

[特集]

# 再配車を用いない複数ステーション型自動車共同利用システムの挙動に関するシミュレーション分析

山本俊行<sup>1</sup>・中山晶一朗<sup>2</sup>・北村隆一<sup>3</sup><sup>1</sup>正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町)<sup>2</sup>正会員 博(工) 金沢大学大学院助手 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

複数ステーションを持つ自動車共同利用システムにおいて再配車を行わない場合、車両の偏在により全ての需要を満たすことが出来なくなる。本研究では、共同利用システムの規模を拡大した場合のシステム挙動についてシミュレーション分析を行った。具体的には、ステーション数、車両数、駐車スペース数、予約申し込み数、片道利用率を変化させた場合の利用トリップ数、予約受付率等の変化を京都パブリックカーシステムの利用実績データを用いたシミュレーションにより分析した。分析結果より、100ステーションのシステムが1つの場合と、10ステーションのシステムが10個独立にある場合でシステム全体の挙動は変わらない事、及び、駐車スペースの総数が同じ場合、ステーション数を増加させるより1ステーション当たりの駐車スペース数を増加させた方が効率的である事等が示された。

**Key Words:** car sharing, electric vehicle, multiple station vehicle sharing system, simulation analysis

## 1. はじめに

環境問題に対する関心の高まりや情報技術 (IT) の発展、政府による新産業創造のための取り組み等の中で、近年、我が国で電気自動車の共同利用に対する期待が高まっている<sup>1)</sup>。特にここ数年は、各地で電気自動車共同利用システムの実験プロジェクトが実施されている。自動車共同利用の概念は新しいものではなく、欧州では草の根的な自動車共同利用が古くから行われている<sup>2), 3)</sup>。伝統的な自動車共同利用システムは数台の自動車を用いた会員制のレンタカーシステムに近いものであった。近年では、他の公共交通機関との連携を主眼としたステーションカーや、地理的に離れた複数の駐車場を持ち、借り出した以外の駐車場で返却する片道利用を可能とする複数ステーション (デポ) 型共同利用システム等、利便性の向上や、より大きな環境負荷削減効果を可能とする共同利用システムが誕生している<sup>4)</sup>。また、IT の発展により予約システムや車両管理の高度化が進んでいる<sup>5), 6)</sup>。

一方、自動車交通による環境負荷の削減に向けて電気自動車の開発も進んでいる。しかしながら、車両価格が未だガソリン自動車に比べて高く、航続距離も限られている等、政府による購入補助金制度にも関わらずその普及は進んでいない。自動車共同利用システムでは、車両の購入費用の負担が複数の会員によって軽減されるため、車両価格が高いという電気自動車の欠点を補うことが可能であり、電気自動車を用いることにより共同利用によ

る環境負荷削減効果も増大する。しかしながら、航続距離が短く、車両の充電状態の管理と利用距離に応じた利用受付を行う必要がある、システム運営費が高くなるという問題がある。

システム運営費を押し上げる要因としては、上記の他に複数デポ型共同利用システムに固有の問題として、車両の偏在により利用予約の受付が不可能となる、あるいは車両の回送 (再配車) が必要となるという問題がある。再配車には人件費がかかる一方、予約の受付可否を判断するためには予約受付システムを高度化する必要がある。また、予約受付が拒絶される場合もあることを会員に許容してもらえるかという問題もある。よって、複数デポ型共同利用システムでは車両の偏在を減少させるための方策をまず検討すべきである。

本研究では、複数デポ型電気自動車共同利用システムを対象として、再配車を行わない場合のシステムの挙動を把握することを目的とする。具体的には、デポ数、車両数、駐車スペース数、予約申し込み数、片道利用率が、利用トリップ数、予約受付率等に与える影響を定量的に明らかにする。このうち、デポ数は地理的に離れた箇所に設定される車両の貸し出し/返却を行う駐車場の数を指す。また、複数デポ型共同利用システムでは片道利用が可能であるため、必要駐車スペース数は必ずしも車両数と一致せず、各デポでそこに配置される車両数以上の駐車スペース数が必要となる。利用トリップ数は、システム全体での総トリップ数や車両1台あたりのトリップ

数で表す事が出来るが、収益性や環境負荷削減等のシステム運営や公共的視点からの指標である。一方で、予約受付率は申し込まれた予約のうちシステムが供給できた割合、すなわち、需要超過のために予約が拒否されなかった割合を表しており、主にシステムの利用者の視点に基づく指標である。

複数デポ型電気自動車共同利用システムの挙動に関しては、阿部ら<sup>7)</sup>、Barth and Todd<sup>8)</sup>、Blosseville et al.<sup>9)</sup>、島崎ら<sup>10), 11), 12)</sup>の研究がある。阿部ら<sup>7)</sup>、Barth and Todd<sup>8)</sup>、島崎・下原<sup>12)</sup>では、再配車を前提として、初期配車時の車両数と再配車ルールを変更することによって利用者がデポで車両を待つ必要のある確率、及び平均待ち時間がどのように変化するかを明らかにしている。一方、Blosseville et al.<sup>9)</sup>では、再配車を実施しているシステムの実利用データを用いて、再配車を行わない場合の必要車両数を算出している。また、島崎<sup>10)</sup>、下原・島崎<sup>11)</sup>では、再配車を行わないシステムを対象として、利用希望者は車両がデポになくても利用をあきらめないという仮定の下で車両数とデポ毎の初期配置台数が待ち時間、車両の稼働率に及ぼす影響を明らかにしている。

本研究では、従来の研究で検討されてきた要因に加えて、デポ数、駐車スペース数、片道利用率、利用料金賦課の有無による影響を考慮することによって、より包括的にシステム挙動を把握することを図っている。これらの要因のうち、デポ数は複数デポの地理的配置に関連した要因であり、片道利用の発生に大きな影響を及ぼす。また、駐車スペース数は当該デポに駐車できる車両数の上限となり、返却時点で車両が駐車されていないスペース数が当該デポへの片道利用予約の最大受付可能数となる。片道利用率は、本来、デポ数やデポの配置によって影響を受けるため内生的と考えられるが、本研究では外生的に値を広い範囲で設定し、その影響を網羅的に検討する。また、共同利用システムを実施する場合、当初は利用料金を徴収せず、実験が進んでから利用料金を賦課するというケースが多い。よって、本研究では、料金賦課の有無によってシステム挙動がどのように変化するかについても検討する。

既に著者ら<sup>13), 14)</sup>は、上記の要因を操作変数、予約受付率50%以上を条件とし、車両1台あたりの平均トリップ数を目的関数とした最適化問題の分析を行っている。これは、車両あたりの経費はほぼ固定であり、車両あたりの利用トリップ数によって損益分岐点が表示されることから、実際の運営主体の実験目標が車両1台あたりの平均トリップ数で設定されていたことによる。また、予約受付率50%という条件は、分析時には無料でシステムが運営されていたため、受付を拒絶されることに対する抵抗感が低いと考えられたことによるものである。分析の結果から、デポ数より駐車スペース数の方が車両1台あたりの平

表-1 シミュレーションでの車両状態の再現

スキャン時刻	車両1		車両2		...
	位置*	充電量	位置*	充電量	
7:00	1	100%	1	100%	...
7:05	0	-	1	100%	...
7:10	0	-	1	100%	...
...	...	...	...	...	...
7:55	0	-	1	100%	...
8:00	3	88%	1	100%	...
8:05	3	90%	1	100%	...
...	...	...	...	...	...
19:50	0	-	4	95%	...
19:55	0	-	4	97%	...
20:00	2	67%	4	100%	...

\*0は貸し出し中を表し、1以上は駐車デポ番号を表す。

均トリップ数に与える影響が大きい等の知見を得ている。しかしながら、これらの分析では、京都パブリックカーシステムの実際の運営状態を基本とする入力変数の設定範囲での最適化を行っており、変数の取り得る値の範囲が限られたものであった。すなわち、得られた知見は限られた解空間での計算結果に過ぎない可能性がある。本研究では、幅広い解空間を網羅的に分析することにより、より広い範囲での最適解の発見、及び、各変数がシステム挙動に及ぼす影響に関するより一般性の高い知見を得ることを目的とする。

## 2. シミュレーションモデル

### (1) 概要

本研究では、共同利用システムの挙動をシミュレーションモデルで表現することにより、各操作変数がシステム挙動に及ぼす影響を定量的に分析する。シミュレーションモデルの構造は著者らの先行研究<sup>13), 14)</sup>と同様のものであるが、今回の分析では解空間を網羅的に探索するためGAによる最適化部分は用いず、予約発生からシステムによる予約受付、実際の利用状況再現に至る部分を用いたシミュレーションを行う。

シミュレーションでは、まず、全ての予約を発生させ、発生順に予約受付可否を判断し、受け付けた予約のリストを作成する。その後、車両の返却遅れ等を含む実際のシステムの挙動を、5分毎の各車両の状態量を逐一再現するピリオディック・スキャン (periodic scan) 方式によりシミュレートする。各車両の状態量は、表-1に示すように、貸し出し中かデポで待機中かを示すダミー変数、および待機中の場合には駐車デポと充電量を示す変数を加えたものとなる。

以上のうち、利用者の挙動である予約申し込み内容および実際の利用が確率的であると見なし、乱数を用い発

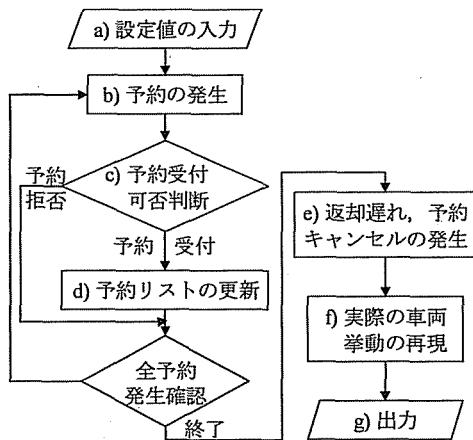


図-1 シミュレーションの手順

生ささせるため、本シミュレーションモデルはモンテカルロ・シミュレーションとなる。モンテカルロ・シミュレーションを用いる場合、出力結果は確定的でなく確率的となる。よって、本研究では、複数回のシミュレーションを行い、出力値の平均値を用いた分析を行っている。

## (2) シミュレーションの手順

シミュレーションは図-1 に示す手順で行われる。以下に各段階について示す。

### a) 設定値の入力

デポ数、駐車スペース数、車両数、予約申し込み数、片道利用率を入力する。

### b) 予約の発生

予約申し込み数、片道利用率の設定に応じ、各予約の利用開始予定時刻、返却予定時刻、出発地、返却地、予定走行距離を乱数により決定する。このうち、利用開始予定時刻、返却予定時刻、予定走行距離については、次章で述べる現実の利用データから1つのトリップを乱数を用いて復元抽出により抽出することで、各変数の分布及び変数間の相関を実際の分布及び相関に一致させている。一方、出発地と返却地については、デポ数及び片道利用率がシミュレーションの入力によって変化するため、別途、シミュレーションの入力値に従う乱数により決定している。

現実の利用データには、上記の各変数に加えて返却遅れ時間も含まれており、抽出したトリップの返却遅れ時間を以下のe)で用いる。

### c) 予約受付可否判断

予約発生順に、それまでに受け付けた予約を前提として、当該予約の受付により以下の2つの条件が満たされるかを計算し、予約受付可否を決定する。

- ・ 出発地、返却地条件のチェック：出発地に車両があるか、及び返却予定時刻において返却地に空き駐車スペースがあるか。

- ・ 充電条件のチェック：出発地の利用可能な車両が予定走行距離に対して十分充電されているか。

### d) 予約リストの更新

予約リストに受け付けられた予約を追加し、予約リストを更新する。

### e) 返却遅れ、予約キャンセルの発生

最終的な予約リストに対し、予め設定されたキャンセル率に従って乱数により予約キャンセルを発生させるとともに、キャンセルされなかった予約について、c)で乱数により決定した返却遅れを返却予定時刻に加え、実際の利用データを作成する。

### f) 実際の車両挙動の再現

実際の利用データに基づき、時間軸に沿ったシステム挙動の再現を行う。この時、実際の利用は返却遅れ等を伴うため予約時の返却予定時刻とは異なる場合がある。そのため、予約が受け付けられている他の会員の利用開始時刻に車両が利用できないケース、すなわち、車両待ちが発生する。

### g) 出力

総利用回数、予約受付率、総利用時間、車両待ち確率、総待ち時間を出力する。

## 3. 分析に用いるデータ

本研究では、シミュレーションで用いる予約の利用開始予定時刻等の属性の設定にあたり、京都パブリックカーシステムでの実際の予約申し込み、および利用実績データを用いる。

### (1) 京都パブリックカーシステム

京都パブリックカーシステムは、平成12年に京都市で運用が開始された複数デポ型電気自動車共同利用システムである。平成13年度終了時点での会員数は470人となっている。利用料金は、当初無料であったが、平成13年9月以降は20円/分(12月に15円/分に値下げ)に設定されている。システムの運用地域を図-2に示す。平成13年度は京都駅前を含む7カ所(9月以前は北大路駅西を除く6ヶ所)のデポで運営されており、営業時間は8:00~21:00、1回あたりの最大利用可能時間は4時間、予約開始日は時期によって変更されているが、最長時で7日前からであった。

車両は2人乗り小型電気自動車であるトヨタのe-comと日産のハイパーミニを合計35台用いている。両車両を単一のシステムで管理しており、性能もほぼ同一で、一回の充電で約100km走行することが可能である。充電時間は2、3時間程度である。

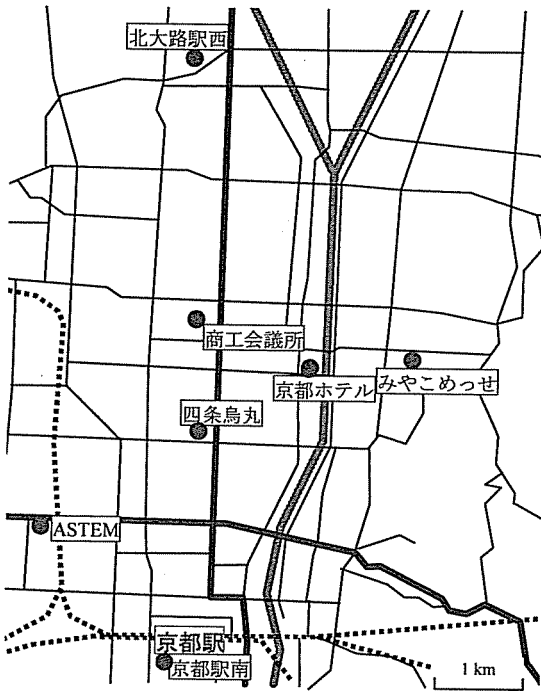


図-2 運用地域

予約申込はiモードやEZweb等を含むインターネット、もしくは各駐車場に設置された端末により行う。また、貸出・返却時はデポにある端末で各会員が持つICカードにより手続きを行う。このICカードは車両の鍵の代わりでもある。

(2) 利用属性分布

本シミュレーション分析では、平成12年度及び平成13年度の全利用データを用いる。いずれの年度も片道、往復利用ともに可能であり、平成13年度の9月以降のみ利用料金を賦課していたため、平成12年度の利用データと平成13年度の8月までの利用データを区別せず、無料実験期間のデータとして扱う。また、平成13年度の9月以降では、12月に利用料金の変更があったため、その前後で利用属性の変化が考えられるものの、シミュレーションに用いるサンプル数を確保するため料金変化の前後の利用データを統合し、有料実験期間のデータとして扱う。片道/往復利用別、無料/有料実験期間別のトリップ数を表-2に示す。片道利用率は無料実験期間では32%、有料実験期間では59%となっており、有料化によって利用パターンが大きく変化したことを示している。

無料実験期間/有料実験期間別、かつ片道利用/往復利用別に利用開始予定時刻、利用時間、返却遅れ時間を集計した結果を図-3~5に示す。図中の%は無料/有料別に片道と往復を足した総利用トリップを100%としたもの

表-2 片道/往復別無料/有料別利用トリップ数

	片道利用	往復利用	計
無料実験期間	1814	3843	5657
有料実験期間	493	341	834
計	2307	4184	6491

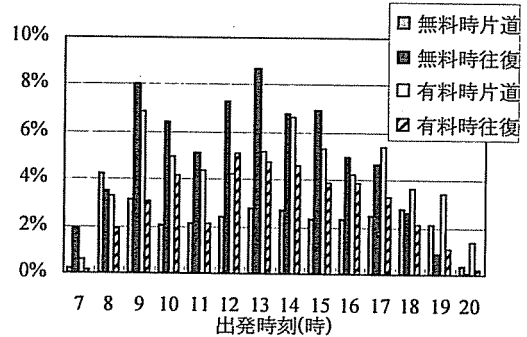


図-3 出発時刻分布

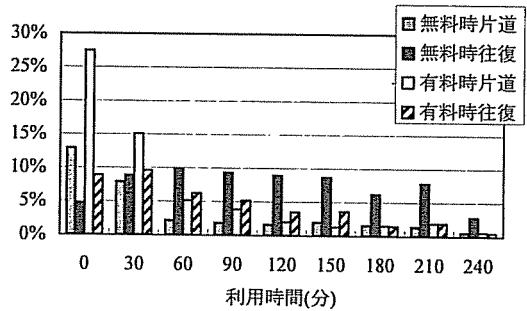


図-4 利用時間分布

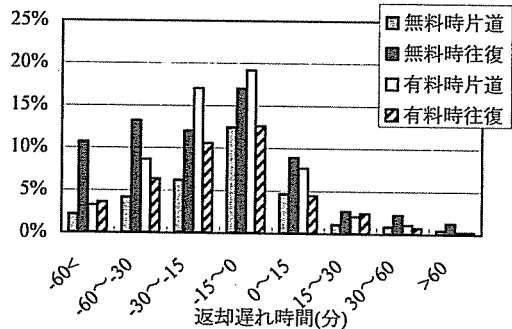


図-5 返却遅れ時間分布

である。

図-3より、無料実験期間では8時台と18時以降のみ片道利用が往復利用を上回り、これらの時間帯での通勤利用の卓越が見られるのに対して、有料実験期間では12時台のみ往復利用が片道利用を上回っており、12時台での昼食のための往復利用の卓越を伺わせる。図-4では、料金の有無に関わらず片道利用の利用時間の短さが示されている。また、往復利用に関しては、有料実験期間では利用時間が長くなるほど利用数が少ないことが明らか

表-3 無料時と有料時の分布の差の検定結果( $\chi^2$ 値)<sup>1)</sup>

	自由度	全体	片道利用	往復利用
出発時刻	14	50.5**	6.5	33.1**
利用時間	11	263.1**	28.5**	152.4**
返却遅れ時間	7	71.6**	26.6**	37.3**

\*\* : 1%で有意差あり

なのに対して、無料実験期間ではそのような傾向は見られない。このことは、有料化によって往復利用による長時間利用が抑制されたことを示している。図-5からは、料金の有無に関わらず15分以上の返却遅れはほとんどない事が分かる、また、無料実験期間の往復利用時では60分以上も早く返却するケースが多く見られ、実際の利用予定時間よりも長めに予約していたケースが多いものと考えられる。

出発時刻分布、利用時間分布、返却遅れ時間分布のそれぞれについて、無料時と有料時の差を統計的に確認するために、分布の差の検定<sup>1)</sup>を行った。検定はそれぞれ、片道利用と往復利用を区別しない場合(全体)、片道利用、往復利用の3通りについて行った。表-3に示す検定結果より、片道利用の出発時刻分布を除き全ての分布について無料時と有料時に差があることが統計的に確認された。

以上に示されるように無料実験期間と有料実験期間では利用パターンが大きく異なるため、シミュレーション分析においても両期間の相違を考慮することが必要である。シミュレーションでは、無料実験期間と有料実験期間のそれぞれの利用データを用いた分析を行い、有料化がシステム挙動に及ぼす影響についても検討する。

#### 4. 分析結果

システムの規模拡大時の挙動分析に先立ち、シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、平成12年度の運用開始時点の実際のデポ配置、駐車スペース数、車両数を入力し、運用開始後数日の実際の予約申し込み、利用データそのものを入力として用いたシミュレーションを行った。シミュレーションの出力として算出された予約受付可否結果、利用トリップ数は実際の運用結果と一致することを確認し、以下の分析を行っている。

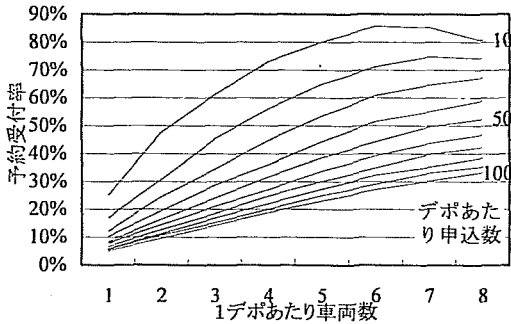
シミュレーションの操作変数として、デポ数は10, 20, 50, 100ヶ所の4通り、駐車スペース数は1デポあたり10, 20個の2通り、車両数は1デポあたり1~8台の8通り、予約申し込み数は1デポあたり10~100まで10刻みで10通り、片道利用率は30~70%まで10%刻みで5通り設定し、各組み合わせについて10日分のシミュレーションを行い、1日あたりの平均値を算出した。シミュレーションは無料期間/有料期間のそれぞれについて

行っており、各予約の利用開始予定時刻、返却予定時刻、実返却時刻、予定走行距離は、3(2)で分布を示したサンプルから無料期間/有料期間別、片道/往復利用別に乱数により発生させている。これらの利用属性は現実の共同利用システムを反映したものであるが、規模の拡大等の共同利用システムの変更後にも同一の分布を持つ保証はない。しかしながら、第3章で示したデータからシステム変更時の分布を予測することは困難であるため、本稿では同一の分布を仮定した分析を行っている。今後は、他の共同利用システムとの比較分析等を行い、システムの形態と利用属性の関係に関する一般的な知見を得る事が必要である。また、出発地、及び、片道利用の場合の目的地は等確率で発生させた。すなわち、デポ数がNの時、出発デポの選択確率は1/N、片道利用の目的デポの選択確率は、出発地のデポを除き1/(N-1)、出発地のデポは0となる。

デポが地理的に近接した場所に複数存在する場合、利用者は、希望した出発地、目的地の予約が受け付けられない時にも、近接したデポを利用することでトリップの予定をほとんど変更することなくシステムの利用が可能である。本稿で用いたデータは図-2のデポ配置に基づいており、そのような利用を可能とする近接したデポは存在しないが、デポ数を拡大した場合には、デポ同士が近接する可能性がある。本稿の分析では、出発地、目的地の変更は行わないものと仮定した分析を行っているため、算出された利用トリップ数や予約受付率は過小である可能性がある。近接したデポが存在する場合の検討については、4(5)での分析が適用可能である。4(5)では、デポ数を2倍にした場合とデポ数あたりの駐車スペース数を2倍にした場合の比較を行っているが、総駐車スペース数が同一の場合には、前者を近接したデポが存在しないケース、後者を2つのデポが直ぐ近くに存在し互いに完全に代替的なケースと捉える事が可能である。

出発地や目的地の代替的なデポ間の変更に加え、利用者は、出発時刻や利用予定時間、片道/往復利用についても、予約が受け付けられない時に最初の予定を変更して再度予約を試みる可能性がある。本稿の分析では、これらも最初の予約申し込み時から変更がないものと仮定しているが、予約が受け付けられなかった場合の利用者の対応行動に関しては別途分析を行っている<sup>15)</sup>。将来的には、予約が受け付けられなかった場合の利用者の対応行動も含めたシミュレーションモデルの構築が望まれる。

上記のような利用属性の設定はデポ毎の需要の相違やデポ間距離の相違を捨象したものであり、操作変数の設定を各デポ共通とすることが出来るため、操作変数の組み合わせ数を大幅に減少させることが可能である。一方で、現実にはデポ毎の需要の偏りにより車両の偏在が問題となる場合が多い。そのため、著者らの先行研究<sup>13), 14)</sup>



計算条件：無料期間、デポ数10ヶ所、駐車スペース数10個/デポ、片道利用率30%

図-6 予約申し込み数別予約受付率

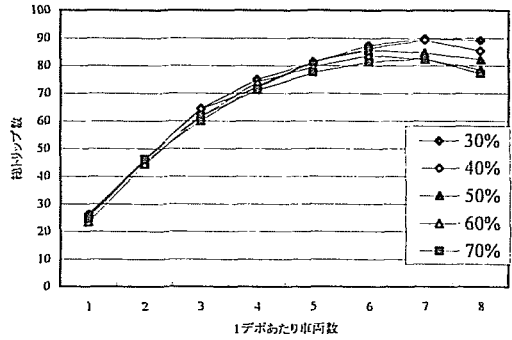
では現実に即して需要の偏りを反映した分析を行っている。その意味で、本稿は、システムの挙動に及ぼす影響を、より多くの変数について、より基本的な設定で把握することを目的とするものである。

また、本稿の分析では、予約キャンセル率は有料期間の実際のキャンセル率に従って5%に固定している。キャンセルの発生は返却遅れとともに、他のトリップが、予約が受け付けられているにも関わらず利用不可能となる可能性をもたらすものである。予約属性が均一でない場合、及び、キャンセル率や返却遅れ時間が変化した場合のシステムの挙動の分析は今後の課題である。

### (1) 予約申し込み数

無料実験期間中のデータを用い、デポ数を10ヶ所、1デポあたりの駐車スペース数を10個、片道利用率を30%とした時の予約受付率を図-6に示す。図より、1デポあたりの車両数に関わらず、予約申し込み数が増加するほど予約受付率が低下することが分かる。利用者からシステムに対する信頼を得るためには予約受付率を高い水準で維持することが必要であると考えられる。著者らの先行研究<sup>13) 14)</sup>では予約受付率50%以上を条件としてシステムの最適化を試みたが、今回の設定では、予約受付率を50%以上に維持するためには、申し込み数を1デポあたり50/日以下に制限する必要があることが示された。なお、結果の掲載は割愛するが、片道利用率及びデポ数を変更したシミュレーションでも同様の結果が得られている。

また、全体的には1デポあたりの車両数を増加させると予約受付率も向上するという妥当な結果が得られたが、申し込み数が少ない場合は1デポあたりの車両数を6台から増加させても予約受付率が向上しないという結果が得られた。特に、申し込み数が10、20の場合には1デポあたりの車両数を増加させると予約受付率は反対に減少する範囲が存在する。これらは1デポあたりの車両数を



計算条件：無料期間、デポ数10ヶ所、駐車スペース数10個/デポ、予約申し込み数100

図-7 片道利用率別総トリップ数

増加させると当該デポでの空き駐車スペース数が減少することが原因であり、当該デポを目的地とする片道利用予約を受け付けられない確率が高くなることを示している。

### (2) 片道利用率

(1)より、空き駐車スペースの減少が片道利用予約の受付率を減少させる可能性が示された。そこで、片道利用率による影響を把握するため、無料実験期間中のデータを用い、デポ数を10ヶ所、1デポあたり駐車スペース数を10個、予約申し込み数を100とした時の総トリップ数を図-7に示す。ここでは、予約申し込み数を100に固定しているため、総トリップ数は予約受付率と同義となる。図より、1デポあたりの車両数が増えるにしたがって片道利用率の増加による総トリップ数の低下が見られる。

片道利用は、目的地での滞在時間中に他の会員が車両を利用できるため、共同利用という観点からは往復利用よりも望ましい。よって、会員に対しては片道利用を推奨すべきであると考えられる。しかしながら、ここでの結果から明らかなように、片道利用率が増加すると予約受付率が減少するケースが存在するため注意が必要である。すなわち、より多くの会員の利用を可能とすることを目指して片道利用を推奨した結果、予約受付率が低下して利用トリップ数が低下してしまう可能性がある。さらに、片道利用を可能とするためには、車両数より多くの駐車スペース数を必要とするという問題もある。片道利用を推進すべきか否かについては、慎重に検討する必要があると言えよう。

車両数に関しては、シミュレーションの結果より、1デポあたりの駐車スペース数が10の場合には車両数は6台/デポ程度にするのが効率的であることが分かる。著者らの先行研究<sup>13) 14)</sup>では、いくつかの設定では最適な車両数は駐車スペース数の半分という結果となっているも

表-4 料金の有無別車両1台あたり平均トリップ数

予約数	無料期間						有料期間						
	100		200		400		100		200		400		
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
1	2.50	0.094	3.40	0.249	4.08	0.215	2.90**	0.082	3.82**	0.148	5.03**	0.116	
車	2.38	0.106	3.08	0.125	3.90	0.303	2.46	0.107	3.68**	0.268*	4.68**	0.150*	
両	2.04	0.055	3.02	0.126	3.83	0.119	2.25**	0.125*	3.31**	0.240	4.52**	0.125	
数	4	1.83	0.062	2.81	0.069	3.60	0.075	1.91*	0.087	3.04**	0.162*	4.26**	0.088
／	5	1.60	0.028	2.60	0.081	3.55	0.113	1.66**	0.026	2.80**	0.114	4.09**	0.185
デ	6	1.43	0.059	2.37	0.063	3.43	0.086	1.42	0.054	2.56**	0.067	3.77**	0.099
ポ	7	1.22	0.045	2.13	0.040	3.14	0.104	1.23	0.032	2.15	0.074	3.58**	0.150
8	1.01	0.044	1.85	0.069	2.95	0.073	1.07**	0.014**	1.86	0.060	3.13**	0.136	

計算条件：デポ数10ヶ所，駐車スペース数10個／デポ，片道利用率50%

\*無料期間との差の有意確率  $p < .05$ ，\*\*無料期間との差の有意確率  $p < .01$

の、最も理想的な設定では、総駐車スペース数が35に対して、最適な総車両数は21という結果を得ている。今回の分析で最適と算出された駐車スペース数と車両数の比率は、先行研究の理想的な設定におけるシミュレーション結果と一致するものである。さらに、米国の UCR IntelliShare プログラム<sup>5)</sup>での分析でも、車両数に対して1.5倍の駐車スペース数が最適であるとされており、本研究での分析結果はこれらの結果と整合的なものである。

### (3) 料金賦課の有無

1 デポあたりの駐車スペース数を10個、片道利用率を50%とし、無料期間/有料期間それぞれのデータを用いた場合の車両1台あたり平均トリップ数を表-4に示す。表では、無料期間と有料期間の平均トリップ数に差があるか否かを統計的に検定するため、10日分のシミュレーションによる平均値に加えて標準偏差も示している。検定にあたっては、最初に無料期間と有料期間で分散に差があるか否かについて統計的に検定した。そして、有意水準5%でF検定結果が有意な場合は非等分散の2標本を対象とするt検定、有意でない場合には等分散の2標本を対象とするt検定を行った。t検定の結果より、ほとんどの予約申し込み数とデポあたりの車両数の組み合わせで無料期間より有料期間の方が有意水準1%で1台あたりの平均トリップ数が多いことが示された。特に、予約申し込み数が400の場合には、デポあたりの車両数がいずれの場合も有意であり、予約申し込み数が多くなるほど料金賦課による影響が大きいことが示された。これは、予約申し込み数が多い場合には既に受け付けた予約によって後から申し込まれる予約が拒否される場合が多くなるが、有料期間では無料期間に比べて各トリップの利用時間が短いため、既に受け付けた予約によって予約が受け付けられなくなる時間帯が少ないことと、同じ時間帯しか受け付けられない場合でも、有料期間のトリップの方が無料期間より利用時間が短いため、残った時間帯の中で利用が可能である確率がより高く、次の予約が

受け付けられやすいという2つの影響によるものである。

### (4) 規模の拡大効果

(3)では有料化によってシステムの効率性(ここでは、1台あたりのトリップ数)が向上することが確認された。事業化を考えた場合、有料化を実施した上でシステムの規模を拡大することで、規模効果によって一層のシステムの効率化を目指すという方向が考えられる。ここでは、(3)の有料時の設定を基に、デポ数を50、100と5倍、10倍に拡大し、予約申し込み数もそれに合わせて5倍、10倍にそれぞれ増やした場合の車両1台あたり平均トリップ数を表-5に示す。デポあたりの駐車スペース数、車両数はそれぞれ10台分、1~8台/デポで(3)の有料時の設定と同一のため、総駐車スペース数、総車両数は5倍、10倍にそれぞれ増加している。

表より、デポ数が50の場合、100の場合ともに多くのケースで1台あたりの平均トリップ数の分散がデポ数10の場合より有意に小さい。これは、予約申し込み数が多くなることで大数の法則が成り立ち、システム効率性のばらつきが小さくなることを示しているものと考えられる。しかしながら、10日分の平均値を見るとデポ数が50の場合、100の場合ともに、ほとんどのケースでデポ数が10の場合と有意な差が見られないという結果となっている。また、有意な差がある場合でも、デポ数が10の場合に比べて1台あたりのトリップ数は少ないという結果となっている。これらの結果より、単純にシステムの規模を拡大しても規模効果によるシステム効率の向上は見込めないことが示された。

ただし、分散が小さくなるという結果より、システム全体の挙動の安定性という観点からは規模を拡大するある程度の効果はあると言えよう。さらに、システム管理センターが管理可能な範囲内であればシステム規模を拡大しても管理費はそれほど増加しないため、システム規模を拡大した方が1トリップあたりの管理費を削減させることが可能である。

表-5 規模拡大時の車両1台あたり平均トリップ数

予約数	デポ数 50						デポ数 100					
	500		1000		2000		1000		2000		4000	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	2.81*	0.062	3.84	0.081	4.97	0.117	2.76**	0.064	3.76	0.076*	4.93*	0.073
2	2.45	0.044*	3.52	0.070**	4.66	0.115	2.45	0.041**	3.52	0.062**	4.65	0.055**
3	2.18	0.035**	3.28	0.051**	4.39**	0.024**	2.13*	0.024**	3.23	0.030**	4.40*	0.049**
4	1.88	0.020**	3.00	0.061**	4.25	0.068	1.86	0.026**	2.99	0.039**	4.19*	0.039*
5	1.64	0.028	2.74	0.022**	4.03	0.050**	1.66	0.022	2.75	0.035**	4.02	0.044**
6	1.45	0.026	2.49*	0.039	3.75	0.039*	1.45	0.014**	2.49*	0.033	3.75	0.036**
7	1.23	0.010*	2.21*	0.033*	3.50	0.052**	1.24	0.010**	2.19	0.017**	3.48	0.028**
8	1.04**	0.014	1.88	0.024*	3.15	0.033**	1.03**	0.010	1.87	0.024*	3.09	0.028**

計算条件：有料期間，駐車スペース数10個/デポ，片道利用率50%

\*デポ数10（表-4右側）との差の有意確率  $p < .05$ ，\*\*デポ数10（表-4右側）との差の有意確率  $p < .01$

表-6 デポ数とデポあたりの駐車スペース数の組み合わせ別車両1台あたり平均トリップ数

予約数	デポ数 20，駐車スペース 10 台/デポ						デポ数 10，駐車スペース 20 台/デポ					
	200		400		800		200		400		800	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
20	2.79	0.201	3.88	0.235	5.03	0.309	3.62**	0.200	4.74**	0.231	6.02**	0.279**
40	2.55	0.209	3.54	0.162	4.78	0.240	2.99**	0.058	4.34**	0.155	5.52**	0.225
60	2.23	0.137	3.28	0.156	4.55	0.194	2.64**	0.049	3.85**	0.103	5.24**	0.167
80	1.89	0.077	3.03	0.125	4.28	0.135	2.20**	0.052	3.49**	0.086	4.93**	0.122
100	1.65	0.062	2.78	0.118	4.10	0.151	1.87**	0.039	3.24**	0.081	4.57**	0.079
120	1.45	0.045	2.51	0.103	3.78	0.105	1.58**	0.037	2.85**	0.051	4.39**	0.075
140	1.23	0.037	2.26	0.098	3.61	0.126	1.36**	0.010	2.53**	0.048	4.13**	0.075
160	1.04	0.046	1.90	0.066	3.14	0.098	1.11**	0.020	2.15**	0.052	3.71**	0.062

計算条件：有料期間，片道利用率50%

\*\*デポ数20，駐車スペース10台/デポとの差の有意確率  $p < .01$

### (5) デポ数とデポあたりの駐車スペース数

(4) では，デポ数を増加させることで単純に規模を拡大してもシステム効率の向上は見込めないことが示された。また，著者らの先行研究<sup>13),14)</sup>でも，限られた解空間での探索ながら，デポ数の増加よりデポあたりの駐車スペースの増加の方が1台あたりの平均トリップ数の向上に及ぼす影響が大きいとの知見が得られている。ここでは，改めて(3)の有料時の設定を基に，デポ数とデポあたりの駐車スペースの組み合わせを20×10とした場合と，10×20とした場合の1台あたり平均トリップ数を表-6に示す。いずれの組み合わせも総駐車スペース数は200で同一であり，デポあたりの駐車スペース数が10台分の場合にデポあたりの車両数が1の場合には，デポあたりの駐車スペース数が20台分の場合には車両数を2とすることで，両ケースで総車両数を同一としている。

表より，1台あたり平均トリップ数の分散には1ケースを除き有意な差は見られない。一方，平均値については，予約申し込み数と総車両数の全ての組み合わせについて有意確率1%でデポ数10でデポあたりの駐車スペース数が20台分の場合の方がデポ数20でデポあたりの駐車スペース数が10台分の場合より1台あたり平均トリップ数が多いという結果が得られた。この結果は，先行研

究<sup>13),14)</sup>とも整合的である。本研究での結果は，一定の総駐車スペース数を用いる場合，デポ数を増加させるより1デポあたりの駐車スペース数を増加させた方が10%から20%も効率的であることを示している。

残念ながら，ここでの結果は直ぐに実際のシステム運営に適用することが出来ない。それは，1つのデポ（駐車場）で10台を超える車両を駐車する場合には，管理者を駐車場に配置しなければならないという法律による障害である。本研究で対象とするような自動車共同利用はわが国では新たな自動車保有・利用形態であるため法律がそれに追いつかないというのはある意味で避けられない側面もある。しかしながら，個別の自動車保有より公共の利益が高いと考えられる自動車共同利用を推進するためには，行政の柔軟で迅速な対応が不可欠であると考えられる<sup>12)</sup>。

一方で，現状の法制度の範囲内での対応としては，駐車スペース数が10台分以下の小規模な複数のデポを徒歩で行き来が可能な一定の範囲内に配置させるという方法がある。特に，鉄道駅にデポを配置しようとする場合には，駅の直近に大規模のデポ用地を確保することは困難である。駅の周辺に距離や立地条件の異なる小規模のデポを複数立地し，情報提供によって空きのあるデポに



誘導することで小規模の複数のデポを大規模な一つのデポのように利用することが可能である。この場合、空きのあるデポにうまく誘導することが重要であり、予約システムを通して予約申し込みがあった場合にシステム側から代替のデポを提案する仕組みが有効である<sup>10)</sup>。

## 5. おわりに

複数デポを持ち、片道利用を認める自動車共同利用システムにおいて、人件費の削減を考慮して再配車を行わない場合、車両の偏在により全ての需要を満たすことが出来なくなる。本研究では、共同利用システムの規模を拡大した場合にシステムがどのような挙動を示すかについてシミュレーション分析を行った。具体的には、デポ数、共同利用車両数、駐車スペース数、予約申し込み数、片道利用率を変化させた場合の予約受付率、利用トリップ数の変化を京都パブリックカーシステムの利用実績データを用いたシミュレーションにより分析した。

分析結果より、デポあたりの駐車スペース数が10の場合には、車両数は6台/デポ程度にするのが効率的であり、100デポのシステムが1つの場合と、10デポのシステムが10個独立にある場合とでシステム全体の挙動は変わらないこと、及び、同じ総駐車スペース数を用いる場合、デポ数を増加させるより1デポあたりの駐車スペース数を増加させた方が10%から20%も効率的であることが示された。

規模の拡大によるシステム効率性の向上に関しては、1台あたりの平均トリップ数といったシステムの利用側面の効率性に加えて、管理センターの管理費等の管理側面からの効率性についても考慮する必要がある。今後は、センターの管理費や会員募集活動費用、デポ用地費等、様々な要因をも考慮することでより現実的な自動車共同利用システムの採算性に関して分析を進展させることが考えられる。

謝辞：本稿は文部省科学研究費基盤研究（一般研究）の助成を受けた研究成果の一部である。また、京都パブリックカーシステム実行委員会の委員の皆様には有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 注

[1] 分布の差の検定は、クロス集計表の形式でまとめられた標本度数の集計結果に基づき無料時と有料時の分布に差があるかどうかを検定するものであり、実質的には独立性の検

定と同じものである。検定量は $\chi^2$ 分布に従う。出発時刻は6時台から20時台まで1時間毎の15時間帯、利用時間は30以内から360分以内まで30分刻みの12時間帯、返却遅れは-60分以下、-60分~-30分、-30分~-15分、-15分~0分、0分~15分、15分~30分、30分~60分、60分以上の8区分を用いてクロス集計表を作成し、検定に用いた。

[2] 法律上の障害に関しては、2004年5月に構造改革特別区域法に基づき特区を申請すれば無人での運用が可能となっている。ただし、本稿で対象とした京都パブリックカーシステムの場合は、充電式の電気自動車を用いており、デポに充電設備が必要となっている。デポでの充電設備を10台以上可能とするには高圧用受電設備が必要で、設置コストが高み、電力料金が割高になるという問題点も存在した。

## 参考文献

- 1) 太田勝敏：マイカーに代わる新しい交通手段—カーシェアリングの意義—, 交通工学, Vol. 36, No. 2, pp. 1-4, 2001.
- 2) 青木英明：カーシェアリング, 世界の動き—初期の試行錯誤から多様な事業の展開まで—, 交通工学, Vol. 36, No. 2, pp. 26-34, 2001.
- 3) Shaheen, S., Sperling, D. and Wagner, C.: Carsharing in Europe and North America: past, present, and future, *Transportation Quarterly*, Vol. 52, No. 3, pp. 35-52, 1998.
- 4) Barth, M. and Shaheen, S.: Shared-use vehicle systems: a framework for classifying carsharing, station cars, and combined approaches, *Transportation Research Record*, No. 1791, pp. 105-112, 2002.
- 5) Barth, M., Todd, M. and Murakami, H.: Intelligent Transportation System Technology in a Shared Electric Vehicle Program, *Transportation Research Record*, No. 1731, pp. 88-95, 2000.
- 6) Barth, M., Todd, M. and Shaheen, S.: Intelligent transportation technology elements and operational methodologies for shared-use vehicle systems, *Transportation Research Record*, No. 1841, pp. 99-108, 2003.
- 7) 阿部直樹, 谷下雅義, 鹿島茂：屋久島における共同利用レンタカーシステムの提案 (屋久島カーフリーアイランド構想 Vol. 4), 土木計画学研究・講演集, No. 20(2), pp. 61-64, 1997.
- 8) Barth, M. and Todd, M.: Simulation model performance analysis of multiple station shared vehicle system, *Transportation Research Part C*, Vol. 7C, pp. 237-259, 1999.
- 9) Blosseville, J.M., Massot, M.H. and Mangeas, M.: Technical and economical appraisal of Praxitèle trial, Presented at the 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 2000.
- 10) 島崎敏一：車輻共同利用システムの車輻配備台数の最適化, 土木計画学研究・講演集, No. 24(2), pp. 309-312, 2001.
- 11) 下原祥平, 島崎敏一：車両共同利用システムにおける車両の最適配車, 土木計画学研究・講演集, No. 24(2), pp. 317-320, 2001.
- 12) 島崎敏一, 下原祥平：車両共同利用の配車のシミュレーションモデル, 土木計画学研究・講演集, No. 25, CD-ROM, 2002.
- 13) Nakayama, S., Yamamoto, T. and Kitamura, R.: A simulation analysis for the management of an electric-vehicle sharing system: The case of the Kyoto Public-Car System, *Transportation Research Record*, No. 1791, pp. 99-104, 2002.
- 14) 中山晶一郎, 山本俊行, 北村隆一：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, pp. 481-487, 2002.
- 15) 山本俊行, 山本直輝, 森川高行, 北村隆一：ITSによるデータ収集技術を活用した自動車共同利用システムの利用者行動分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 571-579, 2004.

## SIMULATION ANALYSIS OF A MULTIPLE-STATION SHARED VEHICLE SYSTEM WITHOUT VEHICLE REDISTRIBUTION

Toshiyuki YAMAMOTO, Shoichiro NAKAYAMA and Ryuichi KITAMURA

Without redistribution of vehicles by operator, a multiple-station shared vehicle system may not meet all the demand, because the vehicles in the fleet may be distributed unevenly across the stations due to the directionality in demand, making it impossible to accommodate demands with certain combinations of origin and destination stations. A simulation model is developed to investigate the effects on system performance of many factors including the number of stations, the number of vehicles, the parking capacity, the size of the demand, and the one way trip rate. System performance is represented by a set of measures including the number of trip served by the system and the total time the vehicle is in use. The results suggest that the performance of a system with 100 stations and that of 10 systems with 10 stations each are the same if the other conditions are the same, and that increasing the number of the parking stalls is more effective than increasing the number of stations.