

# 需要とマッチングの不確実性を考慮した ライドシェアリングサービスの 最適なサービス水準に関する研究

若林 航也<sup>1</sup>・加藤 哲平<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生非会員 埼玉大学理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail:k.wakabayashi.803@ms.saitama-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 埼玉大学理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail:tkato@mail.saitama-u.ac.jp

ライドシェアリングサービスでは、利用者同士のマッチングが行われるため、利用者は移動時間そのものだけではなく、マッチングに要する時間も考慮した交通行動を行う。利用者数に比べてサービスの供給量が少なければ、平均的なマッチング時間が大きくなるだけでなく、その不確実性も大きくなり、サービス水準が低下する。一方、供給量を増やすと、サービス水準が上昇し、利用者数は増えるが、非効率な運営になるため、需要とのバランスが取れるように供給量を決定する必要がある。また、実際の利用者数は様々な要因によって不確実に変化するため、サービスの供給者は利用者数の不確実性を考慮して供給量を決定する必要がある。本研究では、利用者数とマッチング時間の不確実性を考慮した、最適なライドシェアリングのサービス水準に関する考察を行う。

**Key Words:** ride-sharing, matching time, uncertainty, consumer surplus

## 1. はじめに

### (1) ライドシェアリングサービス

物品を多くの人と共有したり、個人間で貸し借りをするシェアリングという概念は、広く普及しつつある。自動車業界においても、カーシェアリングやライドシェアリングをサービスの形態として、シェアリングの波は押し寄せている。カーシェアリングとは、自動車を複数の個人会員や会社で共有し、互いに利用する仕組みである。カーシェアリングが自動車を共有するのに対して、ライドシェアリングは移動を共有するサービスといえる。ドライバーとそれに相乗りする人、または相乗りする人同士を引き合わせるサービスであり、スマートフォンのアプリやソーシャルサービスを通じて、ドライバーと相乗り希望者の間でやり取りがなされる。このライドシェアリングサービスはドライバーの属性の違いといった観点から2つに分類できる。1つはTNC (Transportation Network Company) サービスと呼ばれ、事業主体は自ら運送せず、スマートフォンアプリなど自らが運営するプラットフォームにおいて一般ドライバーと乗客を仲介し、一般ドライバーが自家用車を用いて有償の運

送サービスを提供する。2つめは事業主体がプロのドライバーを手配し、プラットフォームを通じて目的地の近い乗客同士を相乗りさせるサービスである。この種のサービスは一般に乗合タクシーと呼ばれ、その導入による公共交通空白・不便地区の住民のアクセシビリティの改善効果<sup>1)</sup>や、鉄道・バスなどの公共交通からの転換可能性<sup>2)</sup>が確認されている。

以下、本研究ではこの乗合タクシー型のサービス形態を、「ライドシェアリングサービス」と定義する。

### (2) 移動時間の変動

はじめに、ライドシェアリングサービスにおける移動時間とは、マッチング時間、すなわち利用者がサービスの利用を申請してから、利用者のもとに車両が到着するまでの時間、と走行時間、すなわち利用者が車両に乗車してから目的地で降車するまでの時間、の2つから構成されることを前提として議論する。

ライドシェアリングサービスのような日常的な道路交通サービスについては、この移動時間の変動が問題になることが多い。交通やトリップは主目的活動の派生需要であり、

移動時間が不確実であると、その主目的活動を遂行するうえでスケジュールが乱れることとなり、サービス利用者にとって移動時間の変動は望ましくないとされる。したがって、サービスの利用者は、平均移動時間だけでなく、その不確実性も考慮した交通行動を行うと考えられる<sup>(例1)3)</sup>。

### (3) 既存研究と本研究の位置づけ

Daganzo et al.<sup>4)</sup>は、乗合タクシー型のライドシェアリングサービスにおいて、需要を与件としたときに、その需要を満たしながら、少なくとも非効率にならない車両台数の上限値を求め、その車両台数の上限値の範囲内で旅行時間を最も短くする、すなわちサービス水準が高くなるような最適な車両台数を求めた。藤垣ら<sup>5)</sup>は、サービスの運行の結果として達成される「ある一定期間での平均マッチング時間」を、「ある一定期間の利用者数」で説明するパフォーマンス関数と、「マッチング時間を含む何らかの変数」によって「ある一定期間の利用者数」を説明する需要関数を表現し、この2つの関数から均衡利用者数及び均衡マッチング時間を導出した。

以上に挙げたように、ライドシェアリングサービスの導入に伴い、その需要予測や、車両台数・料金などのサービスの計画に関する研究は存在するものの、その過程で、旅行時間の不確実性を考慮した研究はみられない。そこで本研究では、旅行時間の変動を考慮したうえで、最適なライドシェアリングのサービス水準に関する考察を行う。

## 2 ライドシェア車両の挙動<sup>4)</sup>

本章で示す内容は Daganzo ら<sup>4)</sup>によって示されたものであるが、以降の議論で必要になるため、簡潔に示す。以降では、同時乗り合い組数が最大で2組である場合を考える。なお、本研究で示すフレームワークは一般性を失うことなく乗合組数が増えた場合にも適用可能である。

### (1) ライドシェア車両の状態のネットワーク表現

ライドシェアリングサービスのシステムモデルを、ノードとリンクを用いて図1のように表現する。ノード $(i, j)$ は、ライドシェア車両の状態を表す。 $i$ は車両に乗車している乗客数、 $j$ は既に当車両へのマッチングが成立しており、乗車を控えている利用者数を示している。例えば、 $(i, j) = (1, 1)$ の場合は、現在車両内に一組の乗客を抱えており、さらにもう一組の利用者を迎車予定である車両の状態を表す。そして、 $(i, j)$ の状態にある車両の台数を $n_{ij}$ とする。各状態の車両は3方向で示されるリンクを通じて別の状態に遷移していく。ここで、下方向のリンクは、サービスを申請した利用者のライドシェア車両への割り当てを、斜め方向のリンクは、マッチングが完了した利用者の車内への乗車を、左方向のリンクは、車内の乗客の目的地での降車を、

それぞれ表現している。各リンク上に示される $a_{ij}, p_{ij}, d_{ij}$ はノードからノードへの遷移率[veh/hr]をそれぞれ表す。各遷移率の詳細については2.3節で後述する。

### (2) ライドシェア車両の割り当て

前節で述べたネットワークモデルでは、車両割り当て時のルールとして、「既に乗客が存在する車両には、新たに利用者を割り当てない。」という前提を置いている。つまり、ノード $(1, 0)$ から $(1, 1)$ への遷移は生じないと仮定している。このような遷移は、利用者に大きな不利益を感じさせると考えられるため、実際に乗合サービスが提供されることを考慮すると、妥当な仮定だと考えられる。このとき、エリア内に存在する全車両のうち、新たに利用者を割り当てることができる状態にある車両、すなわち、ある利用者からのサービスの申請があったときに、対応可能な状態にある車両台数 $n$ は、以下のように表される。

$$n = \sum_{j \leq 2} n_{0j} = n_{00} + n_{01} \quad (1)$$

車両割り当て時のもう一つの原則として「あるサービス申請者に割り当てられる車両は、利用可能な $n$ 台の車両のうち申請者の位置(以下、需要点と表記する。)に最も近い車両が割り当てられる。」ことを仮定する。

Daganzo et al.<sup>4)</sup>によると、面積が $R[km^2]$ の領域内に、 $w$ 台の車両がランダムに存在する時、領域内のある起点 $O$ から、最も近い車両までの距離の平均値 $\delta(w)$ はを以下のように与えられる。

$$\delta(w) = k_1 \sqrt{\frac{R}{w}} \quad (2)$$

ここで、係数 $k_1$ は、エリアの形状に依存する値で、エリアが円形であるときは $k_1 = 0.5$ 、エリアが正方形であるときは $k_1 = 0.63$ となる。利用可能な車両数が $n$ である場合、 $\delta(n)$ は、利用者から最も近いライドシェア車両、すなわち、利用者を載せることになるライドシェア車両までの平均距離と考えることができる。また、需要点から目的地までの距離の平均は、 $\delta(1)$ で表現でき、乗客が2人いた場合、より近い方の目的地までの距離の平均が $\delta(2)$ で表現できる。

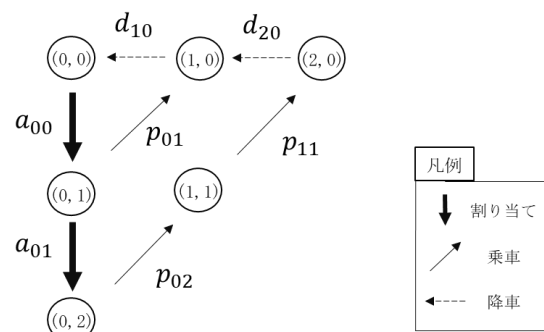


図1.ネットワークモデル

(3) 車両状態の遷移率と総車両台数

ライドシェア車両がエリア内を端から端まで移動するのにかかる時間内に発生する利用者数を  $\pi$  とする。この時間内に、すべての利用者はライドシェアに割り当てられるため、以下のような関係が成立する。

$$\pi = \sum_{i,j} a_{ij} \quad (4a)$$

また、前節から各状態から他の状態へ遷移する平均時間が分かっているため、ノードからノードへの平均遷移率は、待ち行列理論から、以下のように与えられる。

$$a_{ij} = \frac{\pi n_{ij}}{n} \quad (i, j) = (0,0), (0,1) \quad (4a)$$

$$p_{ij} \approx \frac{n_{ij}}{\delta(n)} \approx \frac{n_{ij}\sqrt{n}}{k_1} \quad (i, j) = (0,1), (1,1), (0,2) \quad (4b)$$

$$d_{ij} \approx \frac{n_{ij}}{\delta(i)} \approx \frac{n_{ij}\sqrt{i}}{k_1} \quad (i, j) = (1,0), (2,0) \quad (4c)$$

ネットワーク上で、状態遷移量の保存則が成り立つため、以下の関係が成り立つ。

$$a_{01} = p_{02} = p_{11} = d_{20} \quad (5a)$$

$$a_{00} = d_{10} \quad (5b)$$

$$p_{01} = d_{20} = d_{10} \quad (5c)$$

以上から、各状態における車両数がそれぞれ以下のように決定する。

$$n_{00} = n \left( k\pi + n^{\frac{3}{2}} \right) / (2k\pi + n^{\frac{3}{2}}) \quad (6a)$$

$$n_{01} = k\pi n / \left( 2k\pi + n^{\frac{3}{2}} \right) \quad (6b)$$

$$n_{02} = n_{11} = (k\pi)^2 / \left( 2k\pi n^{\frac{1}{2}} + n^2 \right) \quad (6c)$$

$$n_{10} = k\pi \left( k\pi + n^{\frac{3}{2}} \right) / \left( 2k\pi + n^{\frac{3}{2}} \right) \quad (6d)$$

$$n_{20} = (k\pi)^2 / \left( 2\sqrt{2}k\pi + \sqrt{2}n^{\frac{3}{2}} \right) \quad (6e)$$

このように、 $n_{ij}$  は  $\pi$  と  $n$  の関数として表現できる。ここで、システム内の総車両台数  $m$  は、以下のように表せる。

$$m = \sum_{i,j} n_{ij} \quad (7)$$

式(6)より、すべての  $n_{ij}$  は  $\pi$  と  $n$  の関数であるため、 $m$  も  $\pi$  と  $n$  の関数として表現できる。以下では  $m$  を  $m(\pi, n)$  と表現する。

### 3. 利用者の行動

#### (1) 移動時間

ある起点  $O$  からある終点  $D$  まで、ライドシェアリングサービスを用いた場合と他の交通手段を用いた場合の移動時

間をそれぞれ  $T_s$  と  $T_o$  と定義する。ここでは、簡単のため  $T_o = \delta(1)$  とする。  $T_s$  は、ある人がライドシェアリングサービスを利用した時に、平均的にかかる移動時間を指す。1-2 節でも述べた通り、ライドシェアリングサービスの移動時間は、マッチング時間と走行時間を合わせた時間であると仮定する。図 1 より、ある利用者がライドシェアリングサービスを利用しようとした場合、乗車する車両状態の遷移パターンは以下の 5 通りである。

$$r_1: (0,0) \rightarrow (0,1) \rightarrow (1,0) \rightarrow (0,0)$$

$$r_2: (0,0) \rightarrow (0,1) \rightarrow (0,2) \rightarrow (1,1) \rightarrow (2,0) \rightarrow (1,0)$$

$$r_3: (0,0) \rightarrow (0,1) \rightarrow (0,2) \rightarrow (1,1) \rightarrow (2,0) \rightarrow (1,0) \rightarrow (0,0)$$

$$r_4: (0,1) \rightarrow (0,2) \rightarrow (1,1) \rightarrow (2,0) \rightarrow (1,0)$$

$$r_5: (0,1) \rightarrow (0,2) \rightarrow (1,1) \rightarrow (2,0) \rightarrow (1,0) \rightarrow (0,0)$$

例えば、 $r_4$  のパターンでは、あるサービス申請者  $G$  は、現乗車人数が 0 別の申請者  $H$  が既に乗車予定の状態にある車両  $(0,1)$  に割り当てられ、自らの割り当てにより車両は  $(0,2)$  の状態に遷移する。その後、車両は  $G$  と  $H$  の二人を順に乗車させ、 $(1,1) \rightarrow (2,0)$  と遷移していく。乗客  $G$  は、 $H$  よりも先に目的地に到着し、乗っていた車両は  $(1,0)$  の状態に遷移する。

ここで、サービス申請後マッチングした車両が  $(0,0)$  もしくは  $(0,1)$  である確率をそれぞれ  $s_{00}, s_{01}$  ;  $r_{1\sim 3}$  において  $(0,1)$  の状態から  $(1,0)$  もしくは  $(0,2)$  に遷移する確率をそれぞれ  $s_{01-10}, s_{01-02}$  ;  $r_{2\sim 5}$  において、 $(2,0)$  の状態から  $(1,0)$  もしくは  $(0,0)$  の状態で降車する確率を  $s_{20-10}, s_{20-00}$  とすると、各確率は以下のように表される。

$$s_{00} = \frac{n_{00}}{n_{00} + n_{01}} \quad (8a)$$

$$s_{01} = \frac{n_{01}}{n_{00} + n_{01}} \quad (8b)$$

$$s_{01-10} = \frac{p_{01}}{p_{01} + a_{01}} \quad (8c)$$

$$s_{01-02} = \frac{a_{01}}{p_{01} + a_{01}} \quad (8d)$$

$$s_{20-10} = \frac{1}{2} \quad (8e)$$

$$s_{20-00} = \frac{1}{2} \quad (8f)$$

このとき、移動パターンが  $r_x$  ( $x = 1, 2, 3, 4, 5$ ) になる確率  $p_x$  ( $x = 1, 2, 3, 4, 5$ ) は次式で表される。

$$p_1 = s_{00} \cdot s_{01-10} = \frac{n_{00}}{n_{00} + n_{01}} \cdot \frac{p_{01}}{p_{01} + a_{01}} \quad (9a)$$

$$p_2 = s_{00} \cdot s_{01-02} \cdot s_{20-10} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_{00}}{n_{00} + n_{01}} \cdot \frac{a_{01}}{p_{01} + a_{01}} \quad (9b)$$

$$p_3 = s_{00} \cdot s_{01-02} \cdot s_{20-00} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_{00}}{n_{00} + n_{01}} \cdot \frac{a_{01}}{p_{01} + a_{01}} \quad (9c)$$

$$p_4 = s_{01} \cdot s_{20-10} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_{01}}{n_{00} + n_{01}} \quad (9d)$$

$$p_5 = s_{01} \cdot s_{20-00} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_{01}}{n_{00} + n_{01}} \quad (9e)$$

車両の状態遷移を表すリンクの内、割り当てにあたるリンク以外の乗車・降車リンクにおいて平均的に車両が走行する距離を $l_{ij}$ と定義する。ここで、 $l_{ij}$ において下付きの $ij$ は、リンクの始点ノードを表している。式(3)より以下のように与えられる。(簡単のため、 $R = 1$ とする。)

$$l_{01} = \delta(n) = \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (10a)$$

$$l_{02} = \delta(n) = \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (10b)$$

$$l_{11} = \delta(n) = \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (10c)$$

$$l_{10} = \delta(1) = k_1 \quad (10d)$$

$$l_{20} = \delta(2) = \frac{k_1}{\sqrt{2}} \quad (10e)$$

2.2節でも述べた通り、 $l_{10}$ と $l_{20}$ に関しては、目的地が一つないし二つの場合の平均走行距離を表しているが、これは、式(2)においてそれぞれ、 $w = 1, w = 2$ とした場合に相当する。

さらに、ライドシェア車両の平均走行速度を $v[km/hr]$ とすれば、各移動パターン $i$ の平均移動時間 $t_{ij}$ は、 $l_{ij}$ を $v$ で除した値として以下のように与えられる。(ただし、以降では簡単のため、 $v = 1$ とする。)

$$t_{01} = \frac{\delta(n)}{v} \xrightarrow{v=1} \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (11a)$$

$$t_{02} = \frac{\delta(n)}{v} \xrightarrow{v=1} \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (11b)$$

$$t_{11} = \frac{\delta(n)}{v} \xrightarrow{v=1} \frac{k_1}{\sqrt{n}} \quad (11c)$$

$$t_{10} = \frac{\delta(1)}{v} \xrightarrow{v=1} k_1 \quad (11d)$$

$$t_{20} = \frac{\delta(2)}{v} \xrightarrow{v=1} \frac{k_1}{\sqrt{2}} \quad (11e)$$

乗車、降車リンクの平均移動時間を図1のネットワーク上に記したものを図2に示す。

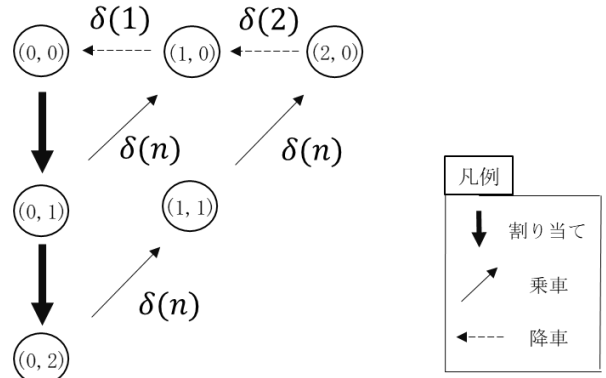


図2 ネットワークモデル (遷移時間表示)

$r_1 \sim r_5$ の各ルートの移動に要する平均総移動時間を $T_x$  ( $x = 1 \sim 5$ )とすると、以下のように表される。

$$T_1 = t_{01} + t_{10} = \frac{k_1}{\sqrt{n}} + k_1 \quad (12a)$$

$$T_2 = t_{02} + t_{11} + t_{20} = \frac{2k_1}{\sqrt{n}} + \frac{k_1}{\sqrt{2}} \quad (12b)$$

$$T_3 = t_{02} + t_{11} + t_{20} + t_{10} = \frac{2k_1}{\sqrt{n}} + \frac{k_1}{\sqrt{2}} + k_1 \quad (12c)$$

$$T_4 = t_{02} + t_{11} + t_{20} = \frac{2k_1}{\sqrt{n}} + \frac{k_1}{\sqrt{2}} \quad (12d)$$

$$T_5 = t_{02} + t_{11} + t_{20} + t_{10} = \frac{2k_1}{\sqrt{n}} + \frac{k_1}{\sqrt{2}} + k_1 \quad (12e)$$

以上より、ある利用者がライドシェアリングサービスを選択した時に、平均的にかかる移動時間は、次式で与えられる。

$$E[T_x] = \sum_{x=1}^5 T_x \cdot p_x \quad (13)$$

## (2) 移動時間の変動

本研究では、Fosgerau&Engelson<sup>9)</sup>に従い、移動時間の不確実性指標としてその分散を用いる。Daganzo<sup>4)</sup>は、面積が $R[km^2]$ の領域内に、 $w$ 台の車両がランダムに存在する時、領域内のある起点 $O$ から最も近い車両までの距離の平均値 $\delta(w)$ が式(2)のように与えられることを示した。これの導出過程における展開を応用することで、ある起点 $O$ から最も近い車両までの距離の分散を求めることができる。

ライドシェアリングサービスの存在する領域を円状であると仮定する。この領域が矩形である場合においても、一般性を失うことなく同様のアプローチが適用可能である。

(後述)  $w$ 台の車両がランダムに存在する時、ある起点 $O$ から最も近い車両までの距離 $d_w$ が $x$ 以上であるときの確率は以下のように表される。

$$Pr\{d_w \geq x\} = \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^w \quad (14)$$

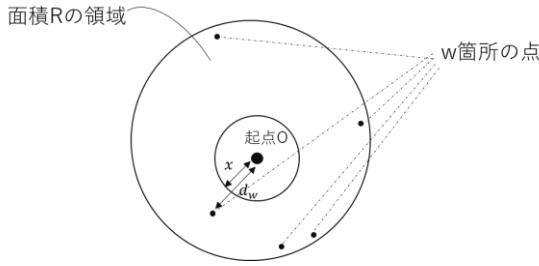


図3.  $d_w \geq x$  となる状況を表したイメージ

一般に、非負の確率変数  $X$  についての確率密度関数を  $f_X(x)$ 、累積分布関数を  $F_X(x) = \int_0^x f_X(t)dt$  としたとき、期待値について以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} (1 - F_X(x))dx &= \int_0^{\infty} P(X \geq x)dx \\ &= \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} f_X(t)dt dx \\ &= E(x) \end{aligned} \quad (15)$$

Daganzo et al.<sup>4)</sup>は、式(15)の等式に倣って、 $d_w$ の期待値を導出している。

ここで、式(15)の1行目から2行目の変形に着目すると、

$Pr\{d_w \geq x\} = \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^w$  を  $x$  で偏微分することで、確率変数  $x$  の確率密度関数  $f(x)$  が求められることがわかる。したがって、 $f(x)$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} f(x) &= -\frac{1}{\partial x} \left[ \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^w \right]' \\ &= \frac{2w\pi}{R} \cdot \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^{w-1} \cdot x \end{aligned} \quad (16)$$

式(14)と(17)より、起点  $O$  から最も近い点までの距離  $x$  についての期待値と確率密度関数が求められた。したがって、その分散  $\sigma_w^2$  は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma^2(w) &= \int_0^{\infty} (x - E(d_w))^2 \cdot f(x)dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{2w\pi}{R} \cdot \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^{w-1} \cdot x^3 dx \\ &\quad + \int_0^{\infty} \left(-4k_1\pi\sqrt{\frac{w}{\pi}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^{w-1} \cdot x^2 dx \\ &\quad + \int_0^{\infty} 2k_1^2\pi \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^{w-1} \cdot x dx \\ &= R \left( \frac{1}{\pi(w+1)} - \frac{2k_1}{2w+1} + \frac{k_1^2}{w} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式(18)の二行目において、第一項と第三項は、置換積分で容易に求めることができるが、第二項では近似計算が必要となる。紙面の都合上、本稿では第二項の式展開のみを示す。第二項の式展開は、以下ようになる。

$$\int_0^{\infty} \left(-4k_1\pi\sqrt{\frac{w}{\pi}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\pi x^2}{R}\right)^{w-1} \cdot x^2 dx$$

$$\begin{aligned} &= -4k_1R\sqrt{\frac{w}{\pi}} \int_0^1 (1-y^2)^{w-1} \cdot y^2 dy \\ &= -4k_1R\sqrt{\frac{w}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma(w)}{4 \cdot \Gamma\left(w + \frac{3}{2}\right)} \\ &= -4k_1R\sqrt{\frac{w}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{4} \cdot \frac{1}{\left(w + \frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{\Gamma(w)}{\Gamma\left(w + \frac{1}{2}\right)} \\ &= -4k_1R\sqrt{\frac{w}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{4\left(w + \frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{w}} \\ &= -\frac{2k_1R}{2w+1} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、式(18)の4行目から5行目の変形には以下のような近似(Daganzo et al.<sup>4)</sup>を用いている。

$$\frac{\Gamma(n)}{\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right)} \cong \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (n \gg 3) \quad (19)$$

式(14)では、起点  $O$  周りの領域を円形としているが、方形を仮定すると式(15)は以下のように表される。

$$Pr\{d_w \geq x\} = \left(1 - \frac{2x^2}{R}\right)^w \quad (20)$$

このとき、式(17)～式(18)と同様の計算を行うことで、ネットワークの形状が方形であるときの起点  $O$  から最も近い点までの距離  $x$  についての分散の値は以下のように示される。

$$\sigma^2(w) = R \left( \frac{1}{2(w+1)} - \frac{2k_1}{2w+1} + \frac{k_1^2}{w} \right) \quad (21)$$

式(18)と式(22)をまとめると、分散  $\sigma_w^2$  は  $k_2$  を用いて以下のように表せる。

$$\sigma^2(w) = R \left( \frac{1}{k_2(w+1)} - \frac{2k_1}{2w+1} + \frac{k_1^2}{w} \right) \quad (22)$$

このとき  $k_2$  はネットワークの形状に依存する係数で、円形の時  $k_2 = \pi$ 、方形の時  $k_2 = 2$  の値をとる。

式(11)での移動時間の計算と同様に、各乗車・降車リンクの移動時間の分散を  $\sigma_{ij}^2$  とすると、以下のように表される。

$$\sigma_{01}^2 = \sigma^z(n) = \frac{1}{k_2(n+1)} - \frac{2k_1}{2n+1} + \frac{k_1^2}{n} \quad (23a)$$

$$\sigma_{02}^2 = \sigma(n) = \frac{1}{k_2(n+1)} - \frac{2k_1}{2n+1} + \frac{k_1^2}{n} \quad (23b)$$

$$\sigma_{11}^2 = \sigma(n) = \frac{1}{k_2(n+1)} - \frac{2k_1}{2n+1} + \frac{k_1^2}{n} \quad (23c)$$

$$\sigma_{10}^2 = \sigma(1) = \frac{1}{2k_2} - \frac{2k_1}{3} + k_1^2 \quad (23d)$$

$$\sigma_{20}^2 = \sigma(2) = \frac{1}{3k_2} - \frac{2k_1}{5} + \frac{k_1^2}{2} \quad (23e)$$

ここで、3-1 節で示した利用者が乗車する車両の状態遷移パターンについて考える。車両の状態遷移パターンとして  $r_1 \sim r_5$  のルートを、それぞれ  $p_1 \sim p_5$  の確率で移動すること

となる。  $r_1 \sim r_5$  の各ルートでの移動時間の分散  $\sigma_y^2$  ( $y = 1, 2, 3, 4, 5$ ) は、以下のように表される。

$$\sigma_1^2 = \sigma_{01}^2 + \sigma_{10}^2 \quad (24a)$$

$$\sigma_2^2 = \sigma_{02}^2 + \sigma_{11}^2 + \sigma_{20}^2 \quad (24b)$$

$$\sigma_3^2 = \sigma_{02}^2 + \sigma_{11}^2 + \sigma_{20}^2 + \sigma_{10}^2 \quad (24c)$$

$$\sigma_4^2 = \sigma_{02}^2 + \sigma_{11}^2 + \sigma_{20}^2 \quad (24d)$$

$$\sigma_5^2 = \sigma_{02}^2 + \sigma_{11}^2 + \sigma_{20}^2 + \sigma_{10}^2 \quad (24e)$$

以上より、ある利用者がライドシェアリングサービスを選択した時にかかる移動時間の標準偏差  $\sigma_s$  は、各状態遷移が独立であるため、次式で与えられる。

$$\sigma_s^2 = E[\sigma_y^2] = \sum_{y=1}^5 \sigma_y^2 \cdot p_y \quad (25)$$

### (3) 移動費用

ある起点  $O$  からある終点  $D$  まで、ライドシェアリングサービスを用いた場合と他の交通手段を用いた場合の移動費用をそれぞれ  $f_s$  と  $f_o$  と定義する。簡単のため、他の交通手段を利用するのにかかる費用は  $0$  とする。ただし、費用がかかる正の場合も一般性を失うことなく表現可能である点に注意したい。

ライドシェアリングサービスの利用料金を定めるために、供給者の行動を考察する。サービスを運営する際の供給者の利益  $B$  は、運営によって得られる収入から、車両  $1$  台あたりの運行経費  $c$  と総車両台数  $m(\pi, n)$  の積を引くことで表す。運営によって得られる収入は、需要率  $\pi$  と移動費用  $f_s$  の積で表されるので、供給者の利益  $B$  は以下のように与えられる。

$$B = \pi \cdot f_s - c \cdot m(\pi, n) \quad (26)$$

供給者の利潤ゼロ条件より、移動費用を定めることができるが、ここでは、需要の不確実性を考慮し、需要量を、 $\pi$  から  $\alpha$  だけ低めに見積もった  $\pi - \alpha$  と仮定する。つまり、不確実性を持つ需要を考慮し、赤字になるリスクを考慮してリスク回避的に利用料金を決定すると考える。ここで用いられる  $\alpha$  の値は、確率的な需要量から正確に定義することもできるが、本研究では簡単のため定数  $\alpha$  で与える。このとき、ライドシェアリングサービスの利用料金は以下のように与えられる。

$$f_s = \frac{c \cdot m(\pi, n)}{\pi - \alpha} \quad (27)$$

移動距離による費用の上昇を考慮する場合、ほかの交通手段とライドシェアサービスの利用料金が同率で大きくなると考えられる。こうした状況は、本研究で提案する手法を拡張することによって表現可能であると考えられるが、今後の課題とする。

### (4) 利用者の交通手段選択行動

利用者は、移動時間と移動時間変動と移動費用を考慮して交通手段を決定するものと仮定する。この時、ある起点  $O$  から終点  $D$  まで移動する利用者の効用関数は、ライドシ

ェアリングサービスを利用する場合の間の効用を  $V_s$ 、利用しない場合の間の効用を  $V_o$  とすると、下式のように表せる。

$$V_s = b_t \cdot T_s + b_\sigma \cdot \sigma_s^2 + b_f \cdot f_s + \varepsilon_1 \quad (28)$$

$$V_o = b_t \cdot \sigma^2(1) + b_c + \varepsilon_2 \quad (29)$$

$b_t, b_\sigma, b_f, b_c$  はそれぞれ、平均旅行時間、旅行時間変動、移動費用、その他の交通手段に固有のパラメータである。誤差項に独立で同一なガンベル分布を仮定すると、ライドシェアリングサービスを選択する場合のロジット型の交通手段選択確率が以下のように定義できる。

$$P_s = \frac{1}{1 + \exp(V_o - V_s)} \quad (30)$$

移動時間の平均  $T_s$  とその分散  $\sigma_s$  と移動費用  $f_s$  は  $n$  と  $\pi$  の関数であるため、 $P_s$  も  $n$  と  $\pi$  の関数であるとみなせる。ここで、ある起点  $O$  からある終点  $D$  まで移動する利用者の総トリップ発生率を  $q$  とすると、ライドシェアリングサービスの利用者発生率の平均は以下のように与えられる。

$$q \cdot P_s = \frac{q}{1 + \exp(V_o - V_s)} \quad (31)$$

$q \cdot P_s$  は  $\pi$  に等しくなるため、式(31)は以下のように変換できる。

$$\pi = \frac{q}{1 + \exp(V_o - V_s)} \quad (32)$$

右辺が  $n$  と  $\pi$  の関数であるから、式(32)において、ある  $n$  が与えられたとき、両辺で  $\pi$  が均衡する点(不動点、両辺一致する点)が存在し、その  $\pi$  を需要量と定義できる。ここで、右辺を写像  $g(n, \pi)$  と表現すると、ある  $n$  が与えられたときの需要量は不動点問題の解  $\pi^*$  によって表現できる。

$$\pi^* = g(n, \pi^*) \quad (33)$$

### (5) 最適なライドシェアリングサービスの設計

ある  $n$  を与えると、前節で述べたように利用者数  $\pi^*$  が定まる。このとき、利用者便益を表す指標である消費者余剰は、ログサム変数で表現できる。このように計算された、ある  $n$  に対する消費者余剰を  $CS(n)$  と置く。  $n$  が増えると、マッチング時間の減少に伴い、ライドシェアリングサービスの移動時間は減少するが、移動費用が増加する。このようなトレードオフが存在するため、利用者便益を最大化する最適な  $n$  が存在すると考えられる。このような  $n$  を最適なライドシェアリングサービスの供給台数  $n^*$  と定義する。  $m^*$  は式(33)に示された均衡条件を制約に持つ、均衡制約付き最適化問題(MPEC)として、以下のように定義できる。

$$\max_n CS(n) \quad (34)$$

$$s.t. (33)$$

## 4. 数値実験

発表時に、仮定のネットワークに 3 章で述べたモデルを適用し、利用者便益を最大化する最適なライドシェアリン

グサービスのサービス水準を算出し、考察を行う。

## 5. まとめ

本研究では、乗り合いタクシー型のライドシェアリングサービスにおいて、需要と移動時間の不確実性を考慮したうえで、最適なサービス水準について考察した。

移動時間の変動と需要の不確実性を組み入れて、ライドシェアリングサービス利用者の行動モデルを構築しサービスの需要量を定式化したところ、需要量がある大きさに均衡することが分かった。需要量が均衡点にあるときの、ライドシェアリング車両の最適供給台数についても定義した。

今後の課題として、ライドシェアリングサービスの利用料金を、距離に応じた上昇制にした場合など、サービスの設定について拡張した議論を行うことが挙げられる。

## 参考文献

- 1) 青野亮, 柳川達郎, 杉浦晶子, 加藤博和: オンデマンド型乗合交通システム導入による住民のアクセシビリティ改善評価手法, 第 51 回土木計画学発表会講演集, 2015
- 2) 金森亮, 落合純一, 平田圭二, 野田五十樹: 名古屋相乗りタクシー実証実験参加者の定期型運賃体系の利用意向, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.58, 2018.
- 3) Lam, T.C., Small, K. A., 2001. The value of time and reliability: Measurement from a value pricing experiment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.37, No.2-3, pp.231-251.
- 4) Carlos F. Daganzo and Yanfeng Ouyang: A General Model of Ridesharing Service, <https://arxiv.org/abs/1807.01140>, 2019.09.最終アクセス
- 5) 藤垣洋平, 高見淳史, 大森宣暁, 原田昇: 高利便性乗合タクシーサービスの均衡分析と収益最大化手法, *交通工学論文集*, 第 1 巻, 第 2 号(特集号 A), ppA\_133-A\_141, 2015.
- 6) Fosgerau, M. and Engelson, L. (2011) The value of travel time variance, *Transportation Research Part B*, 45, 1-8.

(???)