

# 時間的選好を考慮した共同利用システムの 需要-供給最適化問題

齊藤 いつみ<sup>1</sup>・羽藤 英二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

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

<sup>2</sup>正会員 東京大学都市工学科 準教授 (〒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、共同利用システムにおけるシステムの効率性評価を行うことを目的として、日々の出発時刻選択をモデル化し時間的選好を内生化したシステム最適化問題として定式化する。共同利用システムは、需要と供給が一体化システムであることが特徴的であり、今期の需要が来期の各ポートの供給量に直接影響する。これにより、システムを効率的に運用するためには需要の接続性が非常に重要になる。需要の接続性には、時間的・空間的な要素があり双方の最適化問題を解くことが必要となるが、本研究ではまず時間的接続性の評価を行うため、出発時刻の分布特性に着目し基本的な分析と今後のシステム評価に向けた枠組みを示すことを目的とする。

**Key Words :** *sharing system, departure time choice, matching*

## 1. はじめに

近年自転車や電気自動車 (EV) の共同利用が注目されている。大きな背景としては、ITS 技術の高度化により高精度な管理と制御が可能になりつつあること、限られた資源の効率的な利用が必要となってきたことなどがあげられるだろう。同様のサービスに対するニーズは今後も増えていくことが予想されるが、需要管理の難しさやそれに伴う収益性の低さなどから現状では日本において本格的な事業として成功している例は少ない。このようなサービスがシステムとして成立するためには、多様な需要を効率的に束ね、収益を上げていくことが重要な課題であるといえるだろう。共同利用システムは容量制約が存在するため、個人ごとに異なる多様な需要のマッチングを適切に管理することが重要となる。従前の研究においてもマッチングに関する研究は行われているが、モビリティクラウドのようなシステムにおける大きな特徴はプローブパーソン技術など ITS 技術の援用によって管理者が利用者の移動履歴やを情報を逐次管理・更新することができるということである。このような状況下において、管理者は利用者の個人ごとの需要の変動を計測することが可能となるため、個人の移動活動パターンを分析・モデル化しインセンティブ設計などによって需要を逐次管理・調整するアルゴリズムがシステムの頑健性を保障する上で重要な課題となるだろう。履歴を有

効に利用することで、管理者は個人の行動の連鎖とその代替構造を把握しより効率的なマッチングを形成することも可能になる。

インセンティブコントロールに関する研究としては古くから研究の蓄積がされているが、これらは需要を一元的に扱ったり、ヒューリスティックなセグメンテーションを行ったりしている。EV シェアリングのような個別の需要を担保する交通システムを考えた場合、個人の需要の時間的・空間的変動によってシステム全体の挙動が大きく変化することが考えられ、これらの変動を考慮した上で多様な需要をどのように組み合わせることが効率的かということ個人ごとの需要変動を考慮しながら検証していく必要があるだろう。このための基礎的な分析として、個人の移動活動パターンの時間的・空間的ばらつきとその代替選択肢構造の分析が重要になる。さらに、共同で財を利用する場合、他者がどのように行動するかということが自らの利用条件として直接影響する。個人は他者あるいはシステムの挙動を予測しながら行動することが考えられ、そのような行動と予測の相互関係を明示的に扱うことが求められているといえよう。

本研究では、個人の移動活動パターンの動的な変化を行動の不確実性とその相互作用という観点から整理し、共同利用システムの需要管理についての基礎的な知見を得ることを目的とする。

## 2. 共同利用システムにおける行動の不確実性

共同利用システムのように他者のリスク（変動）を常に内包しているシステムにおいて、個人は他者の行動について何らかの推論を行っていると考えられる。さらにそれらの認知に基づいた行動の結果日々変化するシステムの条件を学習しながら最も効用の高い選択肢を選択していると考えられるだろう。これらのダイナミクスを検証するためには行動モデル自体にリスクの認知や学習の概念を導入する必要があるといえる。

### (1) 既存研究における不確実性の扱い

既存研究においては、旅行時間の不確実性を考慮した出発時刻選択モデルや、プロスペクト理論に基づいた配分モデルなど配分モデルに認知旅行時間を導入したモデルが多く存在する。また、選択肢集合に関してはEBAや動的な選択肢集合の生成法なども提案されている。

### (2) 共同利用システムにおけるマッチング

共同利用システムのようなシステムにおいて、サービスレベルは前の期における利用状況に依存する。そのため、利用者は推論と学習の繰り返しによって行動を決定していると考えることができ、このような行動原理を定式化するためには供給側と需要側の相互作用を明示的に取り扱う必要がある。また、供給側としては空間的・時間的に広がりのある需要を適切にマッチングさせて効率的な運用を図ることが望ましい。

本研究では、需要側の出発時刻・到着時刻の希望時刻と変動に着目し、到着分布と出発分布の組み合わせによるマッチングの成立可能性と効率的なマッチングについての検証を行うことを目的とする。図-1に概念を示したパターン1のような分布の重なりが大きいような組み合わせの場合、マッチングされた場合の車両の待ち時間は短くなると考えられるが、マッチング不成立の確率も存在する。一方、パターン2のような組み合わせではマッチング不成立の可能性は減少するが、車両の待ち時間が長くなると考えられる。これらを考慮し、需要者同士の調整行動を促す、あるいはインセンティブによって供給側が調整可能な需要を動かすことで、マッチング効率性を向上させることがシステムそのものの頑健性にもつながるものと考えられる。

## 3. 研究のフレーム

活動の選択を考えると、選択対象としては目的地、滞在時間、出発時刻などが存在する。全てを統一的に扱うモデルがアクティビティモデルとして研究されており、共同利用システムにおいても時間的・空間的な選択を調整することが重要であるため本来は全ての選択を統一的に扱うことが必要であるが、本研究ではまず時間的な選択

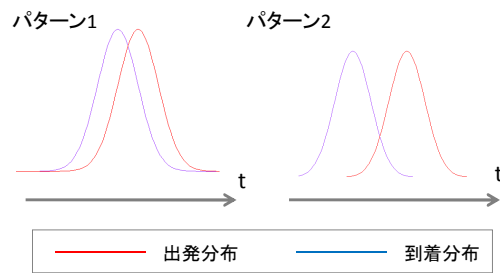


図-1 到着・出発分布の組み合わせパターン例

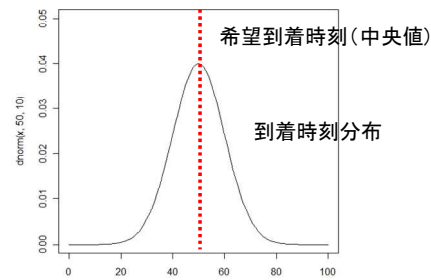


図-2 希望到着時刻の設定

に着目し、出発時刻の選択についてモデル化を行う。さらに、全体のシステムとしての最適化問題を需要モデルを内生的に組み込み定式化する。これにより、需要と供給の相互関係を考慮した最適化問題として定義する。

### (1) 出発時刻選択モデル

出発時刻選択に関する既存研究では、利用者の一般化費用は渋滞による待ち時間と希望到着時刻と実際の到着時刻の差（スケジュールコスト）によって表現される。本研究では、個人や目的ごとのスケジュールコストに対する反応の異質性や所要時間変動に対する動的な学習メカニズムについて明示的に考慮したモデルの定式化を行う。

#### a) 希望到着時刻の設定

スケジュールコストを算出するためには、希望到着時刻を設定することが必要である。希望到着時刻について、既存の実証研究ではアンケートで聞いたり全体のフローの分布から求めたりしている。本研究では個人のday-to-dayの詳細な行動データが取得できていることを前提に、データから希望到着時刻を設定することとする。

具体的には、目的ごとに到着時刻を集計しその分布の中央値を希望到着時刻と定義する。ただし非義務目的の移動については分布のばらつきが大きいため、詳細な検討が必要である。

#### b) 出発時刻選択モデル

本研究で想定する出発時刻選択モデルについて定式化する。本研究では、個人の所要時間に関する認知とその動的なメカニズムに焦点を当て、出発時刻選択について以下のように定式化する。

利用者は早く到着することのコストと遅く到着するこ

とのコストを考慮しながら、自らのコストを最小化するように出発時刻を選択しているとする。

$$\text{Min } L = \beta \cdot \hat{i}(t_s, n) + \gamma \cdot F(\hat{i}(t_s, n)) \quad (1)$$

ただし、

$t_s$ : 出発時刻

$\beta$ : 時間価値(円/分)

$\hat{i}(t_s, n)$ :  $n$ 回目のトリップにおける見積もり所要時間

$\gamma$ : 見積もりを上回った場合の損害(円)

$F(\cdot)$ : 所要時間が見積もり時間を上回る確率

ここで、実所要時間が平均 $\bar{t}$ 、分散 $\sigma_T$ の標準正規分布に従うとすると、式(1)を $\hat{i}$ で微分して、

$$\frac{dL}{dt} = \beta - \gamma \cdot \frac{1}{\sigma_T} \cdot \phi\left(\frac{\hat{i}(t_s, n) - \bar{t}(t_s, n-1)}{\sigma_T(t_s, n)}\right) \quad (2)$$

ここで、

$\bar{t}(t_s, n-1)$ : 実所要時間の平均値

$\phi(\cdot)$ : 標準正規確率密度関数

このとき、見積もり所要時間 $\hat{i}$ は

$$\hat{i}(t_s, n) = \bar{t}(t_s, n-1) + \sigma_T \cdot \phi^{-1}\left(\sigma_T \frac{\beta}{\gamma}\right) \quad (3)$$

となる。これは、前回までの平均時間に余裕時間を足した形式となっており、所要時間の分散 $\sigma_T$ が大きくなるほど余裕時間も大きくなる。

パラメータ推定においては、見積もり所要時間の実測値を

$$\hat{i}(t_s, n) (\text{実測値}) = t^* - t_s(n)$$

$t^*$ : 到着希望時刻

$t_s(n)$ :  $n$ 回目における出発時刻

とし、最小二乗法によって時間、遅れ時間に関するパラメータを求める。

ただし、非義務目的の移動に関してはアクティビティそのものを変更する場合もあるため、検討が必要である。

## (2) 最適化問題としての定式化

(1)では需要側の出発時刻調整モデルについて定式化を行った。ここで、共同利用のようなシステムの効率性や頑健性を評価する際には、個人の選択の結果としてのシステムの挙動を評価する必要がある。ここでは、システム全体の車両の総待ち時間を最小化する最適化問題として定式化する。

$$\text{Minimize } T = \sum_{i,t} t_i(t) \quad (4)$$

$$\text{Subject to } N_i(t) = N_i(t-1) - \sum_j f_{ij}(t) + \sum_g f_{gi}(t) \quad (5)$$

$$(i=1, \dots, n, t=1, \dots, T)$$

表-1 PP データ概要

期間	対象者	トリップ	ロケーション
2008/11/8-12/24	100名	13808件	2920484件
2009/10/29-11/27	50名	2504件	601814件
2010/07/05-08/11	40名	3617件	789074件

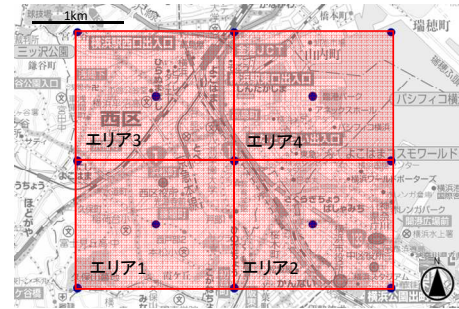


図-3 対象エリア

$$N(t-1) \geq \sum_j f_{ij}(t) - \sum_g f_{gi}(t) \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_i N_i(t) \leq N$$

$$L_n(t) < L_{nc}(t-1)$$

ただし、

$N_i$ : 地点( $i=1, \dots, n$ )の初期EV台数

$N$ : EV総台数

$N_i(t)$ : 時間帯( $t=0, \dots, T$ )終了時のポート  $i$ のEV台数

$L_n(t)$ : 車両 $n$ の時間帯 $t$ における走行距離

$L_{nc}(t)$ : 車両 $n$ の時間帯 $t$ における走行可能距離  
(充電時間を考慮)

$f_{ij}(t)$ : 時間帯 $t$ のポート $i$ からポート $j$ への移動需要

## 4. データ概要

本研究で使用するデータは2008~2010年に横浜で行われたプローブパーソン (PP) 調査のデータである。データ概要を表-1に示す。このデータを用いて、対象エリアの交通行動特性の基礎分析を行う。

### (1) フロー基礎集計

上図のエリアにODともに含まれるトリップを抽出したところ、該当トリップは全体で751トリップ存在した。また、ゾーン間移動の出発・到着確率分布をカーネル密度推定によって曜日ごとに求めたところ、図-4のような結果が得られた。これより、全体で見ると休日はどのエリアにおいても出発・到着分布がほぼ一致しているのに対し、平日は両者の分布が大きく異なることが分かった。特に、エリア1やエリア3では午前中に出発分布の尖度が高くなっているのに対し、エリア4では午前中に到着分布の尖度が高くなっており、逆の傾向を示している。これはエリア特性に大きく依存しており、エリア1や3か

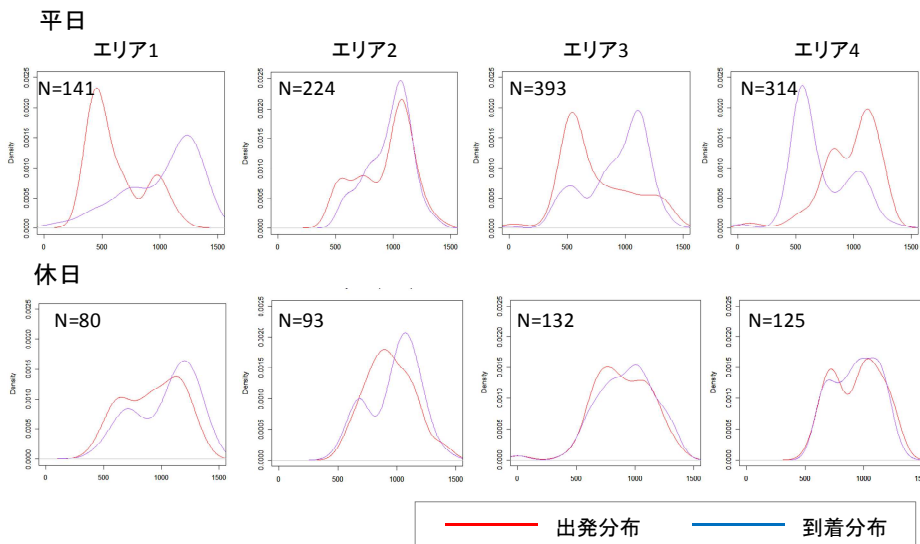


図-4 横浜中心部内々移動に関する出発・到着分布特性（フロー）

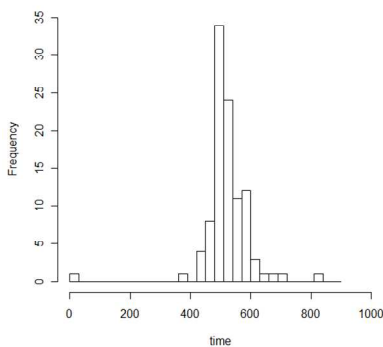


図-5 希望到着時刻分布

らエリア4に通勤したモニターが多く存在したためと考えられる。

この結果より、全てのエリアに同数の車両を配置した場合、昼間にエリア1や3では車両が不足状態になり、エリア4で車両が過剰になる可能性がある。また、エリア1や3でも短時間に需要が重なることで供給が追いつかない時間帯が存在することが考えられる。エリア2や休日はどの時間帯も出発・到着分布がほぼ一致しているため、市場が大きい場合はマッチング確率が高くなり効率性が高いと考えられるが市場が小さい場合は待ち時間が増大するなどのリスクも想定される。このように、マクロで生じる移動活動の時間的選択は、個人の選択の総和として出現しており、より効率のよいマッチングを促すためには出発・到着時刻の調整を個人がどの程度許容できるかということの評価が重要となる。以降では、実際の移動における希望出発・到着時刻の分布や実行動における変動特性についての分析を行う。

## (2) 全体分布の特性

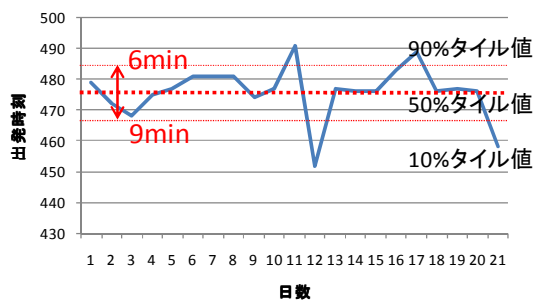


図-6 出発時刻の時系列変化（mc008）

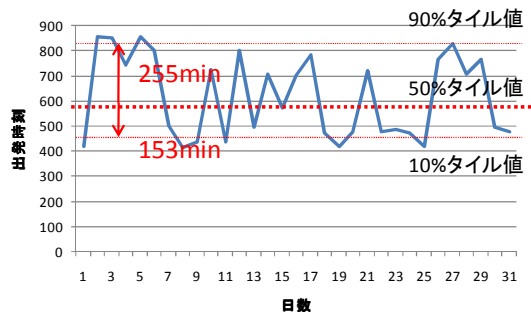


図-7 出発時刻の時系列変化（mc010）

まず、義務目的における全体の希望到着時間分布を図-5に示す。これより、希望到着時刻の平均値は8：48で、その周辺における変動は、出発時刻を遅らせる範囲（90%タイル値-50%タイル値）が37分、早める時間（50%タイル値-10%タイル値）が23分ということが分かった。義務目的の場合、出発を早めるコストの方が遅めるコストよりも若干高い。また全体を通して変動幅はおおむね30分以内に含まれており、大幅な時間変更は難しいと考えられる。一方帰宅時刻に関しては分散が大きく、150分程度のばらつきが観測された。目的によって、具体的に調整可能な時間は異なり、さらに早める場合と遅める場合でも違いが存在する。共同利用の場合全

員が少し調整を行うだけで効率性に大きく差がでることが考えられ、調整幅を詳細に分析することは重要であると考えられる。

### (3) 個人間の異質性

義務目的の場合、全体を通じて出発時刻・到着時刻の分散は小さいが、個人ごとに出発時刻・到着時刻の分散は大きく異なる。図-6, 図-7にはそれぞれ分散が小さいモニターと大きいモニターの代表的な例を示した。90%タイル値-50%タイル値, 50%タイル値-10%タイル値をそれぞれ遅らせる/早める時間の許容値とすると、mc008の場合いずれも10分以下と非常に変動が小さいのに対し、mc010の場合は150~250分の幅で変動しており変動が大きいタイプといえる。このように、義務目的であったとしてもその移動パターンや時間帯調整コストは個人間で大きく異なることが予想され、個人ごとの学習やリスク回避度を考慮することで、効率的にマッチングできる組み合わせとできない組み合わせを識別することが可能になると考えられる。

## 5. パラメータ推定

パラメータ推定及び数値計算結果については第44回土木計画学研究発表会で発表予定である。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、共同利用の評価の枠組みを出発時刻・到着時刻の調整行動とシステム最適という観点から示した。出発時刻や到着時刻の変動特性は個人間で大きく異なり、組み合わせによって生じるリスクも大きく異なることが示された。今後は最適な配分と調整のアルゴリズムの検討・評価を行うことが課題である。

## 7. 参考文献

- 1) 赤松隆, 交通シミュレーション・モデルと動的ネットワーク配分理論,
- 2) 内田敬, 飯田恭敬, 中尾光宏, リスク対応を考慮した道路網経路配分の評価, 土木計画学研究・講演集, No. 14, 1991
- 3) 飯田恭敬, 柳沢吉保, 内田敬, 通勤交通の経路選択と出発時刻の同時推定法, 土木計画学研究・論文集, No. 9, 1991