

交通基盤整備の長期的影響評価のための都市経済分析:

浸水リスク増大による経済活動の空間分布変化

An urban economic analysis for assessing the long-term impact of transportation development:
Changes in the spatial distribution of economic activity due to increased flood risk杉本 達哉¹, 高山 雄貴², 高木 朗義³Tatsuya SUGIMOTO¹, Yuki TAKAYAMA² and Akiyoshi TAKAGI³

本研究では、交通基盤整備の長期的影響評価に資する、浸水リスク増大による経済活動の空間分布 (i.e., 人口分布, 企業分布) 変化を計測可能な都市経済分析手法の開発を目的とする。そのために、集積の経済を考慮した先行研究¹⁾のモデルを基盤に、浸水リスクを考慮できるモデルを構築した。そして、実空間を対象とした分析で生じる大規模な数値計算を可能とするポテンシャル関数がモデルに存在することを示した。加えて、実空間での分析を可能とする系統的なパラメータ設定方法を提示した。さらに、金沢都市雇用圏を対象に、浸水リスク増大に関する反実仮想実験を実施した。そして、その結果がモデルの特徴を反映していることを確認し、整理した浸水区域人口変化から、浸水被害軽減策を考察した。

Keywords: 集積の経済, 浸水リスク, 都市経済分析, ポテンシャル関数

1. はじめに

交通基盤は、長期に亘って社会経済活動を支えるものである。このため、交通基盤整備にあたっては、その長期的な影響を事前に把握することが重要となる。ゆえに我が国においても、交通基盤などの社会資本のストック効果最大化が課題となっている²⁾。

長期的影響の計測には、経済活動の空間分布 (i.e., 人口・企業の立地分布) 変化を把握する必要がある。これは、対象期間が長期となると、その間に交通基盤の利用者である人口・企業の立地が変化し、交通基盤整備の影響の度合いや傾向が変化するためである。この立地変化の主要因が集積の経済であることが、空間経済学分野で蓄積された実証研究により示されている³⁾。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⁴⁾。このことから、交通基盤整備の長期的影響を計測するには、集積の経済を考慮することが重要と言える。

加えて、長期的影響を計測する際には、長期的な趨勢を捉えておく必要がある⁵⁾。本研究では、それらのなかでも、浸水リスク (浸水区域, 浸水深) の変化に注目する。これは、浸水リスクが有する特徴である「空間的な偏在」「気候変動等により生じると考えられる長期的・広域的な変化 (e.g., 特定地区の大幅なリスク増加, 高リスク地区の拡大)」が、社会経済活動の空間分布・交通基盤整備効果に重要な影響を与えうるためである。実際、都市交通システムの発達は、浸水被害を増大させる (e.g., 都市のコンパクト化に伴い、高リスク地区での

経済活動が増加する) 可能性も、低下させる (e.g., 低リスク地区へ経済活動を誘導する) 可能性も存在する。しかし、長期間・広範囲に亘って生じる浸水リスク変化の影響・交通基盤整備による浸水被害の変化を調べることができる (集積の経済を考慮した) 経済分析手法は、未だ存在しない。

これまで、交通基盤整備を評価可能とする都市経済分析手法として、応用都市経済 (CUE) モデルに関する研究が蓄積されてきた⁶⁾。CUE モデルは、多くの開発・実用事例があり、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いる。また、CUE 研究においても、地球温暖化を背景に、災害リスクを考慮したモデルの重要性が指摘されており⁷⁾、モデル開発が行われている^{例えば8)}。しかし、これらの CUE モデルは、集積の経済を考慮しておらず、長期的な影響を計測する分析手法ではない。

近年、都市経済学分野において、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)}。しかしながら、これらの研究では、モデル特性 (i.e., モデルがどのような経済活動の空間分布を表現可能か) を示していない。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。したがって、モデル特性を見極めることが極めて重要¹⁰⁾であり、これを行わないままに定量分析を実施することは重要な問題である。

一方で、近年の都市経済学分野の理論研究では、観測される特徴的な空間分布変化 (i.e., 中心市街地の空洞化、

1 正会員, 修士 (工学), 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発研究所

〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー e-mail: tt-sugimoto@yachiyo-eng.co.jp Phone: 03-5822-6216

2 正会員, 博士 (情報科学), 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系

3 正会員, 博士 (工学), 岐阜大学 社会システム経営学環

都心の郊外化)を表現できる,モデルの数理構造が明らかにされるまでになっている¹⁹⁾.しかしながら,そのような理論的知見を応用する研究は,大規模な数値解析が困難であること,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の原因として,ほとんど進んでいない.

そこで本研究では,交通基盤整備の長期的影響評価に資する,浸水リスク増大による経済活動の空間分布(i.e.,人口分布,企業分布)変化を計測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,モデル特性が明らかとなっている,集積の経済を考慮した先行研究¹⁾のモデルを基盤に,浸水リスクを考慮したモデルを構築する.そして,大規模な数値計算を可能とする,ポテンシャル関数がモデルに存在することを示す.さらに,構築したモデルによる計量分析を可能とするためのパラメータ設定方法を提示する.そのうえで,金沢都市雇用圏を対象に,浸水リスク増大に関する反実仮想実験を実施し,その結果がモデルの特徴を反映したものであることを確認する.加えて,浸水区域内の人口分布変化を把握し,浸水被害の軽減のための政策について考察する.

本稿の構成は以下のとおりである.まず,第2章では,先行研究¹⁾に基づくモデルを構築し,ポテンシャル関数の存在を示す.第3章では,モデルによる計量分析を可能とするためのパラメータ設定方法を提示し,金沢都市雇用圏を対象にパラメータ設定を行う.第4章では,浸水リスク増大に関する反実仮想実験を行う.最後に,第5章で本論文の成果と今後の課題を述べる.

2. モデル

本章では,中村・高山¹⁾に基づいた,集積の経済および浸水リスク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.

2.1 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.

2.2 家計の行動

家計は全て均質であり,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 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,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,中村・高山¹⁾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:

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

ここで,家計の効用にアメニティ水準 A_a を考慮することで,家計行動に浸水リスクを考慮できる枠組としている.

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 i 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:

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

2.3 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, $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_K]^T$ 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.上記のように,生産額に立地点 i 固有の効果 B_i を考慮することで,企業行動に浸水リスクを考慮できる枠組としている.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:

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

2.4 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.⁷⁾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によ

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:

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

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

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

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 (i.e., $S_a = s^H n_a + s^F m_a$) より、 r_a, R_a が次のように表される:

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

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

2.5 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 $\mathbf{h} = (h_{ai})_{a,i \in \mathcal{L}}$ (i.e., 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、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に近似でき、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:

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

ここで、 θ はスケールパラメータである。

2.6 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¹⁾。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、Sandholm¹⁰⁾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 (i.e., $h_{ai} \geq 0 \quad \forall a, i \in \mathcal{L}$, $\sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}} h_{ai} = N$) 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:

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

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¹⁰⁾:

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

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

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¹⁰⁾。具体的には、状態 \mathbf{h}^0 を初期状態とした際に実現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 から探査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. パラメータ設定

本章では、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。

3.1 設定方法

本研究では、Ahlfeldt et al.⁷⁾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。これにより、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。

(1)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.⁷⁾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：

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

(2)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導出

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 を既知として、回帰分析を行う：

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

推定された $(s^H)^{1/\mu}$ とSTEP1で得られる μ を用いて s^H を求める。そして、既知の s^F/s^H を用いて、 s^F を求める。

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 を式(11a)に代入し、 r_a を算出する。

(3)STEP3：通勤費用項の設定

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。

上記の式より、データより得られる $h_{ai}(= \text{trip}_{ai})$ 、 τ_{ai} を既知として、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。

(4)STEP4：アメニティ水準に関する項、賃金項の算出

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 を算出するために、立地均衡条件式(14)を以下のように変形する：

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

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

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

既知として、非線形方程式(21)を解くことで、 $\theta(A_a - r_a s^H)$ 、 θw_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。

(5)STEP5：家計の居住地・就業地分布の算出

立地均衡条件式(14)を満たす h_{ai} を推定する。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 θt 、 $\theta(A_a - r_a s^H)$ 、 θw_i を用いて、立地均衡条件式を変形した次の式を計算することで推定する：

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

(6)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 を用いて、 θ を以下で与える：

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

(7)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 、 $\theta(A_a - r_a s^H)$ 、 θw_i 、 θ 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 $(\theta w_i)/\theta + r_i s^F$ により得られる。

次に、得られた 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、固有ベクトル空間フィルタリングアプローチ¹²⁾を採用する。この手法は、地点間距離の逆数 $1/\tau_{ai}$ を要素に持つ空間重み行列の固有ベクトル \mathbf{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。

A_a 、 Prod_i は次の推定式を用いて推定する：

$$A_a = \kappa^{\text{AME}} \mathbf{X}_a^{\text{AME}} + \mathbf{v}^{\text{AME}} \mathbf{Z}_a + \text{const}_A, \quad (24a)$$

$$\text{Prod}_i = \alpha \sum_{j \in \mathcal{L}} \exp[-\rho \tau_{ij}] m_j + \kappa^{\text{UNI}} \cdot \mathbf{X}_i^{\text{UNI}} + \mathbf{v}^{\text{UNI}} \mathbf{Z}_i + \text{const}_P. \quad (24b)$$

ここで、 $\mathbf{X}_a^{\text{AME}}$ 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、 $\mathbf{X}_i^{\text{UNI}}$ 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、 const_A 、 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 \mathbf{Z} は、正の固有値に対応した固有ベクトルのみを用いる¹³⁾。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.⁷⁾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。

(8)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，残差 δ_a^{AME} ， δ_i^{UNI} として定数で外生的に与える：

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

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

3.2 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1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。

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。

地代は公示地価に10年国債利回りを乗じた値とした。

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。石川県のデータから $s^F/s^H = 0.429$ が得られた。

土地面積 K_a は，国勢調査の地区の土地面積を用いた。

地域間の移動距離 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¹⁴⁾と同様， $2/3 \sqrt{K_a/\pi}$ とした*2。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。

図1 対象圏域と地区分割

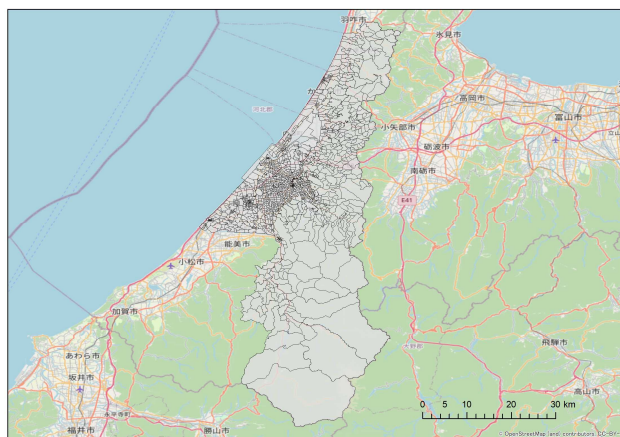


表1 使用データ

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/㎡・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 [㎡]	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 一般労働者所得等（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），同 上水道関連施設（2010年），石川県 洪水浸水想定区域図（2018年他）

$$\tau_{ai} = (\tau_{ai} + \tau_{ia})/2. \quad (26)$$

賃金 w は，賃金構造基本統計調査のデータを用いた。

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
- 最寄り駅までの距離
- 最寄りICまでの距離
- 用途地域面積：住居系／商業系／工業系
- 土地面積に対する用途地域面積の割合：住居系／商業系／工業系
- 給水区域ダミー
- 計画規模の浸水深
- 計画規模の浸水深の2乗

ここで、計画規模の浸水深は、使用データである 5m メッシュ浸水深の地区内平均値を使用した。

3.3 パラメータ設定の結果

(1)パラメータ設定の与条件

距離減衰パラメータ ρ は、既存研究で推定された値と整合するように $\rho = 1.0851$ とした。Ahlfeldt et al.⁷⁾では徒歩を想定して距離あたりの ρ を推定している。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であると仮定して上記の値を設定した。この際、自動車の走行速度は20km/hとした。

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。

(2)パラメータ設定の結果

パラメータの設定値は表-2に示すとおりである。

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、分析結果への影響は全く無いため本設定値を用いる。理論と整合した符号となる設定は今後の課題としたい。

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られた。しかし、用途地域面積と用途地域面積割合について解釈に注意が必要である。用途地域面積は地区面積の大きい地区、そして、用途地域面積割合は地区面積の小さい地区のアメニティ水準の高さを説明する変数として採用されたと考えられる。地区の大きさが影響するのは、本分析の地区設定が丁目単位であり、地区毎に面積が異なるためである。採用された変数をみると、用途地域面積は、住居系・商業系が正の推定値で採用された。これは当該用途が大きいほどアメニティ水準が高いことを示し、妥当な結果と言える。用途地域面積割合は、商業系・工業系が負の推定値で採用された。これは住居系の割合が大きいほどアメニティ水準が高いことを示し、妥当な結果と言える。

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られたが、アメニティ水準と同様の注意が必要である。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、住居系が負の推定値で採用された。これは、商業系・工業系の用途地域の割合が大きいほど生産性が高いことを示しており、こちらも妥当な結果と言える。前者は地区面積が大きい地区、後者は小さい地区の生産性を説明する変数として採用されたと考える。

なお、浸水深に関する変数は、アメニティ水準の変数にのみ採用され、生産性の変数には採用されなかった。

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
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
θ	8.061.E-03	—
t	1.872.E+01	—
κ^{AME} (道路密度)	1.472.E+07	5.33
κ^{AME} (住居系面積)	4.417.E-04	3.07
κ^{AME} (商業系面積)	3.945.E-03	4.79
κ^{AME} (商業系面積割合)	-3.794.E+02	-4.65
κ^{AME} (工業系面積割合)	-2.836.E+02	-5.89
κ^{AME} (給水区域ダミー)	7.753.E+02	14.81
κ^{AME} (浸水深の2乗)	-6.257.E+01	-2.19
α	1.449.E-02	5.08
κ^{UNI} (道路密度)	7.326.E+06	5.61
κ^{UNI} (住居系面積)	6.853.E-04	10.98
κ^{UNI} (商業系面積)	1.572.E-03	5.30
κ^{UNI} (工業系面積)	7.199.E-04	11.13
κ^{UNI} (住居系面積割合)	-1.129.E+02	-6.53
κ^{UNI} (給水区域ダミー)	2.635.E+02	12.07

これは、生産活動の立地に浸水リスクが与える影響が小さく、一方で、居住地選択への影響は無視できないことを示す結果と言える。浸水リスクが企業立地に与える影響が限定的であることは既往研究¹⁹⁾でも示されており³⁾、本研究の結果も、類似の結果であると解釈できる。

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。

4. 反実仮想実験

本章では、構築した手法を用いて、浸水リスク増大による経済活動の空間分布変化を計測する。そのために、浸水リスク増大の条件を示し、反実仮想実験を実施する。

4.1 条件設定

浸水リスクが、計画規模の洪水から、仮に想定最大規模の洪水となった場合を考える。具体的には、「計画規模の洪水と同様の発生確率で、想定最大規模の洪水が生じる」と仮定し、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。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 は浸水リスク変化後の均衡状態である。

さらに、浸水リスクの増大に加えて、通勤費用が一律に低下した場合を考える。これは、交通分野の技術革新の進展 (e.g., 自動運転の普及) などを想定したものであ

る。具体的には、上述の浸水リスク変化に加えて、通勤費用を一律 30%低下させた場合のシェア変化を調べる。

そして、浸水リスクが増大したときの、人口分布が立地変化前（現在）の CASE1、立地変化後の CASE2、浸水リスク増大に加えて通勤費用が低下した CASE3 の 3 ケースについて、浸水区域人口を整理する。

浸水リスクの政策変数となる、浸水深の 2 乗について、その変化を図 2 に示す。

4.2 浸水リスク増大に伴う立地分布変化

浸水リスクが計画規模から想定最大規模となった場合の結果を図 3,4 に示す。図 3 より、家計は、かほく・宝達志水といった、浸水リスクの無い地区に多く立地する結果となった。一方で、浸水リスクが存在する地区においても立地が増加した地区が一部（e.g., 白山、野々市）見られた。また、図 4 より、企業は、浸水リスクの変化による直接的な立地変更の動機は無いものの、立地が変化した。具体的には、白山や野々市、かほくの市街地周辺に集積する結果となった。

家計について、かほく・宝達志水といった地区での立地の増加は、前章のパラメータ推定結果で分かるとおおり、浸水リスクの増大がアメニティ水準に負の影響を与えるため、その傾向を反映し、浸水リスクが増大する地区から転出した結果であると言える。白山や野々市での立地増加は、当該地区への企業の立地集積が進んだためと言える。具体的には、企業の周辺に立地することにより、家計は通勤費用低下といった正の影響を得られる。上記の結果は、それが浸水リスク増大による負の影響を上回ったためであり、通勤費用と浸水リスクの両方を考慮したモデルの特徴を反映した結果であると言える。

企業について、立地変化が生じたのは、家計の立地変化に伴い、床面積の需給均衡が変化したためである。また、白山や野々市、かほくの市街地への集積は、集積の経済による企業間のコミュニケーションのインセンティブを反映した結果であると言える。

続いて、各ケースの浸水区域人口を表 3 に示す⁴。CASE2 について、CASE1 から CASE2 となった場合、浸水区域人口は減少する結果となった。その傾向は、高リスク区域ほど強まった（全域：約 9%減、0.5m：約 30%減、3.0m：約 39%減）。これは、浸水リスクが増大することで、それを回避するために、家計が浸水区域外へ転出したためである。次に、CASE3 では、CASE2 と比べて、浸水区域人口がさらに減少する結果となった。減少度合いは、リスクの大小に依らず、同程度であった（全域：約 4%減、0.5m：約 2%減、3.0m：約 3%減）。結果から、通勤費用の一律低下は、浸水深に関わらず浸水被害軽減に作用することが示唆された。しかし、金沢都市雇用圏では、浸水リスクの高い地区が中心市街地付近に存在す

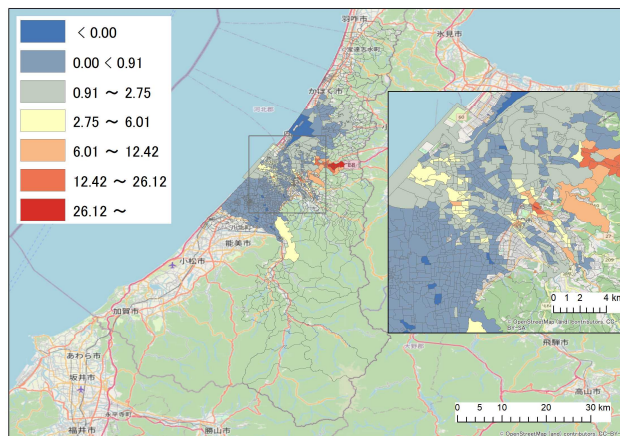


図 2 浸水深の 2 乗の差分（想定最大—計画規模）

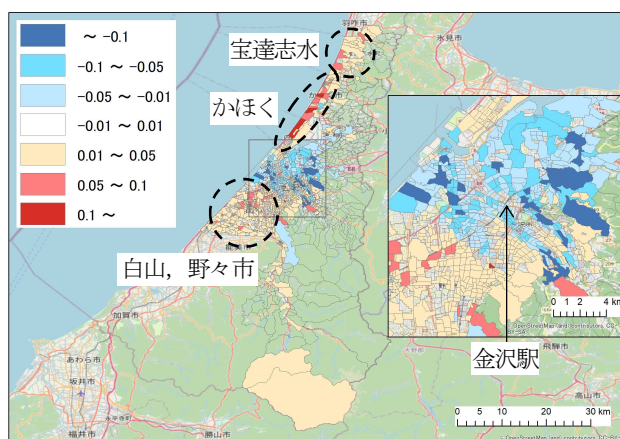


図 3 家計のシェア変化

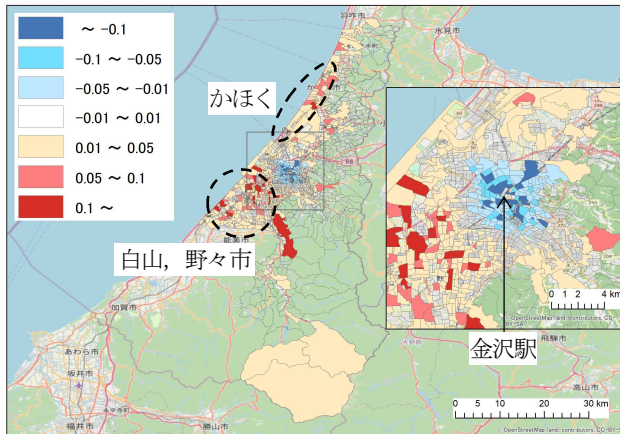


図 4 企業のシェア変化

表 3 各ケースの浸水区域人口

項目		CASE			
		参考	1	2	3
洪水規模	計画規模	○			
	想定最大		○	○	○
通勤費用 30%低下					○
立地分布	変化前（現在）	○	○		
	変化後			○	○
浸水区域人口	全域	126,432	275,755	250,619	240,454
	浸水深 平均 0.5m 以上	40,985	172,575	120,830	118,460
	浸水深 最大 3.0m 以上	21,028	91,958	56,270	54,362

るため、CASE2・3とも依然として、全体（371,405人）の6割強が浸水区域に立地することとなった。ここから、金沢都市雇用圏において、浸水被害を抜本的に解消するには、何らかの政策が必要となることが確認できた。

上記、反実仮想実験の結果から、浸水被害軽減策として、企業立地の誘導や、（一律でない）集中的な交通基盤整備が考えられる。具体的には、浸水区域外でのオフィス機能誘導区域の設定や、オフィス機能誘導区域と低リスク区域を接続する交通基盤の強化などが有効と考える。

以上より、浸水リスク増大による反実仮想実験から、モデルの特徴を反映した結果を得ることができた。加えて、その結果を踏まえて、浸水被害軽減策を考察した。

5. おわりに

本研究では、交通基盤整備の長期的影響評価に資する、浸水リスク増大による経済活動の空間分布（i.e., 人口分布、企業分布）変化を計測可能な都市経済分析を構築した。具体的には、集積の経済と浸水リスクを考慮したモデルを構築した。そして、それによる大規模計算を可能とするポテンシャル関数の存在を示し、かつ、計量分析を可能とするパラメータ設定方法を提示した。さらに、金沢都市雇用圏を対象とした反実仮想実験から、モデルの特徴を反映した結果を得た。加えて、その結果から、浸水被害軽減策について考察した。

本稿では、仮想的な浸水リスク変化の分析に留まった。現実的な気候変動シナリオ下での浸水リスク変化の影響と、その対策を具体的に調べることは今後の課題である。

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）」と、JST創発的研究支援事業JPMJFR215Mの支援を受けた。ここに記して謝意を表したい。

補注

- *1 日本の長期的な国土づくりの指針である国土形成計画¹⁶⁾においても、巨大災害の切迫をはじめとする、時代の潮流を踏まえ国土づくりの方向性を定めている。
- *2 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。
- *3 河野ら¹⁵⁾は、津波浸水深と企業立地の関係を固定効果モデルで分析している。都道府県別産業別の結果から、立地変化の説明変数として浸水深が有意に採用される数が多くなく、限定的であることを示している。
- *4 被害が増大する浸水深（1階床高相当：0.5m、2階床高相当：3.0m）を閾値とし、当該地区に含まれる5mメッシュの浸水深の平均値・最大値を扱った。

参考文献

- 1) 中村孝一, 高山雄貴: 企業と家計の相互作用を考慮した都市形成モデルの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_555-I_569, 2018.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Fujita, M. and Thisse, J.-F.: *Economics of Agglomeration: Cities, Industrial Location, and Globalization*, Cambridge University Press, 2013.
- 5) 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.
- 6) 高木朗義, 武藤真一, 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, 2006.
- 7) 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.
- 8) Dingel, J.I. and F. Tintelnot: Spatial economics for granular settings, NBER Working Paper, No.27287, 2020.
- 9) 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.
- 10) Sandholm, W. H.: Potential games with continuous player sets, *Journal of Economic Theory*, Vol. 97, No. 1, pp.81-108, 2001.
- 11) 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.
- 12) Griffith, D. A.: Spatial autocorrelation and spatial filtering: Gaining understanding through theory and scientific visualization, *Springer*, pp.247, 2003.
- 13) 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.
- 14) Redding, S. J. and Venables, A. J.: Economic geography and international inequality, *Journal of International Economics*, Vol.62, No.1, pp.53–82, 2004.
- 15) 河野達仁, 多々納裕一, 牛木賢司, 中園大介, 杉澤文仁: 津波浸水想定公表による産業別企業立地変化の把握, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.77, No.4, pp.301-315, 2021.
- 16) 国土交通省: 国土形成計画（全国計画）, 2015.