Considering Firms' Work Start Time Choices, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.75, No.2, pp.59-69, 2019.]
- 22) Griffith, D. A.: Spatial autocorrelation and spatial filtering: Gaining understanding through theory and scientific visualization, *Springer*, pp.247, 2003.
- 23) Tiefelsdorf, M. and Griffith, D. A.: Semiparametric filtering of spatial autocorrelation: The eigenvector approach, *Environment and Planning A*, Vol.39, No.5, pp.1193–1221, 2007.
- 24) Redding, S. J. and Venables, A. J.: Economic geography and international inequality, *Journal of International Economics*, Vol.62, No.1, pp.53–82, 2004.
- 25) Mori, T. and Osawa, M.: Cities in a world of diminishing transport costs, *arXiv preprint arXiv: 2012.12503*, 2021.
- 26) Bryan, G., Glaeser, E. and Tsivanidis, N.: Cities in the Developing World, NBER Working Paper, No.26390, 2019.
- 27) Kehoe, T. J.: An Evaluation of the Performance of Applied General Equilibrium Models on the Impact of NAFTA, In: *Frontiers in Applied General Equilibrium Modeling* (Kehoe, T. J., Srinivasan, T. N. and Whalley, J.(eds.)), pp.341-377, Cambridge University Press, 2005.

(Received March 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

DEVELOPMENT OF AN URBAN ECONOMIC ANALYSIS METHOD THAT CONSIDERS AGGLOMERATION ECONOMIES

Tatsuya SUGIMOTO, Yuki TAKAYAMA and Akiyoshi TAKAGI

This study develops an urban economic analysis method that can assess the long-term effects of social infrastructure developments within a city. To this end, we construct a model that considers agglomeration economies and that can explain the endogenous formation of polycentric urban configurations. We then present an analytical method for efficiently obtaining stable equilibria in the model. Furthermore, to demonstrate the applicability of this analysis method, we conduct a counterfactual analysis on the improvement of commuting costs for the Kanazawa urban employment area. The results show that the population distribution changes reflect the model characteristics.