

需要分布に着目した乗り捨て型 カーシェアリングのポート配置問題

若林由弥¹・羽藤英二²・斉藤いつみ³

¹学生会員 東京大学大学院 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: wakabayashi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

³学生会員 NTT サービスイノベーション総合研究所 (〒 239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1)

E-mail: saitoitsumi@gmail.com

近年、都市内の移動の自由度を高めることができる乗り捨て型のカーシェアリングが注目されている。こうした共有型のサービスには、車両の存在による利用不確実性のリスクが存在する。このリスクは需要の偏りにより発生し、サービス提供者だけではなく利用者にとってもリスクとして認識される。本研究では、車両の利用不確実性をリスクとして認識した利用者を仮定し、都心部において乗り捨て型カーシェアリングサービスを導入した場合のシステム評価を収益最大化問題として定式化を行った。その後、簡単なネットワークにおける数値計算によりサービスにおいて最適なポート配置に関する知見を得ると同時に、需要の偏りが生じた場合でも、料金によるインセンティブコントロールによってポート間の移動の偏りを制御し、効率を改善できることを示した。

Key Words : 乗り捨て型カーシェアリング, 利用不確実性, ポート配置

1. はじめに

ドイツの car2go やパリの Autolib といった、乗り捨て型のカーシェアリングのシステムが近年注目されている。このサービスは、縮退し衰弱しつつある都心部においてアクセス・イグレスの短い自由な移動を可能にし、都市における活動を活性化させることができる点で期待されているといえよう。乗り捨て型交通サービスが他のサービスとは大きく異なる点として、利用不確実性の問題が存在する。利用が不確実であるというのは、出発地点近くの駐車場 (以下、ポートと呼ぶ) に車両が存在しない場合と到着地点付近のポートに駐車するスペースがない場合には、サービスが利用できないという不確実性があることを指す。こうした不確実性が生じるのは、乗換駅周辺のポートには需要が集中し駐車スペースがすぐに埋まってしまうといった、場所や時間による需要の偏りが生じるためである。

サービスの供給側はなるべくサービス利用による収益を最大化させるように車両配置や料金を設定するが、単純に需要の多い地点にポートを置くだけでは、偏りによってサービスが非効率なものとなり、かえって収益を落としてしまうといった可能性が考えられる。一方サービスの利用者の観点からいえば、利用者はこうした不確実性をリスクとして捉え、サービスが利用できない可能性が大きい場合には他の交通手段を選択す

る傾向にあるため、サービスそのものの利用度が低下してしまうおそれがある。

本研究では、利用者側 (需要側) にサービスの利用不確実性をリスクとして含んだ交通手段選択モデルを設定し、実際の車両台数と相互に影響を及ぼしあうシステムの評価を総収益の最大化問題として定式化する。また、サービスの料金を利用者の効用に入れ、この料金を細かく設定することによって、需要を制御しシステムの改善を行うことが可能であることを示す。

2. 研究のフレーム

乗り捨て型の共同利用交通サービスについては、カーシェアリングや共同利用自転車についての研究が存在する。共同利用自転車についての研究については、Shu et al.(2010), Nair et al.(2011), Lin et al.(2013) などがそれぞれ定式化を行っている。乗り捨て型のカーシェアリングについての研究には Fan et al.(2008), Correia and Antunes(2012), Boyaci et al.(2013) による総収益最大化としての定式化や、山本ら (2005) の車両 1 台あたりの移動数の最大化としての定式化がある。また Kek et al.(2009) は、料金を差別化することで利用者に再配車を行わせ、需要の偏りを解消出来ることを示した。

こうした研究の中で、サービスの利用不確実性を利用者のリスクとして捉えている研究は多くない。Nair

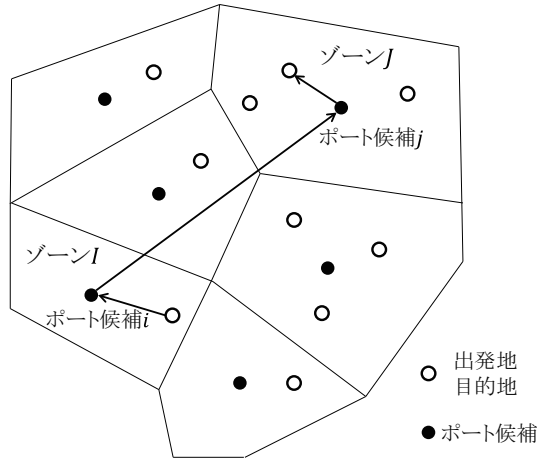


図-1 ゾーンとポートの関係

et al.(2011) は期間内に利用できない人数をシステムのコストに含んだ総コストの最小化問題として評価を行っており、また Lin et al.(2013) は制約条件としてポートあたりの最低利用確率を設定し定式化を行っているが、いずれも利用者のリスクとしては定義されていない。

本研究の大きな特徴は、サービスの利用不確実性をリスクとして認識した利用者モデルを設定し、システムと利用者の相互作用を表現した点、需要の偏りによってかえってシステムが非効率料金になってしまうポートの置き方が存在することを示した点、料金によるインセンティブ制御により、車両台数の偏りを緩和することができることを数値計算により示した点にある。現実の利用者もサービスが使えないことをリスクとして認識しているため、より再現度の高いモデルを構築できるようになり、また、ポート配置や料金のコントロールによってシステムを効率的に運用するための知見を得ることができるという点で大きく意味があると言える。

3. 問題の定式化

(1) 収益最大化問題

問題の定式化を行うにあたり、乗り捨て型のカーシェアリングについて以下のように仮定する。

- 複数存在するポート候補から実際に配置するポートを決定する。
- ポート候補1つを含むゾーンが1つ存在し、それぞれ対応する。
- ゾーン間の時間帯別 OD 交通量は既知である。
- 各移動者は出発地及び目的地が含まれるゾーン間の移動のみを行うことができる。
- ポート間の移動時間は短く、システム上ではほぼ無視できるものとする。

図1にポートとゾーンの関係を図示したものを示す。この時、時間帯 $t \in \{1, 2, 3, \dots, T\}$ における ij 間の期待車両移動数 $f_{ij}(t)$ は以下のように求めることができる。

$$f_{ij}(t) = d_i d_j N_{ij}(t) \delta_{ij}(t) p_{ij}(t) \quad (1)$$

ここで、 d_i はポート i を設置するかどうかのダミー変数、 $N_{IJ}(t)$ は、時間帯 t における IJ ゾーン間のトリップ数、 $\delta_{ij}(t)$ はポート ij 間の利用可能性、 $p_{ij}(t)$ は移動手段において EV を選択する確率である。利用可能性 $\delta_{ij}(t)$ は以下の式のように表す。

$$\delta_{ij}(t) = (1 - Q_i^t(0)) (1 - Q_j^t(c_j)) \quad (2)$$

ここで、 $Q_i^t(x_i)$ は時間帯 t におけるポート i 車両数 $x_i(t)$ が x 台である確率、 c_i はポート i の容量を指す。すなわち、 $Q_i^t(0)$ はポート i が時間帯 t に車両が1台も存在しない確率、 $Q_j^t(c_j)$ はポート j が t に満車である確率を表す。

本研究では、事業者側の収益の最大化を考える。すなわち、以上でおいた仮定を元に以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} \max \quad & U(\{d_i\}, \{u_{ij}(t)\}, X) \\ = \quad & \sum_t \sum_{ij} d_i d_j N_{ij}(t) \delta_{ij}(t) p_{ij}(t) \\ & + \text{cost}_{\text{car}} \cdot X + \text{cost}_{\text{port}} \cdot \sum_i d_i \end{aligned} \quad (3)$$

subject to

$$d_i \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$$0 < X < \sum_i d_i c_i \quad (5)$$

$$0 < u_{ij}(t) \quad \text{for } \{i, j | d_i = d_j = 1\} \quad (6)$$

式3の第1項はサービス利用による収益の期待値を表している。また、 cost_{car} は車両1台、 $\text{cost}_{\text{port}}$ はポート1つに対して1日あたりにかかる維持管理コスト、 X は総車両台数を表しており、すなわち第2項は車両の、第3項はポートの総維持管理コストである。

(2) 利用不可能リスクを考慮した交通手段選択モデル

乗り捨て型の共有型交通サービスが利用選択肢にある場合、利用者は需要の不均衡によって生じる利用不可能性をサービスのリスクとして認知する。この時 EV を利用する効用の確定項 V_{EV} を以下のように定式化する。

$$\begin{aligned}
V_{EV} = & \alpha_{EV} + \beta_{1EV}t_{EV} + \beta_{2EV}u_{EV} \\
& + \beta_{3EV}(acc_{EV} + egr_{EV}) \\
& + \gamma(Q_i(0) + Q_j(c_j)) \quad (7)
\end{aligned}$$

上式において、 α_{EV} は定数項、 t_{EV} 、 u_{EV} 、 acc_{EV} 、 egr_{EV} はそれぞれ EV を利用した場合の旅行時間、料金、アクセス・イグレス距離を表している。また、 $Q_i(0)$ は出発地付近のポートに車両が 1 台も存在しない確率、 $Q_j(c_j)$ は到着地付近のポートがに満車である確率を表しているので、上式の第 4 項はサービスの利用不確実性に対するリスクとみなすことができる。

ここで、各交通手段 a を利用する効用の確定項を V_a とおき、効用の誤差項にガンベル分布を仮定すると、ゾーン IJ 間の移動における EV の選択確率 p_{ij} は多項ロジットモデルを用いて以下のように導出できる。

$$p_{ij} = \frac{\exp(V_{EV})}{\sum_a \exp(V_a)} \quad (8)$$

時間帯 t における総トリップ数を $N(t)$ とおく。1 回のトリップであるポート i から別のポート j に車両が移動する確率 $r_{ij}(t)$ は式 1 より以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned}
r_{ij}(t) &= \frac{f_{ij}(t)}{N(t)} \\
&= \frac{N_{IJ}(t)}{N(t)} \delta_{ij}(t) p_{ij}(t) \quad (9)
\end{aligned}$$

この時、1 回のトリップでポート i に車両が 1 台入る確率 $s_i^{in}(t)$ 及び車両が 1 台出ていく確率 $s_i^{out}(t)$ は以下のように求めることができる。

$$s_i^{in}(t) = \sum_k r_{ki}(t) \quad (10)$$

$$s_i^{out}(t) = \sum_j r_{ij}(t) \quad (11)$$

ここで、ポート i に存在しうる車両の最小値 $x_i^{\min}$ および最大値 $x_i^{\max}$ は以下の式で表される。

$$x_i^{\min} = \min \left\{ 0, X - \sum_{j \neq i} c_j \right\} \quad (12)$$

$$x_i^{\max} = \max \{ c_i, X \} \quad (13)$$

1 回のトリップごとの車両台数の遷移確率行列 $S_i(t)$ は $(c_i + 1)$ 行 $\times$ $(c_i + 1)$ 列の正方行列で表すことができ、以下のように求めることができる。

$$S_i(t) = s_i(t)_{mn} \quad (14)$$

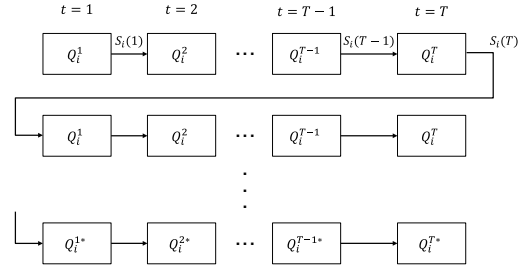


図-2 定常状態を求めるアルゴリズム

$m = n$ の時

$$s_i(t)_{mn} = \begin{cases} 1 - s_i^{in}(t) & (m = x_i^{\min}) \\ 1 - s_i^{in}(t) - s_i^{out}(t) & (x_i^{\min} < m < x_i^{\max}) \\ 1 - s_i^{out}(t) & (m = x_i^{\max}) \end{cases} \quad (15)$$

$m = n - 1$ の時

$$s_i(t)_{mn} = s_i^{out}(t) \quad (16)$$

$m = n + 1$ の時

$$s_i(t)_{mn} = s_i^{in}(t) \quad (17)$$

上以外の場合

$$s_i(t)_{mn} = 0 \quad (18)$$

よって次の時間帯の車両台数の確率ベクトルは $S_i(t)$ を用いて以下のように計算できる。

$$\begin{pmatrix} Q_i^{t+1}(0) \\ Q_i^{t+1}(1) \\ \vdots \\ Q_i^{t+1}(c_i) \end{pmatrix} = (S_i(t))^{N(t)} \begin{pmatrix} Q_i^t(0) \\ Q_i^t(1) \\ \vdots \\ Q_i^t(c_i) \end{pmatrix} \quad (19)$$

以上で求めたプロセスで、時間帯間の車両の移動を表すことができる。このプロセスを繰り返すことで、定常状態における収益の評価が可能となる。繰り返し計算により定常状態を求めるアルゴリズムのイメージを図 2 に示す。

Q_i^t から Q_i^{t+1} への遷移確率は、 Q_i^t に依存する変数 $\delta_{ij}(t)$ 及び $p_{ij}(t)$ によって決定する。また、車両の再配置を行わない場合、最後の期の終了時点での車両台数は次の期の初期台数へ引き継がれる。このような逐次的な計算を繰り返すことによって、最終的な車両台数確率の定常状態 $Q_i^{*t}(x_i)$ を求めることができる。

4. 単純ネットワークを用いた数値計算

本章では、単純なネットワークを仮定して乗り捨て型カーシェアリングにおいて起こりうる現象を表現し、サービスの収益を最大化させるためのシステム設計についての知見を得る。

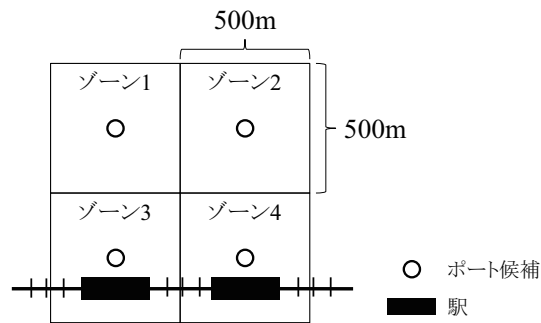


図-3 ネットワークの設定

表-1 ゾーン別時間帯別発生トリップ数

ゾーン	T1	T2	T3	T4	T5
1	200	200	200	200	0
2	200	200	200	200	0
3	0	100	100	100	100
4	0	100	100	100	100

表-2 ゾーン間 OD 分布

	1	2	3	4
1	0	0.3	0.6	0.1
2	0.3	0	0.1	0.6
3	0.3	0.1	0	0.6
4	0.3	0.1	0.6	0

(1) ネットワークの設定

ネットワークは図3のように4つのゾーンが存在し、それぞれのゾーンの中心部にポート候補が存在しているものを考える。また、ゾーン3とゾーン4は鉄道で結ばれており、駅の位置はポートと同じゾーンの中心部にあると考える。ゾーン間トリップの出発地・目的地はゾーン内から一様に乱数によって生成する。各ポート候補の容量は4台であるとする。

それぞれのゾーンにおける発生トリップ及び、OD分布表はそれぞれ表1、表2のように、駅周辺のゾーン3,4に需要が多く集中するように設定した。

また、利用できる移動手段は鉄道、徒歩、カーシェアの3つであるとし、鉄道とカーシェアがゾーン間移動に使えない場合には徒歩で移動するものとする。パラメータの設定は表3に示す通りである。

計算において、ゾーン3・4間の鉄道料金は40[円/分]、旅行時間3分、徒歩移動速度は70[m/min]、ポート候補間旅行時間は5[分]と設定した。

(2) 計算結果

以上の設定を元に数値計算を行い、配置毎に結果を比較したものを表4に示す。まず、ポート間料金は20[円/分]で一定であるとした。

全てのポートの配置において、車両数が3台の時に

表-3 パラメータの設定

パラメータ	値
鉄道定数項	1.00
EV 定数項	1.00
料金 (鉄道)[$\times 10$ 円/分]	-1.00
料金 (EV)[$\times 10$ 円/分]	-1.00
旅行時間 (鉄道)[分]	-1.00
旅行時間 (徒歩)[分]	-1.00
旅行時間 (EV)	-1.00
アクセス・イグレス距離 (鉄道)[$\times 100$ m]	-1.00
アクセス・イグレス距離 (EV)[$\times 100$ m]	-1.00
EV 利用可能性	-10.00

表-4 数値計算結果

配置パターン	車両数	総収益 [$\times 10$ 円/日]	1 ポートあたり収益
{1,2}	3	225.17	112.58
{1,3}	3	149.81	74.90
{1,4}	3	47.42	23.71
{2,3}	3	1.98	0.99
{2,4}	3	50.59	25.30
{3,4}	3	222.52	111.26
{1,2,3}	3	327.66	109.22
{1,2,4}	3	326.85	108.95
{1,3,4}	3	367.50	122.50
{2,3,4}	3	263.30	87.77
{1,2,3,4}	3	524.19	131.05

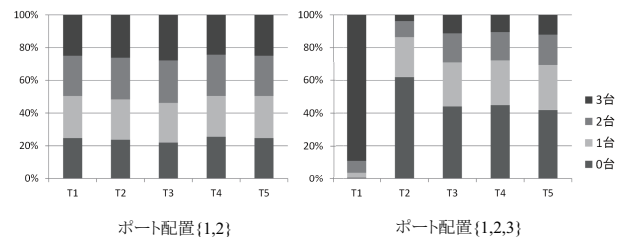


図-4 ポート配置による車両台数確率の変化

収益が最大となった。これは、ポート間の車両移動時間を無視しているために、ポートが満車になるリスクが過大評価されてしまっているためと考えられる。

ポート配置パターンが{1,2}の場合と{1,2,3}の計算結果を比較すると、総収益は配置パターン{1,2,3}のほうが多くなっているが、ポート1つ当たりの収益では{1,2}の配置の方が多くなっている。これは、{1,2}においてポート1・2間で流れていた車両が、ポート3を設置したことによりポート1からポート3へ流れてしまうためであると考えられる。

{1,2}および{1,2,3}の各時間帯におけるポート1の車両台数の確率を図4に示す。ポート配置が{1,2,3}の時、T1の時間帯にポート1からポート3に多くの車両が流れるため、T2以降の時間帯において車両が0台である確率が{1,2}の時に比べて高くなっていく。このように、需要の偏った場所にポートを追加すると、ポートに存在する台数に偏りが生じ、システムがかえって非効率になってしまふことが示された。

次に、料金設定によるインセンティブ制御を考える。ポート配置が{1,2,3}の時に、需要の多いポート

表-5 料金の差別化による収益変化

配置パターン	車両数	総収益 [× 10 円/日]	1 ポートあたり収益
{1,2}	3	225.17	112.58
{1,2,3} (料金均一)	3	327.66	109.22
{1,2,3} (料金差別化)	3	416.66	138.89

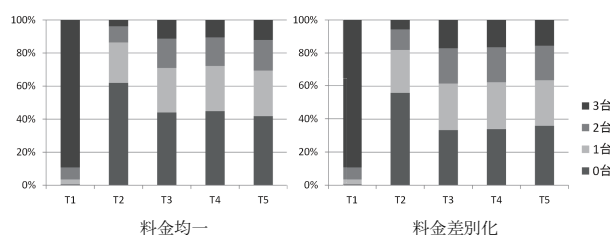


図-5 インセンティブ制御による車両台数確率の変化

1 から 3 への移動の料金を倍に、需要の少ないポート 3 からポート 2 への移動の料金を半額にした場合の計算結果を料金一定の場合と比較する。

計算結果は表 5 のようになった。また、ポート 1 の料金均一の場合と比較した時間帯別の車両台数確率の変化は図 5 のようになった。ポート間の料金を調整したことで、ポート 1 の車両が 0 台である確率がわずかであるものの下がり、結果として収益が増えていることが分かる。この結果から、適当な料金制御を行うことによって、ポート間の車両の偏りを改善し、収益を上げることが可能であることが示された。

5. 結論

本研究では、乗り捨て型の共有型交通サービスにおける、ポートの利用不確実性を考慮した利用者の交通手段選択を含んだシステムの収益評価について定式化した。また数値計算により、時間や場所による需要の偏りが生じている場所にポートを加えると、かえって 1 ポートあたりの収益が下がってしまい非効率なシステムになってしまうことを示した。同時に、料金を細かく設定しインセンティブ制御を行うことで車両の偏りを改善し、収益を上げることが可能であることを示した。

本研究では車両の移動時間をシステム上では考慮し

ないことを大きな仮定として置いている。そのため、少ない車両数の方が満車になるリスクが下がるため、過大に評価されてしまった。実際は移動中の車両も含めた利用不確実性を考慮する必要がある、動的なモデルへの拡張が求められていると言えよう。また本研究では車両台数の定常状態を前提とした収益評価を行ったが、現実のサービスにおいては定常状態になるまでにある程度の時間を要するので、それまでの期間の収益評価を行えないことが課題として挙げられる。また、実際の都市への拡張として、社会実験により得られたデータを元に交通手段選択モデルのパラメータ推定を行い、本研究で取り挙げたモデルを用いて最適なポート配置及び適切な料金設定に関する計算を行うことも展望として挙げられる。

参考文献

- 1) Shu J, Chou M, Liu Q, Teo C-P, Wang I-L (2010) Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution. Working paper, <http://bschool.nus.edu/Staff/bizteocp/BS2010.pdf>
- 2) Nair, R, Miller-Hooks E. 2011. Fleet management for vehicle sharing operations. *Transportation Science* 45(4), pp.524-540
- 3) Lin, J.-R., and Yang, T.-H.(2011). Strategic design of public sharing systems with service level constraints, *Transportation Research Part E*, 47, pp.284-294.
- 4) W. Fan, R.B. Machemehl, N.E. Lownes, Carsharing Dynamic Decision-Making Problem for Vehicle Allocation, *Transportation Research Record* (2008), pp. 97-104
- 5) G.H.D. Correia, A.P. Antunes, Optimization approach to depot location and trip selection in one-way carsharing systems, *Transportation Research Part*, 48 (2012), pp. 233-247
- 6) Boyaci, B., Geroliminis, N., and Zografos, K. (2013). An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems.
- 7) Kek, A.G., R.L.Cheu and M.L.Chor (2006). Relocation simulation model for multiple-station shared-use vehicle systems, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp.81-88
- 8) 山本俊行, 中山晶一郎, 北村隆一, 2002, 再配車によらない電気自動車の共同利用システムの効率化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.19, 3, pp. 481-487

A port location problem in one-way car-sharing systems focused on demand distribution

Yuya Wakabayashi, Eiji Hato and Itsumi Saito