

## 1. 研究背景及び目的

近年、地方都市圏を中心とした自家用車分担率の増加に伴い、公共交通機関分担率及び利用者数は年々減少している<sup>1)</sup>。これに伴い、地方を中心とした自治体では、官民一体となり定時定路線運航の縮小や廃線事業を推進している。一方、海外主要国においては、ライドシェアサービス(以下、ライドシェア)が注目を集め、一部地域においては移動における新しい選択肢として定着しつつある<sup>2)</sup>。このことから、我が国でも、ライドシェアを前提とした公共交通のあり方を再考する必要がある。

本研究では、既存公共交通機関とライドシェアの複合領域における交通ネットワークおよびその分析手法の構築することで、ライドシェアのあり方を検討する。具体的には、交通手段選択モデルにおいて選択確率に依存する相乗りや車両混雑によるコストの変化を考慮することで、不動点問題として定義される均衡モデル(マッチング均衡モデル)を定式化する。また、定式化したモデルを適用した数値実験を行うことで、起点間距離や総交通需要分布、区間混雑状況に応じたライドシェアの選択確率の変化や傾向を明らかにする。

## 2. 交通手段選択モデル

### 2.1. モデルの定式化

モデルの定式化にあたっては、地域内の利用者が自身の居住地(以下、起点)から交通結節点(以下、終点)へアクセスする移動を考える。この時、ライドシェアのサービスが提供されている範囲を  $L$  と定義する。簡単のため利用者1人あたりの起点-終点間を直線と仮定し、利用者の起終点間距離  $L$  と定義する。利用者はライドシェアとその他交通手段から交通手段を選択し、選択確率はロジットモデル式により決定されると仮定する。この時、交通手段の効用は以下で表されるものとする。

$$U_m = V_m + \varepsilon \{m \in (\text{ride}, \text{other})\} \quad (1)$$

where,

$$V_{\text{ride}} = S\{\alpha_{\text{ride}}t_{\text{ride}} + \beta c_{\text{ride}} + \gamma\} + (1-S)\{\alpha'_{\text{ride}}t_{\text{ride}} + \beta c_{\text{ride}}\} \quad (2)$$

$$V_{\text{other}} = \alpha_{\text{other}}t_{\text{other}} + \beta c_{\text{other}} \quad (3)$$

ここで、 $U_m$ は、交通手段 $m \in (\text{ride}, \text{other})$ の効用、 $\varepsilon$ は効用の誤差項を表す。 $\alpha_{\text{ride}}$ 、 $\alpha'_{\text{ride}}$ 、 $\alpha_{\text{other}}$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は、相乗りが発生した際の移動時間、発生しなかった際の移動時間、他の交通手段を利用した際の移動時間、移動費用、相乗りに対するパラメータをそれぞれ表す。また、 $t_m$ 、 $c_m \{m \in (\text{ride}, \text{other})\}$ は移動時間、移動費用をそれぞれ表す。 $S$ は利用者がライドシェアで移動する時に相乗りが発生する確率を表す。したがって、式(2)に示したように、相乗りが発生した場合の効用( $S$ に係る項)と発生しない場合の効用( $(1-S)$ に係る項)の期待値がライドシェアの効用となる。誤差項 $\varepsilon$ が独立で同一なガンベル分布に従うと仮定すると、各交通手段の選択確率は以下のように表せる。

$$P_{\text{ride}} = \frac{\exp(V_m)}{\sum_{m' \in (\text{ride}, \text{other})} \exp(V_{m'})} \quad (4)$$

効用関数の各項については、次節以降で詳述する。

### 2.2. 相乗り確率の算出

相乗りの発生確率を表す $S$ は、栗田<sup>3)</sup>らが示した空間ポアソン分布の導出方法を応用することで導出する。本研究では、ライドシェア利用者の予約後のキャンセル行動は考慮せず、ライドシェアは2組までの利用者を同乗させることができることと仮定する。

起終点間距離  $L$  に存在する利用者数の分布より、長さ $L$ の直線上に利用者が $\lambda$ 人含まれる確率  $p(\lambda, L)$  を求める。 $p(\lambda, L)$ の $L$ に関する1階線形方程式を定義することで、その一般解の導出より、 $p(0, L)$ が求められる。ここで、利用者が起終点間距離  $L$  を移動する間に相乗りが発生

しない確率は、同区間に利用者が存在しない確率  $(p(0, L))$  に等しい。したがって、利用者が起終点間距離  $L$  を移動する間に相乗りが発生する確率  $S$  は以下の式で表すことができる（詳細は紙面の都合上省略する）。

$$S = 1 - p(0, L) = 1 - \exp\left(\int_0^L \rho(L) dL\right) \quad (5)$$

### 2.3. 移動時間の算出

移動時間  $t_m$  の算出にあたり、本研究では4つのパターン分けを行っているが、紙面の都合上本稿ではこのうち「移動時間はネットワーク上における全交通手段の総車両台数に依存し、ライドシェアの移動時間に対するパラメータが相乗りの有無に依存する」のパターンを示す。この時、ネットワーク上の総車両台数  $f(L')$  は、以下のようにライドシェアのサービス範囲全体における全交通手段の利用者密度の積分によって表せる。

$$f(L') = \int_0^{L'} \left[ \frac{1}{2} \rho(L') \right] + \rho'(L') dL \quad (6)$$

ここで、ライドシェアは2組までの利用者を同乗させることができると仮定しているため、ライドシェアの利用者密度  $\rho(L')$  に  $\frac{1}{2}$  を乗じている。また、その他交通手段の車両密度は  $\rho'(L')$  で示している。この時、混雑を考慮した移動速度の逆数が、以下で表されると仮定する。

$$g' = g \cdot (1 + \delta f(L')) \quad (7)$$

ここで、 $g$  は非混雑時の単位距離あたりの移動時間（＝自由走行速度の逆数）、 $\delta$  は移動速度の減少率を表す。つまり、混雑による影響で移動速度が  $(1 + \delta f(L'))$  に反比例することを表しており、起終点間距離  $L$  の移動時間は以下の式で表せる。

$$t(L) = g \cdot L \left( 1 + \delta \cdot \int_0^{L'} \left[ \frac{1}{2} \rho(L') \right] + \rho'(L') dL \right) \quad (8)$$

### 2.4. 移動費用の算出

本研究では、以下のように移動費用が起終

点間距離  $L$  に対して線形に増加するもので表されると仮定する。

$$c_m(L) = b_m \cdot L \{m(\text{ride}, \text{other})\} \quad (9)$$

ここで、 $b_m$  は単位距離あたりの移動料金を表す。

### 3. マッチング均衡

前章で定義した各種効用関数を用いて地点  $L$  における総交通需要  $x(L)$  をかけることにより、同地点におけるライドシェアの利用者密度  $\rho(L)$  が以下の式で表される。

$$\rho(L) = x(L) \cdot P_{\text{ride}}(\rho(L)) \quad (10)$$

ここで、前章で示した通りライドシェアの選択確率は  $\rho(L)$  の関数であるため、式(10)の等号が成立する時の  $\rho(L)$ （不動点問題の解）により均衡時のライドシェアの選択確率が定義できる。なお、式(10)には初頭関数で表現できない定積分が含まれるため、解析解が存在しない。

### 4. 数値解と解析解の算出及び比較

本章では、総交通需要  $x(L)$  に様々な関数を導入した際のマッチング均衡状態を求め、その特性について考察する。先述した通り、定義した不動点問題には解析解が存在しないため、数値的に解を計算する。まず、初期値として  $f(L) = 0$ 、 $S = 0$  とした場合の  $\rho(L)$  を求め、それを式(10)の右辺に代入することで新たに  $\rho(L)$  を求める。これを繰り返すことで、マッチング均衡状態の数値解を計算する。総交通需要分布については一様分布、単調増加・減少分布、ロジスティック分布、ガウス分布を仮定する。

図1において、「積分回数」が0回と表現されているグラフは、相乗りの発生によるコスト変化を無視した場合のライドシェアの選択確率を示している。図に示される通り、相乗りによるコスト変化を考慮しない場合、ライドシェアの選択確率は、距離に応じて単調に増加する傾向であることが分かる。一方、「積分回数1回」以上の値で表現されているグラフは、相乗りによるコストを考慮した選択確率を示している。この場合、ライドシェアの選択確率は、「①：近距離域で低下し、ある閾値を境に増加に転じる場合」と「②：距離に応じて単調に増

加後、ある閾値で横ばいか低下に転じ、さらにある閾値で再度増加に転じる場合」の2傾向を観察できる。

傾向①のようになるのは、起点からの距離が短い範囲では相乗りの生起確率が単調に増加するため選択確率が減少するが、ある閾値以降で相乗りの生起確率が高止まりし、他の項の影響が相対的に大きくなることで、ライドシェアの選択確率が増加傾向に転じるためであると考えられる。傾向②のようになるのは、起点付近では総交通需要が少ない状態であるため他の項の影響が相対的に大きくなり、ライドシェアの選択確率が増加傾向になるが、移動時間の項が $\rho(L)$ の変化に伴って変動することで、ある閾値付近で相乗りに関する項の影響が相対的に大きくなり、以降は傾向①と同様の理由により減少傾向、次いで再度増加傾向に転じるものと考えられる。

先述した通り、定義した不動点問題は解析解をもたない。そこで、近似的に解析解を得る方法を考える。「積分回数」1回で求められる解は、 $f(L) = 0$ 、 $S = 0$ とした場合の $\rho(L)$ を求め、それを式(10)の右辺に代入することで得られる $\rho(L)$ である。この $\rho(L)$ は、解析的に表現可能である。この「積分回数」1回目の $\rho(L)$ について、各総交通需要分布パターンで算出したものを図1に赤色で示す。図1に等高線で示したように、積分回数が増えるにつれて選択確率の変化が小さくなっていることがわかる。よって、「積分回数」2回目以降の選択確率は解析解を有する「積分回数」1回目の選択確率によって概ね近似可能と考えられる。したがって、本研究で定義したマッチング均衡モデルの均衡解

は解析的な関数によって近似的に表現可能であるといえる。

## 5. 期待最大効用及び社会的余剰の算出

本章では、ライドシェア存在下の社会的余剰を算出する。消費者余剰は、式(11)に示す期待最大効用より算出する。

$$Cs = \frac{1}{\beta} \log \sum_{m \in (\text{ride}, \text{other})} e^{\beta V_m} \quad (11)$$

また、ライドシェアの選択確率に総交通需要と利用料金を乗じることで、生産者余剰(ライドシェア供給者の料金収入)を算出する。消費者余剰と生産者余剰の和によって社会的余剰が算出できる。

社会的余剰を最大化するようなライドシェアの料金水準についても検討した結果、最適な料金水準は低価格帯となることが示された。また、社会的余剰が最大となる料金設定とした場合、総交通需要分布ごとの起終点間距離に応じたライドシェアの選択確率は、4章にて述べたものと同じの傾向を持つことが示された。

## 6. まとめ

本研究では、既存公共交通機関と乗り合い式ライドシェアサービスの複合領域に着目し、利用者数の空間的分布を導出可能なモデルを提案した。また、定式化したモデルを適用した数値実験を行うことで、起点間距離や総交通需要分布、区間混雑状況に応じたライドシェアの選択確率の変化や傾向を、要因とともに明らかにした。さらに、生産者余剰と消費者余剰から社会的余剰を算出し、この余剰が最大となる際の、

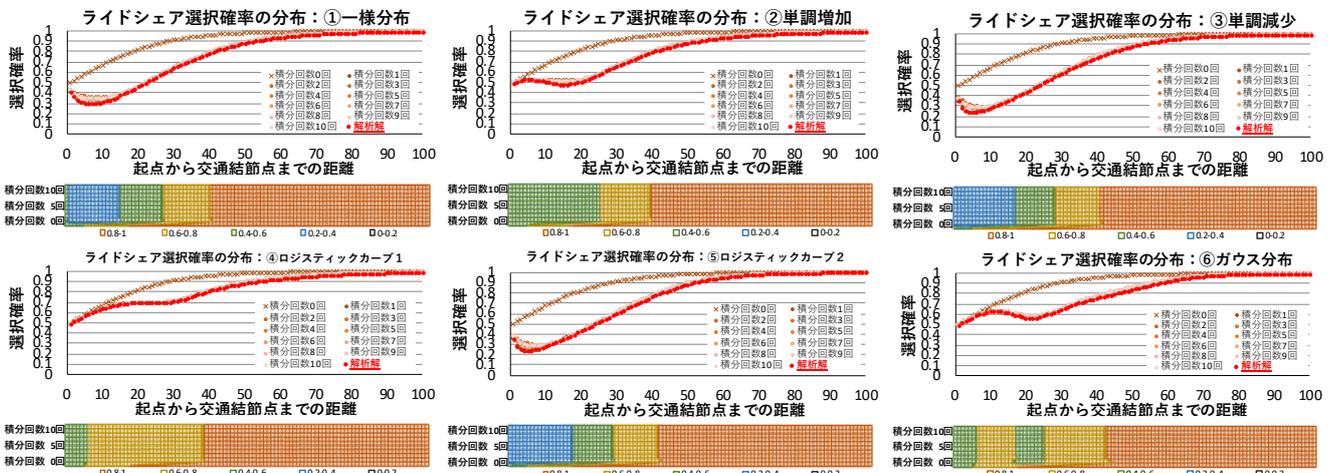


図1. 総交通需要分布別の選択確率

ライドシェアの価格帯の推定や、選択確率の変化及び傾向を検討した。

### 参考文献

- 1) 国土交通省 都市局都市計画課：都市における人の動きとその変化
- 2) Uber Japan 株式会社：諸外国におけるライドシェア法制と安全確保への取り組み，2023年11月6日
- 3) 栗田治：「都市と地域の数理モデル」，共立出版，2013年