

# ネットワーク型車両共有サービスにおける スペースの利用特性とその確率制御手法

若林由弥<sup>1</sup>・羽藤英二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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: wakabayashi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>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

本研究では、車両共有型サービスにおけるスペースのパラドクスとその確率制御について議論する。乗り捨て型の共有型サービスでは、車両の移動が発生するため、需要の偏る所にステーションを追加することで車両の分布に偏りが生じ、かえって収益が低下してしまう場合がある。これをスペースのパラドクスと定義づけ、収益の改善を試みる。システムの確率的な挙動に着目し、料金による需要制御を確率的収益最大化問題として定式化を行う。また、小規模なネットワークにおける数値計算例で、動的計画法を援用した先読み型の解法アルゴリズムを適用することで、リスク回避型の制御が可能になることを示した。

**Key Words :** 乗り捨て型カーシェアリング, パラドクス, 最適化

## 1. 研究の背景

近年、新しい交通サービスの形としてカーシェアリングが注目を浴びている。会員内で車両を共有して利用するこのサービスはユーザーにとって、自動車を私有する場合とは異なり、自分の使いたい時だけ車両を使うことができるため、駐車コストや維持管理コストを抑えることができるというメリットがある。また、私有自動車の代わりにカーシェアリングを利用するユーザーが増えることで、都市内における総車両数が減るため、道路や駐車場のスペースを節約し有効に活用することができるポテンシャルも持ち合わせていると言えよう。

カーシェアリングは round-trip 型と one-way 型の 2 種類に大別することができ、前者は車両を借りたステーションと同じ場所に返す必要があるのに対し、後者は借りたステーションとは別のステーションに返すことができる。そのため one-way 型は round-trip 型よりも自由な移動をユーザーに提供することができる。しかし、one-way 型のカーシェアリングサービスは現状ほとんど普及していない。one-way 型特有の、車両分布が動的に変化するという性質によって、制御困難な複雑系が生じるためである。こうした中で、ステーションの配置がシステムにもたらす影響は非常に大きい。需要が極端に偏った場所にステーションを新しく設置した場合、車両分布の均衡が崩れ、ステーションを追加する前に比べて収益が低下してしまうといったパラド

クスが起こりうる。それにも関わらず、カーシェアリングにおける従来の研究では、ステーション配置の組み合わせについて取り扱っているものはほとんど存在しない。

本研究の目的はこのパラドクスが発生するメカニズムについて整理すると同時に、収益を改善するための施策についての検討・評価を行う事である。この時、システムの挙動が確率的であることに着目し、確率的在庫管理問題として収益最大化問題の定式化を行い、最適な課金施策によってこれを制御することを試みる。ここで、解法アルゴリズムに動的計画法を用いることにより、需要発生の変率分布が複雑な系においても計算が可能となる。

## 2. 研究の位置づけ

本項では、交通ネットワークにおける代表的なパラドクス理論について整理し、シェアリングサービスにおけるパラドクスについて定義すると同時に、パラドクスの解消方法について議論する。

代表的な交通ネットワーク上のパラドクスとして、Pigou(1920) と Knight(1924) によって発見された Pigou-Knight のパラドクスや、Downs(1962) 及び Thomson(1977) による Downs-Thompson のパラドクス、Braess(1969,2005) による Braess のパラドクス等がある。これらのパラドクス理論は、いずれも他の経路やリンクとの組み合わせにおいて、あるサービスの

利便性を上げるためにサービスの内容を向上させた結果、かえって利便性が低下してしまうものである。

シェアリングサービスにも似たようなパラドクスが生じる場合があると考えられる。具体的には、ステーションの配置計画において、需要のバランスが取れているようなネットワークに対し、需要が極端に発生あるいは集中しているような場所にステーションを追加することによって、車両の分布が極端に崩れてしまい、結果的にサービス全体の収益が下がってしまう。これを本研究におけるシェアリングサービスのパラドクスと定義する。こうしたパラドクスを解消するために、以下の3つの解決策が考えられる。

- (a) ステーションを設置しない
- (b) 管理者による車両の移動
- (c) 利用者による車両の移動

1のステーションの削減は、そもそもパラドクスの発生するような箇所からステーションを削減するという単純なものである。しかし、交通サービスとしてシェアリングサービスの優位性を考えた場合、ステーションが密に配置されており、様々な場所からアクセス可能な状態であることが望ましい。そのため、ステーションの数を減らすことは好ましくない。

管理者による車両移動の例としては、Barth and Todd (1999), Kek et al.(2006), Nair and Miller-Hooks (2011) 等が存在する。管理者による車両の移動は確実に車両の偏りをコントロールすることができる反面、車両を移動するための人件費がかかり、赤字となってしまう場合が多い。

これらに対し、利用者ベースの車両の移動では、確実性には欠くものの、低コストで車両を移動させることができるというメリットが存在する。乗り捨て型シェアリングに対するプライシングは、このアプローチに属すると考えられる。一般に、ロードプライシングを始めとする諸々のプライシング施策では、コストを発生させることで需要の発生を抑制することが主な目的とされているが、乗り捨て型のカーシェアリングにおけるプライシングは、需要を減らすのではなく、車両の移動をコントロールしより多くの需要を生み出すための施策であるところに大きな特徴がある。

需要によって在庫管理が大きく変化するこのシステムでは、管理者が在庫となる車両を直接移動させることによって得られる効果よりも、利用を直接制御し車両と需要を直接管理する方の効果が高いと考えられ、そのために課金制御が有効な1つの手段となると言えよう。

表-1 変数の定義

$N = \{\dots, i, j, k \dots, N\}$	ステーションの集合
$T = \{1, \dots, t, t+1, \dots, T\}$	時間帯の集合
$c_i$	ステーション $i \in N$ の最大 駐車可能台数
$X$	総車両数
$x_i(t)$	時刻 $t \in T$ におけるステーション $i \in N$ の車両台数
$s(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots\}$	時刻 $t \in T$ における車両の 分布
$S(t)$	時刻 $t \in T$ における車両分 布の集合
$d_{ij}(t)$	時刻 $t \in T$ に発生するステーション $ij$ 付近間 ( $i, j \in N$ ) の 需要発生数
$v_{ij}(t)$	時刻 $t \in T$ に発生するステーション $ij$ 間 ( $i, j \in N$ ) の車 両実移動数
$o(t)$	時刻 $t \in T$ に行う操作
$O(T) = \{o(1), o(2), \dots, o(T)\}$	それぞれの時刻で行う操作
$p_{ij}(t) \in o(t)$	時刻 $t \in T$ におけるステーション $ij$ 間 ( $i, j \in N$ ) の料 金 (操作変数)

### 3. 確率的最適化問題

本項では、需要の発生や車両の移動が確率的であることを考慮し、システムの短期オペレーションの確率的最適化問題を定式化する。

#### (1) 収益最大化問題の定式化

はじめに、定式化にあたり以下の仮定を設ける。

- システムの稼働時間は離散時間に分割され、全ての車両は各期の開始時刻にいずれかのポートに存在する。(車両保存則)
- 移動元のポートに車両が存在し、移動先のポートに駐車スペースが存在する時のみ、車両の移動が可能である。(出発・到着制約)

このとき、表1のように変数を定義する。

$t$  期における車両の分布が  $s(t)$  である時、オペレーション  $o(t)$  を行った場合の  $t$  期の期待収入は以下のように表される。

$$\begin{aligned} & r(t|s(t), o(t)) \\ &= \sum_{i,j} \sum_{v_{ij}(t)} P(v_{ij}(t)|s(t), o(t)) v_{ij}(t) p_{ij}(t) \end{aligned}$$

よって1日の総期待収益は、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
& R(s(0), O(T)) \\
&= \sum_{t \in T} \sum_{s(t) \in S(t)} P(s(t)) r(t|s(t), o(t)) \\
&= \sum_t \sum_{s(t)} P(s(t)) \sum_{i,j} \sum_{v_{ij}} P(v_{ij}(t)|s(t), o(t)) v_{ij}(t) p_{ij}(t)
\end{aligned}$$

以上より、乗り捨て型シェアリングシステムにおける期待総収益最大化問題は、以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned}
& \max R(s(0), O(T)) \\
&= \sum_t \sum_{s(t)} P(s(t)) \sum_{i,j} \sum_{v_{ij}} P(v_{ij}(t)|s(t), o(t)) v_{ij}(t) p_{ij}(t) \\
& \text{subject to,}
\end{aligned}$$

$$\sum_i x_i = X \quad (1)$$

$$\sum_i v_{ij}(t) \leq x_i(t) \quad (2)$$

$$\sum_j v_{ij}(t) \leq c_i - x_i(t) \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i - \sum_j v_{ij}(t) + \sum_k v_{ki}(t) \quad (4)$$

式1は、車両保存則を表し、各期における車両の合計台数が増えないことを示している。式2は、時刻  $t$  にステーションから出発できる車両数とそのステーションに存在する車両以下であることを表す。また式3は、時刻  $t$  にステーションに到着できる車両数とそのステーションの駐車スペース以下であることを示す。式4は車両の移動による分布の変化を表す。

## (2) 潜在需要の発生手法

ポート  $ij$  間の潜在需要  $d_{ij}(t)$  はポアソン分布に従い発生するとし、その発生確率を以下のように定義する。

$$P(d_{ij}(t)) = \frac{(\lambda_{ij}(t))^{d_{ij}(t)} \exp(-\lambda_{ij}(t))}{(d_{ij}(t))!} \quad (5)$$

$\lambda_{ij}(t)$  はポアソン分布の期待値パラメータで、ステーション  $ij$  間の分布交通量  $\bar{\lambda}_{ij}(t)$  および交通手段選択モデルを用いて以下のように定義する。

$$\lambda_{ij}(t) = \bar{\lambda}_{ij}(t) \cdot \frac{\exp(\alpha_{ij} + \beta p_{ij}(t))}{A_{ij} + \exp(\alpha_{ij} + \beta p_{ij}(t))} \quad (6)$$

ここで、 $A_{ij}, \alpha_{ij}, \beta$  は OD ペア  $ij$  ごとに設定されるパラメータである。本研究ではこの潜在需要に基づいて期待収益を計算する。

## (3) 動的計画法による求解アルゴリズム

以上で定義した問題は、状態遷移にマルコフ性をもつ有限マルコフ決定過程 (Howard(1960)) として定義される。有限計画期間における有限マルコフ決定過程において、各期における最適性方程式は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
& u_t(s(t)) \\
&= \max_{o(t) \in O(t)} \left\{ r(t|s(t), o(t)) + \sum_{s(t+1)} P(s(t+1)|s(t), o(t)) u_{t+1}(s(t+1)) \right\}
\end{aligned}$$

この方程式は、最終期  $T$  から逐次的に遡って計算していくことで計算可能であることが知られており、本問題では次のステップに従って解を求める。

**STEP1**  $T$  期の各状態  $s(T)$  に対して  $u_T(s(T))$  を求める。

$$u_T(s(T)) = \max_{o(T)} \{ r(T|s(T), o(T)) \} \quad (7)$$

**STEP2**  $T - 1$  期の各状態  $s(T - 1)$  に対して  $u_{T-1}(s(T - 1))$  を求める。

$$\begin{aligned}
& u_{T-1}(s(T - 1)) \\
&= \max_{o(T-1)} \left\{ r(t|s(T-1), o(T-1)) + \sum_{s(T)} P(s(T)|s(T-1), o(T-1)) u_T(s(T)) \right\}
\end{aligned}$$

**STEP3** STEP2 を 1 つずつ前の期に戻りながら繰り返して解く。

## (4) リスク回避型問題の定式化

ここで、期待収益の最大化においては、将来効用の分散が先読み時間に応じて大きくなる。本研究では最適方程式をリスク回避型問題として再定式化し、先読みの不確実性を除去することを考える。このとき、 $t$  期における収益最大化問題 (リスク回避型問題) は、以下のように定式化される。

$$\max_{o(t)} \left\{ \min \sum_{t \in T} r(t|s(t), o(t)) \right\} \quad (8)$$

したがって、最適方程式 (7) は、以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}
& u_t(s(t)) = \\
& \begin{cases} \max_{o(t)} [\min \{ r(t|s(t), o(t)) + u_{t+1}(s(t+1)) \}], & \text{if } 0 < t \leq T-1 \\ \max_{o(t)} [\min \{ r(T|s(T), o(T)) \}], & \text{if } t = T \end{cases}
\end{aligned}$$

しかし、5 で定義した需要関数はポアソン分布を仮定しているため、収益の最小値は常に 0 となる。そのた

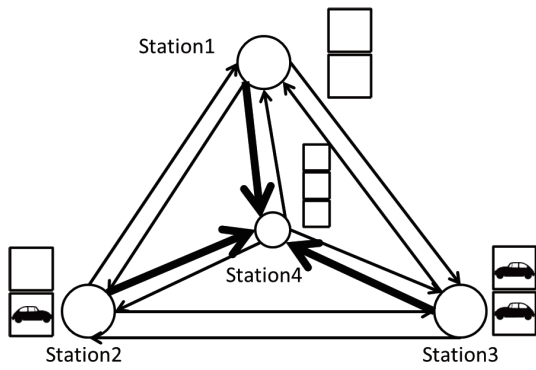


図-1 試算用ネットワーク

表-2 パラメータ設定

o	d	$\lambda_{ij}$						パラメータ			
		t1	t2	t3	t4	t5	t6	$p_{ij}$	$A_{ij}$	$\alpha$	$\beta$
1	2	5.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	1.0	-0.5	-0.2
1	3	2.5	2.5	2.5	5.0	2.5	2.5	3.0	1.0	-0.5	-0.2
2	1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	3.0	1.0	-0.5	-0.2
2	3	2.5	5.0	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	1.0	-0.5	-0.2
3	1	2.5	2.5	5.0	2.5	2.5	2.5	3.0	1.0	-0.5	-0.2
3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	2.5	3.0	1.0	-0.5	-0.2
4	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.0	1.0	-0.5	-0.2
4	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.0	1.0	-0.5	-0.2
4	3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.0	1.0	-0.5	-0.2
1	4	10.0	8.0	6.0	6.0	10.0	8.0	2.0	1.0	-0.5	-0.2
2	4	8.0	6.0	10.0	8.0	8.0	10.0	2.0	1.0	-0.5	-0.2
3	4	6.0	10.0	8.0	10.0	6.0	6.0	2.0	1.0	-0.5	-0.2

め本研究では、最小値の代わりに第一四分位点を代表点とし、最大化する手法をリスク回避型として用いる。

#### 4. 小規模ネットワークにおける試算

ここでは、前章で定式化した最適方程式にもとづき、小規模なネットワークにおけるステーションのパラドクスと料金制御によるシステムの最適オペレーションを求める。計算には、図1のネットワークを用いる。3つのステーションにそれぞれ2つずつ、中央のステーションには3つ駐車枠が存在する。また、車両台数は合計3台である。各候補地のペアについて有向リンクを設定して料金制御の方法を考える。なお、潜在需要は上述の通り、ポアソン分布に従って発生するものとする。ポアソン分布のパラメータは、表2に従う。需要の発生パターンは中央のステーション4に対し需要が集中するようなパターンを設定した。

このネットワークについて期待値最大化制御とリスク回避型制御の2通りの制御を行い、制御効果の検証を行った。なおリスク回避型の場合、需要関数にポアソン分布を仮定しているため、最小値は全てのODで移動需要が全く発生しない場合となり全ての制御で値が0になってしまうため、厳密には最適解を算出することができない。そこで本計算においては、最小値の

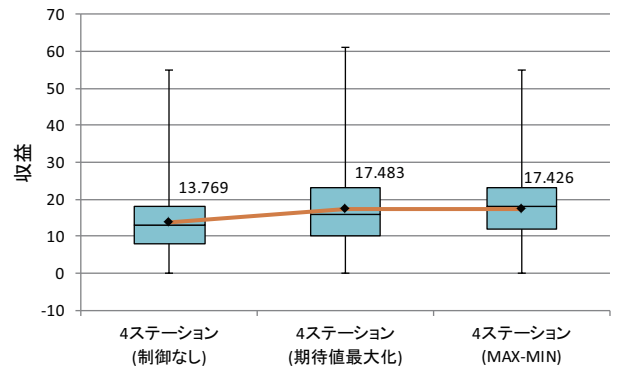


図-2 制御効果の検証

代わりに第一四分位点を用いた。また、本計算では簡略化のため、リンクを1つ選びそのリンクの料金を倍にするという制御について計算を試みた。

このネットワークについて、ステーション1から3の3箇所にステーションを配置した場合と、ステーション4を新しく追加した場合、更に4つのステーションが配置されているときに前述の2つのアプローチの課金制御を行った場合の合計4つのパターンについて収益の変化を試算したものが図2の箱ひげ図である。図の横軸は制御手法の種類、縦軸は収益を表している。まず、ステーションが3つの時に比べ、ステーション4を追加したときの収益は大きく低下していることが分かる。これはステーション4に需要が集中し、車両が全てステーション4に移動してしまうため発生する。すなわち、シェアリングのパラドクスが発生していることがここで確認できる。次に、課金制御の効果について検証してみると、期待値最大型とリスク回避型、どちらの制御においても何もしない場合と比べ、収益が改善していることが見て取れる。2つの制御方法を比べると、期待値最大化制御の方が値の振れ幅が大きく、第一四分位点の値はリスク回避型制御の方が大きくなることが分かる。これより、リスク回避型の制御を行うことにより、ある程度収益が低下するリスクを回避した制御を行うことが可能であると示された。

#### 5. 結論

本研究では、共同利用型車両サービスにおけるパラドクスと確率的な課金制御による収益の改善を試みた。はじめに、ステーション配置のパラドクスについて概念を整理し、小規模なネットワークでパラドクスを例示した。続いて、課金による制御について、収益最大化問題を確率的在庫管理問題として捉え、定式化を行った。また、リスク回避型問題として再定義することで期待収益の不確実性を下側から抑えることができると

仮定した。実際に小規模なネットワークで試算を行った結果、動的計画法による2つの制御手法を適用することで収益の改善を図ることができること、またリスク回避型の考え方である程度収益低下のリスクを回避した制御を行うことができることが検証された。

しかしながら、問題設定や計算手法に課題があることは言うまでもない。実際のネットワークにおいては多数のステーションの組み合わせによって車両の移動が複雑に発生し、単純にステーションやODについて課金するだけでは狙った効果を得ることは難しいと言えよう。また、計算手法についても、小規模ネットワークについて第一四分位点を代表点として擬似的なリスク回避制御の計算を試みたが、厳密なMAX-MIN制御ではないため、効果的に収益低下のリスクを回避出来るとは言い難い。この点については需要モデルや計算アルゴリズムについて今一度考慮する必要があると言えよう。

#### 参考文献

- 1) Pigou, A. C., *The Economics of Welfare.*, MacMillan, London, 1920.
- 2) Knight, F., *Some Fallacies in the Interpretation of*

*Social Costs*, *Quarterly Journal of Economics*, Vol.38, pp.582-606, 1924.

- 3) Downs, A., *The Law of Peak-Hour Expressway Congestion*, *Traffic Quarterly*, Vol.16, pp.393-409, 1962.
- 4) Thomson, J., M., *Great Cities and their Traffic*, Gollancz, London, 1977.
- 5) Braess D., Nagurney A., and Wakolbinger T.: *On a Paradox of Traffic Planning*, *Transportation Science*, Vol.39, No.4, pp.446-450, 2005.
- 6) Barth, M. and Todd, M. , *Simulation model performance analysis of a multiple shared vehicle system*, *Transportation Research Part C*, 7(4), pp.237-259, 1999.
- 7) Kek, A., Cheu, R. and Chor, M. , *Relocation Simulation Model for Multiple-Station Shared-Use Vehicle Systems*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1986, pp.81-88, 2006
- 8) Nair, R., Miller-Hooks, E., *Fleet Management for Vehicle Sharing Operations*, *Transportation Science*, 45, pp.524-540, 2011.
- 9) Barth, M., Todd, M. and Xue, L., *User-Based Vehicle Relocation Techniques for Multiple-Station Shared-Use Vehicle Systems*, paper presented at the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Washington DC, January 2004.
- 10) Howard, A., *Dynamic Programming and Markov Processes*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1960.

## A utilization characteristics of space in car-sharing networks and its stochastic optimization approach

Yuya Wakabayashi, Eiji Hato