

# 乗り合い式ライドシェアリングサービスの マッチング均衡モデル

高橋晃樹<sup>1</sup>・加藤哲平<sup>2</sup>・佐野可寸志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学分野 (〒940-2188新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail:s203265@stn.nagaokaut.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 長岡技術科学大学講師 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: tkato@vos.nagaokaut.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 長岡技術科学大学教授 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail:sano@vos.nagaokaut.ac.jp

近年、公共交通機関分担率や利用者数が減少傾向にある一方で、海外主要国においてはライドシェアが注目を集め、移動における新しい一つの選択肢として定着しつつある。本研究では、乗り合い式ライドシェアサービスに着目し、相乗によるコストを考慮した交通手段選択モデルを用いてマッチング均衡モデルを定式化した。さらに、提案したモデルを用いた数値実験を行い、起点-終点間距離や総交通需要分布に応じたライドシェアの選択確率の変化や傾向を分析した。その結果、相乗によるコストを考慮した場合、選択確率は「近距離域で低下し、ある閾値を境に増加に転じる場合」と「距離に応じて単調に増加する場合」の2種類の傾向がある事が明らかになった。また、均衡状態の近似値を解析的に表現可能であることが示唆された。

**Key Words: Ride sharing, Matching Equilibrium, Discrete Choice Model**

## 1. はじめに

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>。さらには、高齢化等の要因により、公共交通サービスの運転手不足も加速している<sup>2)</sup>。これに伴い、地方を中心とした自治体では、利便性の高い地域旅客運送サービスを提供することを目的に、公共交通に関連する各種計画を策定してきた。さらに、定めた計画に基づいて、官民一体となり定時定路線運航の縮小や廃線、デマンドバス事業への転換事業を推進している<sup>3)</sup>。一方、海外主要国においては、ライドシェアリング(以下、ライドシェア)が注目を集め、行政が積極的に法環境整備を進めることで、IT 関連等の民間企業が公共交通の領域に参入した事例も存在する<sup>4)</sup>。このような施策により、一部地域においては、ライドシェアが移動における新しい一つの選択肢として定着しつつある<sup>5)</sup>。このことから、我が国においても、既存公共交通機関とライドシェアの複合領域の形成を目的とし、法環境整備を実施することで、日本国内におけるライドシェア及び公共交通のあり方を再考する必要があると考えられる。

ライドシェアの利用者行動を分析する研究として、Xiaolei<sup>6)</sup>らは、滴滴出行(Didi)が運営する相乗りサービスの利用データに基づき、相乗りサービスとタクシー市場における予約後の利用者のキャンセル行動を考慮した利用者行動モデルの定式化を行っている。構築したモデルを基に行った分析により、空車のタクシー

が十分に存在する時間帯においては、利用者が相乗りサービスを予約後に目の前を通りかかったタクシーに乗車することが容易であるために、相乗りサービスのキャンセル率が高くなることが示された。また、利用者が相乗りサービスを予約後に空車タクシーを見つけた際、予約車を待ち続けるコストと空車タクシーに乗るコストを評価している点を明らかにし、キャンセルに係るコストや待ち続けることで生じるコストおよび一般の運転手と一緒に移動することへの不安感等を考慮することで、顧客が予約をキャンセルする可能性が高くなる条件を導出している。Yining<sup>7)</sup>らは、デマンド型交通(DRT)と基幹公共交通ネットワークから構成される統合モビリティサービスシステムを設計するための手法を提案している。その中で、基幹公共交通の1つである鉄道駅から終点までのラストワンマイルを、デマンド型交通が担うと仮定した際の、交通ネットワークシステム全体での平均コストを算出し、同一のトリップをタクシーで移動する際の平均コストとの比較を行っている。その結果より、ゾーン分割・車両サイズ・再配置操作及び輸送ネットワークの間隔を同時に最適化するモデルフレームワークを定式化している。三輪ら<sup>8)</sup>は、主に中山間地域における共助型ライドシェアの導入について、アンケート調査を実施し、交通実態を把握するとともに共助型交通システムの参加意向を、ネステッドロジットモデルを用いて分析している。これにより、共助型ライドシェアへの参加意向は全体の2割程度である一方で、過去に家族以外の人を

同乗させた経験や、家族以外の方が運転する自動車に同乗した経験がライドシェアへの参加意向を高めることを明らかにした。

上記に挙げたいずれの研究でも、ライドシェアやデマンド型交通に関して、利用者のコストを考慮したモデルを算出し、キャンセル確率や輸送ネットワーク間隔等の最適化を実施している。これらを踏まえ、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を行うことで、ライドシェアリングのあり方を検討する。中でも本論文では、乗り合い式ライドシェアサービスのマッチング均衡モデルに着目する。具体的には、出発地から交通結節点までを結ぶ区間の移動において、区間内で同サービスの利用者がいた場合に相乗りが生じるという仮定のもと、相乗によるコストを考慮した上でライドシェアを選択する確率を交通手段選択モデルより算出する。その上で、起点-終点間距離や総交通需要分布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ことを目的とする。

本稿の構成は、以下の通りである。2章では、相乗によるコストを考慮した上で交通手段選択モデルの構築を行う。3章では、ライドシェアの利用者密度の算出を行っている。4章では、構築した交通手段選択モデルを用いて、総交通需要分布を変化させながら、起点-終点間距離に応じたライドシェアの選択確率を算出する。5章では、解析解を算出し、4章にて算出した数値解との比較を行う。最後に、6章で本稿のまとめを行う。

## 2. 交通手段選択モデル

### 2. 1. モデルの定式化

本研究では、地域内の利用者が自身の居住地（以下、起点とする）から交通結節点（以下、終点とする）へアクセスする際の移動を考える。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、利用者はライドシェアとその他の交通手段から交通手段を選択すると仮定する。これにより、起点-終点距離に応じたライドシェアの選択確率の変化を簡便な形式表現することが可能となる。また、利用者が自身の起終点間を移動する間の区間で他の利用者が同サービスを利用する際は、確実に乗り合いが生じると仮定する。また、利用者の交通手段選択確率は、ロジットモデル式によって決定すると仮定する。各移動手段の効用は以下で表されるものとする。

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

where,

$$V_{\text{ride}} = \alpha t_{\text{ride}}(L) + \beta c_{\text{ride}}(L) + \gamma S \quad (2)$$

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

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し、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は移動時間、移動費用、相乗に対するパラメータをそれぞれ表す。また、 $t_m$ と $c_m$ ( $m \in (\text{ride}, \text{other})$ )移動時間、移動費用をそれぞれ表し、それぞれ起点-終点間の距離 $L$ についての関数である。 $S$ は相乗りによるコストを表す。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される。

$$P_{\text{ride}} = \frac{\exp(V_{\text{ride}})}{\exp(V_{\text{ride}}) + \exp(V_{\text{other}})} \quad (4)$$

$$P_{\text{other}} = 1 - P_{\text{ride}} \quad (5)$$

なお、式(2)に示した相乗コスト $S$ の具体的な計算方法については、次節で示す。

### 2. 2. 相乗確率の算出

本節では、2.1節にて示した相乗りコスト $S$ の算出方法を示す。相乗が発生すると $\gamma$ だけコストが生じると仮定すると、 $S$ は相乗の発生確率に相当する。栗田<sup>9)</sup>が示した空間ポアソン分布の導出方法を応用し、直線上のランダムな点分布において、相乗の発生確率を算出する。なお、先述した通り、利用者の起点から終点までの間で、ライドシェアサービスの利用者が発生した場合に確実に乗り合いが生じると仮定し、ライドシェア利用者の予約後のキャンセル行動は考慮しない。これは、本研究の目的が、起点-終点間距離や総交通需要分布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ための簡便な手法を提案することであるためである。また、このライドシェアサービスは2組までの利用者のみを同乗させることができると仮定する。本研究で示すモデルは一般性を失うことなく、3組以上の利用者を同乗させる場合も考慮することができる。

終点までの距離が $L$ の地点において、ライドシェアの利用者は、密度 $\rho(\lambda, L)$ で分布していると仮定する。地点 $L$ から終点までに存在する利用者数 $\lambda$ の分布を求めることで、相乗り確率を算出する。まず、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。この確率を求める際に、 $\rho(\lambda, L)$ は以下の性質を持つと仮定する。

① 区間長さの増分 $\Delta L$ を考えたとき、 $p(\lambda, L)$ について次式が成立する。

(a) :  $\lambda = 1$ のとき、

$$p(1, \Delta L) = \rho \Delta L + o(\Delta L) \quad (\Delta L \rightarrow +0)$$

(b) :  $\lambda \geq 1$ のとき、

$$p(\lambda, \Delta L) = o(\Delta L) \quad (\Delta L \rightarrow +0)$$

②  $p(\lambda, L)$ は $L$ に関して積分可能である。

③ (a) :  $\lambda < 0$ のとき、任意の $L$ に対して、 $p(\lambda, L) = 0$

(b) :  $\lambda \neq 0$ のとき $p(\lambda, 0) = 0$

(c) :  $p(0, 0) = 1$  (以上は境界条件)

上記の条件下で、以下のような $p(\lambda, L)$ の $L$ に関する1階線形方程式を考える。

$$\frac{dp(\lambda, L)}{dL} + \rho(L)p(\lambda, L) = \rho(L)p(\lambda - 1, L) \quad (6)$$

この一般解は以下で表される。

$$p(\lambda, L) = (-\int \rho(L)dL) \cdot \{ \rho(L) \int p(\lambda - 1, L) \cdot \exp(-\int \rho(L)dL)dL + C \} \quad (7)$$

ここで、 $p(0, 0) = 1$ より積分定数 $C$ は0である。したがって、 $p(0, L)$ は以下のように表される。

$$p(0, L) = \exp(-\int \rho(L)dL) \quad (8)$$

地点 $L$ から出発する利用者が終点まで移動する間に、相乗が発生しない確率は、同区間に利用者が存在しない

確率に等しい。したがって、相乗の発生確率 $S$ は $1 - p(0, L)$ によって表すことができる。

### 3. マッチング均衡

前章で示した交通手段選択モデルにより、起点-終点間距離に応じたライドシェアの選択確率の算出が可能となる。算出した選択確率と地点 $L$ 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が以下のように計算できる。

$$\rho(L) = x(L) \times P_{ride}(L) \quad (9)$$

前章で示した通り、 $P_{ride}(L)$ は $\int \rho(L)dL$ の関数である点に注意したい。このため、マッチング均衡は以下の不動点問題として定義できる。

$$\rho(L) = x(L) \times P_{ride}(\int \rho(L)dL) \quad (10)$$

ただし、この不動点問題には、解析的な解を持たない積分計算が含まれる可能性がある。本稿では一般解や数値特性については議論しないが、このような問題については今後の課題とする。

### 4. 数値実験

前章で定義した不動点問題を解くことにより、マッチング均衡状態を表現できる。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、マッチング均衡状態の一般解は示さないが、初期値として $S = 0$ 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を計算する。以降では、この繰り返し回数を「積分回数」と表現する。この繰り返しを計 5 回行い、各回で求められた選択確率をグラフ化する。ただし、関数形によっては解析的な積分ができないため、数値積分した結果を示す。

総交通需要分布の形状については図 1 に示した 6 パターンを用いる。具体的には、起点-終点間距離に応じて、総交通需要分布が「①：一様分布」、「②：単調増加」、「③：単調減少」、「④：ロジスティックカーブ 1」、「⑤：ロジスティックカーブ 2」、「⑥：ガウス分布」となっている。求められた解を図 2 に示す。なお、算出に当たっては、Python によって数値解を算出している。

図 2 において、「積分回数」が 0 回と表現されているグラフは、相乗によるコストを無視した選択確率を示している。このことより、相乗発生によるコストを考慮しない場合、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、相乗によるコストを考慮した選択確率を示している。相乗によるコストを考慮した際、ライドシェアの選択確率の変化は、「近距離域で低下し、ある閾値を境に増加に転じる場合」と「距離に応じて単調に増加する場合」2 種類の傾向を観察できる。

前者の傾向が観られる要因について、パターン①、③、⑤において、OD 間の距離がある程度まで長くなると、ほぼ確実に相乗が生じる状態が表現されているためであると考える。すなわち、相乗によるコストを考慮し

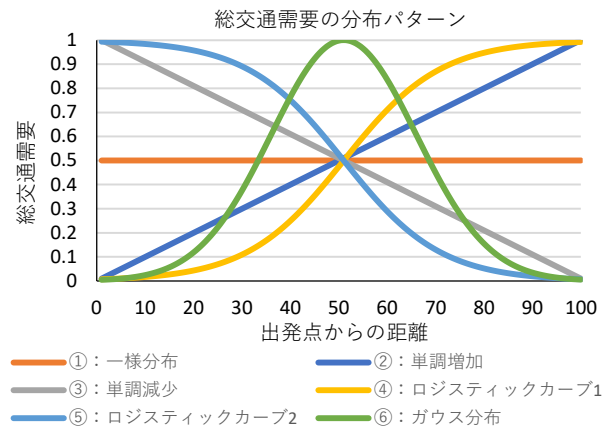


図 1. 総交通需要分布の分析パターン

た場合、起点からの距離が短い範囲では、相乗に関する項が単調に増加するため、ライドシェアの選択確率は減少傾向となる。しかし、ある地点(グラフの閾値付近)以降では、相乗による項が一定値となるため、他の項の影響が相対的に大きくなることで、この地点以降で、ライドシェアの選択確率が増加傾向に転じると考えられる。

次に、後者の要因が観られる要因について、パターン②、④、⑥のいずれの場合においても、起点付近の需要が著しく少ない状態であることが要因であると考えられる。すなわち、式(10)に示す計算過程で、起点からの距離が短い範囲では、 $x$ の値が非常に小さいために、 $\rho(L)$ の値も小さくなる。そのため、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は増加傾向になると考えられる。

先述した通り、「積分回数 1 回」で求められる解は、 $S=0$ の条件下で求められた $\rho(L)$ である。この $\rho(L)$ は初頭関数で表現可能な解析解を有する点に注意したい。図 2 に示すように、「積分回数」が増えることによる選択確率の変化が小さくなっていることが読み取れる。したがって、初頭関数による表現が難しい「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 回の選択確率によって近似可能であると考えられる。

### 5. 数値解と解析解の比較

先述した通り、「積分回数 1 回」によって「積分回数」2 回目以降の解が近似的に表現できる可能性が示された。また、「積分回数 1 回」の解には解析解が存在する。本章では、「積分回数 1 回」の解析解と、「積分回数」2 回目以降の解の比較を行う。「積分回数 1 回」の解析解を、図 2 中に黒色で示す。この値が「積分回数」2 回目以降の数値解と概ね同様の挙動を見せることが分かるこのことから、本稿で示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考えられる。

本章では、数値解と解析解の比較を行う。4 章にて、一回の積分が可能であるならば、近似的に均衡状態が表現できる可能性が高いと判断できた。よって、式(10)における $x(L)$ を、各総交通需要分布パターンを表す関数に置き換えることで、解析解を算出した。なお、

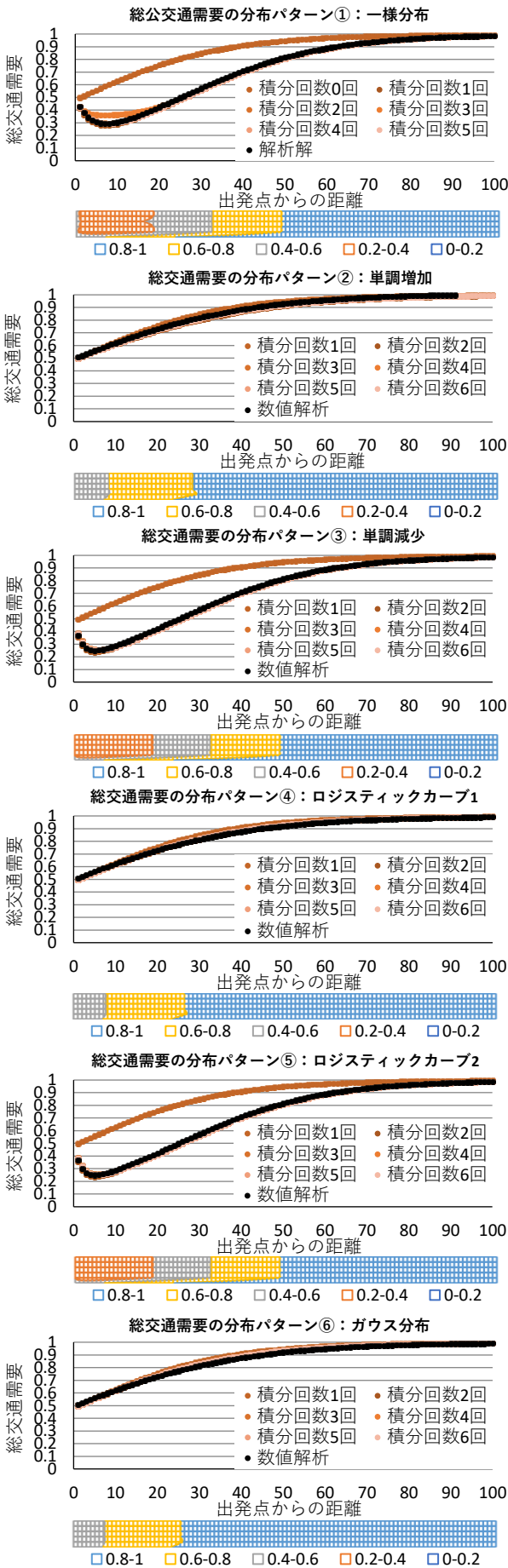


図 2. パターン別の選択確率

算出した解析解は、図 2 のうち黒色で示した値である。よって、解析解が数値解における積分 1 回目以降の値と概ね同様の挙動を見せていることより、4 章における仮説が概ね認められるといえる。ただし、選択確率を定量的に比較した場合、数値解(積分 1 回目の値)と解析解との間に、差異が存在する。これについては、数値積分によって生じた誤差であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、相乗によるコストを考慮したライドシェアの選択確率を交通手段選択モデルより算出し、起点-終点間距離や総交通需要分布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した。その上で、数値解と解析解の比較により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 相乗コストを考慮した交通手段選択モデルから、マッチング均衡状態を求める不動点問題を定式化した。この不動点問題には、解析的な解を持たない積分計算が含まれる可能性がある。本稿では一般解や数値特性については議論しないが、初期値を定め、逐次的に計算を繰り返すことで均衡解の算出を試みた。このような計算過程で、初頭関数による表現が難しいため、数値解を算出する必要が生じることが分かった。
- 2) 総交通需要分布に応じた起点-終点間におけるライドシェアの選択確率の結果より、相乗発生によるコストを考慮しない場合、選択確率は距離に応じて単調に増加する傾向にあることが分かった。一方で、相乗によるコストを考慮した際、ライドシェアの選択確率の変化は、「近距離域で低下し、ある閾値を境に増加に転じる場合」と「距離に応じて単調に増加する場合」の 2 種類の傾向を観測した。
- 3) 上記で得られた起点-終点間におけるライドシェアの選択確率は 1) で述べた通り逐次的に求められた数値解である。ただし、このような逐次的な計算の繰り返し回数が増えるにしたがって、選択確率の変化が小さくなっていることから、一度の繰り返しで均衡解の近似値が得られることが分かった。

繰り返し回数が 2 回目以降では、解析解を得られない問題があったが、一度目の繰り返しでは解析解が得られることが分かっている。このように得られる解析解と数値解の比較により、本稿で示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ことが明らかとなった。

今後は様々な条件下での分析を行い、これまでに得られた知見が他の条件下においても成立するかを検討する必要がある。また、この結果を受けて提案したモデルの拡張を行う必要がある。得られたモデルを用いた実験を行うことで、最適なライドシェアのあり方について、定性的な評価及び考察を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K14842 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 国土交通省都市局：都市における人の動き, <http://www.mlit.go.jp/common/001032141.pdf>, (2023/01/28 アクセス)
- 2) 後藤孝夫：バス運転者不足問題とその改善の方向性について, [http://www.ecomo.or.jp/environment/bus/pdf/bus-17th\\_seminar\\_gotou.pdf](http://www.ecomo.or.jp/environment/bus/pdf/bus-17th_seminar_gotou.pdf), (2023/02/26 アクセス)
- 3) 国土交通省：地域公共交通網形成計画の策定状況一覧, [https://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/content/001349491.pdf](https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/content/001349491.pdf), (2023/01/28 アクセス)
- 4) Arthur D. Little：自動走行が活用されうるモビリティサービスの海外動向・国内事業性の調査, [https://www.meti.go.jp/medi\\_lib/report/H30FY/000677.pdf](https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/H30FY/000677.pdf), (2023/02/26 アクセス)
- 5) 大和総研：海外のライドシェアの現状と日本でのあり方, [https://www.dir.co.jp/report/research/policy-analysis/human-society/20180601\\_020125.pdf](https://www.dir.co.jp/report/research/policy-analysis/human-society/20180601_020125.pdf), (2023/01/28 アクセス)
- 6) Wang Xiaolei, Liu Wei, Yang Hai, Wang Dan, Ye Jieping：Customer behavioural modelling of order cancellation in coupled ride-sourcing and taxi markets, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Volume 86, January 2018, Pages 263-279
- 7) Yining Liu, Yanfeng Ouyang：Mobility service design via joint optimization of transit networks and demand-responsive services, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 151, September 2021, Pages 22-41
- 8) 三輪富生・Chu Tien Dung・Zheng Yan・剣持千歩・佐藤仁美・森川高行：中山間地域における高齢者のための共助交通システムに関する基礎分析, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, (2016/4)
- 9) 栗田治：「都市と地域の数理モデル」, 共立出版, 2013 年 9 月, P105