

経済活動の時空間的な集中メカニズムを考慮した都市システムモデル

鹿島建設(株) 正会員 ○苗 璐

東京工業大学 環境・社会理工学院 正会員 高山雄貴

1. はじめに

朝ピーク時間帯の交通混雑や列車遅延などの問題が起こる主要な原因の一つに、多くの経済活動が日中の特定の時間帯・場所において集中して行われる点が挙げられる。この対策として、経済活動の時間・空間分布を変化させることで交通混雑を緩和させる交通需要マネジメント (TDM) 施策 (e.g., 時差出勤, フレックスタイム) が期待されるが、古典的な交通・立地理論をそのまま効果検証に適用することは困難である。

本研究では、経済活動の時間分布 (始業時刻分布) と空間分布 (人口分布) を内生化したモデルを構築するために、Henderson¹⁾型の始業時刻選択モデルに都市空間構造を導入し、多都市かつ時間・空間集積の経済を考慮した都市システムモデルを構築する。そして、ポテンシャルゲームの性質を用い、モデルの均衡状態の特性分析を行う。

2. モデル概要

本研究では、図-1に示すような、2箇所の単一中心都市で構成されている空間構造を考慮する。以降では、都市の集合を $\mathcal{D} \equiv \{I, II\}$ 、都市を $d \in \mathcal{D}$ と表す。各都市内部の居住地分布は、単方向の線形分布であると仮定し、各都市の居住地数は A である。居住地は、CBD (Central Business District) から近い順にインデックスをつけ、居住地の集合を $\mathcal{A} \equiv \{1, 2, \dots, A\}$ と表す。各居住地の面積はすべて同一で、 L であると仮定する。

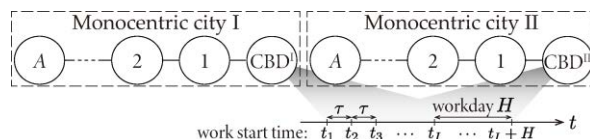


図-1 都市間人口と始業時刻分布

企業は全て CBD に立地し、2都市の始業時刻選択は同一で、 I 種類の時刻から選択できると仮定する。この選択可能な始業時刻は、全て同一の時間間隔で並んでいる。また、全企業の労働時間は同一かつ一定値であり、さらに、ある時間帯には必ず全企業が同時に業務を行っているとは仮定する。なお、以降では、始業時刻が t_i の企業を“企業 $i \in \mathcal{J}$ ”と呼ぶ。ここで、 $\mathcal{J} \equiv \{1, 2, \dots, I\}$ は企業の集合である。

労働者は全て均質であり、都市 d の総労働者数は N^d 、2都市の総労働者数は固定的に $N (= N^I + N^{II})$ である。労働者は、都市 $d \in \mathcal{D}$ 、居住地 $a \in \mathcal{A}$ 、時刻 i に始業する企業 $i \in \mathcal{J}$ を選択する。都市・居住地・始業時刻別の労働者数を $\mathbf{n} = (n_{a,i}^d)_{d \in \mathcal{D}, a \in \mathcal{A}, i \in \mathcal{J}}$ と表す。さらに、労働者は居住している都市の CBD へしか通勤しないと仮定する。

各居住地を結ぶ道路はすべて均質であり、居住地 $a-1$ と a の間の道路を“道路 a ”と呼ぶ。都市 d に居住する始業時刻 t_i の労働者の道路 a の交通量は $x_{a,i}^d = \sum_{b=a}^A n_{b,i}^d$ である。そして、都市 d に居住する始業時刻が t_i の労働者が道路 a を通過する際にかかる交通費用関数は、Henderson¹⁾と同様、非負、 $c(x_{a,i}^d)$ で表されると仮定する。

2都市の労働者は全て均質と仮定するため、同一の効用関数を適用する。予算制約、効用最大化問題の一階条件と需給均衡条件により、間接効用関数は $v_{a,i}^d = w_i^d - \sum_{b=1}^a c(x_{b,i}^d) + h(N_a^d) - \delta_i(t_i)$ で表される。ここで、 w_i^d は都市 d の企業 i の労働者毎の賃金、 $N_a^d = \sum_{i \in \mathcal{J}} n_{a,i}^d$ は都市 d の居住地 a の総労働者数である。 $h(N_a^d)$ は住宅消費により得られる効用増分である。 $\delta_i(t_i) = \gamma |t_i - t^*|$ は日常生活 (e.g., 家族・友人との余暇活動, 学校) とのスケジュール同期の困難さによるスケジュールコストである。ここで、 $\gamma > 0$ は早着・遅刻時間 1 単位当たりの費用を表す。 t^* は労働者が最も望む日々の活動に最も適したワークスケジュールである。

企業は全て完全競争下で一単位の労働を投入して財を生産し、企業の生産性は、同じ都市において同時に始業する総労働者数が多いほど、高まると仮定する。これは、企業の生産効率が、都市別・始業時刻別の労働者数 $M_i^d = \sum_{a \in \mathcal{A}} n_{a,i}^d$ に依存して定まることを意味する。具体的には、都市 d の企業 i の労働者毎の生産高は、 $G_i^d(\mathbf{M}) = g_i^d(\mathbf{M}^d) + (1 - \psi) g_i^{\hat{d}}(\mathbf{M}^{\hat{d}})$ で与える。ここで、 $g_i^d(\mathbf{M}^d) = \alpha \sum_{j \in \mathcal{J}} (1 - \phi)^{|i-j|} M_j^d$ 、 $\alpha > 0$ は生産性効果の大きさを表すパラメータ

キーワード 時間・空間集積の経済, 都市システムモデル, ポテンシャルゲーム

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

である． $d, \hat{d} \in \mathcal{D} (d \neq \hat{d})$ は2つの異なる都市を表す． $\phi \in [0, 1]$ は時間割引項 (i.e., ϕ が大きいほど，時間的相互作用が弱い) を表すパラメータ， $\psi \in [0, 1]$ は空間割引項 (i.e., ψ が大きいほど，空間的相互作用が弱い) を表すパラメータである．

均衡条件の定式化にあたっては，労働者は都市・居住地・労働を供給する企業，企業は都市・始業時刻を選択すると仮定する．その結果，均衡状態における人口・始業時刻分布 $\mathbf{n}^*$ が決まる．次式は，本研究の均衡条件である．

$$\begin{cases} v^* = v_{a,i}^d(\mathbf{n}) & \text{if } n_{a,i}^d > 0 \\ v^* \geq v_{a,i}^d(\mathbf{n}) & \text{if } n_{a,i}^d = 0 \end{cases} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{i \in \mathcal{I}} n_{a,i}^d = N \quad (1)$$

ここで， v^* は労働者の均衡効用である．左辺の条件は，均衡状態では，単一の労働者が選択を変更しても，自らの効用を改善できないことを示している．右辺の条件は人口保存則を表す．

本モデルでは，利潤ゼロ条件により， $G_i^d(\mathbf{M}) = w_i^d$ となるため，都市 d の居住地 a に居住する企業 i の労働者の効用水準は $v_{a,i}^d(\mathbf{n}) = G_i^d(\mathbf{M}) - \sum_{b=1}^a c(x_{b,i}^d) + h(N_a^d) - \delta_i(t_i)$ と書き換えられる．

3. 安定均衡状態の特性分析と数値解析

時空間集積の経済を考慮していることから，均衡条件(1)を満足する均衡状態が複数存在し得る．そこで構築したモデルにポテンシャル関数が存在し，その性質を利用することで均衡状態の特性（一意性と安定性）が確認できる．人口保存則と非負条件($n_{a,i}^d \geq 0$)を満たす $\mathbf{n}$ に対し，関数 $P(\mathbf{n})$ が条件 $\partial P(\mathbf{n}) / \partial n_{a,i}^d = v_{a,i}^d(\mathbf{n})$ を満たせば， $P(\mathbf{n})$ はポテンシャル関数である．本稿で構築したモデルには，この条件を満足するポテンシャル関数 $P(\mathbf{n})$ が存在する．そして，ポテンシャル関数 $P(\mathbf{n})$ の性質(凸性)を用い，本研究のポテンシャルゲームの均衡状態は，必ずしも一意ではないことが容易に確認できる．その上で，本モデルの均衡状態における都市内・都市間の人口・始業時刻分布の特性分析を行った．

次に，数値解析を実施して，上述の理論解析結果との整合性を確認した．その結果，本研究で構築した都市システムモデルの都市内人口分布と時間分布の基本的性質は，高山²⁾の結果と一致することが確認できた．一方で，本研究は，高山²⁾と異なり，都市間人口と始業時刻分布の相互作用の特性を分析できる(図-2)．図では， ϕ が小さくなる場合に始業時刻の集中度が大きくなる領域が見られ，このことから「時間帯間での相互作用の強化は必ずしも始業時刻分布の分散をもたらすとは限らない」という性質が分かる．また，図中に網掛けで示した都市間人口分布の特徴は，「都市間の相互作用が困難，時間帯間の相互作用が容易なほど，都市間人口集中が生じる」という本研究の理論解析結果と一致する．

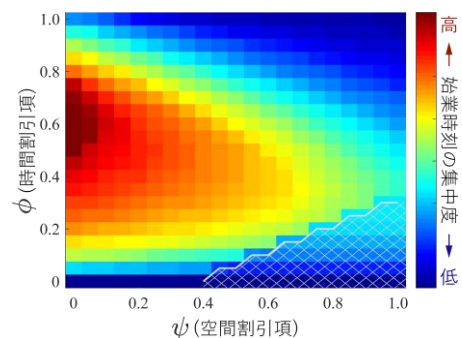


図-2 時空間相互作用の強さと始業時刻の集中度・都市間人口分布の関係

※注：1) 赤いほど始業時刻が集中，青いほど始業時刻が分散することを表す．2) 図右下の網掛けは片方の都市への人口集中を示す．

4. おわりに

Henderson¹⁾型の始業時刻選択モデルに都市空間構造を導入し，時間・空間集積の経済を考慮した都市システムモデルを構築した．そして，ポテンシャルゲームの性質を利用することで，モデルの均衡状態の性質を理論的に明らかにした．さらに，企業間の時間・空間的な相互作用の易化が都市人口，都市内人口分布，始業時刻分布に与える影響を明らかにした．本研究で構築した理論は，始業時刻の分散化 (e.g., 時差出勤) による TDM 施策の効果検証に展開できる．さらに，自動運転・モビリティシェアなどの政策・新技術の効果分析手法へと発展させることにより，多様な政策・新技術が都市経済に与える長期的影響の評価が可能となる．一方で，本稿では，経済活動の時空間分布の内生化を分析する枠組みの基礎構築を目的としたため，「企業は全て1箇所のCBDに立地する」「企業・労働者が均質である」と仮定した．しかし，これらの仮定は，分析により得られる人口・始業時刻分布に大きな影響を与えると考えられる．これらの仮定を実態に合うように改善することは，今後の重要な研究課題である．

参考文献

- 1) Henderson, J. V.: The economics of staggered work hours, *Journal of Urban Economics*, Vol. 9, No. 3, pp. 349-364, 1981.
- 2) 高山雄貴: 始業時刻分布を生産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.