

需要・供給の不確実性に着目した乗り捨て型 カーシェアリングの最適化プライシング

若林由弥¹・羽藤英二²

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

本研究では、プライシングによる乗り捨て型カーシェアリングの売上最大化問題について取り扱う。都心部への乗り捨て型カーシェアリングの導入は、自由な移動をもたらす活動を活性化させる効果が期待できる。一方で、車両の偏りにより利用できるか分からないといった供給側の不確実性と、利用可能であってもユーザーが利用するかどうか分からないといった需要の不確実性について考慮することがシステムの最適化を行う上で必要不可欠となる。本研究では横浜市で行われた大規模社会実験のデータと同時期に参加者の一部に対して行ったプロブパーソン調査によるデータを用いて需要モデルを推定し、ユーザーのサービスに対する感度分析を行うと同時に、需要・供給の不確実性を考慮した最適化のフレームについて提案する。また、推定した需要モデルを用いた数値計算によって状況の再現を行い、プライシング施策の効果の検討及び定式化の妥当性についての検証を行う。

Key Words : 乗り捨て型カーシェアリング, 不確実性, プライシング

1. 研究の背景

近年、世界各地でカーシェアリングが普及しつつある。カーシェアリングは、車両を複数人で共有することによって、都市部への自動車の流入量を抑制し、環境効果ガスの減少や渋滞の解消に貢献することが期待されている他、公共交通と比べて自由度の高い移動を実現できるため、都市部における移動を活発化させることも期待できる。このようなカーシェアリングによるサービスは2種類に大別することができる。1つは拠点型、もう1つは乗り捨て型である。前者では、あるステーションから自動車を利用した場合、必ずそのステーションに車両を返却しなければならない。この場合、ステーションあたりの利用者はそのステーション周辺の少数かつ特定のユーザーに限られるため、相乗りや譲り合いといった利用者間の利用の相互調整を促進するようなマイクロな施策がシステムの最適化において有効な施策であると考えられる。一方、乗り捨て型のカーシェアリングでは、出発したステーションとは別のステーションに車を返却することができるため、利用者はサービスが展開しているエリア内で活動する不特定多数の人間が対象となる。そのため利用者の挙動だけでなく、それによって生じるシステム全体の挙動についても考慮しなければならず、拠点型のシェアリングに対してオペレーションが困難なシステムである

と言えよう。

しかし、乗り捨て型のシステムは公共交通と組み合わせることで市街地に導入することによって、都心部への私有自動車の流入を抑制すると同時に、都心部での移動の自由度を高めることで、都心部の活動を活発化させる効果が期待されている。こうした面から、car2go¹⁾やAutolib²⁾のように既に実用化されている例も存在し、我が国でも複数の都市で実証実験がおこなわれている。

2. 研究のフレーム

(1) 需要・供給の不確実性

乗り捨て型のカーシェアリングの最適化を図る上では、サービスの需要と供給、それぞれの利用不確実性について考慮する必要がある。

利用者はいつでも望んだときにサービスを利用できるとは限らず、出発地付近のステーションに車両がないときや、目的地付近のステーションに車両を停めるスペースがないときには利用できなくなってしまう。これが供給の不確実性である。一方で、たとえサービスが利用できる状態にあつたとしても、ユーザーの個人属性や、料金や移動時間といったサービスの水準によって他の交通手段を利用する場合が存在する。これを需要の不確実性と呼ぶ。乗り捨て型カーシェアリングにおいては、需要の偏りによってステーション毎の車両

の台数が増え、また車両の偏りによって需要の発生に制限がかかるといった、相互の関係が存在する。そのため、乗り捨て型カーシェアリングの最適なオペレーションを考える上では、これら2つの不確実性について同時に議論する必要がある。

不確実性について、既往の研究では、Barrios(2012)³⁾が car2go のデータを元に乗り捨て型シェアリングのLOSについて議論を行っているが、エリア内に車両が一律に分布すると仮定しており、供給の不確実性が考慮出来ていない。また、Ciari et al.(2012)⁴⁾では、既存の交通数値計算ソフトである MATSim の拡張として、カーシェアリングの供給の不確実性を考慮した乗り捨て型カーシェアリングのモデル化を試みているが、ユーザーの意思決定を遺伝的操作を用いた最適化問題として解いており、交通手段選択時におけるユーザーの意思決定プロセスを明示的に評価できているとは言い難い。このように既往の研究では、需要・供給の不確実性について、どちらか一方について言及しているものの、同時に議論している研究はほとんど存在しない。

(2) 乗り捨て型シェアリングにおけるプライシング

不確実性のうち供給の不確実性については、車両を移動することによって改善することが可能である。この場合、車両を移動させる方法として、管理者が車両を移動させ再配置する場合と利用者に車両を移動してもらう場合の2通りのアプローチが議論されてきた。前者の例としては、Barth and Todd (1999)⁵⁾、Kek et al.(2006)⁶⁾、Nair and Miller-Hooks (2011)⁷⁾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。一方で、後者の利用車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よるプライシングは、後者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。

しかし、プライシングにおける需要のコントロールを行う上では、需要発生メカニズムを正確に把握することが不可欠である。インセンティブによる利用者ベースの再配置を行った研究としては、Barth et al. (2004)⁸⁾や Uesugi et al. (2007)⁹⁾、Febbraro et al. (2010)¹⁰⁾等

表-1 横浜市実証実験データ概要

実験期間	2013/10/11~2013/12/20(継続中)
ステーションの数	54 箇所
利用者数	1534 人
利用実績	4596 回
観測トリップ数	8187 トリップ/45 人

が存在するが、いずれもカーシェアリング独自の需要関数を設定しており、他の交通手段との比較という点で需要をとらえた研究は少ない。

(3) 本研究の目的

こうした背景を踏まえ、本研究では、現在横浜市で行われている大規模シェアリング実証実験「チョイモビ」から得られたデータを用いて、システムの不確実性を考慮した交通手段選択モデルの定式化及び推定を試みる。また、推定したモデルを用いて利用数値計算を構築し、プライシングによる収益最大化問題について、シナリオを比較することによって施策の有効性について議論する。実データを用いることで、不確実性を考慮したより精緻なモデルの構築が可能となった点、さらにそのモデルを用いた数値計算により不確実性を含んだサービスの評価が可能になった点が、本研究の大きな特徴と言えよう。

3. 交通手段選択モデル

ここでは、需要・供給の不確実性について明示的に組み込んだ交通手段モデルの定式化を行い、実データを用いて推定を行うことで現実を反映した精緻なモデル化を目指す。

(1) データ概要

本研究では、横浜市で行われている大規模カーシェアリングの実証実験である「チョイモビ」の実験データを用いる。ここでは、基本となるステーションの情報その他、ユーザーの利用実績データや利用中の自動車の位置情報データ等が得られている。本研究では、主に実証実験に関する2つのデータを元に分析を行う。1つはサービスの利用実績データ、もう1つは同時期に実施したプローブパーソン調査による行動データである。表1にデータの概要を示す。

利用実績データは、いつ、どこのステーションからどこのステーションまで車両を貸出したか記録されたデータで、このデータを時刻毎に集計することにより、各時刻におけるステーションの車両台数を把握するこ

とが可能である。プローブパーソン調査は、GPS機能が搭載されたスマートフォンを移動時にモニターに操作してもらうことで、これまでの紙ベースの行動調査ではとらえきれないような詳細な移動データを個人単位で取得することができる調査である。具体的には、各トリップにおける出発時・移動手段変更時・到着時に機器の操作を行うことで、リアルタイムの移動データや、交通手段、移動目的、更に移動中の位置情報データを取得することができる。

利用実績データは、システムのすべての利用データを把握できるため、例えばどのステーションからどのステーションへの利用が多いといった、システム全体に対しての定量的な分析を行うことができる反面、利用者の移動目的やその他の行動については把握することができない。一方で、プローブパーソン調査のデータは、モニターの期間中の移動データを全て取得しているので、サービス利用時以外の行動やサービス利用時の移動目的についても把握することができる反面、一部の少数のモニターに対してしか調査を行っていないため、このデータからシステム全体の把握をすることはできない。本研究ではこれらのデータを同時に用いることにより、システムの不確実性を考慮した利用モデルの推定を行うことを可能にした。

(2) モデルの定式化

各交通手段 m の効用 U_m が確定項 V_m と誤差項 ϵ_m の和 $U_m = V_m + \epsilon_m$ によって表され、誤差項がガンベル分布に従うと仮定したとき、交通手段 m が選択される確率 p_m は多項ロジットモデルを用いて以下のように表される。

$$p_m = \frac{\delta_m \exp(V_m)}{\sum_{m'} \delta_{m'} \exp(V_{m'})} \quad (1)$$

ここで、 δ_m は交通手段 m の選択肢生成可否を表しており、カーシェアリングの場合、出発地付近に車両が存在しない、あるいは到着地付近に駐車可能なスペースが存在しない場合、 $\delta_{CS} = 0$ となる。しかし、こうした利用可能性はプローブパーソン調査によるデータだけでは観測することができない。本研究では、各時刻における車両数のデータをプローブパーソンデータと組み合わせることによって、利用者の行動選択時の利用可能性を判別することを可能とした。

ユーザーが選択する交通手段は公共交通、私有自動車、タクシー、カーシェア、二輪車、徒歩のいずれかであるとし、手段別効用の確定項 V_m は以下のように表されると仮定する。

$$V_m = \alpha_m + \beta_1 t_m + \beta_2 c_m + \beta_3 x_m + \beta_4 \delta_{short} \quad (2)$$

表-2 交通手段選択モデル推定結果

説明変数	パラメータ	t 値	
定数項 (公共交通)	0.981	2.95	**
定数項 (自動車)	0.043	0.13	
定数項 (タクシー)	-0.785	-0.91	
定数項 (カーシェア)	0.053	0.14	
定数項 (二輪車)	-0.406	-1.21	
所要時間 [$\times 10$ 分]	-0.348	-2.57	**
料金 [$\times 100$ 円]	-0.192	-2.45	*
アクセス・イグレス時間 [分]	-0.032	-3.86	**
1km 以内ダミー (徒歩)	1.087	4.08	**
サンプル数		688	
初期尤度		-954.95	
最終尤度		-709.09	
尤度比		0.26	
補正済み尤度比		0.25	

*5%有意, **1%有意

ここで、 α は定数項を表し、 β は各サービス変数に対するパラメータを表す。サービスの説明変数については、 t が移動時間、 c が料金、 x がアクセス・イグレス時間、 δ_{short} は徒歩移動時のみ効用に加算される変数で、出発地と目的地の直線距離が 1km 以下であることを表すダミー変数である。

(3) 推定結果

表 2 にモデルの推定結果を示す。モデル全体の説明力を表す補正済み尤度比は 0.25 と高く、このモデルが十分現実を説明するに足るものであることを示している。所要時間、料金、アクセス・イグレス時間のパラメータはいずれも負値で有意となっており、これらの値が大きくなるほどその交通手段が選ばれにくくなるといった、およそ現実に即した結果であると言える。短距離ダミーのパラメータの値は正値で有意となっており、短い距離のトリップであれば徒歩移動が選ばれやすいといった、こちらについても概ね現実に即した値となっていると考えられる。

以上より、プローブパーソンデータと利用実績データを用いて、不確実性を考慮した定式化を行うことが可能となった。具体的には、誤差項を含む効用を仮定した非集計モデルを用いることで需要の不確実性を表現し、更に実データから利用可能性を観測することでバイアスを排した推定を行うことができるようになった。

4. プライシングによる収益最大化問題

ここでは、乗り捨て型カーシェアリングについて、不確実性を考慮した収益最大化問題としての定式化を行う。更に、定式化を行った交通手段選択モデルを利用した数値計算を構築し、プライシングのシナリオを評価する枠組みを提案する。

表-3 変数の定義

$N = \{\dots, i, j, k, \dots\}$	ステーションの集合
$T = \{1, \dots, t, t+1, \dots\}$	時間帯の集合
$x\{i t\}$	時刻 $t \in T$ におけるステーション $i \in N$ の車両台数
$y\{i t\}$	時刻 $t \in T$ におけるステーション $i \in N$ の駐車可能台数
$v\{ij t\}$	時刻 $t \in T$ に発生するステーション ij 間 ($i, j \in N$) の車両移動数
c_i	ステーション $i \in N$ の最大駐車可能台数
t_{ij}	ステーション ij 間 ($i, j \in N$) にかかる移動時間
$p\{ij t\}$	時刻 $t \in T$ におけるステーション ij 間 ($i, j \in N$) の単位時間当たりにかかる料金

(1) 最適化問題の定式化

定式化を行うにあたり、以下のような仮定をおく。

- 各ステーション間の移動時間はネットワーク上の混雑によらず一定である。
- 移動元のステーションに車両が存在し移動先のステーション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。
- ステーション間の移動が発生した時点で移動先の駐車スペースがブロックされる。
- 車両の返却は、各移動の到着時刻の終了時に一斉に行われる。

この時、表3のように変数を定義すると、総収益最大化問題は以下のように定義できる。

$$\max \sum_t \sum_{i,j} v(ij|t) t_{ij} p\{ij|t\} \quad (3)$$

subject to

$$x(i|t+1) = x(i|t) - \sum_j v(ij|t) + \sum_k v(ki|t - t_{ki}) \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (4)$$

$$y(i|t+1) = y(i|t) - \sum_k v(ki|t) + \sum_j v(ij|t) \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_i v(ij|t) \leq x(i|t) \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_j v(ij|t) \leq y(j|t) \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq x(i|t) \leq c_i \quad \forall i \in N, t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq y(i|t) \leq c_i \quad \forall i \in N, t \in T \quad (9)$$

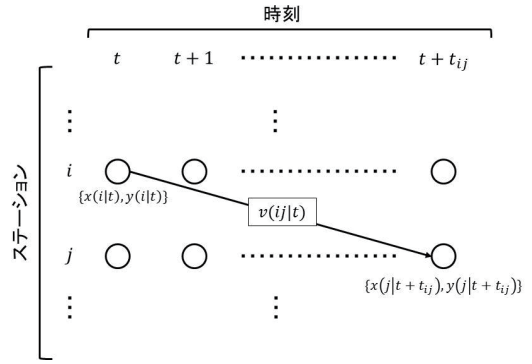


図-1 時空間上の車両の移動

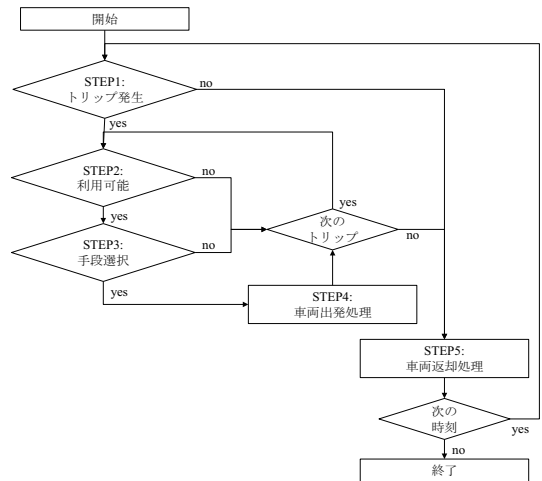


図-2 数値計算のフロー

式(4)及び式(5)はそれぞれ、各時刻におけるステーションの車両数と駐車可能スペースの変化を表している。図1に時空間上における車両移動の概念図を示す。時刻 t にステーション i に到達する車両は、ステーション k を $t - t_{ki}$ に出発した車両である。一方、駐車スペース $y(i|t)$ は移動する車両の出発時から到着時までブロックされるため、時刻 t に出発した i に到着する予定の車両の合計分だけ減少する。

(2) 数値計算の構築

前節で定式化を行ったシステムの最適化問題について、利用者の意思決定を考慮した数値計算を用いて評価する。

図2に数値計算のフローを示す。各ステップでの処理は以下に示す通りである。

STEP1. トリップの発生

その時刻に発生するトリップを列挙する。発生トリップがない場合はSTEP5の車両返却処理へ進み、ある場合には列挙した各トリップに対してSTEP2～STEP5の処理を行う。

STEP2. 利用可能性のチェック

表-4 プライシングによるシナリオ

シナリオ 1	処理なし
シナリオ 2	処理 1 のみ
シナリオ 3	処理 2 のみ
シナリオ 4	処理 1+処理 2

そのトリップの出発地・目的地から半径 500m 以内のステーションを検索し、出発地付近のステーションに車両が存在し、到着地付近のステーションに駐車スペースが存在する場合は移動可能とする。移動可能なステーションの組み合わせのうち、アクセス・イグレス距離の最も短い組み合わせを交通手段選択の候補に加え、STEP3に進む。条件を満たすステーションが付近に存在しない場合は次のトリップを発生させる。

STEP3. 交通手段選択

前章で定式化・推定を行った交通手段選択モデルを用いて、交通手段選択を行った後、カーシェアが選択される場合はSTEP4に進む。カーシェアを選択しない場合は次のトリップを発生させる。

STEP4. 車両の出発

カーシェアが交通手段として利用されたとき、出発ステーションの車両を1台減らす。また、到着ステーションについては駐車可能台数を1台減らす。更に、車両の返却時刻を計算し返却待ち行列に加える。これらの処理が終わったのち、次のトリップを発生させる。次のトリップがない場合はSTEP5の車両返却処理を行う。

STEP5. 車両の返却

その時刻のトリップが全て終わったのち、その時刻に返却される車両を返却待ち行列から検索し、各到着ステーションについて車両台数を1台増やし、返却処理を行う。これらの処理が終了後、次の時刻に進み、再びSTEP1を行う。

(3) 数値計算によるプライシング施策の検討

以上で構築した数値計算を用いて、プライシングのシナリオを検討する。具体的なシナリオとしては、以下の2つの処理の組み合わせを考える。

処理 1:

車両が偏るようなステーション間の移動(移動元のステーションの車両がなくなる、移動先のステーションが満車になる)に対し、時間料金を倍にする。

処理 2:

車両の偏りをなくすような移動(移動元のステーションが満車である、移動先のステーションに車両が存在しない)に対し、時間料金を半額にする。

この時、数値計算によって比較するシナリオを表4に示す。このようにシナリオを作成・比較することによって需要・供給の不確実性を考慮した乗り捨て型カーシェアリングのシステム評価を行うことが可能となった。

5. 結論

本研究では、実データを元に乗り捨て型カーシェアリングシステムにおける交通手段選択モデルについて定式化・推定を行った。その結果、需要および供給の不確実性を考慮した需要モデルの構築が可能となった。また、ここで得られた需要モデルを用いて数値計算によってシステムを評価することができる枠組みを提案した。今後このモデルをベースに、様々な施策や評価値の計算を行うことが出来るであろう。

今後の展望として、まず実ネットワーク上で数値計算を実際に行いシナリオの比較から知見を得ることが考えられる。シナリオの与え方によってはかえって収益が下がってしまうことも考えられるので、十分に結果について考察する必要がある。次に、モデルの更なる精緻化が考えられる。現在のモデルはトリップベースの単純なモデルであるが、現実にはエリア内の駐車場コストや私有交通の同一ツアー内における選択の制限など、現実を反映し切れていない部分を残している。これらの改善を行う事により、例えばエリア内の駐車場料金を倍にする事によりカーシェアへの転換を促すといった、よりマクロな視点での政策を考えることが可能となる。更に、計算コストを考えるのであれば、現在の数値計算を用いた評価ではなく、確率的整数計画問題として最適化問題を解くのが妥当であろう。この場合、定式化だけでなく、現実的な時間に最適解の近似解を求める手法についても十分な考察を行うことが必要であると言えよう。

参考文献

- 1) car2go, <http://www.car2go.com/>, Accessed 20 April, 2014.
- 2) Autolib', <https://www.autolib.eu/fr/>, Accessed 20 April, 2014.
- 3) Barrios, J., On the Performance of Flexible car sharing - A Simulation-Based Approach, <http://www.iceusa.org/>, Accessed 20 April, 2014.
- 4) Ciari, F., Dobler, C., and Axhausen, K., Modeling one-way shared vehicle systems: an agent-based approach, paper presented at 13th International Conference on Travel Behaviour Research, Toronto, July 2012.
- 5) 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.
- 6) 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

- 7) Nair, R., Miller-Hooks, E., Fleet Management for Vehicle Sharing Operations, Transportation Science, 45, pp.524-540, 2011.
- 8) 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.
- 9) Uesugi, K., Mukai, N. and Watanabe, T., Optimization of Vehicle Assignment for Car Sharing System, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 4693, pp.1105-1111, 2007.
- 10) Febbraro, A., Sacco, N. and Saeednia, M., One-way carsharing: solving the relocation problem, paper presented at the Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington DC, January 2012.

Optimization pricing of one-way car sharing systems with demand and supply uncertainty

Yuya Wakabayashi, Eiji Hato