

中山間地域におけるライドシェアの 成立可能性に関する数値シミュレーション

森脇 宇俊¹・力石 真²・藤原 章正³

¹ 非会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: m186659@hiroshima-u.ac.jp

² 正会員 広島大学大学院准教授 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

³ 正会員 広島大学大学院教授 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

本研究では、人口の少ない中山間地域において有用と考えられる、(1) ドライバーが利用者をピックアップする地点（ミーティングポイント）を予め限定（空間的ミスマッチの緩和）、(2) 利用者とドライバー間の事前のスケジュール調整（時間的ミスマッチの緩和）、を前提としたライドシェアシステムを想定し、ライドシェアの成立可能性に関する数値シミュレーションを行った。その結果、集落がコンパクトにまとまっているかどうかマッチング率に大きく影響すること、及び、高齢化の進行がマッチング率に及ぼす影響も小さくないことを確認した。

Key Words: ride-sharing, rural area, meeting point, scheduling

1. 背景

我が国では、特に中山間地域において人口減少、高齢化が進んでおり、バスや鉄道といった従前の公共交通サービスの維持が困難になってきている。このような地域は、人口密度が低く、生活関連施設まで比較的長距離を移動する必要があるという特徴を有する。一方、疎な需要に対し足の長い公共交通サービスを日常的な利用に耐えうるサービス水準のもとで提供することは一般に困難であり、現時点では自家用車で移動せざるを得ない状況にある。

一方で昨今、高齢者による交通事故が多発している背景から高齢ドライバーの運転免許自主返納の動きが活発になっている。これにともなって今後、高齢者は自ら運転する車での移動が難しくなることが予想され、家族や知人の送迎に頼らざるを得なくなり、その結果、移動を控えて引きこもりがちになる恐れがある。

以上を踏まえると中山間地域においては、既存の交通手段に比べてより安価かつ効率的にモビリティを提供するサービスを設計、提供することが求められている。

海外では、UberやLyftといったライドシェアサービ

スがすでに提供されている。また、多くの途上国においてもライドシェアの形態のサービスが広く普及している。一方、これらのライドシェアは主に都市部を対象としたものであり、過疎地域の状況に適したライドシェアについては、事例が限られている。数少ない例外として、公共交通サービス水準の低い北海道の天塩町において、ライドシェアサービスを展開する notteco と天塩町が連携し、住民間のライドシェアに関する実証実験を行っている。特に我が国においては、自家用自動車を有償で運送の用に供することは法で定められた例外を除いて禁止されていることから(道路運送法第78条)、収益を目的としない形でライドシェアサービスを設計することが求められる。

そこで本研究では、中山間地域での展開を念頭に、住民間のボランティアな送迎を前提としたライドシェアサービスの成立可能性について理論的な検討を行う。具体的には、Stiglic et al¹⁾が提案した(1)ドライバーが利用者をピックアップする地点（ミーティングポイント）を予め限定（空間的ミスマッチの緩和）、(2)利用者とドライバー間の事前のスケジュール調整（時間的ミスマッチの緩和）を前提としたライドシェアシステムの中山間地域における成立可能性を検

証する数値シミュレーション解析を行う。

2. 既往研究

谷本ら²⁾の鳥取県日南町における調査によると、買い物に行く際に1日に6往復ほど運行されているバスを利用する人の割合は1割程度となっており、買い物に行く人のほとんどが自家用車で移動している。代替の交通手段の1つとして、佐々木ら³⁾は中山間地域におけるライドシェアの意識調査を行っている。

一方、Furuhata et al⁴⁾に整理されているように、ライドシェアにおけるドライバーとライダーのマッチングについては様々な形態が考えられる。例えば Stiglic et al⁵⁾は、より多くのドライバーがより多くの利用者に相乗りを提供するために、ミーティングポイントの導入を行っている。ミーティングポイントとは、ドライバーと乗客が落ち合う地点の事を指し、バス停もミーティングポイントの一つと言える。図-1のようにいま、ドライバーとライダーが1人ずついる状況を考える。ドライバー・ライダーはそれぞれ矢印の向きに移動するものとし、矢印横の数字はその間の時間を指している。これまでのようにドライバーがライダーを出発地から目的地まで送迎を行うとすると、ドライバーは21の移動時間が必要であった。これを、ミーティングポイントを導入し、ライダーの乗降をミーティングポイントで行うことで、ドライバーの移動時間を18に減らすことができる。また、ミーティングポイントは移動時間のみならず移動距離についても同様に短縮可能である。このように、導入によってドライバーの負担を軽減することができるため、マッチング率が上昇することが示されて

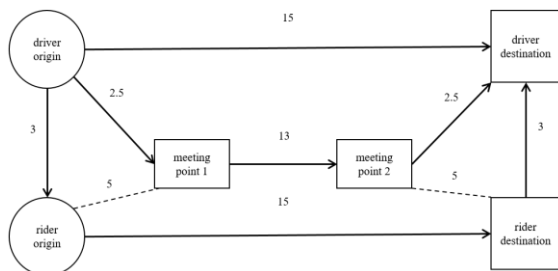


図-1 ミーティングポイントのメリット

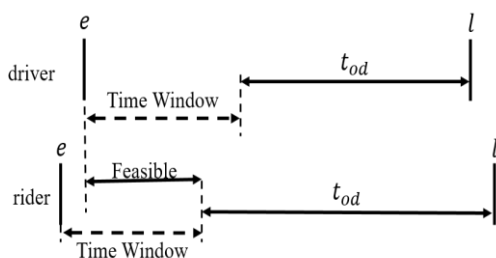


図-2 タイムウィンドウ

いる。さらに、ドライバーの負担を増大させることなく複数人のライダーにサービスを提供することができる点もミーティングポイント導入のメリットといえる。

一方、Agatz et al⁶⁾はタイムウィンドウの概念を用いたライドシェアシステムを提案している。タイムウィンドウについて図-2を用いて説明する。ここで e は最早出発時刻、 l は最遅到着時刻である。つまり、参加者の移動は e と l の間で完了する必要がある。 t_{od} は出発地から目的地に到着するまでに必要な時間で、 e と l の間の時間から t_{od} を図-2のように引いたものがタイムウィンドウと呼ばれる時間である。このタイムウィンドウの中で出発時刻を調整することにより双方の移動ニーズを満たす形でライドシェアサービスを実現することができる。言い換えると、ライドシェアを成立させるためには、それぞれのタイムウィンドウが重複した時間が存在している必要がある。タイムウィンドウ導入の利点は、事前にスケジュールを調整することにより、マッチングの成立可能性が高まる点にある。Uber や Lyft をはじめとした都市部を対象としたライドシェアサービスでは、利便性を重視し、スケジュール調整を行わずにリアルタイムでマッチングするシステムとなっているが、人口が疎な過疎地域においては、スケジュール調整コストを負担してでもマッチング率を最大化するシステム設計が望ましいものと考えられる。

次章では、以上にみたミーティングポイント及びタイムウィンドウを導入したライドシェアのマッチングアルゴリズムを概説する。

3. ライドシェアマッチングアルゴリズム

本研究では、ドライバーの少ない中山間地域におけるライドシェアを想定する。ドライバーの負担を軽減するため、ドライバーは1度の移動においてライダーの乗降をそれぞれ1回ずつのみ行うものとする。これらの条件の上で、ミーティングポイントとタイムウィンドウの導入を行う。以下で概説するマッチングアルゴリズムは Stiglic et al⁵⁾により提案されたものであり、詳細は Stiglic et al⁵⁾を参照されたい。

ライドシェアのマッチングを行う上で、ライドシェアに参加し得るすべての人は情報 s を有していると考えられる。個人の情報 s は全員の情報 S の一部であり、出発地 o_s 、目的地 d_s 、同様に最早出発時刻を e_s 、最遅到着時刻を l_s とする。参加者のスケジュールに余裕がある場合、 $l_s - e_s$ は出発地から目的地までを結ぶ移動時間よりも長くなる。

情報 S はドライバーの集合 D と、ライダーの集合 R に分けられる。 D に含まれるドライバー i が、ライドシェアリングに参加してライダーを乗せた場合に許容できる最大移動時間を T_i 、車両の乗車定員を C_i とする。また、ライダー j がミーティングポイントへ歩いていける最大歩行可能距離を m_j とする。さらに、ドライバー i の出発地、目的地を o_i, d_i 、ライダー j の出発地、目的地を o_j, d_j と定義する。

i から j の距離を d_{ij} 、二点間の移動時間を t_{ij} とあらわす。さらに、少なくとも 1 人は歩いて行けるライダーがいるミーティングポイントの集合を M とし、ライダー j が乗車可能なミーティングポイントの集合を M_j^p 、同様に下車できるミーティングポイントの集合を M_j^d とする。次に、乗車点と降車点の組み合わせを弧 a で表す。ライダー j にとっての弧は、弧 a の集合 $A_j = \{(k, l) | k \in M_j^p, l \in M_j^d\}$ で表せる。すなわち、ライダー j は M_j^p の中のいずれかのミーティングポイントで乗車し、 M_j^d の中のいずれかのミーティングポイントで下車する。最後に、ミーティングポイント m におけるライダーの乗降にかかる時間を τ_m とする。

以上のドライバー $i \in D$ 、ライダー j の集合 $J \in R$ 、弧 $a \in A$ の 3 つの情報に基づき、ライドシェアリングのマッチングを定式化する。以降 (i, J, a) と表す。上述したように、ドライバー、ライダーともに乗降それぞれ 1ヶ所のミーティングポイントにのみ立ち寄り仮定すると、実行可能なマッチはすべて 2ヶ所のみミーティングポイントの弧である $a \in \bigcap_{j \in J} A_j$ で乗降点を持つ。また、ドライバー、乗車するライダーは同一のルートを通る必要があり、さらに、解は車両の容量制約のため $|J| + 1 \leq C_i$ を満たさなければならない。加えて、マッチングが成立するためには参加者全員が e_s と l_s の間で同時に、2つのミーティングポイントの弧である a を利用する必要があり、かつドライバーの移動時間が T_i を超えてはならない。

ミーティングポイント $a = (k, l)$ を用いるマッチ (i, J, a) が時間的に実行可能であることを確認するため、それぞれの参加者にミーティングポイント k (乗車点) におけるタイムウィンドウを導入する。参加者 p (i または $j \in J$) におけるミーティングポイント k でのタイムウィンドウは図-3 のように $[e_p^k, l_p^k]$ で表される。ここで、 $e_p^k = e_p + t_{opk}$ 、 $l_p^k = l_p - (\tau_k + t_{kl} + \tau_l + t_{ldp})$ である。時間的にマッチングが成立するためには、タイムウィンドウであるこの間の時間内に共通の時間帯が参加者全員に存在する必要がある。つまり、図-4 のように次の式(1) が成り立たなければならない。

$$\max \left(\max_{j \in J} e_j^k, e_i^k \right) \leq \min \left(\min_{j \in J} l_j^k, l_i^k \right) \quad (1)$$

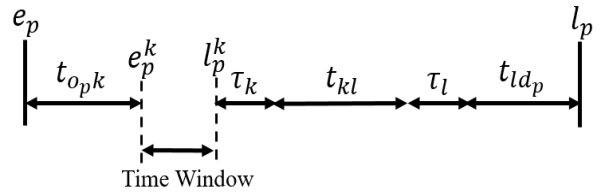


図-3 ミーティングポイントを考慮したタイムウィンドウ

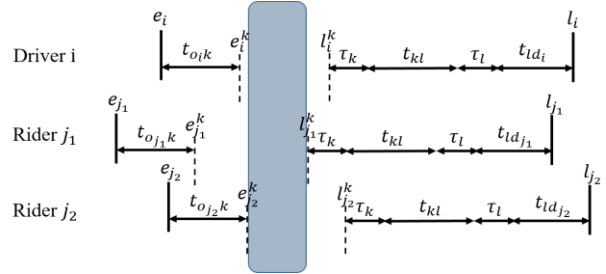


図-4 マッチングが成立するために必要なタイムウィンドウ

$\max(\max_{j \in J} e_j^k, e_i^k)$ は参加者の中で最も遅い最早出発時刻、 $\min(\min_{j \in J} l_j^k, l_i^k)$ は参加者の中で最も早い最遅出発時刻であり、この 2 つの時刻の間にミーティングポイント k を出発すればライドシェアが成立する。さらに、ドライバーが許容できる最大移動時間は T_i であることから、乗車時間は次の式(2)を満たさなければならない。

$$t_{oik} + \tau_k + t_{kl} + \tau_l + t_{ldi} \leq T_i \quad (2)$$

ここで、ドライバー i とライダーの集団 J が $a = (k, l)$ でマッチするとき、移動短縮距離 $\sigma_{(i, J, (k, l))}$ は

$$\begin{aligned} \sigma_{(i, J, (k, l))} &= d_{o_i d_i} - (d_{o_i k} + d_{kl} + d_{l d_i}) \\ &+ \sum_{j \in J} (d_{o_j d_j} - (d_{o_j k} + d_{l d_j})) \end{aligned} \quad (3)$$

と定義される。 $\sigma_{(i, J, (k, l))}$ は、ドライバー、ライダーが相乗りをせずに個別に移動した際の総移動距離と相乗りをした場合の総移動距離の差分として定義されるため、通常、 $\sigma_{(i, J, a)}$ は正の値を取る。式(3)のライダー j の $d_{o_j k}$ 、

$d_{l d_j}$ は歩行可能距離 m_j よりも小さくなければならない。

$\sigma_{(i, J, a)}$ の値が大きいほど、車両の持つキャパシティを効率的に活用しているといえる。

次に、マッチング問題を最適化問題として定式化するため、Agatz et al.⁹⁾ および Stiglic et al.¹⁰⁾ に倣い、図-5 に示す 2 部グラフを定義する。ドライバー i とライダー j のノードをつくり、ノード間に実現可能なマッチの組があればそれぞれをつなぐエッジを作成する。さらに、複数のライダーの集団 J についてもドライバー i と実現可能なマッチがあればエッジを作る。エッジは同一のライダー・ドライバーのペアに対して複数存在 (すなわち、複数のミ

ーティングポイントで乗降可能) する場合があるが, その場合には最も運転短縮距離が大きくなるものをそのノードにおけるエッジとし, 1 組のノード間には 1 つのエッジしか存在しないようにネットワークを構築する. 各エッジ e ($e \in E$) に対して, マッチング参加人数 v_e , 最大運転短縮距離 σ_e の 2 つの情報を付与する. 図-5 の例では, d_2 は n_1 (及び n_1, n_2 のペア) に対して相乗りを提供できないことが確認できる.

以上に定義した 2 部グラフに基づくマッチング最適化問題として, マッチング参加人数の最大化と運転短縮距離の最大化の 2 種類を考えることができる. 両者は類似した解を出すことが想定されるが, 完全には一致しない点に注意が必要である. Stiglic et al¹⁾をもとにその具体例を図-6 に示す. ここでは簡単のためドライバー 2 人 (d_1, d_2) ライダー 2 人 (r_1, r_2), ミーティングポイント 2 地点 (m_1, m_2) とする. 矢印上の数字はノード間の距離を表している. 最も運転距離が短縮されるのは d_1 もしくは d_2 のどちらかのみが 2 人のライダーとマッチをした時であり, 距離を 6 短縮したことになる. 一方, それぞれ 1 対 1 でマッチした場合, 全員参加できるが, 運転短縮距離は 4 と短くなる. このように, 参加人数の最大化と移動短縮距離の最大で異なる解となる可能性がある.

本研究では, 辞書式目標計画法 (lexicographic goal programming) の考えに基づき, まずマッチング参加人数最大化問題を解き, 得られた最適解を達成することを制約条件に加えた上で運転短縮距離最大化問題を解くことで最適なマッチングを導く. 具体的には, マッチング参加者数最大化問題は次のように定義される.

$$\max z_1 = \sum_{e \in E} v_e x_e \quad (4)$$

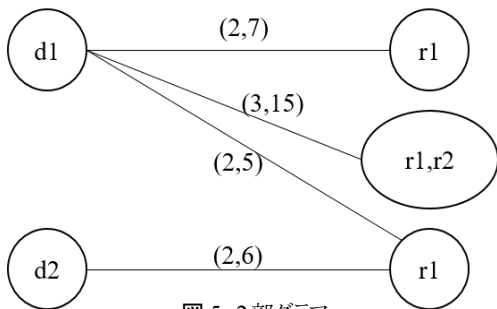


図-5 2部グラフ

(括弧内はマッチング参加人数, 最大運転短縮距離)

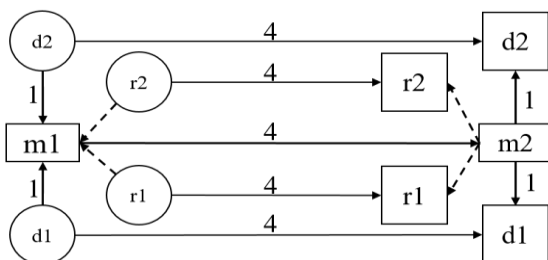


図-6 運転短縮距離とマッチした人数の関係

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{e \in E_i} x_e \leq 1 \quad \forall i \in D, \\ & \sum_{e \in E_j} x_e \leq 1 \quad \forall j \in R, \\ & x_e \in \{0,1\} \quad \forall j \in E. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, x_e はマッチングに参加するかどうかを表す決定変数, E_i はドライバー i のエッジの集合, E_j はライダー j のエッジの集合である. まず, 式(4)の 0-1 整数計画問題を式(5)の制約条件のもとで解き, 解 z_1^* を得る. 次に以下で定義される運転短縮距離最大化問題を, 式(4), 及び, $\sum_{e \in E} v_e x_e \geq z_1^*$ の制約条件化で解く.

$$\max z_2 = \sum_{e \in E} \sigma_e x_e \quad (6)$$

4. 数値計算

本研究では, 島根県飯南町の地理情報, 人口構成を参考に, 乱数を用いた仮想データを作成し, 100 回の繰り返す数値計算を行う. 一般的に, 中山間地域においては買物や診察などのために離れた地方都市へ出向くトリップが多い. そこで本研究では, 飯南町と広島県三次市の地理関係を仮想的に想定しマッチング率の分析を行う. 飯南町と三次市はおよそ 30km の距離がある. 本研究では表-1, 表-2 のように条件を設定して計算を行う. ただし, 後に述べるバスの場合のミーティングポイントの数は, 表とは異なる.

本研究においては以下の 3 つの変化を仮定しのマッチング率への影響を分析する.

(1) 出発地の空間的密度の変化

中山間地域においては居住地が空間的に疎に分布していることが多い. しかし, ミーティングポイントまで徒歩でアクセスすることを想定する場合, ドライバー及びライダーの空間分布が大きな影響を与えることが予想される. そこで, 図-7 のようにライダーの居住地の範囲について 3 通りのシナリオ(OD_Scenario1~3)を想定し, それぞれ一辺の長さが 2km, 3km, 4km の正方形の範囲に居住

表-1 本研究における設定

ミーティングポイントでの乗降時間	乗降時間 τ_m : 2分
歩行速度	4km/h
車両走行速度	40km/h
ミーティングポイントの数 (出発地/目的地)	50/50

表-2 ドライバー・ライダーの条件

ドライバー		ライダー	
最大の移動時間 T_i	$t_{kl} + 5 \sim 6$ 分	歩行可能距離 m_j	年齢によって異なる
乗車可能人数 C_i	5人	出発時間 e_j	8:00~9:30
出発時間 e_i	8:00~10:00	到着時間 l_j	$e_j + t_{kl} + 60$ 分
到着時間 l_i	$e_i + t_{kl} + 5 \sim 15$ 分		

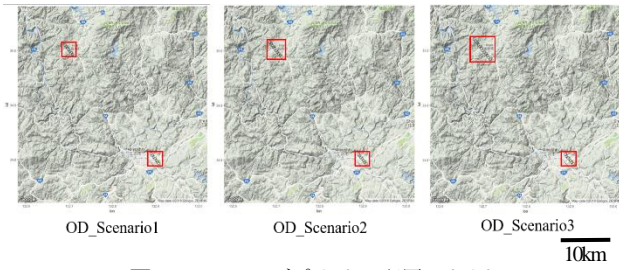


図-7 ミーティングポイントの配置シナリオ

地が密集している場合でどのようにマッチング率に影響があるのかを確認する。ただし、目的地はいずれの場合も一辺 2km の正方形の範囲に密集しているものとする。

(2) 人口・年齢構成の変化

今後、高齢化が進行した場合にどのようにマッチング率が変わるかを検証するため、人口減少・高齢人口の割合の変化を 2 つ目の変数とする。本研究では島根県飯南町の人口・人口予測⁹⁾を基に表-3 のように 3 通りのシナリオ(P_Scenario1~3)を設定する。また、年齢別のミーティングポイントまでの歩行可能距離、運転免許保有率⁷⁾を表-4 のように設定する。ただし、ドライバーの 5%、ライダーの 20% がライドシェアリングに参加する意思があるものとして計算を行う。

(3) 移動手段の変化

本研究ではタイムウィンドウを導入した場合のライドシェアの有効性を確認するため、路線バスの場合、ドライバーにタイムウィンドウがある場合、ない場合の 3 通りのシナリオを設定する。バスは、図-7 のように設定した範囲に、それぞれ対角線上におよそ 500m 間隔でバス停を設置し、1 時間に 1 便の運行頻度とした。ここではバス停へたどり着けば確実に乗れるよう時間を設定した。ドライバーにタイムウィンドウがある場合は、乱数で発生させた出発時間から 5~15 分の余裕を持たせており、タイムウィンドウを考慮しない場合は設定した 8 時~10 時でどの時間でも出発できるものとした。本研究の結果

表-3 人口減少・高齢化のシナリオ

	P_Scenario1	P_Scenario2	P_Scenario3
人口	1000	850	700
~64歳	57%	50%	53%
65~74歳	18%	17%	13%
75~歳	25%	33%	34%

表-4 年齢別の諸条件

	~64歳	65~74歳	75~歳
歩行可能距離	500m	800m	1200m
運転免許保有率	99%	70%	30%

ではそれぞれのシナリオを bus, normal, free と区別している。

5. 分析結果

以下では、出発地、目的地ともにアクセス可能なミーティングポイントが存在し、かつ移動を提供してくれる可能性のあるドライバーが存在するライダーの数を、サービス利用意向を示した全ライダーで割ったものをポテンシャル率と呼ぶ。また、利用意向を示した全ライダーと、実際にマッチングに成功したライダーの人数の割合をライダーのマッチング率と呼ぶ。また、同様にドライバーの場合はドライバーのマッチング率と呼ぶ。

(1) ライダーのポテンシャル率・マッチング率

図-8、図-9 にライダーのポテンシャル率、マッチング率の計算結果を示す。図-8 よりライダーの居住地の範囲が広がるほどポテンシャル率が低下していることがわかる。また、高齢化が進行することで徒歩圏が狭くなるため、高齢化が進むにつれてポテンシャル率が低下する傾向にあることが確認できる。しかし、移動手段がバスであった場合は、高齢化の進行による影響は限定的であることが確認された。図-8、図-9 を比較すると、マッチング率が 5~10% 程度低下しており、さらに分散が小さく

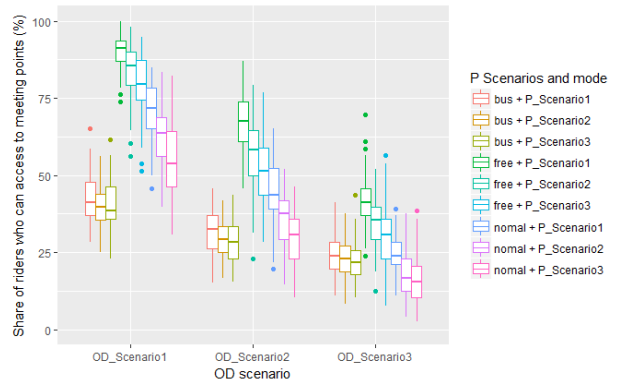


図-8 ポテンシャル率

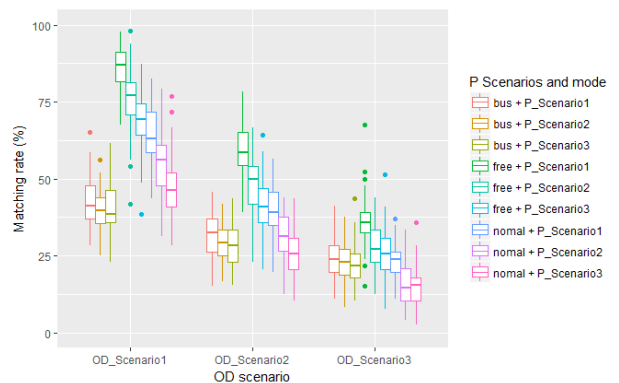


図-9 ライダーのマッチング率

なる傾向にある。バスを移動手段とした場合はポテンシャル率とマッチング率は同じ値になっている。

(2) ドライバーのマッチング率

ドライバーのマッチング率を図-10 に示す。bus の場合は公共交通であるため、ドライバーのマッチング率は考慮しない。ドライバーのマッチング率については、人口減少・高齢化による影響は小さい。また、出発地の範囲が広がるにつれてマッチできる組が減少することから、ドライバーのマッチング率も低下しているものと考えられる。

(3) ドライバーの不足によりマッチできなかったライダーの割合

徒歩圏内にミーティングポイントがあり、かつ移動を提供してくれる可能性のあるドライバーが存在するライダーのうち、マッチングが成立しなかったライダーの割合を図-11 に示す。移動手段がバスの場合、ミーティングポイント（バス停）に到達できる利用者は必ずサービ

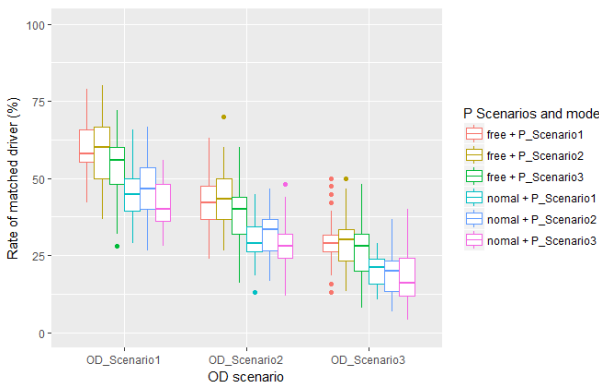


図-10 ドライバーのマッチング率

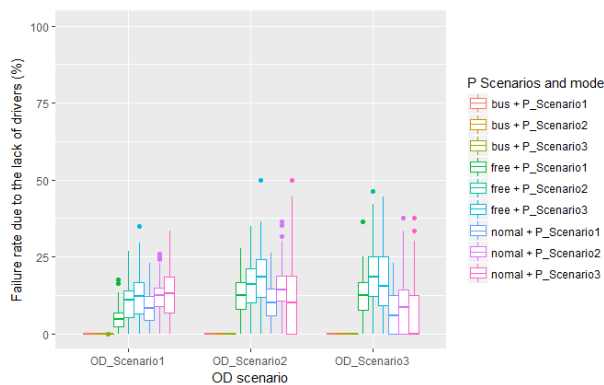


図-11 ドライバー不足によりマッチできなかったライダーの割合

スを享受できる一方、ライドシェアの場合、ミーティングポイントに到達できたとしてもドライバーがおらずサービスを享受できないケースが発生することが確認できる。

6. 結論

本研究では、Stiglic et al.¹⁾により提案されたライドシェアシステムの中山間地域における成立可能性を数値計算を通じて確認した。分析の結果、(1) 既存の路線バスに比べてライドシェアサービスの方がサービスを享受できる総数が多い可能性があること、(2) ただし、その効率は地区の人口分布や高齢化率に依存しており、状況によっては路線バスのような形態の方が望ましい場合も存在することが確認された。

今回の分析では限られた数値計算を示すのみにとどまったが、今後、数値計算のシナリオを細かく設定し挙動の確認を進めるとともに、他のマッチングアルゴリズムとの比較や、実データを用いた分析の実施などを行う必要がある。また、マッチング率の目標値を設定していくことも今後の課題である。

参考文献

- 1) Mitja Stiglic, Niels Agatz, Martin Savelsbergh, Mirko Gradisar., The benefits of meeting points in ride-sharing systems, *Transportation Research Part B*, 82, pp.36-53, 2015.
- 2) 谷本圭志, 倉持裕彌, 土屋哲: 活動能力に着目した高齢者の買い物手段に関する考察—中山間地域を対象に, *土木学会論文集 D3*, vol.70, No.5, 1_781-1_788, 2014
- 3) 佐々木邦明, 二五啓司, 山本理浩, 四辻裕文: 低密度居住地域における交通制約者の移動手段としてのライドシェアの可能性, *社会技術研究論文集*, vol.10, pp.54-64, 2013.
- 4) M. Furuhashi, M. Dessouky, F. Ordoñez, M.-E. Brunet, X. Wang, and S. Koenig, "Ridesharing: The state-of-the-art and future directions," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 57, pp. 28-46, 2013.
- 5) Niels A.H. Agatz, Alan L. Erera, Martin W.P. Savelsbergh, Xing Wang: Dynamic ride-sharing: A simulation study in metro Atlanta, *Transportation Research Part B* 45, pp.1450-1464, 2011.
- 6) 飯南町人口ビジョン : <http://www.iinan.jp/files/original/201603051331002810513.pdf>
- 7) 警察庁 運転免許統計 平成 29 年版 <https://www.npa.go.jp/toukei/menkyo/index.htm>

(?)

Numerical Simulation on the Possibility of Ride-Sharing System in Rural Areas

Takatoshi MORIWAKI, Makoto CHIKARASHI and Akimasa FUJIWARA