

# 通学自転車の経路・駐輪場選択モデルの構築 ～大学構内を対象として～

上杉 朋花<sup>1</sup>・浦田 淳司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 筑波大学理工学群社会学類 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: s2211801@u.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 筑波大学システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: urata.junji.gf@u.tsukuba.ac.jp

少子化時代においても選ばれる大学へとなるために、全国各地でキャンパスの更新が進められている。その際自転車で通学する大学生も多く、更新にあたっては駐輪場や自転車通行空間の再整備が必要となる。大学生の利便性も踏まえつつ効果的な整備を行うためには、学生の通行経路および駐輪場所選択を予測し、学生の嗜好にあった空間整備が望ましい。本研究では、予測にむけ経路・駐輪場選択モデルを構築する。駐輪場密度が高く多くの自転車が駐輪する大学構内において、学生は駐輪可否を見ながら動的に通行経路・駐輪場を選択していると仮定し、本研究では動的離散選択モデルを援用する。駐輪場選択は動的離散選択モデルの走行継続確率として取り入れ、同時選択構造を導入する。モデル実証は構内でのGPSによる行動軌跡データを用いて行う。

**Key Words:** recursive logit model, path choice, bicycle, parking behavior, survival ratio

## 1. はじめに

少子化の進行下でも魅力ある大学として選ばれ続けるため、全国の大学でキャンパスの更新が進んでいる。筆者らが所属する筑波大学においても、ポストコロナ時代における偶発的な出会いとコミュニケーションを通じて学生同士の協働・共創を促すことを目指し、屋外空間の再編と運用の見直しが進められている。

屋外空間を滞在のための空間にしていくため、学生の主要交通手段である自転車のための空間の集約化が必要となる。筑波大学中地区に位置する第三エリアは自転車による通学・移動が中心であり、主要建物の周辺に複数の駐輪場が配置されている。授業間の移動が集中する時間帯には、建物の入口に近い等の理由で特定の駐輪場に需要が偏り、収容可能台数を超過して図-1のように自転車が通路へはみ出したり、歩行者との交錯が生じたりする。これらは通行者の視認性の低下や事故リスクの増大を招くため、今後は安全性と通行機能を両立する設計・運用の枠組みが求められる。

現在第三エリアでは、プレイスメイキングとスマートプランニングを組み合わせた社会実験を通じて、滞在空間の創出に伴う駐輪場の再配置、自転車動線の変更、通行・駐輪ルールの見直し等が進められている。より効果的な社会実験・実装にむけては、事前に空間評価を行うために自転車などの行動予測モデルによるシミュレーションが必要である(国交省(2018)<sup>1)</sup>、大佛ら(2020)<sup>2)</sup>。こうした介入(空間改変)は利用者の意



図-1 第三エリアの駐輪場の現状

思決定の前提条件(駐輪場の立地、混雑状況、入口までの徒歩負担、経路上の走行容易性など)を変化させ、結果として駐輪位置と走行経路の双方に影響を及ぼす。しかし、既存モデルでは経路選択と駐輪場選択が分離して扱われることが多く、駐輪後の徒歩距離の変化や駐輪場の混雑が走行中の意思決定に先行的に及ぼす影響を十分に捉え切れていない。これらを表現するためには、導線改善や駐輪場の容量、配置変更を一貫した指標で比較可能とする、自転車の経路と駐輪場の同時選択の再現が必要である。

以上の背景を踏まえ、本研究では自転車利用者の走

行経路と駐輪場を一体として記述する行動モデルを構築し、空間設計や運用変更の効果を一貫して評価できる枠組みを提示する。具体的には、走行中の逐次的なリンク選択と、駐輪場到達時の自転車を「停める／停めずに通過する」判断を確率的な枠組みで表現し、行動選択の再現性を確保しつつ、駐輪場から建物までの徒歩距離や駐輪場混雑の回避等が意思決定に与える影響を明らかにすることを旨とする。また、筑波大学第三エリアを対象に自転車の走行軌跡および駐輪場所の調査を行い、提案モデルの有効性を実証する。

## 2. 既往研究のレビュー

本研究は、自転車の経路選択、ネットワーク上の逐次・動的選択、駐輪場選択の三領域の先行研究を踏まえ、大学構内における経路と駐輪の同時選択モデルを構築する。本章では各領域の先行研究を整理し、本研究の方針と位置付けを明確にする。

### (1) 自転車の経路選択モデル

自転車通学を対象とした研究として、渡辺ら(1999)<sup>3)</sup>は、単純な距離最短のみでは説明できない経路選択を、リンク属性(車道／自転車歩行者道、有効幅員、路面状態、段差、交通量、交差点数など)により説明可能であることを示した。非集計ロジットにより車道と自歩道の選択確率を推定し、観測通行量との対応から、道路条件の改善が利用に及ぼす影響を定量化している。

さらに、渡辺ら(2002)<sup>4)</sup>は、勾配に対する感度や個人差を考慮したモデルへと枠組みを拡張し、勾配が自転車通行に与える負担の大きさや、平坦な代替経路整備の効果、車道側レーン整備と自歩道拡幅の相対効果が交通量条件に依存することを示唆した。

これらは空間条件を説明変数として取り込み、政策変更に伴う需要再配分の方角性を示せる点で、本研究が対象とする構内の経路・動線・駐輪場配置の評価に直結する。

### (2) 小さなスケールでのネットワーク計画モデル

福山・羽藤(2015)<sup>5)</sup>は1km圏の歩行行動を対象に、ネットワーク特性と逐次的意思決定を統合する枠組みを整理し、経路集合定義や相関構造、時間配分・滞留表現の課題に対して、動的離散選択やRecursive Logit (RL) モデル(Fosgerau et al.(2013)<sup>6)</sup>の有効性を示した。

RLモデルは、経路を事前に列挙せずに、リンクごとの逐次選択として経路選択を表現できる点が特徴である。これは候補経路が多すぎる環境でも有効であり、キャンパスのように短距離で分岐が多いネットワークでも適していると考えられる。

### (3) 駐輪施設選択とその要因

Kohlrautz・Kuhnimhof(2024)<sup>7)</sup>は大学構内を対象に、施設タイプ、屋根の有無、駐輪後の歩行距離を効用に明示し、選好実験に基づく混合ロジットを推定して施設別需要を予測した。実測カウントによる検証では、出入口までの歩行距離の感度調整により適合度が改善する一方、施設到達時の自転車の迂回要因の寄与は限定的であることが示された。また、屋内保管や看板柱への施錠といった潜在需要、および混雑・占有率の影響は今後の課題とされている。

本研究においても、施設タイプと屋根の有無を明示し、出入口までの歩行距離の感度を適切に捉えることを重視する。

### (4) 本研究の位置付け

以上を踏まえ本研究では、経路の列挙を要しないRecursive Logitモデルを基礎とし、大学構内の自転車利用を対象とする経路と駐輪の同時選択モデルを構築する。具体的にはリンク属性に基づく逐次的なリンク選択を価値関数で表現しつつ、駐輪の意思決定を「(経路)選択の終了(非継続)確率」として同一フレームに組み込む。構内ネットワークは短区間で分岐が多く候補経路の重なりも強いことから、将来(行先)を見据えながら逐次的にリンク選択を行っていると考えられる。経路側の効用は通学自転車の既往研究が示す有効幅員、交差点数、勾配、交通量などのリンク特性を中心に記述し、駐輪側の効用は屋根の有無や、建物出入口までの徒歩距離を取り入れる。データは筑波大学第三エリアにおけるGPS行動軌跡と構内の駐輪施設・建物情報を用いる。

本研究の特徴は経路選択と駐輪場選択を1つの動的離散選択モデルとして統合し、経路と駐輪を同時に扱う推定枠組みを提示する点とキャンパス特有の駐輪施設タイプ・屋根・徒歩到達距離などを効用化して空間変数として扱えるようにした点にある。これにより、通行空間の整備と駐輪場の配置・容量の組合せが選択行動に及ぼす影響を、同一パラメータ系のもとで比較可能となり、構内計画の具体的な代替案評価に資することが期待できる。

## 3. モデルの提案

### (1) 既存の動的離散選択モデル

動的離散選択モデルとは、逐次的な意思決定を行う際に、意思決定者が次期以降の期待効用の最大化を図る選択を表現するモデルである。Rust(2006)<sup>8)</sup>による動的離散選択モデルの定式化では、逐次選択問題にマルコフ過程を仮定し、分離可能な効用関数を考える。次

期の行動は過去の履歴に依存せず、効用関数は  $t$  期の効用  $u_t$  の和で表す。このとき、状態  $s_t$  の価値関数  $V_t(s_t)$  は式 (2) のもと、式 (1) で表される。

$$V_t(s_t) = \max_{d \in D_t(s_t)} [u_t(s_t, d) + \rho_t \beta EV_{t+1}(s_t, d)] \quad (1)$$

$$EV_{t+1}(s_t, d) = \int_{s'} V_{t+1}(s') p_{t+1}(s' | s_t, d) \quad (2)$$

ただし、 $D_t(s_t)$  は状態  $s_t$  における選択肢集合、 $\beta$  は時間割引率、 $\rho_t$  は対象の問題が次期も持続し継続する確率（選択継続確率）、 $p_{t+1}(s' | s_t, d)$  は状態  $s_t$  で選択肢  $d$  を選択した時に、状態  $s'$  へ推移する確率である。

Urata et al.(2021)<sup>9)</sup> では、非ネストの選択構造の下で、探索継続時間  $T$  を与えると、状態  $z_t$  にいるアイドル運転者の期待効用  $V^T(z_t)$  は式 (3) に従うとしている。選択継続確率  $\rho_t$  は Rust(2006)<sup>8)</sup> の一般的な動的計画法における生存確率と同様の役割を果たす。

$$V^T(z_t) = \mathbb{E} \left[ \max_{z_{t+1} \in C(z_t)} (v(z_{t+1} | z_t; \theta) + \rho_t \beta V^T(z_{t+1}) + \varepsilon(z_{t+1})) \right] \quad (3)$$

ただし、 $C(z_t)$  は状態  $z_t$  における運転者の選択集合を表す。 $\rho_t$  は状態  $z_t$  を経たのちも運転者が未マッチのままである確率である。 $\beta$  は時間割引係数であり、右辺では  $v(z_{t+1} | z_t; \theta)$  が状態  $z_t$  から  $z_{t+1}$  へ移るアイドル運転者の観測効用を表し、 $\theta$  はパラメータベクトルである。 $\rho_t \beta V^T(z_{t+1})$  は状態  $z_{t+1}$  を達成することの割引価値を表し、 $\varepsilon(z_{t+1})$  は状態  $z_{t+1}$  の後に作用する観測不能要因に起因する誤差を表す。プラットフォームからマッチが成立した時点で運転者の顧客探索行動は強制終了するため、選択継続確率  $\rho_t$  は、状態  $z_t$  の後も少なくとももう 1 期アイドル状態が継続する確率を捉える。各期の探索行動は効用最大化に従うと仮定し、探索中にマッチが成立した場合や時刻終端に到達した場合の価値は、モデル内でいずれもゼロに設定する。

誤差項  $\varepsilon$  がスケーリング係数  $\mu$  ( $\mu \geq 1$ ) をもつガンベル分布に従い、観測不能交絡の独立性の程度を  $\mu$  が表すと仮定すると、次の選択確率が得られる。

$$P^T(z_{t+1} | z_t) = \frac{\exp(\mu(v(z_{t+1} | z_t) + \rho_t \beta V^T(z_{t+1})))}{\sum_{z \in C(z_t)} \exp(\mu(v(z | z_t) + \rho_t \beta V^T(z)))} \quad (4)$$

選択確率  $P^T(z_{t+1} | z_t)$  は、状態  $z_t$  から  $z_{t+1}$  への状態遷移確率の代理として用いられる。これは Fosgerau et al.(2013)<sup>6)</sup> によって提案された Recursive Logit モデルで採用されている取り扱いと同じである。したがって、選択確率を状態遷移確率として扱う限り、Rust(2006)<sup>8)</sup> の動的離散選択と Recursive Logit モデルは同等の構造を共有しており、選択継続確率  $\rho_t$  の与え方を規定すれば本研究の設定に整合的に接続できる。次節では、自転車の走行・駐輪過程に即して選択継続確率  $\rho_t$  を「駐輪せずに走行を継続する確率」として再定義し、駐輪

場選択を  $\rho_t$  に取り込む方法を示す。

## (2) 駐輪場選択への選択継続確率 $\rho$ の導入

本研究では、自転車利用者がいま駐輪するか、それとも先へ進むかを走行中に判断する過程を明示化し、その通過確率を選択継続確率  $\rho$  として式 (1) の  $\rho_t$  に与える。目的地  $d$  近傍の候補駐輪場集合を  $\mathcal{K}(d)$  とし、個人  $n$  の駐輪場  $k \in \mathcal{K}(d)$  に対する選択確率を条件付き MNL で

$$P_n(k | d) = \frac{\exp\left(\frac{v_{n,k}^{\text{park}}}{\mu}\right)}{\sum_{k' \in \mathcal{K}(d)} \exp\left(\frac{v_{n,k'}^{\text{park}}}{\mu}\right)} \quad (5)$$

と定義する。図-2 のように、駐輪場に到着する直前のノードを駐輪場ノードとし、それ以外のノードは一般ノードとする。また、駐輪場ノードから駐輪場まではダミーリンクで接続する。リンク  $a$  の終端ノードを  $j(a)$  とし、 $j(a)$  が候補駐輪場  $k$  に対応する駐輪場ノードである場合、その期の「駐輪せずに走行を継続する確率」を

$$\rho_{j(a)} = 1 - P_n(k | d) \quad (6)$$

とする。駐輪場ノードでない場合、つまり一般ノードの場合は継続が前提となるため  $\rho = 1$  とする。以上により、走行継続確率  $\rho$  は駐輪魅力度に応じて内生的に決まり、式 (1) の将来価値の重み  $\rho\beta$  を通じて走行継続の期待価値を重み付けする。これにより、大学構内で駐輪場が近接する中、利用者が停めやすい駐輪場を選びながら経路選択していることを再現する。

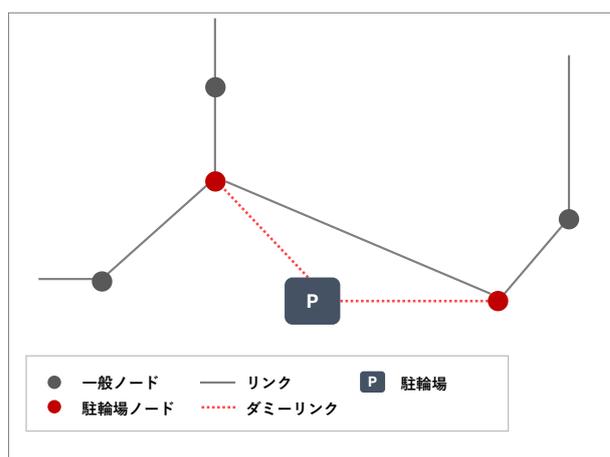


図-2 想定しているネットワークの例

### (3) $\rho$ を考慮した Recursive Logit モデルの提案

本節では, Fosgerau et al.<sup>6)</sup> の Recursive Logit (RL) に基づき, 自転車のリンク逐次選択として経路選択を定式化する. RL モデル基本的な考え方は, 上流リンク  $k$  から下流リンク  $a$  に移るときの瞬間効用に, 下流側の期待最大効用を加え, その条件付き確率が Logit で与えられるというものである.

ネットワークは有向グラフ  $G = (V, A)$  とし,  $A(k)$  をリンク  $k$  から到達可能な下流リンク集合,  $j(a)$  をリンク  $a$  の終端ノード,  $P$  を終端ノード集合とする. 上流リンク  $k$  から下流リンク  $a$  への遷移に関する瞬間効用  $u(a | k)$  は

$$u(a | k) = v(a | k) + V^d(a) + \mu \varepsilon(a) \quad (7)$$

と定義する. ここで,  $v(a | k)$  は観測可能な瞬間効用,  $V^d(a)$  は下流側の期待最大効用 (目的地  $d$  に依存する継続価値),  $\varepsilon(a)$  は標準ガンベル分布に従う誤差項,  $\mu$  はスケールパラメータである.

誤差項がガンベル分布に従うとき, 期待最大効用はログサムで表される. 前節で導入した走行継続確率  $\rho$  を将来価値の重みとして用いると, 価値関数は

$$V(k) = \log \left( \sum_{a \in A(k)} \exp \{ v(a | k) + \rho_{j(a)} \beta V(a) \} \right), \quad k \notin P. \quad (8)$$

で与えられる. 終端ノード  $p \in P$  では  $V(p) = 0$  とする. 一般形では  $\mu \log \sum \exp \{ \cdot / \mu \}$  となるが, 本研究では後述のとおり  $\mu = 1$  とする.

リンク選択確率は, 式 (7) と式 (8) に基づき

$$P(a | k) = \frac{\exp \left\{ \frac{1}{\mu} (v(a | k) + \rho_{j(a)} \beta V(a)) \right\}}{\sum_{b \in A(k)} \exp \left\{ \frac{1}{\mu} (v(b | k) + \rho_{j(b)} \beta V(b)) \right\}} \quad (9)$$

となる. ここで  $\rho_{j(a)}$  は走行継続確率であり,  $j(a)$  が駐輪場ノードである場合には前節の駐輪場確率  $P_n(k | d)$  (式 (5)) を用いて  $\rho_{j(a)} = 1 - P_n(k | d)$  (式 (6)) とし, それ以外のノードでは  $\rho_{j(a)} = 1$  とする. 駐輪魅力度が高い地点に近づくほどその期に走行を終了する誘因が高まり, 継続価値の重み付けが内生的に調整される.

観測系列  $(k_{r,t}, a_{r,t})$  に基づく経路対数尤度は

$$\mathcal{L}_{\text{path}}(\theta) = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{T_r} \log P(a_{r,t} | k_{r,t}) \quad (10)$$

で与えられる. 本研究では, パラメータ推定の際の識別の問題を回避するため  $\beta = 0.99$ ,  $\mu = 1$  に固定する.

## 4. 実証分析

### (1) データの概要

実証分析では, 筑波大学第三エリアを主に利用する学生を対象に, 2025年6月12日から7月3日に調査・収集したGPS軌跡データを用いる. なお, 本調査は筑波大学のシステム情報系研究倫理委員会の承認を得て, 実施された.

第三エリアは自転車の駐輪台数が非常に多いことを特徴とする. 図-3は, 2025年6月2日から6月6日までの平日5日間に, 1日あたり6時点で, 第三エリア周辺 (約3.5ha) の駐輪場27箇所 (最大駐輪可能台数: 約1800台) における駐輪台数を集計した結果である (3日は雨天のため除外). 1限開始前 (8:00頃) には約300台であるのに対し, ピーク時には1,500台を超え, 授業時間帯に応じて駐輪台数が大きく変動していることが読み取れる.

図-4に分析対象エリアを示す. ネットワークはノード数67, リンク数80, 駐輪場数27で形成する. 取得したGPS点列をマップマッチングによりキャンパス内ネットワークのリンク上へ投影し, 各トリップのリンク遷移系列を抽出して分析に使用する. 併行して実施したダイアリー調査に基づき, 各トリップで利用した駐輪場と大学への到着時刻を特定した. 前処理として第三エリアを利用していない, GPSの精度が悪くリンクを識別できないといった観測を除外し, 最終的に37名分のトリップ数56, リンク遷移回数504のデータを用いて分析を進める.

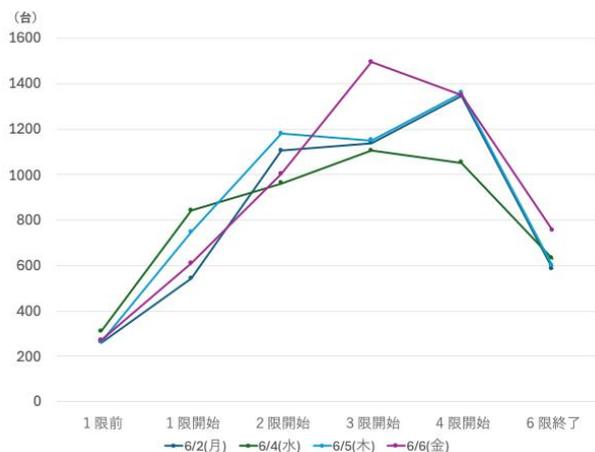


図-3 時間帯別の第三エリア 駐輪台数の変化



図-4 分析対象範囲

## (2) 駐輪場選択

本研究における駐輪場効用は、入り口までの距離、収容台数、駐輪場混雑率、屋根比率、ラック比率、1階ダミーを説明変数とする。入り口までの距離は、候補駐輪場から目的建物の入口までのマンハッタン距離を算出して用いた。収容可能台数は各駐輪場の有効幅を実測し、1台あたり0.5mとして計算した台数を基本とし、ラックが設置されている場合はラック本数を収容台数とした。屋根比率は当該駐輪場における屋根付き区画の割合、ラック比率はラック設置区画の割合をそれぞれ投入した。1階ダミーは、当該駐輪場が地上1階に設置されている場合に1、2階に設置されている場合に0とした。なお、第三エリア周辺は高低差があるため、2階から直接校舎に入ることが可能な場所が複数あり、2階にも駐輪場が設置されている。混雑率は、駐輪台数調査で取得した1週間分の台数記録から6つの時間帯（1限開始前、1限開始後、2限開始後、3限開始後、4限開始後、6限終了後）ごとに各駐輪場の占有率を算出し、ダイアリー調査における各個人の大学到着時刻に最も近い時間帯の値を当該個人・駐輪場に対応づけて用いる。具体的には、駐輪場 $k$ の推定収容台数を $C_k$ 、該当時間帯 $t$ の観測台数を $N_{k,t}$ とし、混雑率を $occ_{k,t} = N_{k,t}/C_k$ と定義する。

候補駐輪場からの駐輪場選択をMNLモデルで最尤推定した結果を表-1に示す。駐輪場から建物の入口までの距離は負、収容台数は正、混雑率は負でいずれも有意となり、駐輪後の徒歩での移動距離が短いこと、駐輪場の規模が大きいいこと、駐輪場の混雑がみられないことが駐輪場選択に影響している。このパラメータ推定結果を走行継続確率 $\rho$ の算出に用いる。

表-1 パラメータ推定結果（駐輪場）

| 変数           | 推定値    | t 値     |
|--------------|--------|---------|
| 入口までの距離      | -5.422 | -18.40* |
| 収容台数         | 1.044  | 8.13*   |
| ラック比率        | -0.266 | -0.45   |
| 1階ダミー        | -0.141 | -0.35   |
| 混雑率          | -0.559 | -2.42*  |
| サンプル数        |        | 56      |
| 初期対数尤度       |        | -186.6  |
| 最終対数尤度       |        | -139.4  |
| $\rho^2$ 値   |        | 0.253   |
| 修正済 $\rho^2$ |        | 0.221   |

注：\* は5%有意。

## (3) 経路選択

経路選択におけるリンク効用は、距離、道幅、加速度、坂ダミー、ターンダミーの5種類の説明変数で構成する。距離はリンク長である。道幅は幅員5m以下となる区間は測定した具体の数値を用い、5m以上の区間は5mとする。加速度は路面の凹凸を表しており、自転車に加速度計を取り付けて全リンクを走行した実験から得た計測値を用い、各リンクで観測された加速度の平均値を用いる。坂ダミーは学内の大きな傾斜区間に該当するリンクに1、それ以外に0を与えた。右左折に関する情報は一つに統合したターンダミーとして扱い、上流リンクと下流リンクのなす角が右折域（22.5～157.5度）または左折域（185～337.5度）のいずれかに該当する場合に1、直進域に該当する場合に0とした。角度域の設定は岡ら(2018)<sup>10</sup>の定義に準拠した。

推定には、距離・加速度・ターンダミー・坂ダミーの4変数を用いた。道幅は加速度と共線性が見られたため除外した。MNL、RL、および走行継続確率 $\rho$ を考慮したRLの結果を表-2に示す。比較は同一サンプル（ $N = 504$ ）と初期対数尤度 $L_0 = -544.4$ を基準に行い、最終対数尤度とMcFaddenの $\rho^2$ を評価指標とした。その結果、MNLは $LL = -459.8$ 、 $\rho^2 = 0.155$ 、RLは $LL = -411.9$ 、 $\rho^2 = 0.243$ となり、 $\rho + RL$ は $LL = -148.0$ 、 $\rho^2 = 0.728$ とモデル精度が大きく改善した。

2つのモデルの対数尤度を $LL_a$ および $LL_b$ とし、統計量 $2\Delta LL = 2(LL_a - LL_b)$ を用いて尤度比検定を行った。 $\rho + RL$ とRLの比較の統計量は527.8、 $\rho + RL$ とMNLの比較の統計量は623.6であった。いずれも $p < 0.001$ で統計的に有意であった。

これらの結果から、リンク遷移の逐次選択を明示化し、走行中の「駐輪場の通過（走行継続）」を $\rho$ で取り込む提案モデルが観測行動の説明力を大幅に高めてい

表-2 パラメータ推定結果 (経路)

| 変数             | MNL    |        | RL     |        | $\rho + \text{RL}$ |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|
|                | 推定値    | t 値    | 推定値    | t 値    | 推定値                | t 値    |
| 距離             | -0.165 | -2.23* | -0.491 | -9.16* | -0.732             | -9.32* |
| 加速度            | 0.611  | 7.37*  | -0.059 | -3.20* | -0.278             | -7.27* |
| ターンダミー         | -0.002 | -0.02  | -0.240 | -2.43* | -0.167             | -1.47  |
| 坂ダミー           | 0.388  | 7.21*  | 0.255  | 4.80*  | 0.000              | -0.01  |
| サンプル数          | 504    |        | 504    |        | 504                |        |
| 初期対数尤度         | -544.4 |        | -544.4 |        | -544.4             |        |
| 最終対数尤度         | -459.8 |        | -411.9 |        | -148.0             |        |
| $\rho^2$ 値     | 0.155  |        | 0.243  |        | 0.728              |        |
| 修正済 $\rho^2$ 値 | 0.148  |        | 0.236  |        | 0.721              |        |

注：\* は 5 % 有意

ることが確認できる。

続いてパラメータの係数の符号と有意性を整理する。距離は 3 モデルすべてで負かつ有意であり、距離の増加が選好を一貫して低下させるという直感と一致する。特に RL では係数の絶対値が大きく、逐次選択の枠組みが累積距離の不効用をより鋭敏に反映している。加速度は MNL では正で有意である一方、RL および  $\rho + \text{RL}$  では負で有意となり、凸凹が多いリンクは敬遠される傾向を示した。ターンダミーは MNL では有意でないが RL では負で有意となり、交差点進入に伴う局所的な負担が捉えられている。 $\rho + \text{RL}$  ではこの有意性が弱まり、駐輪の通過・継続選好を同時に扱うことで一部の影響が他要素に吸収された可能性がある。

以上より、走行継続確率  $\rho$  の導入が適合度の観点で大きな寄与をもたらすことが明らかになった。距離の負効果は頑健であり、路面の凹凸の影響の有意性も  $\rho + \text{RL}$  モデルで顕在化した。

## 5. 結論

### (1) 本研究の成果

本研究では、経路選択と駐輪場選択の意思決定を動的離散選択の枠組みに統合し、Recursive Logit (RL) に選択継続確率  $\rho$  を導入することで同一モデル内で同時に記述・推定できることを示した。特に、 $\rho$  を「走行継続 (通過) の確率」として将来価値の重み付けとして内生的に組み込むことにより、駐輪場の魅力が高い地点に近づくほど走行継続の期待価値が減衰する構造を実装した。この結果、候補経路の事前列挙を要しない

RL の利点を保ったまま、駐輪行動を経路選好と一体で扱えるモデルを構築することができた。

実証分析では、筑波大学第三エリアを利用する学生の GPS 軌跡と実際の駐輪台数などを用いてモデル化し、推定適合度の改善を確認した。経路側では、MNL に比べて RL が改善し、さらに走行継続確率  $\rho$  を導入した提案 RL で大きく改善が見られた。特に、 $\rho + \text{RL}$  と RL の比較、同モデルと MNL の比較に対する尤度比検定はいずれも有意であり、走行中の「駐輪場の通過・走行継続」を  $\rho$  で表現することが観測行動の説明力を高めることを示した。経路におけるパラメータでは距離の負効果が一貫して有意であり、逐次選好の文脈では右左折による負担と加減速の負担がより明確に現れた。駐輪側では、建物入口までの距離 (負)、収容可能台数 (正)、混雑率 (負) がいずれも有意であり、徒歩移動の負担の小ささ、駐輪場の規模の大きさ、駐輪場の混雑回避が選好に大きく影響を与えることを示した。

### (2) 今後の展望

大佛ら (2020)<sup>2)</sup> では、キャンパス広場において歩行者の経路・滞留場所・食堂選択の行動シミュレーションを構築している。本研究でも、推定パラメータからリンク選択確率および駐輪場選択確率を算出するシミュレータを構築することで、通行規制や空間変更の複数シナリオの流動予測・比較を可能とすることを旨とする。予測・比較により、快適性と安全性の両立を指向する構内設計指針を提案したい。特に通行規制シナリオでは自転車の手押し走行を想定している場所もあるため、説明変数として自転車の走行速度を導入することを検

討する。また、2025年10月の社会実験期間中に今回同様の調査を行い、その調査結果と6月期の本推定結果と比較することで、汎用性のあるパラメータが得られたかを検証したい。

**謝辞：** 本研究における調査の実施にあたって、筑波大学の藤井さやか教授、雨宮護准教授、山本幸子准教授の助言を受けた。また、本研究成果の一部は、鹿島建設との共同研究「教育研究環境の改善に向けた、第三エリアを中心としたキャンパス空間の再構築に関する研究」、筑波大学ヒューマン・スマートシティ研究機構、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR222Y の支援を受けたものである。ここに感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 国土交通省都市局 都市計画課都市計画調査室: スマート・プランニング実践の手引き ~個人単位の行動データに基づく新たなまちづくり~, 国土交通省, 東京, 第二版(平成30年9月)。
- 2) 大佛俊泰, 山田百合子, and 金子弘幸: 大学キャンパス広場での行動モニタリング調査に基づく歩行者行動特性, 日本建築学会計画系論文集, Vol.85, No.778, pp.2591-2599, 2020.
- 3) 渡辺義則, 角知憲, 清田勝, and 秦裕二郎: 自転車で通学する高校生を対象としての自転車利用者の経路選択モデルに関する基礎研究, 土木学会論文集, No.618/IV-43, pp.27-37, 1999.
- 4) 渡辺義則, 緒方剛, 清田勝, 角知憲, and 小佐々昌典: 自転車で通学する高校生の経路選択モデルを用いての自転車道路の整備に関する考察, 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.171-176, 2002.
- 5) 福山祥代 and 羽藤英二: ネットワーク上の空間計画に向けた観測と行動モデルの展開, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I.1-I.19, 2015.
- 6) Fosgerau, M., Frejinger, E., and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.56, pp.70-80, 2013.
- 7) Kohlrautz, D. and Kuhnimhof, T.: Planning for bicycle parking: Predicting demand using stated preference and count data, *Journal of Cycling and Micromobility Research*, Vol.2, pp.100011, 2024.
- 8) Rust, J.: Dynamic programming, Entry for consideration by the New Palgrave Dictionary of Economics (draft dated April 5, 2006), April 2006.
- 9) Urata, J., Xu, Z., Ke, J., Yin, Y., Wu, G., Yang, H., and Ye, J.: Learning ride-sourcing drivers' customer-searching behavior: A dynamic discrete choice approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.130, pp.103293, 2021.
- 10) 岡英紀, 力石真, 田名部淳, 福田大輔, and 大口敬: 車種及び距離帯を考慮した貨物車経路選択行動のモデル分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.57-66, 2018.

## MODELLING OF ROUTE AND PARKING CHOICES OF STUDENT BICYCLE ON A UNIVERSITY CAMPUS

Tomoka UESUGI and Junji URATA

To remain a university of choice even in an era of declining birthrates, campus renewal projects are underway nationwide. With many university students commuting by bicycle, these renovations necessitate the reorganization of bicycle parking facilities and cycling routes. To ensure effective improvements while prioritizing student convenience, it is desirable to predict student travel paths and parking location choices, thereby creating spaces that align with student preferences. This study constructs a route and parking lot selection model for prediction. Assuming that students dynamically choose routes and parking lots while checking availability within university campuses—where parking lot density is high and many bicycles are parked—this study employs a dynamic discrete choice model. Bicycle parking lot selection is incorporated as the continuation probability in the dynamic discrete choice model, introducing a simultaneous choice structure. Model validation is performed using GPS-based behavioral trajectory data collected on campus.