

再帰ロジット型交通行動モデルを用いたサブスクリプション型 MaaS の評価に関する基礎的研究 Fundamental Study on the Evaluation of Subscription-based MaaS by Using Recursive Logit Travel Choice Model

田淵景子*, 福田大輔**

Keiko Tabuchi* and Daisuke Fukuda**

This study proposed an evaluation method of the settings of a subscription-based MaaS (Mobility as a Service) by using the recursive logit (RL) travel choice model. The proposed framework enables to compute the maximum tolerable fixed price for a given MaaS setting consistent with travel behavior theory. In order to examine the proposed framework, we analyzed traveler behavior by using the latest large-scale travel survey data in Tokyo Metropolitan Area. We estimated a multimodal travel choice model under the RL framework with reasonable parameter estimates. Finally, we demonstrated the evaluation framework by applying it to one sub-region in the Tokyo Metropolitan Area and confirmed that it provides reasonable outputs in terms of the level of the derived fare settings for the pre-determined MaaS settings.

Keywords: MaaS, recursive logit model, transportation behavior model, multimodal, subscription

Mobility as a Service, 再帰ロジットモデル, 交通行動分析, マルチモーダル, サブスクリプション

1. 研究の背景と目的

現在の日本の主要都市圏では都市内交通手段のネットワーク整備が進み、一つのトリップでも複数の交通手段の組合せを用いることが利用可能となっている。複数交通手段の組合せ利用が人々にとってどの程度の利便性をもたらすのかを評価することは、交通ネットワーク自体が概成した現状では重要な視点になると考えられる。こうした状況において、人々の移動の利便性をさらに向上させるために、今ある交通インフラをより便利に利用できるような仕組みの開発が進められている。近年、自動運転車やシェアサイクルなど様々な新モビリティサービスの導入が検討されているが、その中でも MaaS (Mobility as a Service) はモビリティ界の革命的な新サービスとして注目を浴びている。

MaaS は、ICT を活用して複数の交通サービスを統合し、マイカー以外の公共交通、シェアサイクル、タクシーなどの交通手段を束ね一つのサービスとして捉えた上で、統合した情報や料金体系を提供するサービスである。藤垣ら¹⁾によると、近年登場した統合モビリティサービスは、道路を走る自動車を使用した公共交通の統合を目指すもの(旅客自動車輸送型)、その他の鉄道やカーシェアリング、自転車シェアリングも含むもの(統合型)に大別される。MaaS はそのうち統合型に分類され、公共交通に加えてシェアカーやシェアサイクルを含めた幅広い交通移動サービスを一つのアプリケーションで利用できるサービスと位置づけられる。フィンランドでは 2016 年に *whim*²⁾ というアプリによる MaaS サービスが開始されている。日本でも小田急電鉄³⁾ やトヨタ自動車⁴⁾ が MaaS の導入を検討しており、既に小田急電鉄は *Emot* というアプリを用いたサービスを 2019 年に開始している。

MaaS の主要な特徴の一つとして運賃支払いの統合が挙

げられ、それが実現しているサービスはサブスクリプション型 MaaS とも呼ばれる。日高⁵⁾によると、MaaS には 5 段階のレベルがあり、そのうちレベル 3 が予約や決済ができるだけでなく、包括した一体的な利用料金体系を持つシームレスなモビリティサービスが実現される段階である。例えば月額制で都市内の“乗り放題サービス”が提供される段階はレベル 3 に相当する。我が国においても、このレベル 3 にあたる情報の統合に加えて料金体系を統合した段階の MaaS が今後導入されることが期待される。村井ら⁶⁾ は滋賀県大津湖南地域の路線バス利用大学生を対象として MaaS のサブスクリプション型運賃制度に関する SP 調査や社会実験を実施し、利用者のバス利用頻度の増加や多様な目的を伴うバス利用行動がとられるようになる可能性があることを示している。本研究ではレベル 3 のサブスクリプション型 MaaS、すなわち、定額を支払うことで当該エリア内の交通サービスが乗り放題になるサービスに着目する。

サブスクリプション型 MaaS を効果的に都市圏内に導入するためには、その定額料金とサービスの利用可能範囲の適切な組合せについての適切な評価が必要である。MaaS は多様な移動手段を自由に組み合わせ、より柔軟なマルチモーダル経路選択の機会を利用者に与えるサービスである。このようなサービスの導入による利便性の変化を評価するためには、複数の交通手段と複数の経路を同時に選択する、マルチモーダル交通行動モデルが必要である。交通行動モデルを用いたサブスクリプション型 MaaS に関する研究事例は、筆者らの知る限り見られない。

そこで本研究では、経路選択枝の列挙を必要としない交通行動モデルである再帰ロジット (Recursive Logit (RL)) タイプの交通行動モデルを用いて、サブスクリプション MaaS 導入を評価するための枠組みの提案と実データを用いた検

* 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院土木・環境工学系修士課程 (Tokyo Institute of Technology)

** 正会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (The University of Tokyo)

討を行う。藤垣ら⁷⁾は、想定される利用者層を整理した上で具体的なサービスにおける需要特性を分析し、運転に対して不安がある人や駅から自宅が遠い人、自宅周辺の移動が多い人などがサービスを利用したい傾向にあることを示した。これを受け、本研究のケース・スタディでも、都市圏において駅から自宅が遠い人が多く住む地域を対象に MaaS の導入評価のシミュレーションを実施する。以上を通じて、サブスクリプション型 MaaS の導入範囲と定額料金水準設定に関する基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 再帰ロジット交通行動モデルを用いた MaaS 評価

2.1 既往研究

Fosgerau et al.⁸⁾は、経路選択枝の列挙の必要がない新たな経路選択モデルである RL モデルを提案した(次の 2.2 において、Fosgerau et al. を参考に RL モデルの定式化を行う)。

RL モデルをマルチモーダル経路選択に適用した既往研究として、de Freitas et al.⁹⁾によるスイス・チューリッヒ都市圏における分析が挙げられる。de Freitas et al. では、自動車、トラム、バス、徒歩等を同時に考慮したマルチモーダルネットワーク上における経路選択行動を RL モデルを用いて記述し、実データを用いてパラメータ推定を行った。交通手段毎に異なるパラメータを設定して推定した結果、公共交通の運行間隔は交通の意思決定に大きな影響を与えないこと、乗り換え時間の長さは乗車時間の長さよりも大きな影響を与えることなどを明らかにした。

2.2 モデルの定式化

RL モデルはリンクベースで意思決定者が選択を繰り返す行動モデルであり、幾つかのノードとリンクで構成されたネットワークを考える。再帰的にロジット型選択(リンク選択)を繰り返すことで、経路選択枝を列挙する必要なく効用関数のパラメータ推定を行うことができる。

全体のマルチモーダルネットワークからその一部を取り出した図1のような状況を例に考える。図1において、 k, a, d はそれぞれリンクラベルを、 O は出発地のノードを、 D は目的地のノードをそれぞれ表す。現在リンク k の状態にいる意思決定者は「状態 k のもとで次のリンク a (アクション) を選択する際に得られる効用」と「選択した状態 a から目的地 d までの累積の期待効用」の和が最大となるように状態を選択するものと仮定する。その際のリンク選択枝集合を $A(k)$ とする。このとき、意思決定者 n が状態

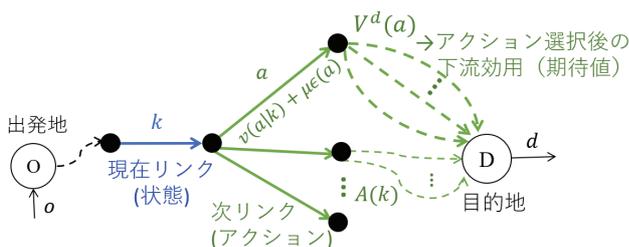


図1 RLモデルのネットワーク構造

k のもとで次のリンク a を選択する効用は式(1)のように表される。

$$u_n(a|k) = v_n(a|k) + \mu\epsilon_n(a) + V_n^d(a) \quad (1)$$

ここで $v_n(a|k) + \mu\epsilon_n(a)$ は現在の状態 k から次の状態 a を選択する際に得られる効用(即時効用)を、 $V_n^d(a)$ は選択した状態 a から目的地 d までの期待効用(価値関数)を、 ϵ はガンベル分布に従う誤差項をそれぞれ表す。なお、スケールパラメータ μ は予め1に基準化してある。

RL モデルは逐次的にリンク選択を繰り返す動的計画問題として解釈することができ、動的計画問題における価値関数は Bellman 方程式の形で式(2)のように表される。

$$V_n^d(k) = E \left[\max_{a \in A(k)} \left(v_n(a|k) + \mu\epsilon_n(a) + V_n^d(a) \right) \right] \quad (2)$$

さらに、ガンベル分布に従う誤差項 ϵ の最大値の期待値がログサム変数になることから、価値関数は式(3)のように特定化される。

$$V_n^d(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a|k) + V_n^d(a))} & \forall k \in A \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 A は全リンク集合を表す。また、 $\delta(a|k)$ は $a \in A(k)$ のとき1、それ以外るとき0となるダミー変数である。

この価値関数を変形すると式(4)を得ることができる。

$$e^{\frac{1}{\mu} V_n^d(k)} = \begin{cases} \sum_{a \in A} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a|k) + V_n^d(a))} & \forall k \in A \\ 1 & k = d \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{where } \delta(a|k) = \begin{cases} 1 & a \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

本研究では、交通手段選択と経路選択を同時に決定するマルチモーダル交通行動モデルを構築する。そのため、ネットワークのリンクは交通手段毎に分けて定めることとする。図1のネットワークを交通手段も考慮できるよう書き換えると図2のようになる。例えば、自宅から駅までの経路は図2のように①徒歩で向かう場合、②自転車で向かう場合、③バスで向かう場合の3つの交通手段が選択できる

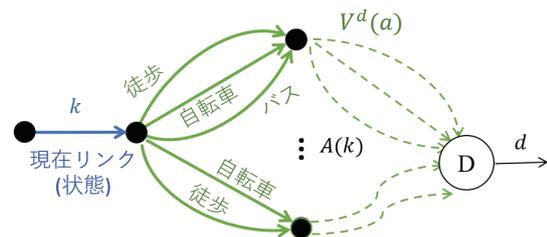


図2 マルチモーダルを考慮した RL ネットワーク

と仮定する。このとき、同じノード間を結んでいるが交通手段毎にリンクの効用が異なるため、別々のリンクを定める必要がある。このとき、自宅ノードから鉄道駅ノードを結ぶリンクは3つあり、図2のように同じノード間を3つのリンクで結ぶネットワークとして表すことができる。同様に、自宅ノードとバス停ノードを結ぶリンクも図2のように複数のリンクを考える。図2の例ではアクセス部分について述べたが、イグレス部分についても同様にマルチモーダルな経路選択を考えて同様のネットワークを構築する。

2.3 モデルのパラメータ推定

RL モデルの即時効用 v_n は、交通サービス水準変数等を用いて通常のロジットモデルのように特定化することができる。実証分析では、式(5)のように特定化している。

$$v_n(k) = \beta_1 \times Walk_{Time_n}^k + \beta_2 \times Bicy_{Time_n}^k + \beta_3 \times Rail_{Time_n}^k + \beta_4 \times Bus_{Time_n}^k + \beta_{cost} \times Cost_n^k \quad (5)$$

ここで、 $Walk_{Time_n}^k$ 、 $Bicy_{Time_n}^k$ 、 $Rail_{Time_n}^k$ 、 $Bus_{Time_n}^k$ はそれぞれ、利用者 n のリンク k における徒歩、自転車、鉄道、バスの移動時間を表す。また、 $Cost_n^k$ は利用者 n のリンク k における移動費用を表す。また、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_{cost} はそれぞれのパラメータである。

パラメータ推定を行うにあたってはRLモデルを行列形式で表現することが便利である。詳細はFosgerau et al.⁸⁾を参照されたいが、 \mathbf{M} を即時効用を束ねた行列、 \mathbf{b} を目的地ダミーを示すベクトル、 \mathbf{z} を価値関数(の指数変換値)のベクトルとしてそれぞれ次のように定義する。

$$\mathbf{M} = \begin{cases} \delta(a|k)e^{\frac{1}{\mu}v_n(a|k)} & a \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$= \begin{cases} e^{\frac{1}{\mu}v_n(a|k)} & a \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mathbf{b} = \begin{cases} 0 & k \neq d \\ 1 & k = d \end{cases}$$

$$\mathbf{z} = \{z_k\} \text{ where } z_k = e^{\frac{1}{\mu}V(k)}$$

このとき、次の関係が成り立ち、この式の $(\mathbf{I} - \mathbf{M})$ が逆行列を持つことが、価値観数が得られる条件となる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{Mz} + \mathbf{b} \Leftrightarrow (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (7)$$

一方、リンク選択確率を書き改めると次式のようになる。

$$P_n(a|k) = \frac{\delta(a|k)e^{\frac{1}{\mu}v_n(a|k)} e^{\frac{1}{\mu}V^d(a)}}{\sum_{a' \in A} \delta(a'|k)e^{\frac{1}{\mu}v_n(a'|k)} e^{\frac{1}{\mu}V^d(a')}} \quad (8)$$

$$= \frac{M_{k_a z_a}}{\sum_{a' \in A} M_{k_{a'} z_{a'}}$$

さらに、ある状態 k から各リンクを選ぶ確率を束ねてベクトル表記するため、行列 \mathbf{M} の k 行ベクトル \mathbf{M}_k を用いると、リンク選択確率を束ねたベクトル \mathbf{P}_k は、

$$\mathbf{P}_k = \frac{\mathbf{M}_k \circ \mathbf{z}^T}{\mathbf{M}_k \mathbf{z}} \quad (9)$$

と表わされる。ここで、 \circ は2つの行ベクトルの要素毎の積によって得られる行ベクトルを表す。

以上を踏まえ、全ての状態(リンク)をまとめると、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{P} = (\mathbf{P}_0, \dots, \mathbf{P}_k, \dots, \mathbf{P}_{|A|})^T \quad (10)$$

パラメータは最尤推定法により推定する。

個人 $n = 1 \dots N$ が実際に選択したモードチェインデータを σ_n と表すと、対数尤度関数は次式で表される。

$$\max_{\beta} LL = \ln \prod_{n=1}^N P(\sigma_n; \beta) = \sum_{n=1}^N \ln P(\sigma_n; \beta)$$

$$= \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N \left\{ \left[\sum_{i=0}^{I_n-1} v(k_{i+1}^n | k_i^n) \right] - V(k_0^n) \right\}$$

$$= \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N \{v(\sigma_n; \beta) - V(k_0^n; \beta)\} \quad (11)$$

ここで $V(k_0^n; \beta)$ は、起点における下流効用である。

2.4 サブスクリプション型MaaS定額料金の評価

構築したRLモデルを用いて、マルチモーダルネットワークにおけるサブスクリプション型MaaS導入の評価を行う手順について述べる。この評価は、サブスクリプション型MaaS導入の適切な空間範囲とその定額料金水準の関係を明らかにすることを目的としている。

MaaSの導入により、当該エリアにおける各交通手段を利用する毎に料金を支払わなくて済むようになり、その代わりに予め定められた定額料金を一括して支払うことが利用者には求められることとなる。そこで、「MaaS導入前後において利用者の満足度が最低でも現状の水準を維持しなければならなかったときに、最大でどれ位の定額料金の支払いまでを利用者は許容するのか」という観点から評価を行う。つまり、「ある特定のODペアにおけるトリップを対象としたときに、移動費用や移動時間を総合した利用者の総満足度(RLモデルの起点下流効用により規定)が、定額MaaSが導入されることによって導入前よりも大きくなるかせいぜい等しいならば、そのMaaSが実際に利用される(つまり利用者がそのサービスを購入する)」という仮説に立脚してサブスクリプション型MaaS定額料金の評価を行う。

評価のためのシミュレーションは以下の手順で行う。

- ① 実際のネットワークをリンクとノードで表す
- ② 構築した再帰ロジットモデルを用いて、MaaS導入

前の段階におけるある特定の OD ペア間の利用者の満足度を算出する

- ③ MaaS を導入するネットワーク範囲を決定する
- ④ ③の MaaS 導入範囲内に存在する交通手段の各リンクに付与された移動費用を 0 円に設定する
- ⑤ ④のネットワークのもとで再帰ロジットモデルを用い、②と同様の OD ペア間における MaaS 導入後の利用者のグロスの満足度を算出する。
- ⑥ ⑤で導出した MaaS 導入後の利用者の満足度水準が、②で算出した MaaS 導入前の利用者の満足度水準と等しいかそれよりも大きくなるような、MaaS 定額料金の上限を算出する。

以上の手順について式等を用いて詳細を説明する。まず、手順②の満足度の算出方法では、最初にパラメータ推定結果を用いて即時効用関数(式(4))を特定化する。RL モデルにおいて、交通行動全体に対する利用者の満足度は、出発地点(起点)における下流効用を用いて表すことができる。すなわち RL モデルにおける起点下流効用は、標準的な多項ロジットモデルのログサム変数に相当するものである¹⁰⁾。これを求めるために、式(7)を変形して得られる次の行列式(12)を解くことで、下流効用が計算される。

$$z = (I - M)^{-1}b \quad (12)$$

以上により計算された MaaS 導入前の場合の出発地点における下流効用を $V_0^{without}$ と表す。これが MaaS 導入前の利用者の満足度を表す。

次に、手順④の MaaS 導入後のリンクの移動費用の設定について説明する。MaaS 導入後について、MaaS 導入範囲内の即時効用は次の式(13)で計算される。導入前の即時効用の式とは異なり、MaaS 導入範囲内は利用あたりの費用がかからない(その代わりに別途定額料金が課される)設定となるため、ここでは便宜的に $Cost_n(k) = 0$ と設定する、すなわち、

$$v_n(k) = \hat{\beta}_1 \times Walk_{Time_n}^k + \hat{\beta}_2 \times Bicy_{Time_n}^k + \hat{\beta}_3 \times Rail_{Time_n}^k + \hat{\beta}_4 \times Bus_{Time_n}^k + \hat{\beta}_{cost} \times 0 \quad (13)$$

によって部分効用値を求める。

その上で MaaS 導入後の利用者の満足度も②と同様にして計算し、求められた下流効用を V_0^{with} とする。(手順⑤)

ここまでで算出した利用者の MaaS 導入前後の満足度の値を用いて手順⑥を行う。これは、MaaS 導入後の利用者の満足度水準が MaaS 導入前の利用者の満足度水準と等しいかそれよりも大きくなるような MaaS 定額料金の上限を算出するものである。まず、 V_0^{with} は MaaS 導入後のネットワーク上の移動による満足度を表しており、これから MaaS 定額料金を支払う分の効用を引いたものが、MaaS 利用者の MaaS 定額料金の支払いを含めた満足度となる。つまり、

対象とする OD ペアにおける移動(トリップ)に対する MaaS 定額料金を $FixedFare_0$ とすると、MaaS 導入後の正味の満足度は、

$$V_0^{with} - FixedFare_0 \times |\hat{\beta}_{cost}| \quad (14)$$

で表される。ここで、 $\hat{\beta}_{cost}$ は移動コストのパラメータ推定値(費用の限界効用に相当)であり、本研究では、RL モデルから得られた費用パラメータをそのまま用いている点に留意されたい。

このとき、ある特定の OD ペアにおいて、MaaS 導入後の満足度が MaaS 導入前の満足度よりも大きいか少なくとも等しくなるためには、(14)式で表される MaaS 導入後の正味の満足度が、MaaS 導入前の満足度 $V_0^{without}$ よりも大きいか少なくとも等しくなければならない。すなわち、 $FixedFare_0$ は次の式(15)を満たさなければならない。

$$V_0^{without} \leq V_0^{with} - FixedFare_0 \times |\hat{\beta}_{cost}| \quad (15)$$

これにより、ある特定の OD ペアにおけるトリップにおいて利用者がサブスクリプション型 MaaS を購入すると考えられる定額料金上限値(許容定額料金)を求める。

3. ケース・スタディ

3.1 東京都市圏パーソントリップ調査を用いた基礎分析

本研究では、東京都市圏居住者のマルチモーダル交通選択モデルを構築する。それに先立ち、最新の大規模交通調査である H30 東京都市圏パーソントリップ調査(PT 調査)を用いて、この地域に住む人が現在どのような移動を行っているのかの基礎データ分析を行う。

基礎分析に用いるデータは、H30 東京都市圏パーソントリップ調査のうち、以下の条件を満たすものをマスターデータより抽出し、拡大をして集計を行った。

- ・ ツアー内の全トリップは東京都市圏内で完結しており、都市圏外には出ないもの。
- ・ 一日のアクティビティパターンの開始時滞在ゾーンと終了時滞在ゾーンが同一の計画基本ゾーンであるもの(自宅発・自宅着のアクティビティを想定)。
- ・ 一日以内に全アクティビティが終了しているもの。

東京都市圏に住む人々の一日の行動を分析した結果を図 3 に示す。東京都市圏全体で見ると、半数以上の人(全体の 69.3%) は一日に一ツアーのみを行っていることがわかる。また、寄り道(3 つ以上のトリップチェーン)をする人も少ないことがわかる。全体の約半分は自宅との単純な通勤先との往復(約 1,046 万人, 38%) または通学先との往復(約 138.7 万人, 14%) の移動であり、それ以外も一つのトリップに異なる複数の活動目的を含まない単純なアクティビティパターンをとっている。なお、図 3 には記載していないものの、下位には、通勤先からの帰宅途中で買い物をするなどの寄り道を行うアクティビティパターン、学校から一度家に帰った後に私用で出かけるなどのサブツアーを行うアクティビティパターン(つまり一日の活動が 3 つ以

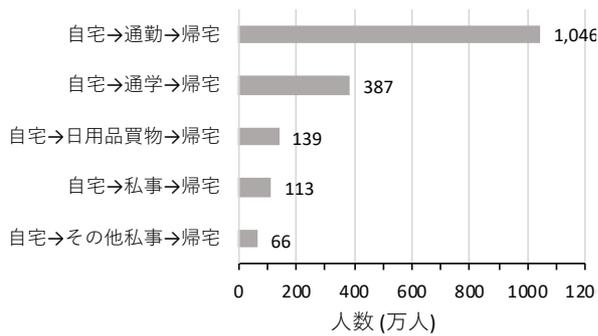


図3 主要アクティビティパターン (上位5位)

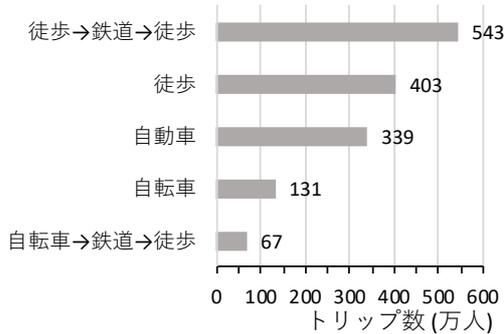


図4 主要モードチェーン (上位5位)

上存在するアクティビティパターン)なども含まれており、それらは全体の約15%程度存在している。

次に、都市圏に住む人々がどのように交通手段を組み合わせるのか(モードチェーン)を集計した結果を図4に示す。都市圏において最も多いモードチェーンは「徒歩→鉄道→徒歩」であり、次いで「徒歩のみ」、「自動車のみ」の順であった。このように、比較的単純なモードチェーンが多数を占める結果となったものの、下位にも「徒歩→バス→鉄道→徒歩」のようにバスと鉄道を組み合わせる移動している人も一定数存在していた。

なお、一つ目のトリップの出発時刻の分布を調べたところ、最も多かった出発時刻は午前7時台であり、次いで午前8時台、午前6時台の順に多くなった。また、一番目トリップの出発時刻の全体に占める午前出発の割合は、全体の約85%であった。

3.2 マルチモーダルネットワークの構築

本研究ではPT調査の計画基本ゾーンレベルの区画にエリアを分割し、それぞれのゾーンを一つのノードと捉える。そして任意の2つのゾーン間の異なる交通手段による移動行為をリンクとみなす。交通手段選択と経路選択を同時に行うことを考慮するため、図2に表すマルチモーダルを表現したネットワーク例のように、あるノードからあるノードまで結ぶリンクは一つではなく交通手段別に複数個考えたネットワークを作成してリンク属性変数(所要時間や費用等)を定めた。

表1 RLモデルのパラメータ推定結果

説明変数	推定値	t値
$Walk_{Time}$ (分)	-0.146	-367.7
$Bicy_{Time}$ (分)	-0.149	-60.51
$Rail_{Time}$ (分)	-0.036	-94.00
Bus_{Time} (分)	-0.045	-103.0
$Cost$ (円)	-0.0070	-119.3
最大対数尤度	-459,500	
サンプルサイズ	41,719	

3.3 モデルのパラメータ推定結果

H30 東京都市圏パーソントリップ調査を用いた推定結果を表1に示す。午前8時にトリップを開始している41,719のトリップをマスターデータから抽出し、リンク数31,437、目的地ノード数41,719の大規模マルチモーダルネットワークを対象にパラメータ推定を行った。移動時間については、徒歩、バス、鉄道はGoogleマップより算出される午前8時に出発する場合の移動時間を、自転車は時速15kmとして算出した移動時間を設定している。移動費用に関しては、徒歩:0円、自転車:一回あたり駐輪料金、バス・鉄道:大人の普通乗車料金を設定している。

モデルのパラメータは当初の想定通り全て有意なマイナスの値となっており、利用者は移動時間が短い経路や移動コストが安い経路を好む傾向にあることが確認された。また、交通手段毎の移動時間に関するパラメータを比較すると、その絶対値は自転車、徒歩、バス、鉄道の順に大きくなった。すなわち、単位移動時間の長さに関する抵抗は自転車が一番大きく、鉄道が一番小さいことが示唆された。これに連動して、各交通手段の時間価値を計算すると、時間価値の値は、自転車:21.3円/分、徒歩:16.4円/分、バス:6.43円/分、鉄道:5.14円/分となった。

4. サブスクリプション型MaaS評価のケース・スタディ

4.1 対象地域の概要

ケース・スタディは、図5のように東京都南西部から神奈川県北東部にかけての小田急小田原線と東急田園都市線の並行するエリアを対象として行う。この地域には両路線の駅間を接続する複数のバス路線が存在する。こうした地

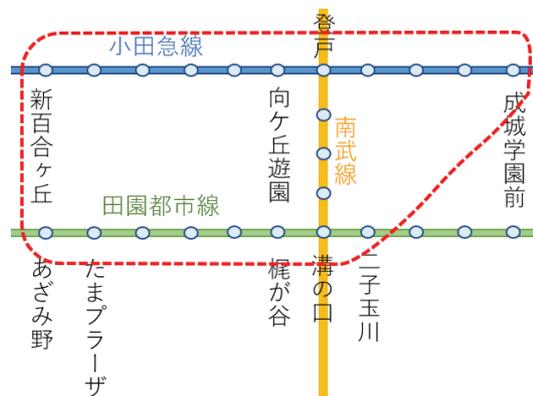


図5 対象エリア

表2 各リンクのLOS変数設定条件 (LOS変数, 交通手段等)

リンク番号 [手段]	1[歩]	2[歩]	3[歩]	4[歩]	5[歩]	6*[自]	7*[自]	8[自]	9*[バ]	11*[バ]
移動時間 (分)	26	13	15	3	2	8	32	1	10	32
移動費用 (円)	0	0	0	0	0	70	70	70	210	220
リンク番号 [手段]	12*[バ]	13*[バ]	14*[バ]	15*[バ]	16*[バ]	17*[バ]	18*[バ]	19*[バ]	21*[バ]	22*[鉄]
移動時間 (分)	30	34	11	9	51	29	30	28	28	8
移動費用 (円)	220	220	220	220	440	210	210	210	220	157
リンク番号 [手段]	23*[鉄]	24*[鉄]	25*[鉄]	26[鉄]	27[鉄]	28[鉄]	29[鉄]	30[鉄]	31[鉄]	32[鉄]
移動時間 (分)	22	11	18	10	12	10	7	5	3	13
移動費用 (円)	346	220	314	157	157	157	157	126	126	199

[] 内の文字は当該リンクの交通手段 ([歩]: 徒歩, [バ]: バス, [鉄]: 鉄道, [自]: 自転車) を表す。

*はシミュレーション(b)においてサブスクリプション型MaaSの対象とするリンクを指す。

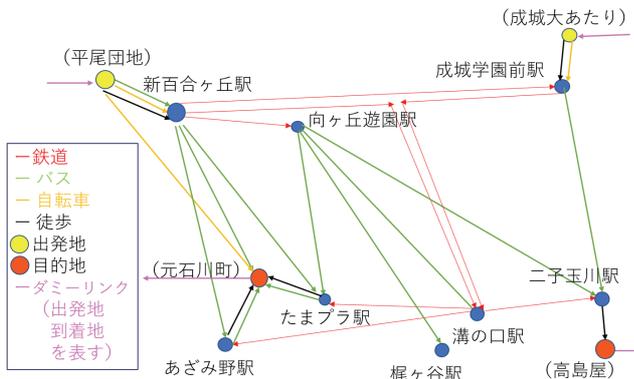


図6 対象地域内交通サービスのネットワーク表現

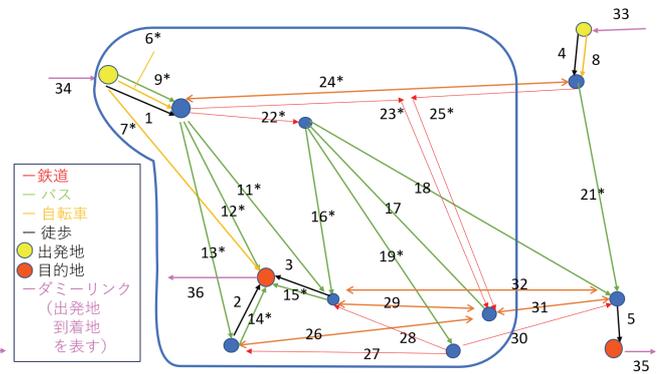


図7 リンク番号とMaaS導入範囲の設定

域では、多様なマルチモーダル経路選択が行われやすく、MaaSを導入による利便性向上も期待されると考えられる。

4.2 シミュレーションの設定条件

シミュレーションは、(a) 対象地域内にMaaSを導入する場合、(b) 特定の交通事業者の運営するサービスのみにMaaSを導入する場合の二パターンで行う。図6は対象地域内の鉄道、バス、自転車、徒歩利用によるマルチモーダルネットワークをノードとリンクで表したものである。本研究では、出発地と目的地をそれぞれ二つずつ設け、計四つのODペア間のトリップについて評価することとする。また図7は、作成したネットワークにリンク番号を付与したもので、リンク数34、ノード数11となる。各リンクの移動時間と移動費用は表2に示す通りである。ここで、公共交通リンクの設定は、初乗り運賃や乗り換え割引等の料金特性を考慮して柔軟に設定することができる。例えばリンク23*や25*は、登戸駅で小田急線から南武線に乗り換えるルートの一つのリンクでまとめたものであり、その移動費用を設定する際にそうした料金特性を反映させることができる。

以上を踏まえシミュレーションの設定について説明する。まず、シミュレーション(a)は、図5中の赤枠で囲われたエリア内の交通手段がサブスクリプション型MaaSになるという想定で行う(但し、出発地点と到着地点がどちらもMaaS導入範囲内に含まれていない「成城大→高島屋」の

ODペアはシミュレーション対象外とする)。

次に、シミュレーション(b)は、図7および表2中の*で記された特定の交通事業者がサブスクリプション型MaaSになるという想定で行う。これは具体的には、小田急グループの鉄道、バス、平尾団地発の自転車路線がサブスクリプションMaaSとなる状況を想定したものである。

4.3 シミュレーション結果と考察

評価シミュレーションは表1のパラメーター推定結果を用い、2.3に示した方法を適用して行った。その結果を表3に示す。この表には、比較のためMaaS導入前の各ODペア間の移動費用の最小値と最大値も併記されている。

a) 広範エリアにMaaSを導入する場合

まず、図7の青枠内の地域にMaaSを導入する場合(MaaS(a))では、各ODペアの移動者が当該サービスに対して支払っても良いと考える最大定額料金(許容定額料金)は、「平尾団地→元石川町」の場合(656円)が他の二つのODペアの値(平尾団地→高島屋: 578円, 成城大→元石川町: 519円)と比べて高くなった。これは、「平尾団地→元石川町」の場合、出発地と到着地が共にMaaS導入対象地域内に含まれることから、MaaS利用により享受する効用が他のODペアよりも大きいことや、導入前の移動費用自体が高いことが理由であると考えられる。このように、提案する評価手法では、対象とするODペアによるサブスクリブ

表3 サブスクリプション型 MaaS に対する許容定額料金のシミュレーション結果

OD ペア	導入前移動費用 (円/日)	MaaS (a) の許容定額料金 (円/日)	MaaS (b) の許容定額料金 (円/日)
平尾団地 →元石川町	最小 0(自転車) 最大 833(バス→鉄道→バス)	656	461
成城大 →高島屋	最小 220(バス) 最大 510(自転車→鉄道)		
平尾団地 →高島屋	最小 377(鉄道→バス) 最大 682(バス→鉄道)	578	461
成城大 →元石川町	最小 440(鉄道→バス) 最大 761(自転車→鉄道→バス)		
		519	334

ション型 MaaS 導入から享受する効用の多寡を考慮した料金設定の評価を行うことが可能となっていることが確認される。

また、表3には導入前の移動費用の最小値と最大値も記されているが、いずれの OD ペアにおいても、許容定額料金の試算値は最小値と最大値の間に収まる結果となっている。これより、本提案手法によって得られる許容定額料金は直感的にも妥当な範囲に収まることが示唆される。

b) 特定交通事業者グループに MaaS を導入する場合

次に、小田急グループ運営の交通機関（鉄道、バス）と関連自転車リンク（表2中の*印のリンク）に MaaS を導入する場合（MaaS (b)）に関しても、(a) の場合と概ね類似した結果が得られた。但し、(a) に比べて (b) では MaaS 導入範囲が狭められていることから、許容定額料金は (b) の場合の方が小さくなっていることが分かる。また、「成城大→高島屋」と「成城大→元石川町」の OD ペアでは、許容定額料金の算出値は、当該 OD ペア間の移動費用最小値よりも小さい値となっていることも分かる。例えば「成城大→高島屋」の場合、現状では直通バス（運賃 220 円）だけを利用して移動することができるため、MaaS 導入に対する支払い意思が相対的に低くなっているものと考えられる。このように、提案する評価手法は、対象とする OD ペアの特性とサブスクリプション型 MaaS の設定範囲との関係を適切に捉えていると判断される。

5. 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究では、複数のモビリティサービスを定額料金で利用できるサブスクリプション型 MaaS に注目し、交通行動分析の観点からその適切な導入方法～具体的には、サブスクリプション型 MaaS の設定空間範囲とそれに対する利用者の最大許容（定額）料金の関係性を定量的に評価する手法～を構築した。具体的には、再帰ロジット (RL) モデルを用いたマルチモーダル交通選択モデルを構築し、RL モデルの経路非列挙特性に着目して、RL モデルをサブスクリプション型 MaaS の設定エリア内の複数の交通手段を用いたトリップに適用する考え方を提案した。その上で、RL モデルにおける利便性指標である起点下流効用に基づいて、MaaS 導入前後における利用者の満足度を比較し、許容さ

れる最大のサブスクリプション型 MaaS 料金（許容定額料金）を求める方法を新たに提案した。本研究は特定の OD ペアにおけるトリップ単位での移動を対象として、利用者の観点、すなわち、当該サブスクリプション型 MaaS が実際に購入されるための MaaS 定額料金の上限値を求める方法を提案するものである。これにより、任意の OD ペアにおけるトリップにおいて、利用者の MaaS 利用への“スイッチング”を促すために必要な定額料金の上限値の基礎的な検討に資することが期待される。

提案した手法の現実的妥当性を検証するため、東京都市圏 PT 調査を用いて RL モデルのパラメータを推定した上で、特定の地域を対象として MaaS 導入のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果より、提案する評価手法により、MaaS の適用される範囲や対象とする OD ペアの特性に応じて、算出される許容定額料金が適切に変化し得ることが確認された。以上より、提案手法の一定程度の妥当性を実証的に確認することができたと考えている。

5.2 今後の課題

主な今後の課題は、以下の通りである。

- RL モデルのパラメータ推定に関して、本研究では PT 調査マスターデータから得られるサンプルをそのまま用いた。サンプルの抽出等のバイアスを削減するためには、拡大係数等を用いてサンプルに重みを付けた上で推定する等の対応が必要になると考えられる。
- 評価の枠組みにおいて、サブスクリプション型 MaaS 定額料金の限界効用を、RL モデルより推定された移動費用の係数 ($|\widehat{\beta}_{cost}|$) をそのまま用いて与えているが、この経済学的な根拠は必ずしも十分ではない。限界効用を適切に定めるためには、選好意識調査等を新規で実施して、サービスの組合せ（バンドリング）に対する情報を収集した上で新たな交通行動モデルを構築する必要があると考えられる。
- MaaS で利用できる移動手段としては、今回対象とした鉄道やバス、自転車以外にも、自動車もシェアリング等の形態によりサービスに含まれる可能性も高い。現状の PT 調査では、カーシェア利用のデータはほとんど含まれないため今回は分析対象から除外したが、自動車

による移動も考慮することができれば、評価の現実的妥当性がより高まると考えられる。

- 本研究では、与えられた OD ペアに対するトリップベースでの交通行動モデルを用いた評価に留まっている点において、現実の MaaS の料金設定を考える上で大きな課題が残されている。実際に MaaS が導入された場合には、利用者は、複数のトリップ間の連関（トリップチェーンやツアー）や（一定期間中の）トリップ頻度等を考慮した上で自身の許容定額料金を判断すると考えることが自然である。さらには、サブスクリプション型 MaaS 導入下では、目的地やトリップチェーン等の変更も起こり得ると考えられる。モデル分析の枠組みを、生活行動全体を考慮したアクティビティ・ベースのアプローチへと拡張することにより、より適切な評価を行うことができるようになると考えられる。
- 本研究の料金設定の基本的な考え方は、「どういう定額料金の設定を行えば、現状において料金が一体化されていない個別の公共交通サービスを利用している利用者が MaaS 利用へとシフトしてくれるのか」というものである。現実には、MaaS オペレータは自身の事業収益等を考慮して料金設定を行うものと考えられる。こうしたサービス供給側の行動規範を考慮した料金設定について検討することも今後の課題である。

【謝辞】

交通サービス水準データセットの構築作業においては、一般財団法人計量計画研究所の石井良治氏より多大なご支援を頂戴しました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 藤垣洋平, Giancarlo Troncoso Parady, 高見淳史, 原田昇. “統合モビリティサービスの概念と体系的分析手法の提案”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_735-I_74, 2017.
- 2) Whim “All transport in one app” (<https://whimapp.com/>) (参照 2019-12-10).
- 3) 小田急電鉄株式会社 “MaaS アプリサービス「Emot (エモット)」サービスイン”, (<https://www.odakyu.jp/news/o5oaa1000001mstg-att/o5oaa1000001mstn.pdf>) (参照 2019-10-7).
- 4) トヨタ自動車株式会社 “トヨタのコネクティッド & MaaS 戦略”, (https://www.toyota.co.jp/pages/contents/jpn/investors/financial_results/2019/q3/competitiveness.pdf) (参照 2019-2-6).
- 5) 日高洋祐, 牧村和彦, 井上岳一, 井上佳三. “MaaS〜モビリティ革命,” 日経 BP 社, 2018.
- 6) 村井藤紀, 塩見康博. “路線バスを対象としたサブスクリプション型 運賃制度の採算性における導入可能性の検討”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 75, No. 5, pp. I_1177-I_1187, 2019.
- 7) 藤垣洋平, 高見淳史, Giancarlo Troncoso Parady, 原田昇. “大都市圏向け統合モビリティサービス Metro-MaaS の提案と需要評価”, 日本都市計画学会都市計画論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 833-840, 2017.
- 8) Fosgerau, Mogens; Emma Frejinger and Anders Karlström. "A link-based network route choice model with unrestricted choice set.", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, pp. 70-80,

2013.

- 9) de Freitas, Lucas Meyer; Henrik Becker; Maëlle Zimmermann and Kay W. Axhausen. "Modelling intermodal travel in Switzerland: A recursive logit approach", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 119, pp. 200-213, 2019.
- 10) Zimmermann, Maëlle and Emma Frejinger. "A tutorial on recursive models for analyzing and predicting path choice behavior", *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Vol. 9, Issue 2, Paper No. 100004, 2020.