

鉄道通勤利用者の最適居住地分布とその実証研究*

Optimal residential location pattern of railway commuters and its empirical study

円山 琢也**・原田 昇***

By Takuya MARUYAMA** and Noboru HARATA***

1. はじめに

東京圏に代表される鉄道通勤混雑については、通勤定期割引、通勤手当の存在により利用者の通勤交通費の負担額がピーク時の鉄道車内混雑の外部不経済と比較して低すぎるのが一因であるという指摘がある。通勤費が低く抑えられることで、中長期の利用者の住居選択時に、通勤費の重要性は低くなり、非効率的な居住地選択が行われ、通勤が長距離化している可能性がある¹⁾。結果として現実の居住地分布は、社会的な観点からみた最適な分布と乖離している可能性がある。本研究は、ネットワーク上での鉄道混雑を考える場合の最適な居住地分布についての考察を深めると共に、東京圏の鉄道ネットワークを対象として実証的分析を行うことを目的とする。

本研究は、単純のためゾーン毎の通勤発生量、集中量を所与とした両側制約型の分布モデルを基本として分析を行っていく。各地域の都市活動量は現状のままという前提である。この単純なモデルを用いる理由は、既存の職住最適配置の研究と関連付けた分析が行えるためである。また、利用者の通勤時刻、交通手段の変更行動、鉄道事業者の運営費用などは分析の対象外であることを断っておく。

2. 移動不効用を最小化する居住地分布

(1) 既存の最適職住配置問題

現実の都市においては、Cross Commuting と呼ばれる「無駄な」通勤交通が発生していることが知られている。これは、図-1 上のように、居住地-勤務地の組み合わせが a B, b A であるような場合である。この場合、居住地(あるいは勤務地)を入れ替え

て、職住組み合わせを図-1 下の a A, b B に変更することで、全体の通勤時間(距離)を減少させることができる。Cross Commuting は、全体の通勤時間を長時間化し、混雑を増加させている一因となっている。職住再配置によりこの無駄な通勤を減少させることのできる限界は、次の Hitchcock 型の輸送問題で求めることができる²⁾。

$$\min Z(\mathbf{q}) = \sum_r \sum_s c_{rs} q_{rs} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_s q_{rs} = O_r, \sum_r q_{rs} = D_s, q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (2)$$

where

- c_{rs} : OD ペア rs 間の交通抵抗(所要時間など)
- O_r : ゾーン r からの発生交通量(就業者数, 所与)
- D_s : ゾーン s への集中交通量(従業者数, 所与)
- q_{rs} : OD ペア rs 間 OD 交通量(通勤目的)

鈴木³⁾は、このモデルを東京都市圏に適用し、最適職住配置により、平均通勤時間を現状より約7分減少させることができることを明らかにしている。このモデルにおいてOD間交通抵抗 c_{rs} は、外生的に与えられた一定値であると仮定されており、OD間のネットワークは明示されていない。この点についての拡張を以下に示そう。

(2) 両側制約型分布・配分統合モデルとの関係

発生量と集中量がいずれも所与として与えられた場合に分布交通量と混雑を考慮した配分交通量を同時に求める記述モデルとしての両側制約付き分布・配分統合モデルは、周知のように次の最適化問題として定式化される⁴⁾。

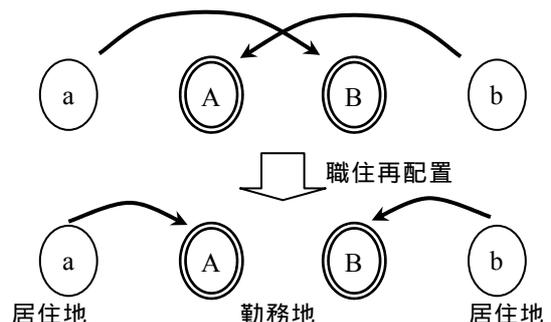


図-1 Cross Commuting とその解消

*キーワード: 住宅立地, 人口分布, ネットワーク交通流
 ** 正会員, 修, 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻
 *** 正会員, 工博, 東京大学大学院新領域創成科学研究科
 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,
 Tel 03-5841-6234, Fax03-5841-8527)

$$\min Z(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\gamma} \sum_{rs} q_{rs} \ln q_{rs} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad x_a = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \sum_s q_{rs} = O_r, \\ \sum_r q_{rs} = D_s, \quad x_a \geq 0, f_k^{rs} \geq 0, q_{rs} \geq 0 \quad (4)$$

where

c_{rs} : OD ペア rs 間経路 k の経路交通量

x_a : リンク a の交通量

$t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数

$\delta_{a,k}^{rs}$: リンク経路接続行列

γ : パラメータ

この最適化問題の一階の条件を求めて整理すると、以下の二重制約型エントロピーモデルが導出される。

$$q_{rs} = A_r B_s O_r D_s \exp(-\gamma c_{rs}) \quad (5)$$

$$A_r = \left[\sum_s B_s D_s \exp(-\gamma c_{rs}) \right]^{-1}, \quad B_s = \left[\sum_r A_r O_r \exp(-\gamma c_{rs}) \right]^{-1} \quad (6)$$

$$c_{rs} = \min_k \{c_k^{rs}\} = \min_k \left\{ \sum_a t_a(x_a) \delta_{a,k}^{rs} \right\} \quad (7)$$

c_k^{rs} は、OD ペア rs 間経路 k の経路費用、 c_{rs} は、そのうち最小の経路費用である。 A_r, B_s はバランシングファクターとも呼ばれる。

さて、式(3)、(4)のモデルは、混雑が発生せず、 $\gamma \rightarrow \infty$ である場合、式(1)、(2)の最適職住配置モデルと完全に一致する。さらに、混雑が発生する場合も、 $\gamma \rightarrow \infty$ とおけば、利用者が自由な経路選択を行う前提で、移動の不効用を最小化するように職住を入れ替えるモデルの一つの近似解法とみなせよう。

3. 料金設定による最適居住地分布の形成

次に鉄道料金を変更することで、居住地分布を最適化することを考える。まず、関連する最適混雑料金理論のレビューを行っておく。

(1) ネットワーク上での最適料金理論のレビュー

交通ネットワーク均衡分析における混雑料金政策の議論としては、固定需要型の利用者均衡モデルにおいて各リンクに限界費用課金を行うことで、総走行時間を最小化するシステム最適配分が達成できることがよく知られている。この料金システムは、独立需要関数による Beckmann 型需要変動モデルの場合でも社会的余剰を最大化するという意味で最適課金である。最近、Bellei, *et al.*⁵⁾は、以上の議論を一般化し、利用者の行動モデルが複数の利用者クラ

スで構成されたランダム効用理論に従う任意のモデルで、リンクコスト関数が相互干渉を表現する場合も含めた最適課金について、不動点問題を用いた議論を展開している。そして、最適化の目的関数を、行動モデルと統合的な利用者余剰と料金収入の和(社会的余剰)とおいた場合、限界費用原理が最適課金解の必要条件を満たす解の一つであることを証明している。

本章は、両側制約型分布・配分統合モデルにおける最適課金を考えてみる。片側制約型の分布モデルは、目的地選択モデルという解釈が可能のため、上記と同様な議論が展開できる。しかしながら、両側制約型の場合は、結論は必ずしも自明ではない。

これに関連して、Boyce, *et al.*⁶⁾は、両側制約型の分布・分担・配分統合モデルにおいて限界費用課金を実行した場合の議論を展開している。ただし、彼らは、限界費用課金を賦課した場合に、システムがどのような状況になるのかの考察が必ずしも十分では無く、単に様々な指標での比較を行うにとどまっている。

(2) 両側制約型分布配分統合モデルと最適課金

さて、ネットワークの各リンク a に限界費用課金

$$p_a^{SO}(x_a) = x_a \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \quad (8)$$

が賦課されている場合、式(3)の目的関数は、次のように置き変わる。

$$\min Z^{SO}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \sum_a x_a t_a(x_a) + \frac{1}{\gamma} \sum_{rs} q_{rs} \ln q_{rs} \quad (9)$$

この目的関数の意味を考えてみる。限界費用課金下では以下が成立している。

$$q_{rs} = A_r B_s O_r D_s \exp(-\gamma mc_{rs}) \quad (10)$$

$$A_r = \left[\sum_s B_s D_s \exp(-\gamma mc_{rs}) \right]^{-1} \quad (11)$$

$$B_s = \left[\sum_r A_r O_r \exp(-\gamma mc_{rs}) \right]^{-1} \quad (12)$$

$$mc_{rs} = \min_k \{mc_k^{rs}\} = \min_k \left\{ \sum_a [t_a(x_a) + p_a^{SO}(x_a)] \delta_{a,k}^{rs} \right\} \quad (13)$$

これら式(10)~(8)を式(9)に代入して整理すると、

$$Z^{SO} = \frac{1}{\gamma} \sum_r O_r \ln O_r + \frac{1}{\gamma} \sum_s D_s \ln D_s \\ + \frac{1}{\gamma} \sum_r O_r \ln A_r + \frac{1}{\gamma} \sum_s D_s \ln B_s - \sum_a x_a p_a^{SO}(x_a) \quad (14)$$

となる。ここで、式(9)の最適化問題の意味を考えてみる。上式、右辺第一項と第二項は定数であるから無視すると、

$$\max. -Z^{SO} = -\frac{1}{\gamma} \left[\sum_r O_r \ln A_r + \sum_s D_s \ln B_s \right] + \sum_a x_a p_a^{SO}(x_a) \quad (15)$$

となる、式(15)右辺第一項は、Williams⁷⁾によって示された二重制約型エントロピーモデルと整合的な利用者余剰の式であり、第二項は、各リンクの最適混雑料金収入すなわち供給者余剰であり、それらの和は社会的余剰となる。したがって、両側制約型分布・配分統合モデルにおいても限界費用課金は、需要モデルと整合的な社会的余剰が最大化されるという意味での最適課金であることが分かる。また、その際の職住分布は、その意味での最適な分布といえる。

4. 東京都市圏への適用

(1) 対象地域・データ

分析の対象とする東京都市圏の鉄道のデータは、既存研究⁸⁾のネットワーク、リンクコスト関数を用いる。混雑による車内混雑悪化による不効用を表現する混雑不効用関数を利用している。ゾーン数はH10東京PT調査中ゾーン144、ネットワークは、約5,000リンクから構成される。現状OD表は、H10年東京PT調査を利用している。なお、ゾーン内々交通、域外交通は分析から除外している。

さらに、本研究では、混雑現象が生じている時間帯を対象にするため発時刻ベースで集計して午前6時~9時に出発したトリップのみを扱う。日合計の通勤トリップのうち、この時間帯に含まれるトリップは、鉄道利用交通で86.1%になる。また、この時間帯のトリップのうち、通勤目的のトリップが占める割合は、鉄道利用交通で74.9%である。この割合のトリップがODの分布の変更の考察対象となる。通勤目的以外のODトリップは分析対象外であるが、混雑現象には影響を与える設定とする。

(2) 移動不効用を最小化する分布

まず、式(3)のモデルのパラメータ γ を現状再現するように、キャリブレーションを行った。図-2には γ を0~まで変化させた場合の距離帯別のトリッ

プ分布の変化を示す。 γ が小さくなるほど、長距離トリップの割合が増加し、 $\gamma=0.05$ において、現状をほぼ再現する結果が得られている。この値で、OD表の他の再現性指標($R^2, RMSE$)の適合度も最良となった。

$\gamma \rightarrow \infty$ とにおいて移動の不効用を最小化するような職住配置を計算した結果を表-1[b]に示す。平均通勤所要時間が、約10分程度減少し、さらに混雑率も大幅に低下することにより、利用者の総不効用も大きく減少している。既存研究³⁾は、最適割当による鉄道通勤時間の短縮効果が中心に示されていた。本研究は、混雑を考える拡張を行うことで、通勤時間の短縮のみならず、混雑緩和による不効用の軽減の試算結果も示したことに意義がある。また、対象地域の鉄道混雑緩和を考える際に職住分布の不効率性の視点の重要性が示唆される。

(3) 料金設定による社会的余剰の最大化

職住再配置政策の実行の困難さと比較すれば、鉄道料金の変更は実行が容易な政策である。表-1[c]には、最適課金時の状況を示す。図-3には、その場合のトリップ分布を示している。職住再配置ほどの急激な変化は無いが、トリップ分布は、全体的にわず

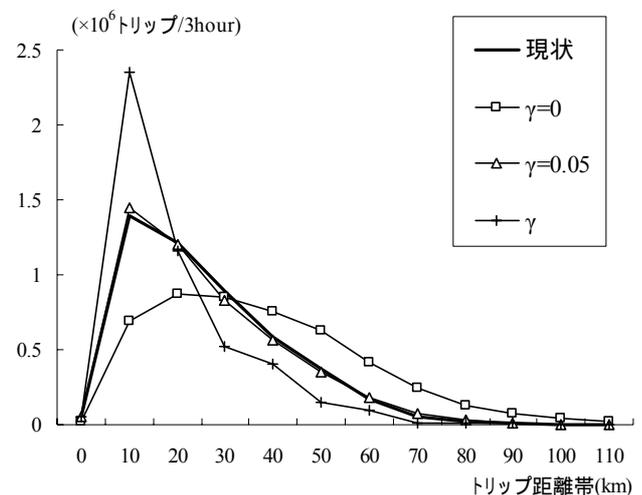


図-2 距離帯別の通勤トリップ分布のモデル推定値

表-1 鉄道の混雑変化

	鉄道混雑率(%) 両方向平均値		平均所要 時間(分)	総不効用 (10 ³ 人・分)
	全域	山手線内		
[a]現状	43.9	83.2	50.68	14555.2
[b]最適職住配置	26.7	35.4	41.26	12153.1
[c]最適課金時	42.0	75.0	50.26	14147.6

注) 課金時の総不効用は料金分を除く

ながら短距離化し、混雑緩和がなされている。

また、料金を最適料金の $x\%$ として変化させた場合の社会的余剰およびその内訳である利用者余剰と料金収入の変化を図-3,4 に示す。当然ながら、料金を増加させると収入は増加するが、利用者余剰は減少する関係にあり、社会的余剰は、最適混雑料金の100%の料金設定値で、最大となっていることが確認できる。

我が国においては、通勤手当の存在により、通勤

に関する金銭的費用が支給されており、料金の利用者負担はゼロとみなせる。したがって、現状は、料金設定は、最適混雑料金の 0% とみなせる。この点と最適混雑料金点との社会的余剰を比較することで、現状で発生している余剰の損失分が概算できる。すなわち、本研究のフレームに従って、利用者が居住地、鉄道経路を選択しているとの前提の下であるが、通勤手当の存在と鉄道運賃の最適料金との乖離により、7,600万(円/3h)程度の厚生損失が生じていると計算される。

5. おわりに

本研究では、混雑が発生している場合の鉄道通勤利用者の最適居住地分布に関して、二つの考え方を指摘し、それぞれについて、東京都市圏を対象に計算例を示した。一つは、職住の入れ替えにより移動に関する総不効用を最小化するという分布である。もう一つは、需要モデルと統合的な社会的余剰の最大化という意味での最適な分布であり、これはネットワーク上の各リンクに最適混雑料金を賦課することにより実現するものである。今後の課題としては、居住地選択における地代の考慮など分析フレームの一般化が挙げられる。

参考文献

- 1) 八田達夫：東京の過密通勤対策，八田達夫，八代尚弘（編）東京問題の経済学 第2章，東京大学出版会，1995.
- 2) White, M. J.: Urban commuting journeys are not "wasteful", *Journal of Political Economy*, Vol. 96, No. 5, pp. 1097-1110, 1988.
- 3) 鈴木勉：東京大都市圏における職住割当の最適化に関する実証研究，都市計画論文集，No. 27, pp. 337-342, 1992.
- 4) 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-，丸善，1998.
- 5) Bellei, G., Gentile, G. and Papola, N.: Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 9, pp. 779-798, 2002.
- 6) Boyce, D.E., Balasubramaniam, K., and Tian, X.: Implications of marginal cost road pricing for urban travel choices and user benefits, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Kluwer Academic Publishers, Chapter 3, pp. 37-48, 2002.
- 7) Williams, H. C. W. L.: Travel demand models, duality relations and user benefit analysis, *Journal of Regional Science*, Vol. 16, No. 7, pp. 147-166, 1976.
- 8) 円山琢也，原田昇，太田勝敏：大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用，土木計画法学研究・論文集，Vol. 19, no. 3, pp. 551-560, 2002.

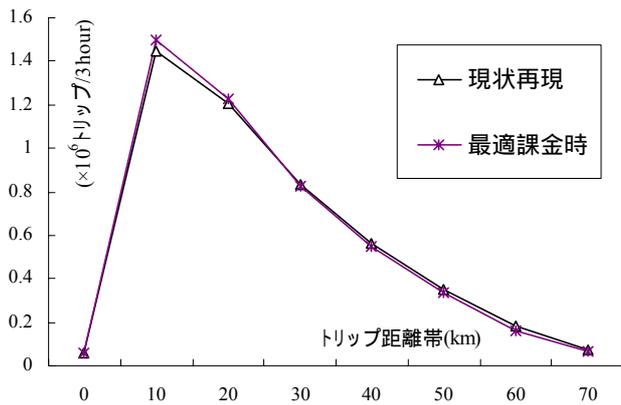


図-3 最適課金によるトリップ分布の変化

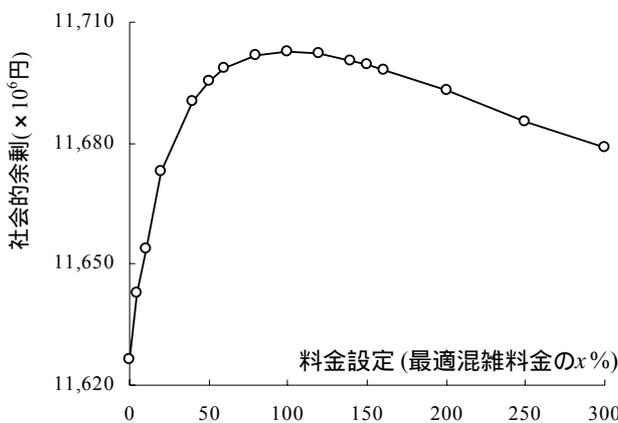


図-4 鉄道料金変化と社会的余剰変化

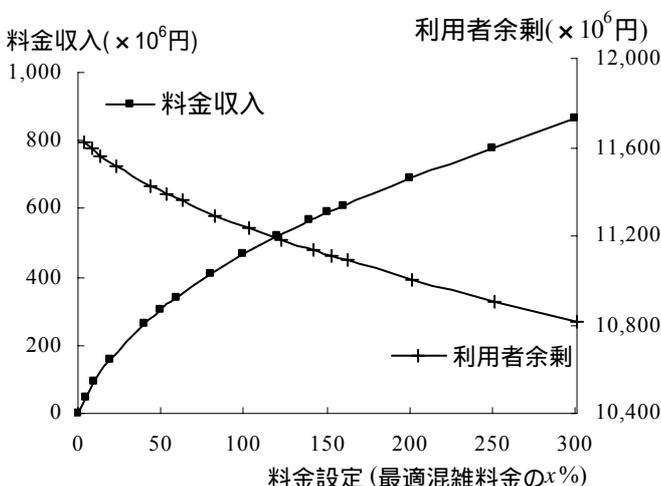


図-5 鉄道料金変化と利用者余剰・料金収入変化