

# 地方部における持続可能な短距離ライドシェア に関する制度分析

丸山満帆<sup>1</sup>・四辻裕文<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: 156t140t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 神戸大学特命助教 自然科学系先端融合研究環重点研究部 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: yotsutsuji@people.kobe-u.ac.jp

地方部では、移動手段の制約を受けて、世帯の誰かが自家用車を利用すると残された世帯員は近距離施設への外出機会が制限されるという場合がある。このような世帯員の移動支援策の一つに、他の世帯が所有する自家用車への相乗り（短距離ライドシェア）がある。長距離トリップの燃料費等の折半といった経済的インセンティブ付与が困難な短距離ライドシェアでは、運転者が他人を同乗させる主な動機として利他心がある。同乗者候補に比べて運転者候補の人数が多くトリップ頻度も高いという状況下では、運転者候補と同乗者候補の二部マッチングに基づく短距離ライドシェアシステムは、持続可能性が課題となる。本研究では、制度による課題解決に着目し、そのような状況下の短距離ライドシェアシステムの持続可能性に対する情報提供制度の効果を検討する。

*Key Words* : Short-trip ride-share, Bipartite matching, Other-regarding preference, Information rule

## 1. はじめに

### (1) 背景

地方部でバスやタクシーを利用できない村落に居住する世帯では、世帯の誰かが自家用車を使用すると、移動手段を持たない残りの世帯員は近距離の生活関連施設への外出機会が制限されることがある。このように短距離トリップの移動手段に対して制約を受ける世帯員に向けた移動支援策として、他の世帯が所有する自家用車への相乗りのシステム化が提案されている<sup>1),2),3)</sup>。

一般に相乗りの形態は様々であるが、本研究では、自家用車の運転者がトリップの起終点の途中で他の世帯の世帯員を非金銭報酬のもとで同乗させるような形態に着目する。本稿ではこれを「ライドシェア」と呼ぶ。また、短距離トリップを対象に、運転者候補として登録された会員と同乗者候補として登録された会員に対する二部マッチングやインセンティブ付与といったサービスを通じて、運営者がライドシェアを実現するシステムに着目する。本稿ではこれを「短距離ライドシェアシステム」と呼ぶ。以下、特に断らない限り、この短距離ライドシェアシステムを「当システム」と呼ぶ。

佐々木ら<sup>1),2),3)</sup>は、地方部において当システムが成立する条件の一つに、同乗者候補に比べて運転者候補のトリップ頻度が高くその人数も多いという状況を挙げた。そのような状況下で、運転者候補と同乗者候補の二部マッチングに基づき非金銭報酬でライドシェアが行われる場合、当システムの持続可能性が課題になる

と考えられる。

### (2) 課題の認識

トリップ長が中長距離ならば、運転者が他人を同乗させる動機の一つは、燃料費等を同乗者に折半してもらいたいことだろう。しかし、短距離トリップの場合、同乗者に肩代りしてもらい程度の燃料費も掛からない。したがってこの場合、金銭的ではない動機付けを運転者候補に与えなければ、当システムを持続させることは困難になるだろう。そこで本研究では、運転者候補の主な動機として、同乗者候補への利他心に着目する。

トリップ頻度及び会員数が運転者候補と同乗者候補で異なる場合、運転者候補と同乗者候補のマッチングを前提した当システムでは、マッチする相手がいなかったという機会を度々経験した会員がもはや当システムに参加しなくなることが懸念される。そこで本研究では、マッチするペア数を維持するための制度として、情報提供制度に着目する。すなわち、会員のライドシェア成立可否に関する情報を運営者が運転者候補に提供することによって、ライドシェア成立可否に対する運転者候補の期待を誘導するような制度に着目する。

### (3) 目的

本研究は、地方部において非金銭報酬のもとで運転者候補と同乗者候補の利他的選好に支えられた短距離ライドシェアシステムを分析対象とし、制度を用いたシステム持続可能性を検討する。そのために、既往研

究の実証的知見<sup>1),2),3)</sup>に基づき、以下を前提とする。まず、ライドシェア成立可否の状態に関して、運転者候補は、同乗者候補のために迂回して目的地に向かうのか迂回せずに直接向かうのか近視眼的に決定する一方、同乗者候補は、ライドシェア成立を期待して外出するのか在宅して外出を先延ばしするのか遠視眼的に決定する。また、運転者候補と同乗者候補の二部マッチングでは、各期で安定性をもつ相手とマッチできる受入保留方式を採る。この方式では、マッチしたペアは安定性を有するが、マッチしたのが必ずしも選好順序第一位の相手とは限らない。マッチした相手とは必ずライドシェアをするものとし、マッチング後のキャンセルは考慮しない。ある期で安定性をもつ相手とライドシェアを出来たとしても、気兼ねといった利他心や取引外部性の影響があるので、次の期には選好順序に変動が起きる。そのため、次の期で異なる相手とマッチする可能性やそもそも参加しなくなる可能性がある。

このような前提のもと、本研究の目的は、短距離ライドシェアシステムにおいて運営者が制度を導入しなければ当システムへの参加人数とライドシェアが成立したペア数は減少することを数値シミュレーションで示した後、情報提供制度の導入によるシステム持続可能性について検証することである。

## 2. 位置付け

### (1) 関連する諸研究

当システムでは、運転者候補は、予定通りにトリップを行わず同乗者候補のために予定の一部を変更して、同乗者候補を相乗りさせることになる。このような形態に限らず、車の相乗りには多様な形態がある。例えば、運転者がラウンドトリップの起点から途中までや途中から終点までに同じ世帯員を相乗りさせるという形態は、「送迎」と呼ばれる。また、通勤や帰郷のように予定通りのトリップの起終点が運転者と同乗者でほぼ同じという形態は、「カープール」「バンプール」と呼ばれる。カープールやバンプールではトリップ費用の削減が主な動機となるが、送迎では同じ世帯員への利他心が主な動機となる。

社会心理学によると、利他行動には、利他的な動機と利己的な動機がある。前者は、相手が助かると自分も嬉しいという外心的利他、困っている相手と自分は心理的に不可分だというアイデンティティ共有、等であり、後者は、助けてあげようという内心的利他、常識的には助けるべきだという社会的規範、困っている相手を見続けるのは心苦しいという認知的不協和回避、等である<sup>4)</sup>。神経経済学によると、利他行動には、遺伝子レベルの動因が存在する。相手が自分より劣位な立

場であると知覚すると、自分の生体内にはオキシトシンというホルモンが分泌されて、自分がその立場であれば相手にしてもらいたいことを相手にも為そうと促すと言われている<sup>5)</sup>。

これらの知見を鑑みると、運転者にとって自分が将来同乗者の立場になったときの見返りが期待できるという互惠性や応報性に基づくシステムではないとしても、ライドシェアは成立すると考えられる。すなわち、たとえ自分は同乗者になる機会が無いと解っていても、運転者は相乗り行動を選ぶ場合があると推測される。

佐々木ら<sup>1),2)</sup>は、このような利他心に支えられた二部マッチングに基づく短距離ライドシェアを地方部の低密度居住地域で成立させるための条件を調査した。そして、無償で相乗りさせる行為は、運転者にとって相手が信頼できる知人ならば抵抗感はないが、同乗者にとっては気兼ねという心理的負担になることを示した。そのうえで、それをシステム持続可能性への課題の一つに挙げた。長田ら<sup>3)</sup>は、マーケティングの心理的方略を用いて、地域住民に対して潜在的な参加者を掘り起こした。会員の顔合わせの集会、利用者の声のメール、気兼ねに相当するポイント券の導入、等を通じて会員の増加を実践した。これらの実証的知見は、制度面での工夫次第では当システムが持続可能であることを示唆している。

Agatz *et al.*<sup>6),7)</sup>は、dynamic ridesharing (DRS) の分析フレームを検討した。ここで言う dynamics とは、利用時間帯が固定的なカープールというよりもむしろ流動的な都市内タクシーに近い形態を指す。彼らの分析フレームでは、参加人数の最大化と総旅行費用の最小化がシステムの目的であった。Kleiner *et al.*<sup>8)</sup>は、同乗者が運転者に付けたビット額に基づき耐戦略性をもつオークションメカニズムに従う DRS を提案した。彼らはマルチエージェントシステムとして DRS を分析したが、彼らの分析フレームでは、台キ口の最小化とマッチしたペア数の最大化がシステムの目的であった。Chan & Shaheen<sup>9)</sup>、中村<sup>10)</sup>は、北米での車の相乗りの発展経緯を調べた。北米での相乗りは、自主的に利用者が結成される形態やサービス業として運営される形態を含めて多様であり、HOT レーン通行料対策や目的地駐車料対策が利用者の動機として挙げられた。Furuhata *et al.*<sup>11)</sup>は、DRS の形態を identical, inclusive, partial, detour の 4 つに分類するとともに、マッチングサービスの運営形態も分類した。Siddiqi & Buliung<sup>12)</sup>は、ICT を活用した DRS のシステム運営の発展経緯を調べた。これらの先行研究は、運転者候補が地域内で高密度に居住して頻繁に移動し、同乗者候補がある場所で予約すると即座に運営者が周辺の複数の運転者候補を探索するというものである。つまり、本研究とは分析

対象と適用地域が異なるといえる。

## (2) 本研究の位置付け

本研究は、佐々木ら<sup>1),2),3)</sup>の実証的知見に基づいて短距離ライドシェアシステムをモデル化し、情報提供制度の導入がシステム持続可能性に及ぼす効果について理論的に検証するものである。本研究が想定する当システムの適用地域とは、運転者候補と同乗者候補は低密度に居住するが、生活関連施設への旅行費用は殆ど掛からないような地域である。運転者候補は、例えば「次週の外出時には自家用車に同乗させても構わないので、今週中に同乗者候補の予約を受けたい」という程度で当システムに参加する会員を想定する。同時に、同乗者候補は、例えば「次週の外出時に相乗りをしたいけれど、上手くマッチされなければ次々週に先延ばしても構わない」という会員を想定する。この意味で、本研究が想定している地域社会は、DRSに関する先行研究の中で想定された社会とは異なるといえる。

当システムのモデル化にあたっては、DRSの先行研究で提案された分析フレームを本研究が想定する地域社会に適した形で応用する。そのうえで、情報提供制度の効果を検証することになる。本研究は、システムを適用する地域社会の様相が既往のライドシェア研究とは異なるものであるといえる。

## 3. 枠組み

### (1) マッチング、ライドシェアリング

当システムでは、会員がライドシェアに至る過程を「マッチング」と「ライドシェアリング」という2つの段階(stage)に大別する。マッチング段階とライドシェアリング段階を併せて、期(period)と呼ぶ。以下、便宜的にマッチング段階を前段階、ライドシェアリング段階を後段階と呼ぶ。今期の後段階は、直後の期の前段階と重複するように設定する。重複する段階では、マッチングとライドシェアリングが同時に行われる。

各々の段階の開始時刻から終了時刻までの時間は、例えば全て一週間にする等、期に依らず一定であると仮定する。ある期の前段階と後段階の終了時刻は各々、次の期の開始時刻になる。会員は、前段階の時間内で終了時刻までに予約をする。運営者は、終了時刻にマッチングを行い、マッチした相手を会員に通知する。会員はマッチした相手と後段階の時間内でライドシェアを行い、運営者は同時間内に次の期のマッチングを行う。

本研究では、運転者候補のトリップ頻度は高いが同乗者候補のそれは低いということを示すにあたって、便宜上、運転者候補は每期必ず外出するが同乗者候補は在宅することがあると設定する。また、簡単化のため、

運転者候補は、出発地と目的地を結ぶ最短ルートとは異なる迂回ルート上でライドシェアを行う一方、同乗者候補は、その迂回ルート上に出発地と目的地をもつ。

本研究では、マッチした相手と後段階で必ずライドシェアを行うと設定する。マッチした相手が後段階で約束を反故にする場合もある。この場合を想定したキャンセル阻止に関する研究は別の機会に示す。

### (2) 利他的選好

利他心を持つ会員は、相手の意図・タイプ・効用などを自らの行動に反映すると考えられる。行動経済学では、利他的選好(other-regarding preferences, social preferencesと同義)のモデル化のアプローチは3つに大別される<sup>13),14)</sup>。intention-basedアプローチでは、なぜ相手はその行動をとったのかという相手の意図を自分の行動に反映し、相手が親切ならば親切な行動を、敵対するならば敵対的行動をとる。type-dependentアプローチでは、どんなタイプの相手かを自分の行動に反映し、良い人には親切な行動を、悪い人には敵対的行動をとる。これらのアプローチでは、互惠性や応報性を考慮したゲーム理論を用いる。一方、相手の意図やタイプでなく、相手の効用や行動を自分の効用や行動に反映するoutcome-basedアプローチがある。このアプローチではこれまで、純粹利他性モデル、warm-glow givingモデル、不平等回避モデルが提案されてきた。

一方、土木計画学では、outcome-basedアプローチを主として、利他的選好を考慮した行動モデルが開発されてきた。小林・喜多・多々納<sup>15)</sup>は、利他的動機による相乗りと父権的動機による送迎を区別したうえで相手の効用値を線形和として組み込んだ誘導型ランダム効用モデルを提案した。森川・田中・荻野<sup>16)</sup>は、他者集合を代表していると推測される効用値と自分自身の効用値との差を反映したシェア型ログサム変数に基づくランダム効用モデルを提案した。本研究では、outcome-basedアプローチに従うFehr & Schmidt<sup>17)</sup>のモデルを用いて同乗者の気兼ねと表現することにする。

### (3) 会員の状態、行動

会員は、ライドシェアが成立する状態と成立しない状態のいずれかに置かれる。直前の期の後段階で、会員は、その前段階に選んだ行動の結果に依っていずれかの状態を経験したことになる。マッチした相手とはライドシェアの効用を分かち合うことが出来るが、マッチしなかった相手とは出来ないものとする。そして、その後段階と重なる今期の前段階において、その経験に基づきどの相手に対してどの行動を選ぶかの意思決定を行う。その際、今期の後段階における状態の不確実性を考慮して行動の割引現在価値を見積もることにな

る。会員は、個々の相手に対して価値が最も高い行動を選んだ後、全ての相手に対する選好順序をその価値の降順に決定する。

各々の期の運転者候補と同乗者候補の行動は、その期の状態にのみ依存し、期それ自体には依存しないと仮定する。そして、両者の行動を次のように仮定する。まず、各期の行動に関する同乗者候補の選択肢は、「在宅する」、「外出する」とする。同乗者候補は、外出の際にはライドシェアの他に交通手段がないので、遠視眼的 (hyperopic) に行動を決めるとする。将来の期における状態の不確実性を無限期に亘って考慮し、その総期待効用の割引現在価値に基づき、毎期の行動を選ぶと仮定する。次に、各期の行動に関する運転者候補の選択肢は、「同乗者候補のトリップ予定ルートを含んでいる迂回ルートを選ぶ」、「迂回せずに最短ルートを選ぶ」とする。運転者候補は、近視眼的 (myopic) に行動を決めるとする。その期の後段階における状態の不確実性のみを考慮して迂回するか、当システムに参加せずに最短ルートを選ぶかを見積もり、当該期の行動を選ぶと仮定する。

#### (4) 外部性

当システムは、外出の目的から派生した短距離トリップ需要に基づいて会員のマッチングが行われるような交通サービス市場とみなすことができる。松島<sup>18)</sup>によれば、交通市場において市場の失敗が生じる要因には、混雑の外部性、取引外部性 (市場厚・市場薄の外部性と同義)、規模の経済性、手段補完性の四つがある。このうち、当システムで着目すべきは、取引外部性 (trading externality, thin/thick market externality と同義)、手段補完性 (strategic complementarity in mode choice) の2つといえる。前者は、会員の中で当システムへの参加人数が期ごとに減少すると、運転者候補と同乗者候補の双方の参加人数の減少に拍車を掛けるという外部性である。後者は、当システムに往路で参加する同乗者候補が、復路も同じ手段を選ぶ必要性を同時に考慮しなければならないという外部性である。

本稿では、このうち、取引外部性に焦点を絞る。今、ある期に当システムに参加しようとする一人の同乗者候補への外部不経済を考える。当該期に既に参加している他の同乗者候補の人数が多いほど、あるいは当該期の運転者候補の人数が少ないほど、この同乗者候補がいずれかの運転者候補とマッチする確率は小さくなる。この点が、この同乗者候補の参加意欲に影響を及ぼすと考えられる。当該期に参加しようとする運転者候補も同様である。

#### (5) 持続可能性を支える制度

運営者が当システムを持続させるための制度は、情報提供とインセンティブ付与という2つの側面から設計できると考えられる。前者は、メッセージやシグナルによって状態に対する会員の期待を誘導する制度を指す。後者は、インセンティブや利得によって会員の行動に関する意思決定を変容させる制度を指す。本稿では前者のみに着目し、情報提供制度を設計する。

本研究では、Kamenica & Gentzkow による説得コミュニケーションの分析枠組み<sup>19),20)</sup>を応用し、情報提供制度をモデル化する。この制度において「情報」とは、ライドシェアが成立したか否かの状態に応じて運営者が運転者候補に開示するメッセージのことを指す。運営者は、運転者候補の迂回ルート選択確率が最大になるように、メッセージの提供ルールを決める。本研究では、メッセージとして「ライドシェアできない」と「おそらくライドシェアできる」を用意する。運営者の戦略は、直前の期でライドシェア成立ならば、100%で「おそらくライドシェアできる」のメッセージを開示する一方で、不成立ならば、「ライドシェアできない」に加えて「おそらくライドシェアできる」のメッセージを任意の確率で開示することである。以下、この確率を「情報開示ルール」と呼ぶことにする。他方、運転者候補は、掲示されたメッセージに基づき、状態の生起確率をベイズ学習していくとする。

## 4. モデル

### (1) スケジューリング

$D$  を同乗者候補の集合、 $S$  を運転者候補の集合とし、互いに素  $D \perp S$  とする。会員の集合を  $N = D \cup S$  とし、会員数を  $|D| \geq 2, |S| \geq 2, |S| \geq |D|$  と仮定する。ある  $d \in D$  はすべての  $s \in S$  に対する選好順序を持ち、ある  $s \in S$  はすべての  $d \in D$  に対する選好順序を持つ。 $k \in N$  が持つ選好順序の二項関係を  $\succeq_k$  で表す。 $\succeq_k$  に関する選好順序の集合は弱順序を満たす。

運営者と会員は、図-1 に示すスケジュールに従うと仮定する。時刻の初期値を 0 と仮定し、期は 1 から始める。時刻  $\tau - 1$  から時刻  $\tau$  までの時間では、ライドシェアリング段階 (後段階) とマッチング段階 (前段階) が重複すると仮定する。 $\tau$  期において、前段階の終了時刻または後段階の開始時刻が、共に時刻  $\tau$  となる。 $\tau$  期における会員の意思決定は、後段階での状態が不確実な状況下で、前段階の終了時刻  $\tau$  の時点で行われる。

### (2) マッチング

Roth & Sotomayor<sup>21),22)</sup>、坂井他<sup>23)</sup>に倣って、 $D$  と  $S$  のマッチングを定義する。関数  $\mu: N \rightarrow N$  に対して

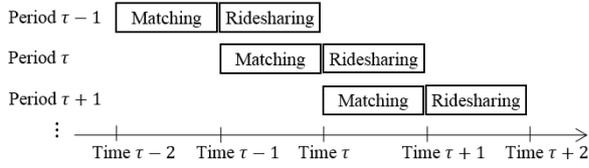


図-1 段階 (stage) と期 (period) と時刻 (time)

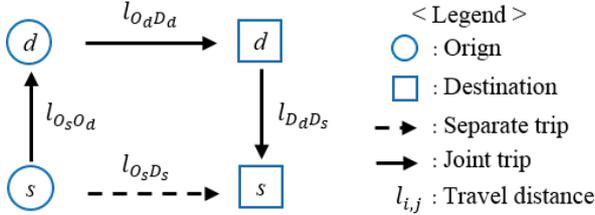


図-2 ネットワークを用いたライドシェアの考え方

$\mu(k)$  を  $k \in N$  の「相手」と呼ぶ． $\mu(d) \in S$  は， $d \in D$  が相手  $\mu(d)$  とマッチすることを表す． $\mu(s) \in D$  も同様に表す． $\mu(k) = k$  は，どの相手にもマッチしないことを表す．次式を満たす関数  $\mu$  を「マッチング」と呼ぶ．

$$\mu(d) \in S \cup \{d\} \quad \text{for } \forall d \in D \quad (1a)$$

$$\mu(s) \in D \cup \{s\} \quad \text{for } \forall s \in S \quad (1b)$$

$$\mu(\mu(k)) = k \quad \text{for } \forall k \in N \quad (1c)$$

このとき， $\mu(k) \succeq_k k$  を満たすならば，つまり，どの相手ともマッチしないことを好むかそれよりも選好順序上位の相手とマッチするのを好むならば，「 $\mu$  は個人合理性を満たす」と表現する．また，同乗者候補と運転者候補の組  $(d, s) \in D \times S$  が  $s \succeq_d \mu(d)$  且つ  $d \succeq_s \mu(s)$  を満たすならば，つまり，自分の選好順序の中で今の相手よりも上位の候補が存在するという状況がお互いに成り立つならば，「 $(d, s)$  は  $\mu$  から逸脱する」と表現する．個人合理性を満たし，且つ  $\mu$  から逸脱するペアが存在しないならば「 $\mu$  は安定性を満たす」と表現する．安定性を満たすマッチングを  $\mu^*$  とする． $\mu^*$  の集合を「安定マッチング集合」と呼び，

$$M = \{\mu^*(s), \mu^*(d) | \forall d \in D, \forall s \in S\} \quad (2)$$

で定義される  $M$  で表す． $\tau$  期に安定マッチング集合に属する  $(d, s) \in M$  は，互いに他の相手との抜け駆けが出来ない．しかし， $\tau + 1$  期に選好順序が変われば， $\tau + 1$  期の  $M$  は変化する．

本研究では， $\tau$  期の前段階における  $\succeq_k$  の選好順序は，時刻  $\tau$  までに全ての  $\mu(k)$  に付けた価値の大小によって順序付けられるとする． $k$  は，一人ひとりの相手に対して， $\tau - 1$  期にライドシェアを成立させた相手か否か，且つその相手と  $\tau$  期の後段階で再びライドシェア可能か否かを考慮し，時刻  $\tau$  で自分自身の行動を選択する． $k$  は，もしある相手とマッチしたくないならば，誰もマッチしないほうがよいという価値の順位に比べて，その相手の価値を劣位に順序付けることになる．

### (3) ライドシェアリング

Agatz *et al.*<sup>(6),(7)</sup>を参考にして，ライドシェアとトリップとの関係を図-2に示す．

任意のノード  $i$  と任意のノード  $j$  を結ぶリンク  $(i, j)$  の距離を  $l_{i,j}$  とする． $(d, s) \in M$  のトリップが同じ期の同じリンクで生じた場合，それはライドシェアの成立を意味する．ライドシェアが成立したリンクを  $(i^*, j^*)$  で表す． $\tau$  期にリンク  $(i^*, j^*)$  上で  $(d, s) \in M$  がライドシェアを成立させたとき，当該の  $d$  と  $s$  はライドシェアの効用を分かち合う．このとき， $d$  と  $s$  が得る効用を各々， $r_s^d(i^*, j^*)$ ， $r_d^s(i^*, j^*)$  で表す．以下，煩雑さを避けるため  $(i^*, j^*)$  の表記を略す．

$\tau$  期の  $d$  と  $s$  の起終点間の移動距離を各々  $l^d$  と  $l^s$  とする． $k \in N$  が予定するトリップの起点と終点のノードを  $O_k$  と  $D_k$  とおく．すると，例えば図-2の場合， $l^d = l_{O_d, D_d}$ ， $l^s = l_{O_s, O_d} + l_{O_d, D_d} + l_{D_d, D_s}$  のように定義される．そのうえで，ライドシェアの効用は，ライドシェアによる移動距離  $l^d$  に比例すると仮定する． $d$  は  $s$  がライドシェアのために迂回してくれた距離に応じて， $s$  は  $d$  と一緒にライドシェアが出来た距離に応じて，互いにライドシェアの効用を分かち合うものと仮定する．このとき， $r_s^d$  と  $r_d^s$  は次式で表される．ただし，単位距離当たりの効用を表すパラメータ  $\zeta^d$  と  $\zeta^s$  は， $\zeta^d, \zeta^s > 0$  を満たす．

$$r_s^d = \zeta^d l^d \frac{l^s}{l^d + l^s} \quad (3a)$$

$$r_d^s = \zeta^s l^d \frac{l^d}{l^d + l^s} \quad (3b)$$

### (4) 取引外部性

$\tau$  期に当システムに参加する  $d$  にとって， $D$  のうち当該期の参加人数  $n^D$  が増えると，任意の相手  $s$  とマッチできる可能性は低くなる．ところが，相手  $S$  のうち当該期の参加人数  $n^S$  が  $n^S > n^D$  を満たすならば，その可能性は高くなる．ここで， $\tau - 1$  期の  $n^D$  を  $\tau$  期の  $n^D$  で除した比率を  $\Delta^D$  で表す． $\tau$  期に  $n^D$  が減ると  $\Delta^D > 1$  が成り立つ．ただし， $\tau$  期の  $n^D$  がゼロの場合は  $\Delta^D = 1$  が成り立つと定義する．このとき， $(n^S - n^D)\Delta^D > 0$  な

らば  $\tau$  に対して正の外部性が及ぼされると考えられる．一方， $d$  が任意の相手  $\mu(d)$  とマッチした回数を  $m_{d,\mu(d)}$  で表すと， $m_{d,\mu(d)}$  が多くなるならば，その相手の価値を見積もる際には，さきほどの正の外部性の影響は小さくなると考えられる．以上は， $s$  についても同様に成り立つものとする．

本研究では， $\tau$  期の前段階で任意の相手の価値を見積もる際に， $d$  と  $s$  は，以下で定義する取引外部性  $\eta_s^d$ ， $\eta_d^s$  を考慮すると仮定する．ただし， $\xi^d, \xi^s, \kappa^d, \kappa^s$  はパラメータであり， $0 < \xi^d, \xi^s \leq 1$ ， $\kappa^d, \kappa^s \geq 1$  とする．

$$\eta_s^d = \xi^d(n^S - n^D)\Delta^D - \kappa^d \log m_{d,s} \quad (4a)$$

$$\eta_d^s = \xi^s(n^D - n^S)\Delta^S - \kappa^s \log m_{d,s} \quad (4b)$$

### (5) 利他性

Fehr & Schmidt<sup>17)</sup>を応用し，同乗者の気兼ねを定式化する．彼らのモデルでは，相手よりも自分の効用が低いと不平等感によって自分の効用は低下する．一方，本研究のモデルでは，同乗者候補は， $\tau - 1$  期に相手よりも高いライドシェア効用  $r_s^d$  を得ると，相手に対する気兼ねによって， $\tau$  期における当該の相手に対する自身の効用は低下すると考える．

同乗者  $d$  の気兼ねを  $h_s^d$  で表すと， $h_s^d$  は次式で表される．ただし， $h_s^d \leq 0$  を満たす．パラメータ  $\beta^d$  は， $\beta^d \geq 1$  を満たす．

$$h_s^d = -\beta^d \max\{0, r_s^d - r_d^s\} \quad (5)$$

### (6) 意思決定

$S$  と  $D$  の状態集合を  $C$ ， $S$  の行動集合を  $A$ ， $D$  の行動集合を  $B$  とする． $s \in S$ ， $d \in D$  は， $\tau - 1$  期の後段階の状態  $c \in C$  を観測して相手  $\mu(s)$ ， $\mu(d)$  の価値を見積もり，価値が最大となるような行動  $a \in A$ ， $b \in B$  を  $\forall \mu(s) \in D$ ， $\forall \mu(d) \in S$  に対して時刻  $\tau - 1$  に選択し，効用  $v_d^s(c, a)$ ， $v_s^d(c, b)$  を得るものとする．

$s$  は， $d$  とライドシェアするには迂回しなければならないが，迂回すれば必ず  $d$  とマッチできるとは限らない．以下， $d$  のために迂回をせずに， $s$  が直接目的地向かうことを「迂回しない」と表現する．一方， $d$  は， $s$  とライドシェアするには外出しなければならないが，外出すれば必ず  $s$  とマッチできるとは限らない．以下， $d$  が在宅することを「外出しない」と表現する．そして， $C$ ， $A$ ， $B$  を次のように定義する．

$$C = \{ \text{ライドシェア不成立, ライドシェア成立} \} \\ = \{c_0, c_1\} \quad (6a)$$

$$A = \{ \text{迂回しない, 迂回する} \} = \{a_0, a_1\} \quad (6b)$$

$$B = \{ \text{外出しない, 外出する} \} = \{b_0, b_1\} \quad (6c)$$

$\tau$  期の後段階の状態  $c' \in C$  は， $\tau - 1$  期の後段階の状態  $c \in C$  と  $\tau$  期の前段階での行動  $a \in A$ ， $b \in B$  に基づく斉時的マルコフ決定過程の状態推移確率  $p_{c,c'}^a \equiv \text{Prob.}(c'|c, a)$ ， $p_{c,c'}^b \equiv \text{Prob.}(c'|c, b)$  に従って遷移する．状態推移確率行列  $P^a$ ， $P^b$  を以下のように定義する．

$$P^a \equiv \begin{pmatrix} p_{00}^a & p_{01}^a \\ p_{10}^a & p_{11}^a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{00}^a & 1 - p_{00}^a \\ 1 - p_{11}^a & p_{11}^a \end{pmatrix} \quad (7a)$$

$$P^b \equiv \begin{pmatrix} p_{00}^b & p_{01}^b \\ p_{10}^b & p_{11}^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{00}^b & 1 - p_{00}^b \\ 1 - p_{11}^b & p_{11}^b \end{pmatrix} \quad (7b)$$

運転者候補  $S$  の意思決定をモデル化する．任意の  $d$  に対して付ける価値を  $V_d^s(c, a)$  で表す．運転者候補の行動は近視眼的と仮定したので， $\tau$  期の後段階の状態を考慮しないで  $v_d^s(c, a_0)$  の価値をもつ行動  $a_0 \in A$  を選ぶか， $\tau$  期の後段階の状態のみを考慮して  $V_d^s(c, a_1)$  の価値をもつ行動  $a_1 \in A$  を選ぶ．このとき， $s \in S$  の意思決定は次式で表される．

$$a^* = \arg \max\{v_d^s(c, a_0), V_d^s(c, a_1)\} \text{ for } \exists c \in C \quad (8)$$

$V_d^s(c, a)$  は次式で表される． $\delta$  は当該期の後段階の期待効用に対する割引因子であり， $0 \leq \delta \leq 1$  を満たす．

$$V_d^s(c, a) = v_d^s(c, a) + \delta \sum_{c' \in C} p_{c,c'}^a v_d^s(c', a) \quad (9a)$$

$$v_d^s(c_0, a) = \begin{cases} 0 & \text{if } a = a_0 \\ \eta_d^s & \text{if } a = a_1 \end{cases} \quad (9b)$$

$$v_d^s(c_1, a) = \begin{cases} r_d^s & \text{if } a = a_0 \\ r_d^s + \eta_d^s & \text{if } a = a_1 \end{cases} \quad (9c)$$

同乗者候補  $D$  の意思決定をモデル化する．任意の  $S$  に対して付ける価値を  $V_s^d(c, b)$  で表す．同乗者候補の行動は遠視眼的と仮定したので，無限期に亘る総期待効用の割引現在価値を最大化する行動  $b_0, b_1 \in B$  を  $\tau$  期に選ぶ．このとき， $V_s^d(c, b)$  は次式で表される．

$$V_s^d(c, b) \equiv E \left[ \sum_{\tau=0}^{\infty} \delta^\tau v_s^d(X^\tau, b) \mid X^\tau = c \right] \quad (10)$$

ところが， $D$  のトリップ頻度は  $S$  より低くて  $D$  は必ずしも外出しないと仮定したので， $D$  の在宅の頻度をモデルに考慮する必要がある．そこで，在宅率  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 1$ ) を導入し，当システムを利用できないにも関わらず止むを得ず外出する際の機会費用を在宅価値  $Z$

として与えることにする．そのため，先ほどの  $V_s^d(c, b)$  を次式のように再定式化する．

$$V_s^d(c, b) = v_s^d(c, b) + \delta \left( (1 - \alpha)(p_{c,0}^b Z + p_{c,1}^b V_s^d(c_1, b)) + \alpha Z \right) \quad (11a)$$

$$v_s^d(c_0, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } b = b_0 \\ \eta_s^d & \text{if } b = b_1 \end{cases} \quad (11b)$$

$$v_d^s(c_1, a) = \begin{cases} r_s^d & \text{if } b = b_0 \\ r_s^d + \eta_s^d + h_s^d & \text{if } b = b_1 \end{cases} \quad (11c)$$

ただし， $v_s^d(c_1, b_1)$  には気兼ね  $h_s^d$  が含まれる点に注意する．このとき， $D$  の意思決定は次式で表される．

$$Z, b^* = \arg \max_{b \in B} \{Z, V_s^d(c, b)\} \quad \text{for } \exists c \in C \quad (12)$$

## (7) 評価指標

当システムの持続可能性に関する評価指標は，各期における参加人数  $n^S$  と  $n^D$ ，ライドシェアが成立したペアの数  $|M|$ ，そして厚生水準  $W$  の3つとする．

このうち， $W$  は，ライドシェアが成立したペア  $(d, s) \in M$  の互いの価値に対するナッシュ積の総計で表されるとする．このとき，各期の  $W$  は次式で表される．

$$W = \sum_{(d,s) \in M} V_d^s(c_1, a_1) V_s^d(c_1, b_1) \quad (13)$$

## 5. 制度設計

### (1) 受入保留方式

運営者は，Gale & Shapley の受入保留方式 (Deferred Acceptance Algorithm, DA アルゴリズムと略す．GS アルゴリズムとも呼ばれる)<sup>24),25),26)</sup> に従い，安定マッチング集合  $M$  を期ごとに求めるものとする．受入保留方式で求めた  $M$  は，全員が  $\mu^*$  から逸脱する誘因を持たない．その意味で  $M$  は効率的である．また，全員を含むあらゆるペアも  $\mu^*$  から逸脱する誘因を持たない．その意味で  $M$  は提携ゲームのコアになっている．つまり  $M$  は，コアの部分集合になるので，パレート効率性と個人合理性を満たすことになる．

運営者が受入保留方式を用いる際の課題は， $S \subseteq M$  と  $D \subseteq M$  の双方ともに選好順序の戦略的虚偽表明をしたとしても運営者にはそれを阻止することが不可能であるという点である<sup>21),22),23)</sup>．受入保留方式では，双方のうちいずれかの側が先に選好順序上位の相手に申し込み，申し込まれた側がその相手の受け入れを一時保留する．このとき，申し込まれる側の選好順序は耐

戦略性を満たさない<sup>21),22),23)</sup>．したがって， $S \subseteq M$  と  $D \subseteq M$  のどちらを申し込まれる側に設定するのが実践上の課題となる．

本研究では，受入保留方式において申し込まれる側を運転者候補とする．その理由は，運転者候補は，虚偽表明してまでも特定の同乗者候補とライドシェアをしたいとは思わないだろうと考えられるためである．

### (2) 情報提供制度

Kamenica & Gentzkow の分析枠組み<sup>19),20)</sup> を応用し，情報提供制度をモデル化する．運営者は， $\tau - 1$  期の後段階でいずれかの状態  $c \in C$  を観測した後に， $\tau$  期の前段階において情報開示ルール  $\epsilon$  に従いながら運転者候補  $s$  に1つのメッセージを開示する．ここで，メッセージ集合を  $G^\epsilon$  とし，次のように定義する．

$$G^\epsilon = \{ \text{ライドシェアできない, おそらくライドシェアできる} \} \\ = \{g_0, g_1\} \quad (14)$$

まず，運営者の戦略をモデル化する．運営者が状態  $c \in C$  に基づいてメッセージ  $g \in G^\epsilon$  を提供する際の確率分布を  $\pi^\epsilon(g|c)$  とし，次のように設定する．

$$\begin{aligned} \pi^\epsilon(g_0|c_0) &= 1 - \epsilon & \pi^\epsilon(g_1|c_0) &= \epsilon \\ \pi^\epsilon(g_0|c_1) &= 0 & \pi^\epsilon(g_1|c_1) &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

情報開示ルール  $\epsilon$  は運営者が運転者候補  $S$  に勧める行動と解釈できる．運営者はいずれの状態が観測されたとしても， $S$  に対して迂回してもらうことを望むとする．

次に，情報提供制度下における運転者候補  $S$  の意思決定をモデル化する． $s \in S$  は， $g \in G^\epsilon$  に基づいて  $c \in C$  の生起確率に関するベイズ学習を行う． $c \in C$  に対する事前確率  $\bar{p}(c)$ ，事後確率  $p(c|g)$  を次式で表す．

$$\bar{p}(c_0) = 1 - \theta \quad \bar{p}(c_1) = \theta \quad (16)$$

$$\begin{aligned} p(c_0|g_0) &= 1 & p(c_1|g_0) &= 0 \\ p(c_0|g_1) &= \frac{\epsilon(1-\theta)}{\epsilon(1-\theta)+\theta} & p(c_1|g_1) &= \frac{\theta}{\epsilon(1-\theta)+\theta} \end{aligned} \quad (17)$$

$S$  は， $g \in G^\epsilon$  を観測して  $c \in C$  を予測し，行動  $a \in A$  を選ぶ．その結果， $c_0 = a_0$  且つ  $c_1 = a_1$  ならば，メッセージ  $g$  の価値  $\tilde{g}$  を自身の効用に加える．すなわち，次で定義するメッセージの価値  $\tilde{g}(c, a)$  を  $v_d^s(c, a)$  に加えるものとする．ただし， $\tilde{g}$  は， $\tilde{g} > 0$  を満たす．

$$\tilde{g}(c, a) = \begin{cases} \tilde{g} & \text{if } c_0 = a_0 \text{ or } c_1 = a_1 \\ 0 & \text{if } c_0 = a_1 \text{ or } c_1 = a_0 \end{cases} \quad (18)$$

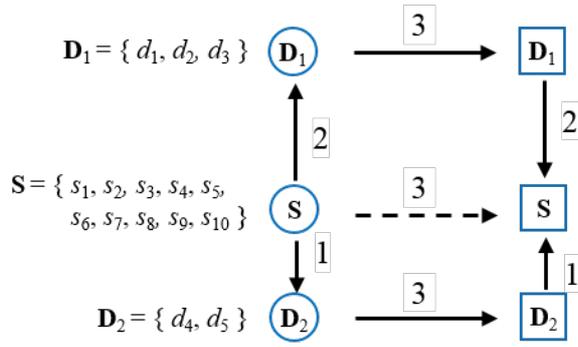


図-3 分析対象のネットワーク

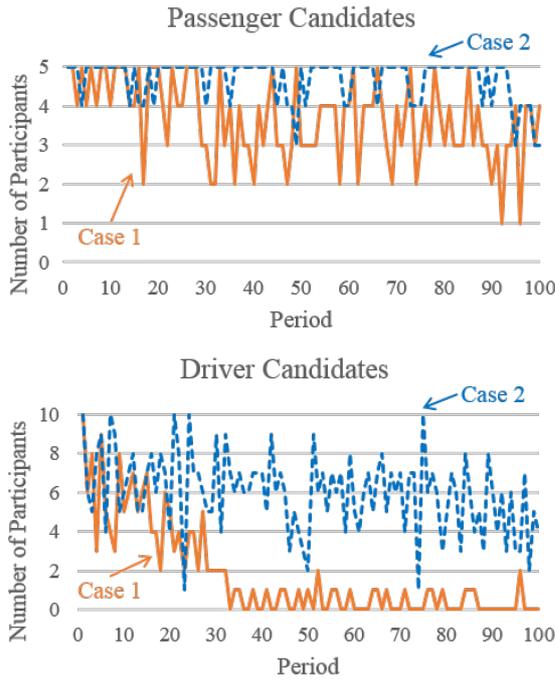


図-4 参加人数の推移と取引外部性の影響

ベイズ学習する  $S$  の  $V_d^s(c, a)$  は次式で表される .

$$V_d^s(c, a) = v_d^s(c, a) + \tilde{g}(c, a) + \delta \sum_{c' \in C} p(c'|g) v_d^s(c', a) \text{ for } \exists g \in G^\epsilon \quad (19)$$

## 6. 数値事例

数値シミュレーションの設定は次の通りである . 運転者候補 10 名 , 同乗者候補 5 名とし , 対象ネットワークを図-3 とした . 式 (4a)(4b) では ,  $\xi^d = \xi^s = 0.01$  とし , ケース 1 が  $\kappa^d = 0.20$  と  $\kappa^s = 0.15$  , ケース 2 が  $\kappa^d = 0.01$  と  $\kappa^s = 0.01$  とした . 式 (5) では ,  $\beta^d = 1$

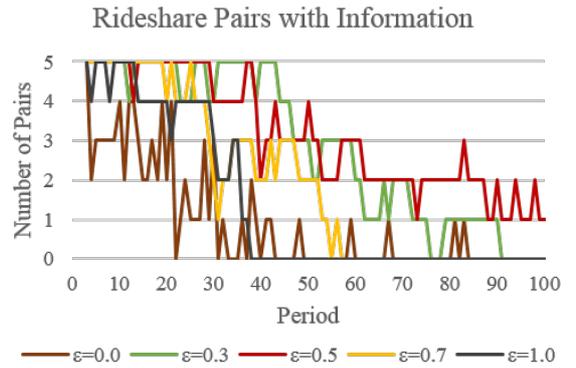
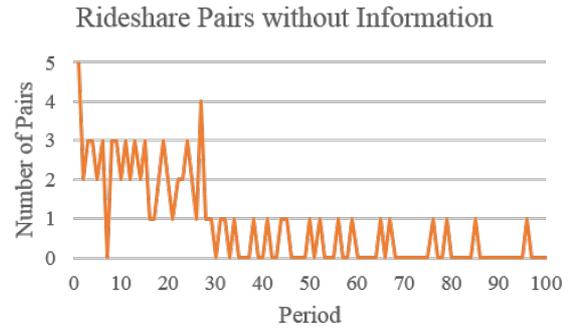


図-5 ライドシェアペア数と情報開示ルール ( ケース 1 )

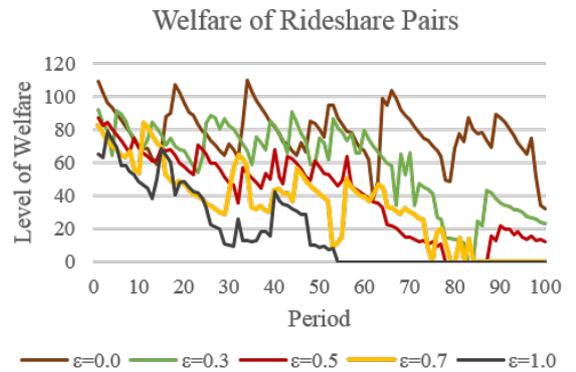


図-6 厚生水準と情報開示ルール ( ケース 1 )

とした . 式 (7a)(7b) の  $p_{00}^a, p_{11}^a, p_{00}^b, p_{11}^b$  は , 期ごとに平均 0.5 , 分散 0.05 の正規乱数を与えた . 在宅率  $\alpha$  は , 期ごとに一様乱数を与えた . 時間割引因子は ,  $\delta = 0.95$  とした . メッセージ価値は ,  $\tilde{g} = 1$  とした .

数値シミュレーションの結果を考察する . 参加人数の推移を図-4 , ライドシェアが成立したペア数を図-5 , 厚生水準の推移を図-6 に示す . 図-4 をみると , 同じ相手とマッチした回数に応じた負の外部性の影響 が大きなケース 1 では , ケース 2 と比べて , 運転者候補の参加人数の低減が早い期で生じている . 同じ相手でも負の

外部性が小さなケース 2 では、運転者候補の参加人数は比較的安定して推移している。以下、ケース 1 を対象に考察する。図-4 をみると、30 期を過ぎてしばらくは同乗者候補 2 名が少なくとも参加している。しかし、図-5 をみると、30 期を過ぎるとライドシェアが全く成立しない期が連続して出現する。その一方で、情報提供制度を導入すると、情報開示ルール  $\epsilon$  に依っては、ライドシェア成立のペア数の減少を抑えることが可能である。このとき、 $\epsilon$  が 0.5 に近いほど、つまり、情報が曖昧であるほど、ペア数の減少を引き延ばすことができる。ところが、図-6 をみると、 $\epsilon$  がゼロに近いほど、つまり、情報が明確であるほど、厚生水準は高くなっている。したがって、本稿のシミュレーション結果に限れば、ライドシェア成立ペア数と厚生水準を評価指標とすると、 $\epsilon = 0.3$  程度の情報開示ルールに従うケースが持続可能なシステムにとって妥当であると考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、地方部において非金銭報酬のもとで運転者候補と同乗者候補の利他的選好に支えられた短距離ライドシェアシステムの持続可能性について、数値シミュレーションを通じて情報提供制度の効果を分析した。その結果、ライドシェア成立可否の状態に対する運転者候補の期待をメッセージによって誘導し、ライドシェア成立のペア数の減少を抑えることが可能であることを示すことが出来た。

今後の課題として、以下の点が挙げられる。まず、システムの持続可能性をさらに向上させるためには、インセンティブ付与によって会員の行動を変容させるようなポイント制度の効果についても検討する必要がある。この場合、非金銭的報酬を前提とするならば、例えば運転者候補には「ポイントを貯めると村長から褒められる」といった動機付けを考える必要があるだろう。また、利他心に基づく運転者候補を想定するならば、運転者候補が自ら選好する相手とマッチされるよりも自分を必要としている相手とマッチされることを望む可能性も否定できない。この場合、受入保留方式とは異なるマッチングのメカニズムが必要になるだろう。さらに、同乗者候補がシステムの利用を継続しようとしたとき、手段補完性の影響を強く受ける可能性がある。この場合、同乗者候補の往復トリップを保障する予約制度の検討が必要になるだろう。

謝辞： 神戸大学の喜多秀行教授、山梨大学の佐々木邦明教授、広島大学の塚井誠人准教授から有益なコメントを頂戴した。本研究は、JSPS 科研費 252490710 の助成を受けている。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) Yotsutsuji, H., Sasaki, K., Yamamoto, M.: Availability of volunteer-based dynamic ridesharing with bipartite group in a low-density small community in Japan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.10, pp.1009-1024, 2013.
- 3) 長田美月, 四辻裕文, 佐々木邦明, 山本理浩: 人的なネットワークが疎な地域におけるライドシェアの実装上の心理的阻害要因. 第 47 回土木計画学研究発表会講演集, PaperNo.352, 2013.
- 4) 真島理恵: 利他行動を支えるしくみ. 序章, pp.1-29, ミネルヴァ書房, 2010.
- 5) P. J. ザック (柴田裕之訳): 経済は「競争」では繁栄しない. 3 章, pp.91-121, ダイヤモンド社, 2013.
- 6) Agatz, N. A. H., Erera, A. L., Savelsbergh, M. W. P., Wang, X.: Dynamic ride-sharing: A simulation study in Metro Atlanta. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, pp.1450-1464, 2011.
- 7) Agatz, N. A. H., Erera, A. L., Savelsbergh, M. W. P., Wang, X.: Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, Vol.223, pp.295-303, 2012.
- 8) Kleiner, A., Nebel, B., Ziparo, V. A.: A mechanism for dynamic ride sharing based on parallel auctions. *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.266-272, 2011.
- 9) Chan, N. D., Shaheen, S. A.: Ridesharing in North America: Past, present, and future. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, Vol.31, No.1, pp.93-112, 2012.
- 10) 中村文彦: 北米のライドシェアの未来. 運輸政策研究, Vol.15, No.2, pp.46-47, 2012.
- 11) Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.: Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.57, pp.28-46, 2013.
- 12) Siddiqi, Z., Buliung, R.: Dynamic ridesharing and information and communications technology: past, present and future prospects. *Transportation Planning and Technology*, Vol.36, No.6, pp.479-498, 2013.
- 13) Schmidt, K. M.: Social preferences and competition. *Journal of Money, Credit and Banking*, Vol.43, s1, pp.207-231, 2011.
- 14) 大垣昌夫, 田中沙織: 行動経済学. 8 章, pp.143-173, 有斐閣, 2014.
- 15) 小林潔司, 喜多秀行, 多々納裕一: 送迎相乗りのためのランダムマッチングモデルに関する研究. 土木学会論文集, No.536/IV-31, pp.49-58, 1996.
- 16) 森川高行, 田中小百合, 荻野成康: 社会的相互作用を取り入れた個人選択モデル - 自動車利用自粛行動への適用 -. 土木学会論文集, No.569/IV-36, pp.53-63, 1997.
- 17) Fehr, E., Schmidt, K. M.: A theory of fairness, competition, and cooperation. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol.114, No.3, pp.817-868, 1999.
- 18) 松島格也: マッチングを考慮した交通市場メカニズムに関する理論的研究. 序章, pp.1-17, 京都大学博士論文, 2003.
- 19) Kamenica, E., Gentzkow, M.: Bayesian persuasion. *American Economic Review*, Vol.101, No.6, pp.2590-2615, 2011.
- 20) 田村彌, 坂井豊貴: メカニズムデザインと意思決定のフロンティア. 第 4 章, pp.63-98, 慶應義塾大学出版会, 2014.

- 21) Roth, A. E., Sotomayor, M. O.: One-to-one matching: The marriage model. *Two-sided Matching: A Study in Game-theoretic Modeling and Analysis* (Roth, A. E., Sotomayor, M. O. Eds.), Part 1, Cambridge Univ. Press, pp.15-122, 1990.
- 22) Roth, A. E., Sotomayor, M. O.: Two-sided matching. *Handbook of Game-theory* (Aumann, R. J., Hart, S. Eds.), Vol.1, Ch.16, Elsevier Science Publishers, pp.486-539, 1992.
- 23) 坂井豊貴, 藤中裕二, 若山琢磨: メカニズムデザイン. 第7章, pp.159-191, ミネルヴァ書房, 2008.
- 24) Gale, D., Shapley, L.: College admissions and the stability of marriage. *American Mathematical Monthly*, Vol.69, pp.9-15, 1962.
- 25) Roth, A. E.: Deferred acceptance algorithms: history, theory, practice, and open questions. *International Journal of Game Theory: Special Issue in Honor of David Gale on his 85*, pp.537-569, 2008.
- 26) 坂井豊貴: マーケットデザイン入門. 第7章, pp.111-134, ミネルヴァ書房, 2010.

(2015.4.24 受付)