

交通・立地統合モデルによる 政策効果分析手法の提案

松村 一樹¹・高山 雄貴²

¹学生非会員 金沢大学 自然科学研究科 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: kazuki153@stu.kanazawa-u.ac.jp

²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

本研究では, Ahlfeldt et al. (2015)¹⁾ を改良した立地モデルを改良し, 大規模な都市空間・交通ネットワークを対象とした分析が可能となる枠組みを提案する. そのために, 本モデルにポテンシャル関数が存在することを示したうえで, その効率的な解析手法を提案する. そのうえで, この解析手法の効率性を確認するため, 9×9 の格子状ネットワークを持つ都市における均衡状態の解析を実施する.

Key Words : *quantitative urban model, traffic congestion, potential function*

1. はじめに

社会基盤整備による効果は広範囲に渡って発現する (e.g., 道路整備に伴う土地利用の変化). 立地モデルを用いた計量分析ではこれらの広範囲に渡る効果を計量化できるため, これまでに多くの研究が蓄積されてきた. その中でも応用都市経済 (Computable Urban Economic: CUE) モデル²⁾ では家計・企業等の立地と交通の相互作用が考慮されており, 実務でも利用される段階に至っている. しかし, 堤ら (2012)³⁾ の指摘のひとつにもあるように, 殆どの CUE モデルにおいて, 交通量の変化による交通混雑の影響が考慮されていない. また, 交通混雑を考慮した研究においても, 数値計算コスト等の問題に起因して, 分析時の空間解像度を粗く設定している状況が見られる¹⁾.

近年, 定量的空間経済学と呼ばれる分野で, 交通混雑を考慮した家計と企業の立地モデルが開発されるようになってきている. なかでも Allen and Arkolakis (2022)⁴⁾ は, 現実的な都市空間を対象とした計量分析が可能な分析枠組を提示したうえで, シアトルを対象に道路整備の影響を分析している. しかし, この分析枠組でも, CUE モデルの場合と同様, 道路ネットワークの大幅な縮約が必要とされる. 具体的には, 道路リンクは立地点間を直接結ぶものに限定され, その起終点の両方に居住者・就業者が存在する必要がある. すなわち, 複雑な道路ネットワークを含む都市空間には直接適用で

きないという限界がある.

これらの課題を解決した研究の一つが, 杉本ら (2022)⁵⁾ である. この研究では, Fujita and Ogawa (1982)⁶⁾ を拡張し, 交通混雑を考慮した分析枠組を開発している. そのうえで, 金沢都市雇用圏を対象に, 高解像度の分析 (1,656 町丁目, 約 11.7 万リンク) が実行可能であることを明らかにしている. しかし, この研究では, 数値解析の効率化に不可欠なポテンシャル関数の存在を担保するために, 立地モデルに幾つかの強い仮定を導入している (e.g., 企業・家計の土地消費量が固定的).

そこで本研究では, Ahlfeldt et al. (2015)¹⁾ を拡張し, 交通混雑を考慮できるモデルを構築する. また, このようなモデルの課題であった「実都市に適用可能な分析枠組」を提案する. 具体的には, ポテンシャル関数が有する性質に基づき, 安定均衡状態の数値解析手法を整理する. そして, その手法が複雑な交通ネットワークを有する都市にも適用できることを, 簡単な数値例により確認する.

本稿の構成は以下のとおりである. まず, 第 2 章では交通混雑を考慮した立地モデルを構築する. そのうえで, 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す. 第 3 章では, 実都市に向けた効率的な解析を行うために, ポテンシャル関数を用いた均衡状態の解析手順を整理する. 第 4 章では, 格子ネットワークにおける解析結果の例を示す. 最後に第 5 章で結論を述べる.

¹ CUE モデルを用いた分析例の中には, これらの課題を解決したと思われる事例が存在する. しかし, パラメータ設定・数値計算の方法が整理されておらず, それが他の分析への適用・展開の障害になっている.

2. モデルの設定

(1) 都市・交通条件の設定

本章では、1つの都市が存在しその都市内には I 個の立地点がある場合を考える。その立地点の集合を $\mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ と表す。

この都市には立地主体である家計と企業に加え、floor space を供給するデベロッパーが存在する。家計は全て均質であり、総数は固定的に N である。各家計は居住地 $r \in \mathcal{I}$ 、労働を供給する企業 $s \in \mathcal{I}$ を選択する。

また、立地点間は道路ネットワークによって接続されている。そこで、立地点 r, s 間の道路ネットワークは K_{rs} 個あり、道路ネットワークの集合を $\mathcal{K}_{rs} = \{1, 2, \dots, K_{rs}\}$ とする。また、居住地が立地点 r 、就業地が立地点 s の家計の中で通勤時に経路 $k \in \mathcal{K}_{rs}$ を選択する家計数を f_{rs}^k とする。このとき、居住地を r 、就業地を s を選択する交通量を q_{rs} と置くことで、居住地が立地点 r の家計数 n_r 及び就業地が立地点 s の家計数 m_s は以下の式で与えられる。

$$n_r = \sum_{s \in \mathcal{I}} q_{rs} = \sum_{s \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{K}_{rs}} f_{rs}^k \quad (1a)$$

$$m_s = \sum_{r \in \mathcal{I}} q_{rs} = \sum_{r \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{K}_{rs}} f_{rs}^k \quad (1b)$$

(2) 家計の行動

この都市の家計は均質であるため、同一の効用関数を有する。したがって、家計は居住地と就業地により特徴づけられる。この家計の効用は、以下に示すように、合成財の消費量 c_{rs} 、floor space 面積 l_{rs} に応じて決まる。

$$u(c_{rs}, l_{rs}) = c_{rs} + \beta \ln l_{rs} + B_r \quad (2)$$

ここで、 β は floor space の選好に関するパラメータ、 B_r は居住地のアメニティ水準を表す。

合成財をニューメレールとすると、予算制約式は以下で表される。

$$w_s = c_{rs} + Q_{R_r} l_{rs} + t\tau_{rs}^k (f_{rs}^k) \quad (3)$$

ここで、 t は通勤費用パラメータ、 w_s は勤務地 s における賃金率、 Q_{R_r} は住宅用の floor space の単位面積当たりの価格、 $\tau_{rs}^k (f_{rs}^k)$ は rs 間の通勤費用である。

これを解くと、 c_{rs} 及び l_{rs} が以下のように定められる。

$$l_{rs} = \frac{\beta}{Q_{R_r}} \quad (4a)$$

$$c_{rs} = w_s - \beta - t\tau_{rs}^k (f_{rs}^k) \quad (4b)$$

したがって、立地点 $r \in \mathcal{I}$ における住宅用の floor space の総需要 $L_{R_r} = \sum_{j \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{K}_{rj}} l_{rj} f_{rj}^k$ は次のように表される。

$$L_{R_r} = \frac{\beta n_r}{Q_{R_r}} \quad (5)$$

以上から、間接効用関数 v_{rs}^k は以下のようになる：

$$v_{rs}^k = w_s - \beta \ln Q_{R_r} - t\tau_{rs}^k (f_{rs}^k) + B_r + \beta(\ln \beta - 1) \quad (6)$$

(3) 企業の行動

企業は、完全競争のもと労働と floor space を投入して、合成財を生産する。生産関数は、以下の Cobb-Douglas 型を仮定する。したがって、立地点 s の企業の生産高 y_s は、労働・floor space 投入量 H_{M_s} 、 L_{M_s} を用いて、以下のように表される：

$$y_s = F_s H_{M_s}^\alpha L_{M_s}^{1-\alpha} \quad (7)$$

ここで、 F_s は立地点 s の生産性を表す指標、 α は労働の投入割合である。

さて、立地点 s の企業は、以下で与えられる利潤 π_s を最大化する労働・floor space 投入量を選択する。

$$\max_{H_{M_s}, L_{M_s}} \pi_s = y_s - w_s H_{M_s} - Q_{M_s} L_{M_s} \quad (8)$$

ここで、 Q_{M_s} は業務用の floor space の単位面積当たりの価格である。

この利潤最大化問題と利潤ゼロ条件より、 H_{M_s} 、 L_{M_s} 、 w_s 、 Q_{M_s} の次の関係が得られる：

$$H_{M_s} = \left(\frac{\alpha F_s}{w_s} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{M_s} \quad (9a)$$

$$Q_{M_s} = (1 - \alpha) \left(\frac{\alpha}{w_s} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} F_s^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (9b)$$

(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住宅・業務用の土地と資本を投入し、完全競争のもとで住宅・業務用の floor space を供給する。生産関数は Cobb-Douglas 型を仮定することから、デベロッパーの利潤を Π_s とすると、利潤最大化行動は次のように表される：

$$\max_{M_s, Q_s} \Pi_s = Q_s S_s - P M_s - R_s G_s \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } S_s = M_s^\mu Q_s^{1-\mu} \quad (10b)$$

ここで、 M_s は資材投入量、 G_s は土地供給量、 Q_s は就業地 s における floor space の単位面積当たりの価格、 S_s は floor space 供給量、 P は都市全域にわたる資本の

共通価格, R_s は土地の価格, μ は資本の投入割合である. なお floor space は, 業務用の場合は Q_{M_s}, S_{M_s} , 住宅用の場合は Q_{R_s}, S_{R_s} のようにそれぞれ C と R を下付き添え字として区別しているが, その設定は同一であると仮定する. このため, $Q_s = Q_{M_s} = Q_{R_s}$ となる.

利潤最大化問題の一階条件・利潤ゼロ条件から, 次の関係が得られる.

$$M_s = \frac{\mu}{1-\mu} \frac{R_s}{P} G_s \quad (11a)$$

$$Q_s = \frac{P^\mu R_s^{1-\mu}}{\mu^\mu (1-\mu)^{1-\mu}} \quad (11b)$$

$$S_s = \left(\frac{\mu}{P} Q_s \right)^{\frac{1}{1-\mu}} G_s \quad (11c)$$

(5) 市場均衡状態

本モデルでは, 労働・土地・floor space 市場を考えている. そこで, 各々の需給均衡条件から得られる関係を整理する. 労働の需給均衡条件は $H_{M_s} = m_s$ で与えられている. この関係と (9) 式より, L_{M_s}, Q_{M_s}, w_j について次の関係が得られる:

$$L_{M_s} = \left\{ \frac{(1-\alpha)F_s}{Q_{M_s}} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} m_s \quad (12a)$$

$$w_s = \alpha \left(\frac{1-\alpha}{Q_{M_s}} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} F_s^{\frac{1}{\alpha}} \quad (12b)$$

土地の需給均衡条件と (11) 式から, 住宅・業務用の floor space 生産量 S_{R_r}, S_{M_s} は, 以下で与えられる:

$$S_{R_r} = \varphi_{R_r} Q_{R_r}^{\frac{\mu}{1-\mu}}, \quad \varphi_{R_r} \equiv \left(\frac{\mu}{P} \right)^{\frac{1}{1-\mu}} G_{R_r} \quad (13a)$$

$$S_{M_s} = \varphi_{M_s} Q_{M_s}^{\frac{\mu}{1-\mu}}, \quad \varphi_{M_s} \equiv \left(\frac{\mu}{P} \right)^{\frac{1}{1-\mu}} G_{M_s} \quad (13b)$$

この関係から, floor space 供給量 S_{R_r}, S_{M_s} は, 土地供給量 Q_{R_r}, Q_{M_s} が多いほど・floor space 価格 Q_{R_r}, Q_{M_s} が高いほど, 増加することが確認できる.

住宅・業務用の floor space 需給均衡条件 ($S_{R_r} = L_{R_r}, S_{M_s} = L_{M_s}$) および (5)(9b)(12a) 式より, 単位面積当たりの floor space 価格が得られる.

$$Q_{R_r} = \left(\frac{\beta n_r}{\varphi_{R_r}} \right)^{1-\mu} \quad (14a)$$

$$Q_{M_s} = \left\{ \frac{(1-\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} F_s^{\frac{1}{\alpha}}}{\varphi_{M_s}} m_s \right\}^{\frac{1}{1-\mu} + \frac{1}{\alpha}} \quad (14b)$$

これと (12b) 式を用いると, 各立地点の賃金 w_s は次のように表される.

$$w_s = \lambda_s m_s^{-\gamma} \quad (15a)$$

$$\lambda_s = \alpha(1-\alpha)^{\frac{\alpha(1-\alpha)}{1-(1-\alpha)\mu}} F_s^{\frac{1}{1-(1-\alpha)\mu}} \varphi_{M_s}^\gamma \quad (15b)$$

$$\gamma \equiv 1 - \frac{\alpha}{1-(1-\alpha)\mu} < 1 \quad (15c)$$

以上の関係を利用すると, 居住地 r , 就業地 s を選択する家計の間接効用関数 v_{rs}^k が, $\mathbf{f} = (f_{rs}^k)_{r,s \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}_{rs}}$ の関数で与えられる.

$$v_{rs}^k(\mathbf{f}) = \lambda_s m_s^{-\gamma} - (1-\mu)\beta \ln n_r - t\tau_{rs}^k(\mathbf{f}) + \psi_r \quad (16a)$$

$$\psi_r = B_r + (1-\mu)\beta \ln \varphi_{R_r} + \beta(\mu \ln \beta - 1) \quad (16b)$$

3. 均衡状態

以上の結果, 均衡状態における効用分布を v^* とすると, 均衡条件は以下のように定めることができる.

$$\begin{cases} v^* = v_{rs}^k(\mathbf{f}) & \text{if } f_{rs}^k > 0, \\ v^* \geq v_{rs}^k(\mathbf{f}) & \text{if } f_{rs}^k = 0, \end{cases} \quad (17a)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{K}} = N \quad (17b)$$

したがって, この非線形連立方程式 (17) を解くことで, 均衡状態を得ることができると分かる.

詳細・広域な実空間を分析対象にする場合, 非線形連立方程式が不可避免的に大規模になることから, その数値解析は困難となる. そこで本研究では, 立地均衡状態の数値解析を効率的に実施するために, 本モデルにポテンシャル関数が存在することを示しておく. Sandholm⁷⁾ により示されているように, 非負条件, 人口保存則を満たす (i.e., $f_{rs}^k \geq 0 \quad \forall r, s \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K}_{rs}$, $\sum_{r \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{K}_{rs}} f_{rs}^k = N$) 任意の \mathbf{f} に対して, 次の条件を満たす関数 $P(\mathbf{f})$ をポテンシャル関数と呼ぶ.

$$\frac{\partial P(\mathbf{f})}{\partial f_{rs}^k} = v_{rs}^k(\mathbf{f}) + \zeta \quad \forall r, s \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K}_{rs} \quad (18)$$

ここで, ζ は任意の定数である.

この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{f} と一致する:

$$\max_{\mathbf{f}} P(\mathbf{f}) \quad (19a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{r, s \in \mathcal{I}} f_{rs}^k = N, f_{rs}^k \geq 0, \quad \forall r, s \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K}_{rs} \quad (19b)$$

さらに, $P(\mathbf{f})$ を局所的に最大化する \mathbf{f} は, 安定的な均衡状態と一致する.

効用関数 (16) より、本モデルには次のポテンシャル関数が存在する:

$$P(\mathbf{f}) = \frac{1}{1-\gamma} \sum_{s \in \mathcal{I}} \lambda_s m_s^{1-\gamma} + \sum_{r \in \mathcal{I}} \{-(1-\mu)\beta(\ln n_r - 1) + \psi_r\} n_r - \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{r \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{I}} (-\zeta f_{rs}^k + t T_{rs}^k(\mathbf{f})) \quad (20)$$

ただし、 $T_{rs}^k(\mathbf{f})$ は $\tau_{rs}^k(\mathbf{f})$ を積分した値である。

したがって、本研究における立地均衡状態は、最適化問題 (19) を局所的に解くことにより、容易に得ることができる。次章以降では、この性質を利用した安定性解析手法を提案する。

4. 解析手法

(1) 解析における課題と解決法

先述の通り、本研究では最適化問題 (19) を局所的に解くことにより、容易に解析を行うことができるという特徴を持つ。本研究ではこの特徴を用いることで、実都市等の複雑なネットワークにおける解析を現実的なものとするを目的としていた。

ここで、前章で示したポテンシャル関数 (20) では \mathbf{f} を変数としている。これは、安定均衡状態における \mathbf{f}^* が導出できる一方で、全ての立地点 r, s 間の経路集合 \mathcal{K}_{rs} を列挙する必要が生じる。しかし、実都市適用を考慮した場合、全ての立地間の経路の列挙というのはほぼ不可能である。したがって、(20) 式で示されたポテンシャル関数を用いた解析は、実都市を始めとした複雑・膨大なネットワークを持つ都市には利用できない。

そこで本節では、複雑な交通ネットワークとなる格子ネットワークにおいても安定的な均衡状態が得られ、なおかつ居住地・就業地別の家計数やリンク毎の交通量も得られるようにポテンシャル関数を改良する。具体的には、経路交通量 \mathbf{f} で与えられていたポテンシャル関数を、居住地・就業地別の家計数 \mathbf{q} とリンク交通量 \mathbf{x} に分解した上で定義する。

ここで注目すべき部分は、ポテンシャル関数 (20) を用いた解析において \mathbf{f} における経路集合 \mathcal{K}_{rs} の情報を用いるのは「通勤費用計算にかかる部分のみ」であり、この計算そのものは負の通勤費用の最大化、すなわち通勤費用の最小化問題を解く「経路選択に関する均衡問題」として捉えられるということである。そして経路選択に関する均衡問題は、経路列挙が不要で、かつ複雑な交通ネットワークに対応できる方法（交通モデル）が確立している（e.g., 土木学会, 1998⁸⁾）。以上から、経路集合 \mathcal{K}_{rs} の情報を用いた通勤費用計算に

おいて既存の交通モデルの考え方を用いることで、今までは経路集合 \mathcal{K}_{rs} を用いた \mathbf{f} による膨大な計算をしていたものから、 \mathbf{q} を用いた立地均衡問題と \mathbf{x} を用いた交通均衡配分に分けて考えることができる。経路集合 \mathcal{K}_{rs} は無数に存在しており列挙がほぼ不可能であるのに対して、 \mathbf{q}, \mathbf{x} はたかだか $\{(\text{立地点})^2 + \text{リンク数}\}$ で計算できることから、実都市に近く膨大な情報を持つ格子ネットワーク等における計算も可能となる。また、変数に \mathbf{q} が存在することで、家計の居住地・就業地分布についても求められることから、懸念されていた課題も解決できる。

さて、ここからは実際にポテンシャル関数とその解析手法について触れていく。先述の通り、先に示したポテンシャル関数との違いは「通勤費用に関する項（ポテンシャル関数による負の通勤費用最大化）が交通モデルそのもの（通勤費用の最小化）」に置き換え可能であるということにある。 \mathbf{x} を用いた交通モデル（通勤費用最小化問題）は、等価な最適化問題として赤松らによって示されており、以下のように表すことができる：

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega \quad (21)$$

s.t.

$$x_{ij} \geq 0 \quad (22a)$$

$$\sum_i x_{ji} - \sum_j x_{ij} + \sum_s q_{rs} \delta_{ri} - \sum_r q_{rs} \delta_{si} = 0 \quad (22b)$$

ここで、 $i, j \in \mathcal{I}$ は連続するノード、(22b) は各ノードのフロー保存則であり、 δ_{rk} はノード i が立地点 r, s のセントロイドであれば 1, そうでなければ 0 を取る変数である。

また、(21) で示された最適化問題は以下のように変形できる。

$$\max_{\mathbf{x}} - \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega \quad (23)$$

本研究では、最適化問題 (23) と既存のポテンシャル関数 (20) を比較することで、 \mathbf{q}, \mathbf{x} を用いた現実的に解析を行うことができるポテンシャル関数を、以下のように定められた：

$$P(\mathbf{q}, \mathbf{x}) = \frac{1}{1-\gamma} \sum_{s \in \mathcal{I}} \lambda_s m_s^{1-\gamma} + \sum_{r \in \mathcal{I}} \{-(1-\mu)\beta(\ln n_r - 1) + \psi_r\} n_r - \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega \quad (24)$$

s.t.

$$x_{ij} \geq 0 \quad (25a)$$

$$\sum_i x_{ji} - \sum_j x_{ij} + \sum_s q_{rs} \delta_{ri} - \sum_r q_{rs} \delta_{si} = 0 \quad (25b)$$

以上の結果から、本研究において、たかだか{(立地点)² + リンク数}で表現できる変数を用いた、実都市適用が現実的となるポテンシャル関数(24)を局所的に解くことにより、容易に立地均衡状態を得ることが可能となった。次節では具体的な解析のアルゴリズムについて簡単に説明する。

(2) 解析アルゴリズム

本研究では、以下のステップで解析を行う。

Step 1: 初期状態(初期のOD, 総人口等)を設定し、与える。

Step 2: 設定したOD交通量を用いて、最適となる家計の分布(立地側の均衡)を求める。(ここでは q を変数とし、通勤費用を除いた場合における均衡状態を求める。)具体的には、(24)式における通勤費用に関する項を除く部分を最小化する。

Step 3: 最適化された居住地・就業地分布の中で、費用が最小となるようにOD交通量を最適化(交通側の均衡を求める)する。具体的には、(24)式における通勤費用に関する項を最小化する。

Step 4: ポテンシャル関数(24)を用いて、居住地、就業地、経路ごとの家計の変化量を求める。

Step 5: 収束判定を行い、これを満たさない場合はStep2から計算を繰り返す。

以上の5つのステップで計算を行うことで、都市での解析が可能となる。次章では、上記の解析ステップにおける9×9での格子ネットワークにおける実際の解析結果を例示する。

5. 格子状ネットワークにおける解析

本研究の成果として、9×9の格子ネットワーク(図1)における解析結果を示す。ここでは、通勤費用に関するパラメータを変化させることで、格子状都市の交通容量が変化した場合に都市の形成に与える影響について確認する。具体的には、都心の変化について確認を行う。

なお、本解析では全てのリンクを同質とし、通勤費用 $\tau_{rs}(x)$ は以下の式で与えた。

$$\tau_{rs}(x) = t_0 \left\{ 1 + t_\alpha \left(\frac{x}{c} \right)^{t_\beta} \right\} \quad (26)$$

ここで、 c は交通容量を表すパラメータであり、今回の解析では $0 \leq c \leq 1$ の範囲で変化させることで、都心の変化を確認する。なお、その他の各種パラメータは

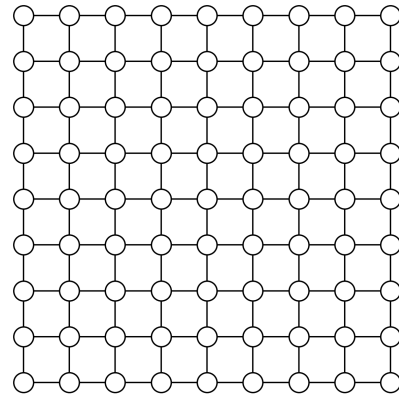


図-1: 9×9の地域における2次元格子状都市

以下に示す。ここで、通勤費用に関するパラメータ t_0 , t_β , t_α は土木学会(2003)⁹⁾に記載されている標準値を使用した。

$$\begin{cases} t_\alpha = 0.48 \\ t_\beta = 2.89 \\ \mu = 0.75 \\ t_0 = 0.74 \\ N = 100 \end{cases} \quad (27)$$

以上の設定のもと、パラメータ c の値を変化させ、均衡状態がどのように変化するかを調査した。結果を以下の図(2)~(4)に示した。

これらの結果から、図(2)に示すように c の値が小さい、すなわち交通容量が小さく通勤費用が大きくなる場合は居住地と就業地の移動が少なく、特に中心地点では道路(リンク)の利用はほとんどないことが確認できる。また、図(3)から図(4)にかけて通勤費用が低下していく(交通容量が大きくなっていく)と、居住地と勤務地が分離し、リンク間での移動も盛んになっていることが確認できる。

6. おわりに

本研究では、Ahlfeldt et al. モデルを拡張して交通混雑の影響を確認できるようにした交通・立地統合モデルを開発した。また、本モデルにおいてポテンシャル関数の存在を確認し、これを利用することで大規模なネットワークにおける解析手法も提示した。最後に9×9の格子状ネットワークにおける結果も示した。この結果からは、交通容量の大小による都市の構造・移動の変化を確認できた。

上記の成果は、複雑なネットワークにおける解析例が殆ど存在しなかったことを考えると、その解析を容易にしたという点で一定の成果があると考えられる一方で、いくつかの課題も残されている。特に、本研究

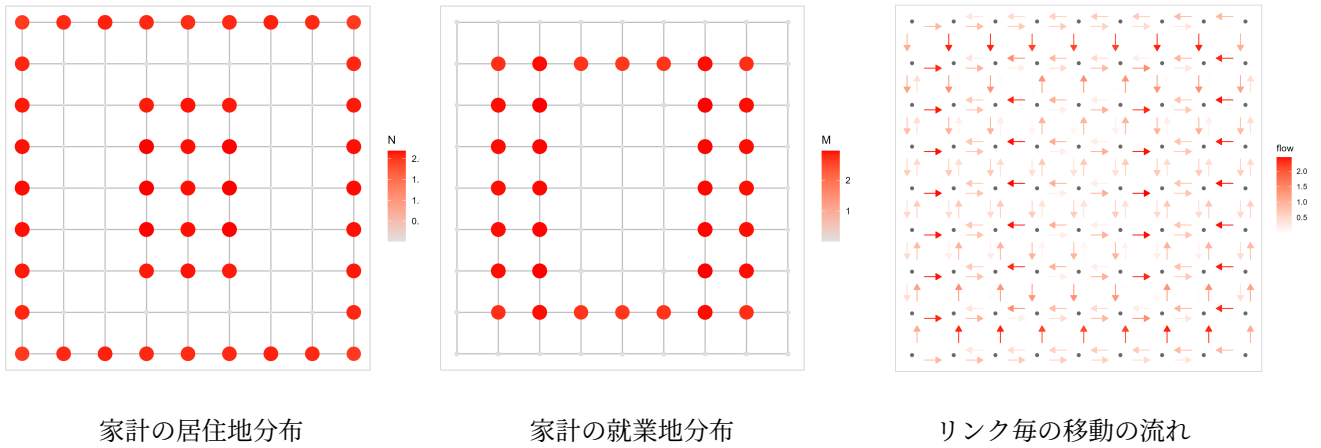


図-2: $c = 0.2$ の場合における均衡状態

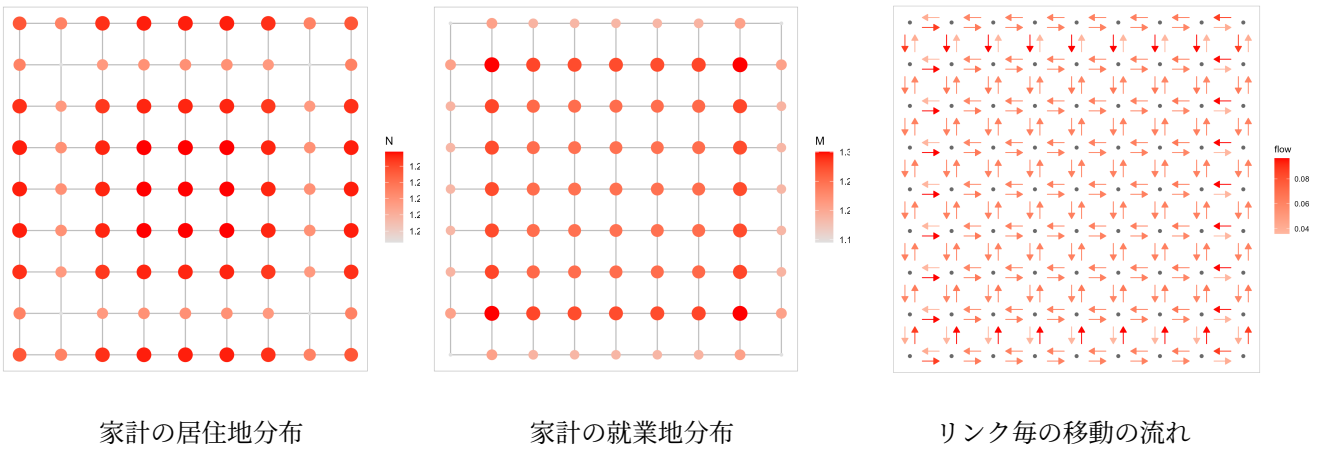


図-3: $c = 0.6$ の場合における均衡状態

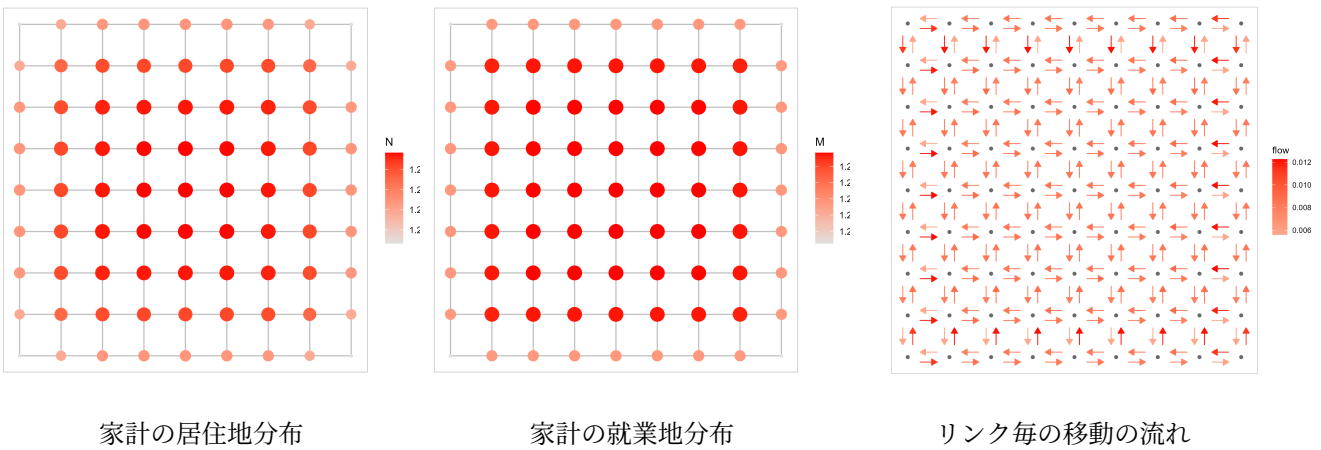


図-4: $c = 1.0$ の場合における均衡状態

の究極の目的となる実都市への適用や、それに向けた安定的な計算メカニズムの開発は重要な課題であると考えられる。

参考文献

1) 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.

2) 上田孝行, 石川良文, 小池淳司, 石倉智樹, 小林優輔, 山崎清, 武藤慎一: Excel で学ぶ地域・都市経済分析. コロナ社, 2010.

3) 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.

- 4) Allen, T. and Arkolakis, C.: The welfare effects of transportation infrastructure improvements, *The Review of Economic Studies*, Vol.89, No.6, pp. 2911–2957, 2022.
- 5) 杉本達哉, 杉浦聡志, 高山雄貴: 交通混雑を考慮した Fujita and Ogawa (1982) モデルに基づく定量的都市経済モデルの開発, 応用地域学会研究発表大会, 2022.
- 6) 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.
- 7) Sandholm, W. H.: *Population Games and Evolutionary Dynamics*, MIT Press, 2010.
- 8) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 土木学会, 1998.
- 9) 土木学会 (編): 道路交通需要予測の理論と適用: 第 I 編 利用者均衡配分の適用に向けて, 丸善, 2003.

(2023. 3. 6 受付)