

首都圏高速道路網における 経路選択パターンの規則性

石川 裕太郎¹・酒井 高良²・赤松 隆³

¹非会員 東北大学 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)

E-mail: yutaro.ishikawa.s5@dc.tohoku.ac.jp

²学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)

E-mail: takara.sakai.t1@dc.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)

E-mail: akamatsu@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、長期間にわたる感知器での観測データに基づき、利用者の経路選択パターンの規則性を明らかにした。より具体的には、経路選択モデルのパラメータの動的な推計結果から、日ごとのパラメータの日内推移過程と当該日の混雑レベル、パラメータの大小と道路網の混雑レベルをそれぞれ対応づけられることを明らかにした。これより、道路網が混雑しているときには利用者は確率的に様々な経路を選択し、混雑していないときにはより確定的に最短経路を選択することが明らかとなった。

Key Words: 経路選択パターン, パラメータ推計, 最尤法, 動的交通量配分, 時空間ネットワーク

1. はじめに

道路網における利用者の経路選択行動の分析は、需要予測での利用をはじめとする道路交通計画において重要である。そのために、利用者の経路選択行動を表現する様々な理論モデル、および観測データに基づくモデル・パラメータの推計手法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が提案されている。

これら理論モデルにおいて、いくつかのパラメータは、利用者の行動原理を表している。従来、利用者の行動原理はその時間変化に対して安定的なものと考えられてきた。このことは、長期間観測データからパラメータを動的に推計し、その変動特性をみることで確認できる。しかしこれまで、観測データからのパラメータ推計はモデルの適合度の評価を目的とした研究(例えば安藤ら⁷⁾、三輪・森川⁸⁾など)が多く、観測データは対象ネットワーク、車両、期間などが限定されたものが多い。したがって、長期間観測データに基づき利用者の行動原理の時間変動特性を明らかにした信頼性・頑健性の高い結果は未だに存在しない。

本研究の目的は、長期間にわたる時々刻々の観測データに基づき、利用者の経路選択パターンの時間変動特性を解明することである。具体的には、まず経路選択モデルのパラメータ推計手法を時空間ネットワークを利用することで動的枠組みに拡張する。次に、年間を通して日内の複数時間帯についてパラメータを推計し、day-to-day 変動特性、ならびに within-day 変動特性を示す。さらに、これらのパラメータの変動と道路網上の

混雑状況(供給サイドの条件)との対応関係について明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。まず2章において、利用するモデルと推計手法の定式化を行い、続く3章で分析対象とするデータについて述べる。次に4章において、時間帯別のパラメータの推計結果を示し、5章では、時々刻々の交通状態と経路選択パターンの関係性について述べる。より具体的には、時々刻々の渋滞空間分布と各時間帯の推計パラメータの対応関係について議論し、供給サイドの条件による利用者の行動原理の変化について考察する。最後に6章において、本研究のまとめを述べる。

2. モデルの概要

(1) 動的な配分モデルの枠組み

本研究では、供給サイドの条件を固定することによって利用者の経路選択行動(需要サイド)を分析する。そのため、パラメータを推計するための配分モデルには、Flow Independent な交通量配分の枠組みを適用する。¹さらに、動的なパラメータを推計するため、時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 を利用した動的な交通量配分モデルを取り扱う。時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 は、一般的な道路ネットワークに時間軸を追加し、三次元に拡張したネットワー

¹ 各リンクの旅行時間がリンク交通量に依らず一定であること。すなわち、本研究では時々刻々のリンク旅行時間は観測データに基づいた値を設定し、モデル中では一貫して定数として扱っている。

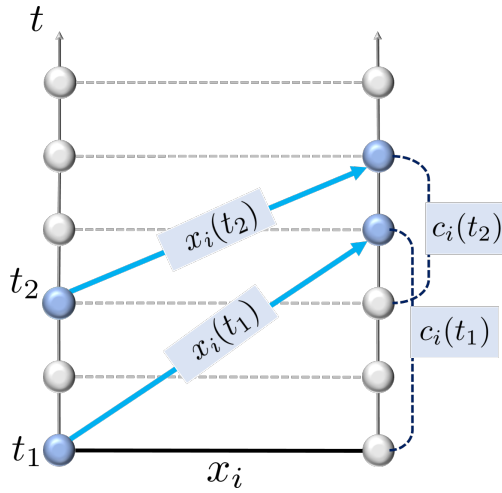


図-1 時空間ネットワークの構造

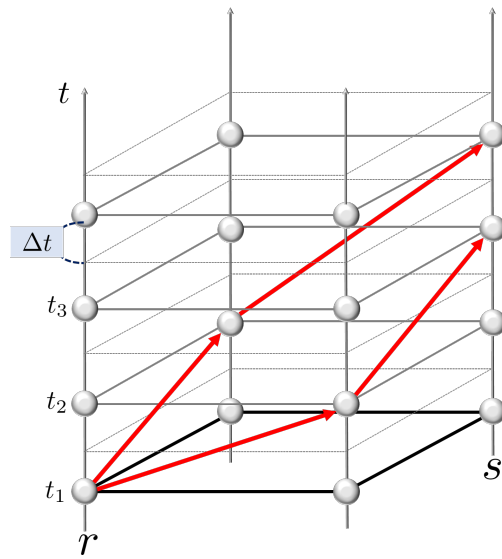


図-2 時空間ネットワーク上での経路選択

クであり、時空間ネットワーク中の各リンクは図-1に示すような構造となっている。図中の縦軸が時間軸であり、時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 中のノードには位置 i と時刻 t の情報 $x_i(t)$ 、青矢印で示されたリンクには同じく旅行時間 $c_i(t)$ が紐付けられている。また、時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 中での利用者の選択経路は、図-2中の赤矢印線のように示される。ここで、以降の議論を明瞭にすすめるために、時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 上のリンク集合を \mathcal{L} 、経路集合を \mathcal{K} と定義する。

本研究では、この時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 上で、Flow Independent なロジット型確率配分モデルである Dial¹⁰⁾ 配分法を適用し、時々刻々のリンク交通量を算出する。具体的には、ロジット型確率配分モデルでは、起点 r -終点 s 間の経路 k の選択確率 P_k^{rs} は、

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_k^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta c_k^{rs})} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

と与えられ、 \mathcal{N}_3 上の経路の交通費用を c_k^{rs} を用いて表現される。 θ は利用者の知覚する旅行時間に対する感度パラメータである。

(2) パラメータ推計手法

式 (1) における感度パラメータ θ の最尤推定量は、尤度関数

$$s(\theta) = \prod_{k \in \mathcal{K}} (P_k^{rs})^{f_k^{rs}} \quad (2)$$

を最大にする θ を求めることで定まる。具体的な最適性条件は、Robillard¹⁾ により以下のようにリンク変数のみを用いて最尤方程式：

$$f(\theta) = \sum_{i \in \mathcal{L}} c_i x_i(\theta) - \sum_{j \in \mathcal{L}} c_j \tilde{x}_j = 0 \quad (3)$$

に帰着することが示されている。ここで、 $x_i(\theta)$ はリンク i に θ のもとで配分される交通量、 \tilde{x}_j はリンク j で観測された交通量であり、 c_i, c_j は各リンクの交通費用である。このとき、最尤推定量 θ は最尤方程式の解 $\hat{\theta}$ として示される。すなわち、ネットワークで観測された総交通費用と、 $\hat{\theta}$ のもとでロジット配分を行った結果から算出される総交通費用が一致するように $\hat{\theta}$ が決定する。本研究ではさらに、動的なパラメータの推計を、全推計対象時間帯 \mathcal{T} を複数の時間帯 $w_t \in \mathcal{T}$ に分割して行う。そこで式 (3) を、時間帯 w_t に含まれる各時刻 $t \in w_t$ を用いて

$$f(\theta(w_t)) = \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{t \in w_t} c_i(t) x_i(\theta, t) - \sum_{j \in \mathcal{L}} \sum_{t \in w_t} c_j(t) \tilde{x}_j(t) = 0 \quad (4)$$

と拡張する。すべての変数は時刻 t に関する関数となるが、これは観測データならびに前節で示した動的な交通量配分の枠組みを利用することで求解可能である。

3. 推計対象データ

(1) 観測データとネットワーク

本研究では、首都圏高速道路網を分析対象とする。分析のため、道路網をノード数 287、リンク数 333 の二次元ネットワーク \mathcal{N}_2 として表した。 \mathcal{N}_2 中の OD ペア数は 11823 である。

利用するデータは、首都圏高速道路網上の約 1500 個の感知器で観測された 24 時間、1 分刻みの速度データ・交通量データである。観測期間は 2014 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの 365 日間である。交通費用は旅行時間とし、速度データとリンク長データから算出した。また OD 交通量は、観測された発生・集中交通量データから二重制約エントロピーモデルを用いて推計した。1 時間あたりの総 OD 交通量は約 5 万台であった。

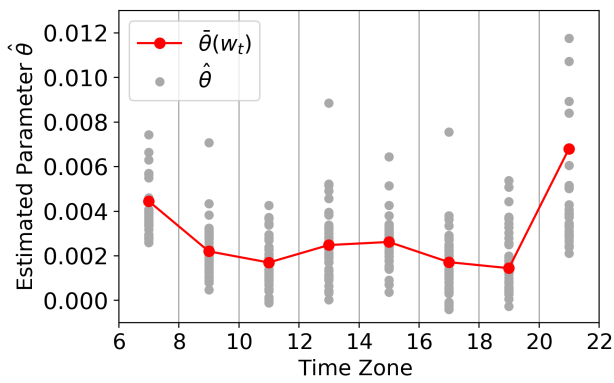


図-3 パラメータの推計結果

(2) 推計対象日と時間帯

推計対象日は、交通状態との対応関係を見ることを考慮し、後述する4つの日内混雑推移パターン $P^i (i = 1, \dots, 4)$ それぞれに属する代表的な日を10日ずつ抽出した計40日とした。また、日内の推計対象時間 \mathcal{T} は6時から22時とした。推計を行う時間帯の幅は2時間と設定し、各日8つの時間帯 $w_t (t = 1, 2, \dots, 8)$ についてパラメータ $\hat{\theta}$ を推計した。時空間ネットワーク \mathcal{N}_3 を単位時間幅 Δt は20秒に設定して構築した。

4. パラメータの推計結果

本章では、前章までに示した枠組みで実際にパラメータを推計した結果を示す。図-3に、全推計日の時間帯 w_t 別のパラメータの推計結果 $\hat{\theta}$ と、各時間帯 w_t ごとの推計結果の平均を推移過程 $\bar{\theta}(w_t)$ として示す。縦軸はパラメータの推計値、横軸は推計を行った8つの時間帯である。

図-3からは、以下の事象が観察できる。

- 早朝や夜の遅い時間帯など、交通量が少なく、混雑があまり発生しないような時間帯には、パラメータの推計値が大きくなっている。
- 朝や夕方など、交通量が多く、混雑が発生しやすい時間帯には、パラメータの推計値が小さくなっている。
- 平均値からも同様のことが確認できる。

以上を踏まえて以降では、推計結果と道路網の混雑状況の対応関係に着目して分析する。

5. 交通混雑状態との対応関係

本章では、本研究と同じ首都圏高速道路網の同期間のデータに基づいた酒井・赤松¹¹⁾の混雑の変動に関する規則性に従い、推計結果を分類する。具体的にはまず、酒井・赤松¹¹⁾の3つの規則性を整理する。時間帯別の

混雑レベル、混雑の推移パターン、1日の混雑レベルの3つの規則性に基づいて推計結果を分類し、対応づけが可能であることを示す。最後に、本研究で得られた結果の解釈について考察する。

(1) 酒井・赤松¹¹⁾の整理

酒井・赤松¹¹⁾では混雑の時間変動特性について、クラスタリングを用いた分析を行い、典型的な混雑空間分布、およびその日内推移過程について主に、以下の3つの規則性が明らかにされている。

1. 時々刻々道路網上で実現している混雑の空間分布は、典型的な8タイプ(渋滞空間分布タイプ)に分類できる
2. 混雑空間分布の日内状態推移は、年間を通して典型的な4パターン(日内混雑推移パターン)に分類できる
3. 典型的な4つの日内状態推移パターンは、混雑レベルが異なっている

図-4に、8つの典型的な混雑空間分布タイプを示す(知見.1)。図中では、赤矢印リンクが渋滞が発生しているリンクであることを示している。本稿での議論を明瞭に進めるために、道路網の混雑レベル(渋滞リンク数)により8つのタイプをグループ $G^1 = \{N1, N2\}$, $G^2 = \{M1, D1, E1\}$, $G^3 = \{M2, D2, E2\}$ に分類する。 G^1 にはほぼ混雑がないタイプ、 G^3 には混雑が激しいタイプが属し、 G^2 にはその中間のタイプが属する。

知見.2.は、渋滞空間分布タイプが1日の中で時間とともに推移していくパターンが、年間を通しておよそ4パターン(P^1, P^2, P^3, P^4)存在することを意味している。具体的な推移パターンを図-5に示す。図-5は、縦軸を本研究の推計対象日、横軸を時間帯としたメッシュ構造となっており、各セルの色(図-4と対応)がその日・時間帯に出現している渋滞空間分布(G^1, G^2, G^3)を表している。いずれのパターンでも、朝や夕方には、早朝や日中、夜間と比較すると色が濃くなっており、混雑状況が日内で規則的に変化していることが確認できる。さらに、日内の混雑推移パターンは、日ごとの混雑レベルの違いも表していることも確認できる(知見.3)。これは、図-5において P^1 では混雑の少ない淡い色の占める時間帯が多く、 P^4 では終日激しい混雑を表す濃い色で占められていることから確認できる。

(2) 道路網の混雑レベルとパラメータの大小

時間帯ごとに出現していた渋滞空間分布タイプ別に、パラメータの推計結果 $\hat{\theta}$ を分類した結果を図-6に示す。各タイプが属するグループでの平均 $\bar{\theta}_G$ も併せて示す。縦軸はパラメータの推計値、横軸は渋滞空間分布タイプ

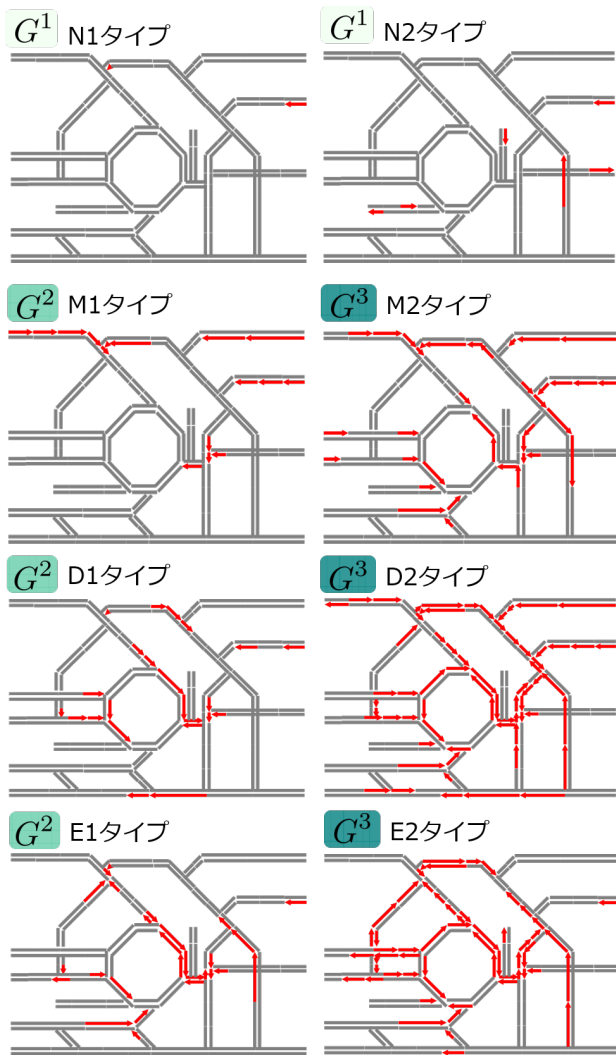


図-4 典型的な8つの渋滞空間分布タイプ

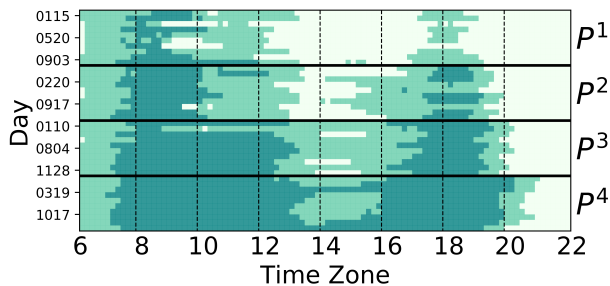


図-5 日内の混雑推移パターン

である。²

混雑レベルの異なるグループ間で、パラメータの大小関係が明確に判別できる。具体的には、混雑の激しいグループのパラメータ値は大きく、その逆ほど小さくなっている。このことから、実際の利用者の行動パターンは、

² 視認性向上のため、全推計結果の95%が入るように縦軸のスケールを調整している。

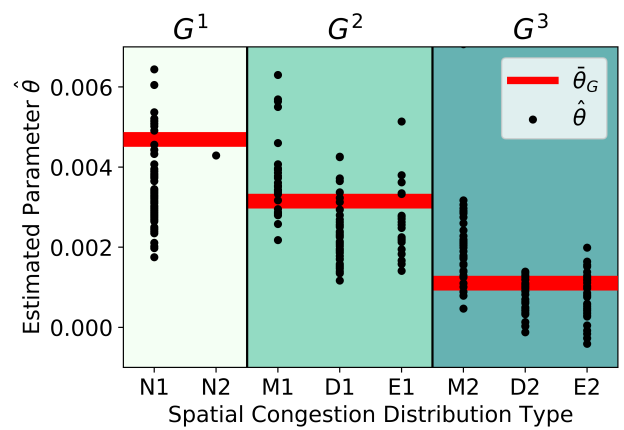


図-6 渋滞空間分布タイプ別・パラメータの推計結果

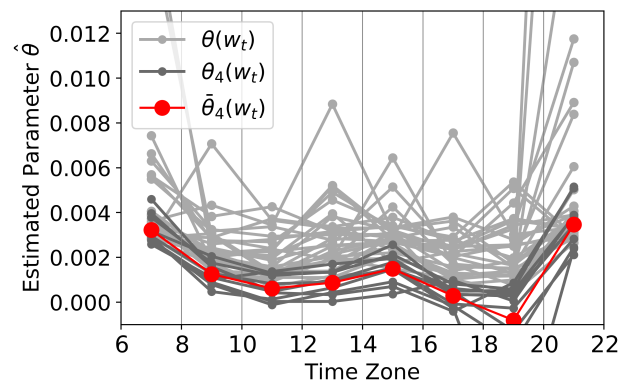


図-7 パラメータの日内推移過程

混雑していないときはより確定的に最短経路を選択し、混雑が激しいときは最短経路によらず様々な経路を選択していることが明らかとなった。

(3) 日内の混雑推移パターンとパラメータの推移過程

各日の時間帯別のパラメータ推計結果を線で結ぶと、パラメータの日内の推移過程を表すことができる。ここでは、縦軸をパラメータの推計値、横軸を時間帯として全ての推計日のパラメータの日内推移過程 $\theta(w_t)$ を図-7に示す。その中で特にパターン4に属する日の推移過程 $\theta_4(w_t)$ を強調表示し、その平均である $\bar{\theta}_4(w_t)$ も併せて示す。

$\theta(w_t)$ の軌跡は、日によってずれがあるものの、概ね ω 型となることがわかる。このことは、図-5の横軸方向の色の変化に着目することで、前節と同様に、混雑と対応づけた解釈が可能である。また、濃色で強調表示された $\theta_4(w_t)$ に着目すると、それらは図-7の $\bar{\theta}_4(w_t)$ とよく似た形状であるとともに、パターンを限定しない場合と比較して各時間帯におけるばらつきも小さくなることが確認された。このことは、他の4つのパターンにつ

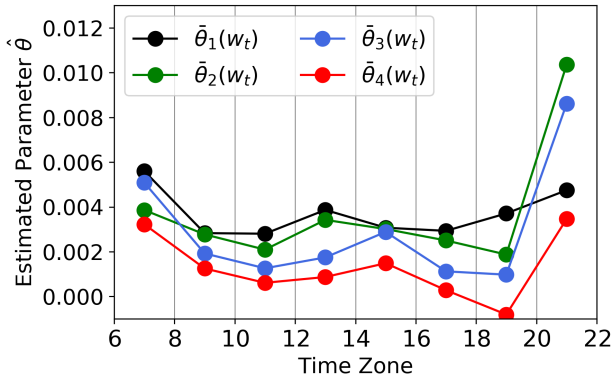


図-8 各パターンにおけるパラメータの平均日内推移過程

いても確認できたため、パラメータの日内推移過程は、日々の混雑レベルによって分類することで安定的になることがわかる。

(4) 日々の混雑推移レベルとの対応

図-8に、図-7に示した $\bar{\theta}_4(w_t)$ をすべてのパターン i について示す。各パターン i に属する推計日のパラメータ日内推移過程は、前節での議論から、 $\bar{\theta}_i(w_t)$ を中心とした軌跡を描くことを意味する。ここで、 $\bar{\theta}_i(w_t)$ の大小関係に着目すると、ほとんどの時間帯で $\bar{\theta}_1(w_t) > \bar{\theta}_2(w_t) > \bar{\theta}_3(w_t) > \bar{\theta}_4(w_t)$ が成り立つことが確認できる。このことは、日々の混雑レベルという視点からも、パラメータの大小関係に規則性が存在することを示している。

(5) 結果の考察

本研究では、利用者の経路選択行動がロジットモデルに従うと仮定し、パラメータの変動特性を検証を行った。ここでのパラメータは、利用者の知覚旅行時間に対する感度を表しており、パラメータ θ の変動は、利用者の経路コストに対する感度の変化を意味する。本研究において、パラメータ θ は日内で ω 型に変動し、混雑レベルによってその大きさが異なることが示された。すなわち、利用者の旅行時間に対する感度は混雑状況に応じて変化する。具体的には、より道路網が混雑している場合には旅行時間に対して鈍感になり、混雑が激しくない場合は敏感に反応している。具体的な利用者の行動としては、道路網上の至るところで混雑が発生している場合に、各利用者が結果として最短経路以外の経路を選択してしまう状況などが予想される。または、経路選択を放棄し、常に同じルートを選択する利用者の存在も考えられる。また一方で、ロジットモデルでは利用者の知覚する旅行時間が確定項と誤差項の線形和として $c_k^r + \epsilon$ と表現されている。推計を行ったパラメータ θ は、誤差項 ϵ の従う Gumbel 分布のスケールパラメータであり、

その分散は π^2/θ である。このことから、パラメータの変動は統計学的に解釈すれば、Gumbel 分布の分散の大きさが変化するを意味しており、今回考慮しなかった要因が経路の選択に与える影響の度合いが、道路網の混雑状況に応じて変化するを意味している。

本分析においては、数学的な取り扱いを簡便にするため、利用者の経路選択を決定する要因を、利用者の知覚する経路旅行時間のみと極めてシンプルに設定した。そのため、推計したパラメータが規則的に変動するという結果は、モデルに組み込まれていない要因に起因する歪んだ結果である可能性もある。具体的に、今回考慮していない要因で、現実的に利用者が経路選択に影響を及ぼすものとして、以下の2つが挙げられる。

- 知覚した旅行時間の実現可能性
- 逐次的な経路の選択可能性

まず今回は、旅行者は出発時点で完全に目的地までの旅行時間を把握した状況で経路選択を行うことを仮定した。しかし、特に混雑が発生しているような状況下では、最終的な所要時間が知覚した旅行時間に対して乖離してしまう可能性も考える。この場合、パラメータの変化として出現した要因は利用者の行動原理の変化によるものではなく、旅行時間の不確実性に対するリスクの混雑状況による変化である。また、今回分析対象としたような交通量の多いネットワークでは、交通状態は刻々と変化する。そのような状況において、利用者も実際には走行しながら提供された交通情報に応じて逐次的に経路を選択している可能性がある。つまり、経路を決定するタイミングが混雑状況に応じて、近視眼的もしくは巨視眼的に変化することを意味する。以上のようなケースを想定した場合、利用者が必ずしも混雑状況に応じて経路選択行動原理を変化させているとは言い難い。

6. おわりに

本研究では、長期間かつ詳細な観測データから、経路選択モデルの動的なパラメータ推計を行った。その結果、利用者の経路選択パターンと道路網の混雑の間に規則性が存在することを明らかにした。より具体的には、まず、パラメータの日内推移過程の形状が概ね ω 型になることを示し、利用者の経路選択パターンが日内で変動していることを特定した。次に、各日のパラメータ日内推移過程 $\theta(w_t)$ について、道路網の混雑状況（供給サイドの条件）と合わせて詳細に分析し、パラメータ日内推移過程 $\theta(w_t)$ の上下関係は、当該日の道路網の混雑レベルの大小と対応することを示した。以上のことから、実際の利用者の行動パターンが、混雑していないときはより確定的に最短経路を選択し、混雑が激しいときは最短経路によらず様々な経路を選択しているこ

とを明らかにした。

一方で、今回明らかにした規則性は、利用者の経路選択が、知覚した旅行時間だけに依存して決定することを仮定した状況下での結果である。そのため、今回は考慮に入れなかった他の要因によって、結果に多少の歪みが生じている可能性も否定できない。今後は、一例として知覚旅行時間の実現可能性に関するリスクや逐次的な経路選択を反映したモデル、あるいは Network-GEV モデルといったより一般的なモデルの導入など、モデルを拡張して分析を行うことが望まれる。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、首都高速道路株式会社、日本道路交通情報センター (JARTIC) より貴重なデータをご提供いただきました。また本研究は、日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究 (B) (課題番号：18H01551) の助成を受けた研究の一部です。ここに記し、感謝を表します。

参考文献

- 1) Robillard, P.: Calibration of Dial's Assignment Method, *Transportation Science*, Vol.8, pp. 117-125, 1974.
- 2) Fisc, C.: Note on the Maximum Likelihood calibration on Dial's Assignment Method, *Transportation Research*, Vol.11, pp. 67-68, 1977.
- 3) Anas, A., Kim, I.: Network loading versus equilibrium estimation of the stochastic route choice model: Maximum likelihood and least squares revisited, *Journal of Regional Science*, Vol.30, pp. 89-103, 1990.
- 4) Fosgerau, M., Frejinger, E., Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B*, Vol.56, pp. 70-80, 2013.
- 5) Mai, T., Fosgerau, M., Frejinger, E.: A nested recursive logit model for route choice analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.71, pp. 100-112, 2015.
- 6) Mai, T.: A method of integrating correlation structures for a generalized recursive route choice model, *Transportation Research Part B*, Vol.93, pp. 146-161, 2016.
- 7) 安藤正幸, 高山純一, 中山晶一郎: 交通流観測結果による Logit 型経路選択モデルの検証, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.435-453, 2011.
- 8) 三輪富生, 森川高行, 倉内慎也: プローブカーデータを用いた動的な経路選択行動に関する基礎的分析, 土木計画学研究・論文集, 22, 467-476, 2005
- 9) 永井政伸, 日比野直彦, 森地茂: ETC-OD データを用いた都市高速道路における経路選択行動に関する研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.67, No.5, pp. 589-597, 2011.
- 10) Dial, R.B.: A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol.5, pp. 83-111, 1971. *Transportation Research Part B*, Methodological 98, pp. 179-197, 2017.
- 11) 酒井高良, 赤松隆: 首都圏高速道路網における渋滞パターンと MFD の関係性, 土木計画学研究・講演集, 58, (CD-ROM), 2018.

(2019. 3. 10 受付)

REGULARITIES OF ROUTE CHOICE PATTERNS IN METROPOLITAN EXPRESSWAY NETWORK

Yutaro ISHIKAWA, Takara SAKAI and Takashi AKAMATSU