

ワンウェイ型シェアリングシステムの最適デポ配置とフリーフロート型システムの有効性

中村 謙太¹・溝上 章志²・橋本 淳也³

¹学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: 143d8823@st.kumamoto-u.ac.jp

²正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp

³正会員 熊本高等専門学校准教授 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

E-mail: j-hashii@as.yatsushiro-nct.ac.jp

近年、都市における新たな交通手段としてカーシェアリングが注目を集めている。乗り捨てが可能なワンウェイシェアリングサービスでは、利便性が高い反面、需要の偏りによる車両の偏在が問題となっている。ワンウェイ型シェアリング (OWS) システムのフィージビリティを検討するために開発した既存研究では、OWS置換えモデルを組み込んだシミュレーションモデルを用いて、ステーションベース型に加えてフリーフロート型のシステムの導入可能性の検討を行う。さらに、ステーションベース型についてデポ配置の最適化を行い、効率性を高めた運用方法を検討する。

Key Words : micro electric vehicle, "one-way type" car-sharing system, simulation analysis, genetic algorithm

1. はじめに

都市における新たな交通手段としてカーシェアリングが注目を集めている。ドイツのcar2goなど、欧米を中心にカーシェアリングシステムが定着してきた。図-1¹⁾に示すように我が国でもシェアリングサービスの会員数と車両台数は年々増加傾向にある。さらに、近年MEV(Micro Electric Vehicle)を利用したシェアリングシステムへの注目が集まっている。MEVは、国土交通省^{2) 3)}が平成25年から新たに認定した超小型電気自動車であり、少子高齢化時代の「新たなカテゴリー」の乗り物として位置づけられている。初期費用が高額なMEVとシェアリングは相性が良いと考えられている。

シェアリングサービスは、貸出し場所と返却場所が同一であるラウンドトリップ型と貸出し場所と返却場所が異なるワンウェイトリップ型に大別されるが、後者は利便性が高い反面、需要の偏りにより車両が偏在するといった問題が生じる。この場合、再配車を行っているが、それには経費がかかるため採算面で大きな問題となっている。また、ワンウェイ型シェアリングサービス (以後、



図-1 カーシェアリング車両台数と会員数の推移

OWSシステム:One-Way type Sharingと記す) にはステーションベース型とフリーフロート型の2つのサービスがある。ステーションベース型では専用のステーションが存在する。一方、フリーフロート型は専用ステーションが存在せず、対象地域内であれば道路の路側帯や公共駐車場に返却できるサービスであり、ステーションベース型よりも自由度の高いサービスであり、一般道路に路上駐

車が基本的に認められている欧米を中心に近年展開されているシステムである。著者らの既存研究⁴⁾では、車両の偏在により予約が受けられないリスクを考慮したモデルを構築し、そのモデルを組み込んだシミュレーションプログラムを開発してステーションベース型OWSシステムの挙動を表現している。本研究では、①再配車を行わないステーションベース型とフリーフロート型OWSシステムの運用シミュレーション分析、②一般道路に路上駐車認められていない日本の道路環境で提供されるサービスであるステーションベース型についてデポ配置の最適化を行い効率性を高めた運用を検討することを目的とする。

2. ワンウェイ型共同利用交通の現況と研究詳細

カーシェアリングに関する既存研究は、ワンウェイのカーシェアリングシステムが抱える主問題である車両不均衡の問題に関連してなされている。Kekら⁵⁾は車両の再配置マネジメントシステムに焦点を当て、3段階から成る最適化シミュレーション (OTS) 意思決定支援システムを設計した。その結果、シンガポールのカーシェアリング会社において、スタッフの経費を最大50%減らすことができること、駐車場で車両不足の期間を最大13%減らすことができると結論付けている。Nourinejadら⁶⁾は車両の不均衡を低減するために、動的最適シミュレーションモデルを構築している。そこでは離散的なシミュレーションの中で逐次再配置の最適化モデルを解いている。その結果、事前予約時間が0分から30分に増加した場合、総車両数の86%が削減できることを示している。Correiaら⁷⁾は車両の再配置数、デポサイズ、および潜在的なデポ配置に焦点を当て、カーシェアリング事業の収益を最大化する混合整数最適化MIPアプローチを提案し、車両のメンテナンス、駐車場提供費用、車両減価償却、および車両の再配置などのコストを最小限に抑えることで事業収益の最大化を目指している。この結果、100トリップあたり22.7台の車両が最適であると結論づけている。Costainら⁸⁾は環境、安全に対するカーシェアリング利用者の選好意識を包括的に扱った。カーシェアリング挙動の分析モデルを用いてカーボン・オフセットがカーシェアリングにリンクしていることや、環境意識の高い方に選択肢を与えた場合、カーボン・オフセットを好んで選択することなどを明らかにした。また、公共交通サービスが悪く交通渋滞がない場合には、オフピーク期間や週末に最もよく使われることも明らかにした。Habibら⁹⁾はカーシェアリングの顧客と業務データを用いてカーシェアリング利用者の行動モデルを構築した。会員継続期間、活発に利用される特定の期間と意欲的な会員の月当たり

の利用頻度を予測し、カーシェアリング利用者の行動の詳細を示している。一方我が国では、原ら¹⁰⁾はサービスの最適な割当のためワンウェイ型カーシェアの利用権取引制度を提案している。オークション理論を用いて利用者の評価値を表明させ最も評価値の高い利用者から割当を行い、システムに対する利用権オークションのVCGメカニズムを設計している。その他の我が国での研究のレビューは文献4)に譲る。

これらの既存研究では、主として①カーシェアリングの利用意向に関する分析、②実証実験データをもとにしたシステムの運用シミュレーション分析、③共同利用による車両台数削減や最適割当などの最適化分析をテーマとしている。しかし、現在行っているトリップチェーンのうちのどの部分のトリップをOWSシステムに置き換えるかといった分析や、OWSシステムの弱点である乗り捨てによる車両の偏在により予約が受けられないというリスクを考慮した意思決定行動のモデル化を行ったような研究はない。本研究では、(1)発デポでの利用可能な車両の有無や着デポでの返却可能なデポの有無といった、他者の行動に依存する利用者間相互作用を記述し、(2)予約が受け付けられなかったことによる経験 (リスク) の逐次更新プロセスを導入したOWSシステムの運用シミュレーションモデルを構築する。(3)デポの位置と数の最適化、およびステーションベース型に加えてフリーフロート型のシミュレーション分析、また、(4)熊本都市圏パーソントリップ調査のデータを用いて実際のトリップの挙動をシミュレートし、OWSシステムの導入に必要な要件を検討している点も特徴である。

3. OWSシステムの運用シミュレータの構築によるOWSシステム選択モデルの推定

(1) SP調査データ

本研究では、熊本市におけるMEVによるOWSシステムに対する利用意向を把握すること、OWSシステムへのトリップの置き換えモデルを推定することを目的として、SPによる選好意識調査を行った。本調査は、熊本市中心部から半径10km圏内の校区からランダムに13校区を選び、校区ごとに任意抽出した約30世帯への訪問留置法によって実施した。調査の概要とサービスプロファイルの作成方法、選好意識に関する単純集計結果は文献4)にあるため、ここでは省略する。

OWSシステム選択モデルは、個人ごとにOWSシステムに置き換えをするか否かを予測する2項ロジットモデルである。モデルの推定には、「置き換える」、または「条件によっては置き換えても良い」とした現在のトリップごとに設定したOWSシステムのサービスプロファ

イルに対して「利用する」か「利用しない」を回答した SP データを用いた。モデルの推定結果を表-1に示す。尤度比、的中率ともに大きく、モデルの適合度は高い。また、各変数のパラメータの符号条件も論理的であり、 t 値も高く統計的に有意である。詳細な検討については文献4)に譲る。

(2) OWSシステムの運用シミュレータの概要

本シミュレータでは、トリップ開始時刻の早いトリップから順にOWSシステムへ転換するか否かの判定を行い、1分ごとにすべてのMEV車両の挙動を追跡していく。図-2に手順を示す。以下に各段階について説明する。

Step-1 初期条件の設定：デポ数、デポ配置、1デポ当たりの駐車台数、総MEV数、MEV初期配置台数、料金、予約条件などのデフォルト値を設定する。

Step-2 利用可否判断：トリップごとの OWS システムへの置き換え確率 pr を算出し、その確率が発生させた一様乱数 p よりも大きいとき、OWSシステムを利用すると判定する。

Step-3 発デポの選択肢集合の決定：ここでは発ノードから 300m 以内の距離にデポがあるかを探索し、さらにその中で利用可能な MEV が 1 台以上あるデポを探索し、発デポの選択肢集合 S を決定する。

Step-4 着デポの選択肢集合の決定：着ノードから 300m 以内の距離にデポがあるかを探索し、さらにその中で駐車台数に空きがあるデポを探索し、着デポの選択肢集合 S' を決定する。

Step-5 発着デポの決定：発デポの選択肢集合 S 、着デポの選択肢集合 S' の中で最短距離のデポを決定し、当該トリップに用いる発着デポを決定する。

Step-6 充電残量チェック：利用する車両の充電残量をチェックする。

Step-7 デポ状況の更新：発着デポでの MEV 台数情報の更新、および個人ごとに予約が受け付けられたか否かの経験を蓄積する。

Step-8 出力：すべての OWS システムの潜在利用者に対して発生時刻頃にこれらの操作を実行し、終了するまで Step-2 以降を繰り返す。最終的に総利用回数、予約受付率、MEV稼働率などの OWS システム導入可能性の評価指標を出力する。

このシミュレーションでは、個人が独立に仮のトリップをOWSシステムへ置き換えるのではなく、多数のOWSシステム利用者間での相互作用、例えば、発デポでの利用可能なMEVの有無や着デポでの返却可能性は、それ以前の他の利用者の選択結果に依存するなどを考慮してOWSシステムへの置き換え選択行動がなされる点新しい。このようなインタラクションの連鎖を毎回処理しており、特徴の異なる利用者間での相互作用を考慮

表-1 OWS 選択モデルの推定結果

	説明変数	推定値	t 値
置き換える	時間料金(円/min)	-0.188	-10.33
	事前予約時間(分)	-0.0046	-1.83
	デポにMEVがない確率	0.047	1.96
置き換えない	トリップ所要時間(分)	-0.016	-3.26
	私用・業務目的ダミー	-0.415	-2.20
	性別(男性=1)	-0.318	-1.68
	年齢	-0.011	-2.07
サンプル数		784	
尤度比		0.31	
的中率		0.74	

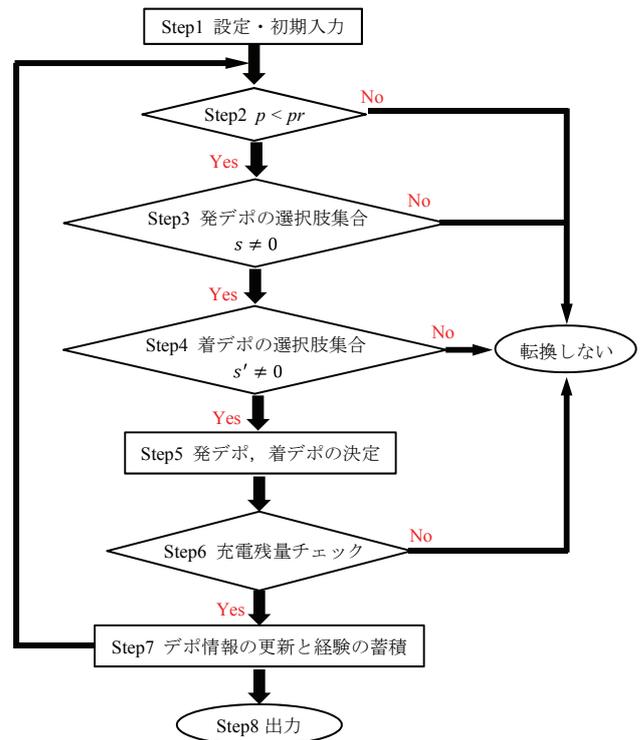


図-2 シミュレーションフロー

したマルチエージェントシミュレーションになっている。

また、一日ごとに更新されるOWSシステムへの置き換え確率は、OWSシステム選択モデルに車両の偏在のために借りたいデポのMEVが予約できないというリスクを表す「デポにMEVがない確率」という変数が導入されているため、日を更新する毎に、予約が受けられなかった経験が更新され、デポにMEVがない確率の値が変化する置き換え確率が算出される。したがって、利用可能なMEVが不在であったり、着デポへの駐車ができないなど、予約が受けられないことが続くと、トリップの置き換え確率は小さくなっていくという構造になっている。

4. OWSシステムの運用に関するシミュレーション分析

(1) 導入地域と検討するOWSシステムの種類

本研究では、図-3に示すように、熊本市中心部から東は熊本県庁、北はJR上熊本、南はJR平成駅、西はJR熊本駅までの約半径5km圏内の29の熊本都市圏PT調査CゾーンをOWSシステムの導入地域とし、シミュレーション分析によるOWSシステムの導入可能性の検討を行う。まず、PT調査のマスターデータから導入対象地域内に発着の両方を持つトリップを抽出し、OWSシステム選択モデルを適用する潜在需要とする。これにより151,040のトリップが抽出された。シミュレーションには熊本市のネットワークデータを用いる。対象地域内でのノード数は262あり、PT調査データには発着ゾーンに1つのセントロイドしかないため、発着ゾーン内にあるすべてのノードをトリップの発着ノードとしてランダムに割りあてることとした。

ワンウェイ型のシェアリングシステムは、車両を借受・返却する専用ステーション（デポ）が固定化されているステーションベース型と対象地域内であれば道路の路側帯や公共駐車場に返却できるフリーフロート型に大別される。従来からあるステーションベース型とは異なり、フリーフロート型のカーシェアは車両を借受・返却できる場所が多く、自由度の高いサービスを提供できる。アメリカ、ドイツ、カナダなどで展開されているCar2goやドイツのDriveNowなど、基本的に一般道路に路上駐車が認められている欧米を中心に、近年展開されているシステムである。以下では、ステーションベース型とフリーフロート型の2つのOWSシステムについてシミュレーション分析を行い、2つのシステムを比較して導入可能性の検討を行う。

(2) ステーション型OWSシステム

a) 基本設定

デポ、駐車台数、配車数、料金、予約条件の初期条件の設定値を表-2に示す。1デポ当たりの駐車台数、配車数、料金、予約条件は、現在運用されているカーシェアリングのサービス水準を参考にして設定した。シミュレーションを実施する分析対象エリアのトリップの発着ゾーンを図-3に、デポの配置位置を”●”で示す。デポは29のゾーン内の駅や電停付近に1箇所ずつ配置し、中心市街地には町丁目ごとに1箇所、配置した。

基本条件のもとでシミュレーションを90日間実行したときの平均利用トリップ数や予約受付率などの結果を表-3に示す。予約受付率とは置き換え意向のあるトリップから実際にOWSシステムに置き換えたトリップの比率である。置き換え意向のあるトリップは、シミュレーション

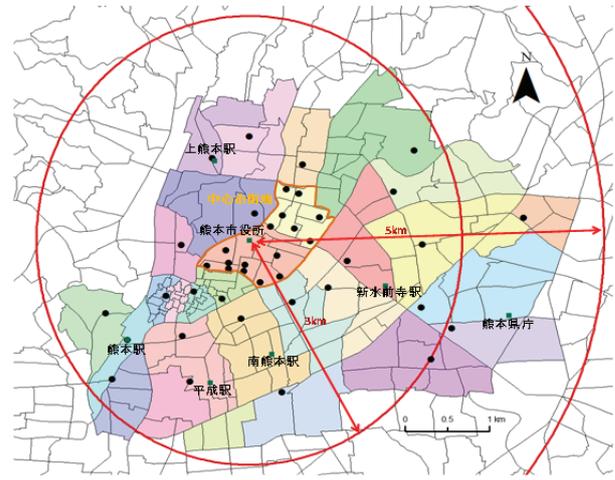


図-3 対象地域とデポの配置

表-2 基本設定

デポ	駐車スペース	配車数	料金 (円/分)	予約条件
42箇所	5/デポ	3/デポ	20	30分前

表-3 基本設定での出力結果（ステーションベース型）

	平均	標準偏差	変動係数
予約受付トリップ数	1842.01	70.40	0.04
予約受付率	0.56	0.02	0.03
車両不在による予約不可トリップ数	952.42	92.12	0.10
駐車不可による予約不可トリップ数	473.58	56.19	0.12
車からの転換数	442.46	26.24	0.06
徒歩からの転換数	943.84	40.07	0.04
バスからの転換数	95.33	10.34	0.11
使用台数	124.43	1.39	0.01
稼働率	0.99	0.01	0.01
実車率	0.16	0.01	0.04
利用時間(分)	28568.67	1148.86	0.04

ョンフローのStep-2の条件を満たし、かつ出発地・目的地の300m以内にデポが存在するトリップであると仮定した。OWSシステム選択モデルでは出発地からデポまで、目的地からデポまでの距離を効用関数の変数に導入していないため、ここでは上記の条件を満たすトリップを置き換え意向のトリップとすることにした。ここで予約不可トリップとは予約時に発デポに利用可能なMEVがないために予約が受け付けられなかったトリップと、予約時に着デポに駐車スペースの空がないために予約を受け付けられなかったトリップの両方がある。使用台数は総MEV台数126のうちで利用された台数である。利用時間はOWSシステムに転換した全てのトリップのトリップ時間の合計である。稼働率は総MEV台数のうち使用された車両台数の比率であり、全ての車両が1日に1回でも使用されれば100%となる。実車率は車両1台当たりサービスの提供時間に対する実稼働時間の比率である。稼働率、実車率ともに値が高いほど効率的な運用となつ

ていることを示す。

潜在需要のうち1,841トリップ（約12%）がOWSシステムを利用するという結果が得られた。OWSシステム利用者の属性、特徴的な利用形態、OWSシステム導入による環境負荷削減効果、利用料金やデポでの駐車可能台数によるOWSシステムの運用の感度については、文献4)を参照されたい。料金設定については、基本設定20（円/分）時から10（円/分）と安値に設定した場合の予約受付トリップ数は20（円/分）時の約2倍に増大し、料金設定が利用数に与える影響は非常に大きいことがわかった。事前予約での感度分析では、料金ほどには利用トリップ数や予約受付率に与える影響は大きくないが、予約条件が緩い0分前ではOWSシステムの需要は増加する。デポ当たりの駐車スペースと配車数についての感度分析では、駐車スペースに対し0.4~0.6倍の配車数にすることが最も効率的であることを明らかにした。

(3) フリーフロート型OWSシステム

a) 基本設定

フリーフロート型OWSシステムのデポ、駐車台数、配車数、料金、予約条件の初期条件の設定値を表-4に示す。フリーフロート型OWSシステムは対象地域内であれば道路の路側帯や公共駐車場に返却できることから、対象地域内にあるすべてのノードがデポになる。そのためデポ数は262箇所となり、駐車スペースは各ノードに1スペースとした。車両の初期配置は126台をランダムにノードに割り当てて配置している。料金、予約条件はステーションベース型OWSシステムと同様のサービス水準を設定した。

90日間シミュレーションを行った結果を表-5に示す。潜在需要のうち3,308トリップ（約2.2%）がOWSシステムを利用するという結果が得られた。ステーションベース型と比較すると、予約受付トリップ数は増加している反面、予約受付率は低下している。フリーフロート型では、300m以内に必ずデポが存在することになるため、置き換え意向のトリップが増加するが、配車数による制約のため車両不在・駐車不可による予約不可トリップ数が増加したためである。フリーフロート型は利便性が高い反面、それによる利用者の増大によりシステムはステーションベース型と比較して予約受付率の点では効率的ではないことがわかる。しかし、毎日すべての車が一度は利用されているため稼働率は100%になっており、実車率はステーションベース型よりも増加している。

図-4にゾーン別に集計した平均発着回数を示す。図中の”●”はデポ配置を示している。ステーションベース型では中心市街地のデポでの利用頻度が高かったが、フリーフロート型では郊外部での発着回数も多い。デポの数が増えたことで郊外部でも利用が高まった。

表-4 基本設定（フリーフロート型）

デポ	駐車スペース	車両台数	料金(円/分)	予約条件
262箇所	1/デポ	126	20	30分前

表-5 基本設定での出力結果（フリーフロート型）

	平均	標準偏差	変動係数
予約受付トリップ数	3308.74	142.87	0.04
予約受付率	0.32	0.01	0.05
車両不在による予約不可トリップ数	5690.32	692.21	0.12
駐車不可による予約不可トリップ数	1343.42	109.06	0.08
車からの転換数	1239.56	62.10	0.05
徒歩からの転換数	1012.44	50.71	0.05
バスからの転換数	188.97	15.30	0.08
使用台数	126.00	0.00	0.00
稼働率	1.00	0.00	0.00
実車率	0.30	0.01	0.04
利用時間(分)	54224.23	2118.95	0.04

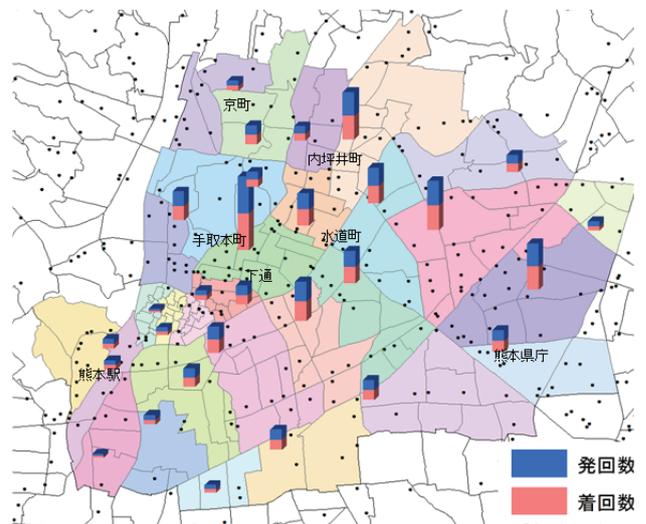


図-4 ゾーン別平均発着回数

表-6 導入前後のCO₂排出量と削減効果

	CO ₂ 排出量(tCO ₂)	
	ステーションベース型	フリーフロート型
OWS導入前	1577.51	
OWS導入後	1571.97	1552.15
削減効果	5.53	25.35

b) OWSシステム導入による環境負荷削減効果

基本設定のもとでのフリーフロート型OWS導入によるCO₂排出量を算出した結果をステーションベース型と併せて表-6に示す。フリーフロート型がステーションベース型に比べ予約受付トリップが多いこと、利用される範囲も広域になるなどのため、CO₂削減量も大きくなっており、環境負荷削減効果は大きい。

c) 各要素に関する感度分析

ステーションベース型OWSシステムと同様、料金、事前予約条件、車両台数がOWSシステムの運用に与える影響を感度分析する。

料金設定について10 (円/分) , 20 (円/分) , 30 (円/分) の3ケースでシミュレーションを行って料金に対する感度を分析した。図-5にケースごとの効率性評価指標値を示す。料金設定を10 (円/分) と安値に設定した場合、予約受付トリップ数は基本設定20 (円/分) 時の約1.3倍に増大するが、30 (円/分) に引き上げた場合は約0.3倍に減少する。ステーションベース型と比べると感度は大きくない。フリーフロート型では、料金が安くなり置き換え意向のあるトリップが増加しても予約が受けられるトリップに制約があるため、一定の需要を超えるると予約不可が増えて効率的な運用ができなくなる。

事前予約も同様に、0分、30分、60分、120分の4ケースでシミュレーションを行った。図-6に効率性評価指標

値を示す。ステーションベース型と同様、料金ほどには利用トリップ数や予約受付率に与える影響は大きくないが、サービス水準の高い事前予約無し (0分前) で最も予約受付トリップ数は多くなる。

車両台数を50台から200台まで10台ずつ増やしていった場合の感度を分析した。効率性指標値を比較したものを図-7に示す。台数を増やしていくにつれ予約受付トリップ数は増加していく。提供する車両台数が少ないと車両不在で予約不可が増加するが、車両台数が増えると駐車不可で予約不可が増加し、実車率は低下していく。予約受付トリップ数は160台から170台の車両台数の場合に最大となっている。予約受付率も160台から170台時で最大になっており、この対象地域の規模では160台から170台の車両を提供することが望ましいと考えられる。稼働率はどの車両台数の場合でも100%となり、すべての車両が少なくとも1日に1回は使用されている。

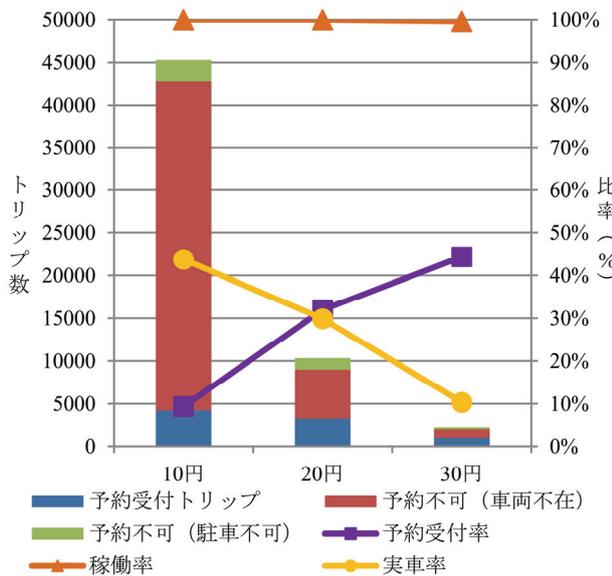


図-5 料金設定の各ケースの比較

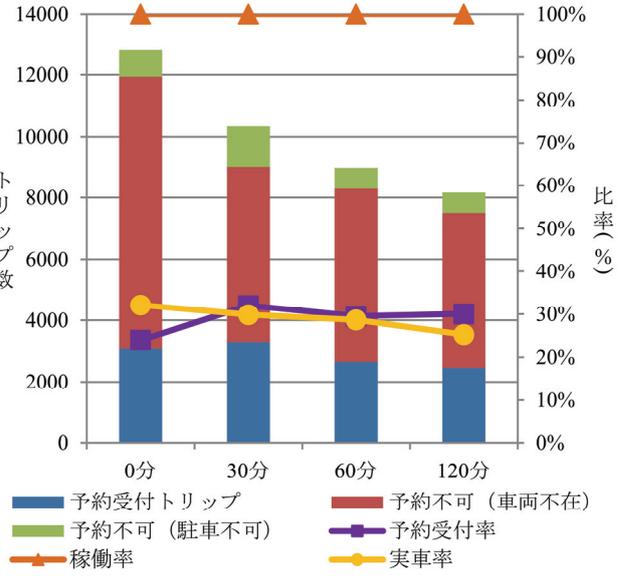


図-6 予約条件の各ケースの比較

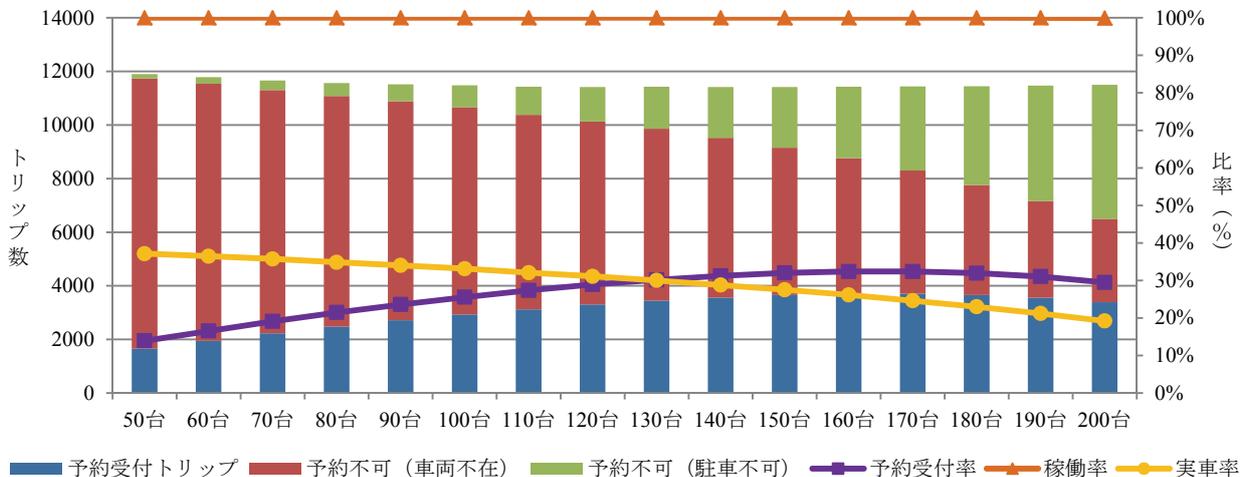


図-7 車両台数別の効率性の比較

5. OWSシステムシミュレーションを組み込んだ最適デポ配置計画

フリーフロート型ではステーションベース型と比較し予約受付トリップ数は増加するが、予約受付率は大きく低下するため効率的な運用方法とはならない。また、日本では路上での駐車が認められていないため、フリーフロート型 OWS の導入は解決すべき課題が多い。ここでは、ステーションベース型 OWS の運用効率性を高める最適デポ配置計画問題を解く。

(1) 定式化

ステーションベース型 OWS ではあらかじめデポを配置していたが、実際のシステムでは需要の偏りを考慮してデポを配置する必要がある。予約不可が少なく予約受付トリップ数が多い、無駄な車両が少ない使われ方をするデポ配置が望ましいと考えられる。そこで、42 箇所配置していたデポを候補地とし、最適なデポ配置を検討する。

まず、決定変数として、候補地 p にデポを配置するとき 1、そうでないとき 0 の値をとる離散変数 δ_p と、離散変数 $x_{p_t q_{t+t_{pq}}}^{i,n}$ を導入する。時刻 t から $t + t_{pq}$ の時間に個人 i が車両 n でデポ p からデポ q へ移動するとき 1、そうでないとき 0 の値をとる。これらの離散変数を用いて最適デポ配置計画を定式化すると以下ようになる。

$$\max_{\delta, x} \alpha \left(\frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p_t q_{t+t_{pq}}}^{i,n}(t)}{V} \right) + (1 - \alpha) \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p_t q_{t+t_{pq}}}^{i,n}(t) t_{pq}}{T * N} \quad (1)$$

subject to

$$\delta_p = \{0, 1\} \quad (2)$$

$$x_{p_t q_{t+t_{pq}}}^{i,n}(t) = \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_{pq} \sum_n \delta_p x_{p_t q_{t+t_{pq}}}^{i,n}(1) + \sum_p \delta_p a_p(1) = N \quad (4)$$

$$\delta_p a_p(t) \geq 0 \quad (5)$$

$$\delta_p C_p \geq \delta_p a_p(t) \quad (6)$$

$$\delta_p a_p(t) = \delta_p a_p(t-1) - \sum_i \sum_n \sum_q \delta_p x_{p_{t-1} q_{t-1+t_{pq}}}^{i,n}(t-1) + \sum_i \sum_n \sum_q \delta_q x_{q_{t-t_{qp}} p_t}^{i,n}(t-t_{qp}) \quad (7)$$

ここで、 α は目的関数の第 1 項と第 2 項のウェイトを表すパラメータ、 V を 1 日の置き換え意向のトリップ数、

$a_p(t)$ を時間 t でのデポ p に存在する車両数、 C_p をデポ p の駐車スペース数、 S をデポ候補地集合、 N を総車両数、 t_{pq} をデポ p からデポ q までの旅行時間とする。

目的関数式(1)は、第 1 項が予約受付率、第 2 項が実車率を表しており、これらを制約条件(2)~(7)の下で最大化する問題として定式化している。多目的最適化問題となっており、予約受付率と実車率の関係を満たしている。デポ数が増加に応じて車両数が増加すると、予約受付率は増加するが実車率は低くなり、デポ数の減少により車両数が減ると、実車率は高くなるが予約受付率は低下するというトレードオフ関係になっている。

一方、制約条件のうち式(4)は $t = 1$ の初期時点での初期配置台数と移動する車両の台数は総車両数に等しくなるという容量制約条件である。 $t = 1$ の初期時点で容量制約条件を満たせば次の時間帯以降も自動的に容量制約条件は満たされる。また、式(5)はデポ p での配車数に対する制約条件、式(6)はデポに駐車スペース数以上の車両は駐車できないことを表す制約条件である。式(7)は t 時点でのデポ p に存在する車両数は、 $t - 1$ 時点での車両数にデポ p から出発する車両数を引き、デポ p に駐車する車両数を足したものになる連続条件を表している。

(2) GAによる解法

最適デポ配置計画は多目的最適化問題でかつ NP 困難な計算量クラスの問題である。また OWS システムシミュレーションを組み込んで最適化を行うため、厳密解法で最適解を求めることは困難と予想される。そこでメタヒューリスティックス手法である遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて最適化を行う。GA は選択、交叉、突然変異という生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものである。遺伝子から生成される評価関数のみで探索し微分可能な評価関数も扱えるため、組み合わせ最適化問題でシミュレーションを組み込んだ本問題に適している。

GA では、各遺伝子に対して適応度という評価値を持っているが、OWS システムシミュレーションによって GA 中の適応度を算出する。選択アルゴリズムはエリート戦略とルーレット選択を併用し、交叉は一様交叉で行う。遺伝子長を 42 とし、図-8 に示すように 42 の候補地に 0, 1 の値で遺伝子型を表現する。この遺伝子により表現されたデポ配置で OWS シミュレーションを実行し適応度を算出する。その他の各パラメータは、個体数 20, 交叉率 0.5, 突然変異確率 0.2 と設定した。終了判定は 100 世代を超えた時点で終了する。

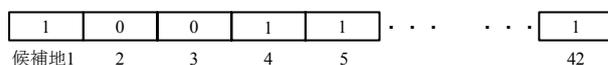


図-8 遺伝子型の表現

(3) 最適デポ配置計画案

駐車スペースを 5 台、各デポに配車する車両数を 3 台、目的関数のウェイト $\alpha=0.5$ 、適応度を評価するシミュレーションの実行日数を 10 日として最適化を行った結果のデポ配置を図-9 に、図-10 に最適解の 1 つと基本設定時のステーションベース型、フリーフロート型 OWS の効率性評価値の比較を示す。予約受付トリップ数はフリーフロート型が最も多いが予約受付率は最も低い。今回得た最適解の 1 つは、デポの配置により対象地域の潜在需要を制限しているため、予約受付トリップ数は少ないが予約受付率は高くなるとともに、実車率、稼働率はともに改善されている。デポ配置は中心市街地内のデポは解として残っており郊外部のデポは削減されている。郊外部でも熊本駅、平成駅、水前寺駅周辺のデポは残っており、公共交通機関との接続で利便性が高まることがわかった。

世代別の予約受付率と実車率をプロットしたものを図-11 に示す。世代を経る毎に予約受付率、実車率は高い方へ改善されていくのがわかる。世代を経る毎に解は改善されており、GA が適切に働いていることがわかる。

目的関数のウェイト α とデポの駐車スペースと配車数によってケースを分け最適化を行った結果を図-12 に示す。いずれのケースも適応度を評価するシミュレーションの実行日数は 10 日としている。ウェイト $\alpha=0.6$ と設定したとき、予約受付率を高めるために潜在需要は制限され、 $\alpha=0.5$ の場合よりもデポ数は減少した。ウェイト $\alpha=0.4$ と設定した場合、実車率を高めるようにデポ配置を行うため、 $\alpha=0.5$ の場合よりもデポ数は減少した。図-13～図-17 にケース毎の最適解でのデポ配置を示す。いずれのケースでも中心市街地にデポが集積する結果となった。郊外部にはデポは配置されない傾向にあるが、熊本駅、水前寺駅などの公共交通機関周辺のデポは残っている。これからも中心市街地へのデポの集積と公共交

通機関と連結させる配置が効率的な運用につながる事がわかる。

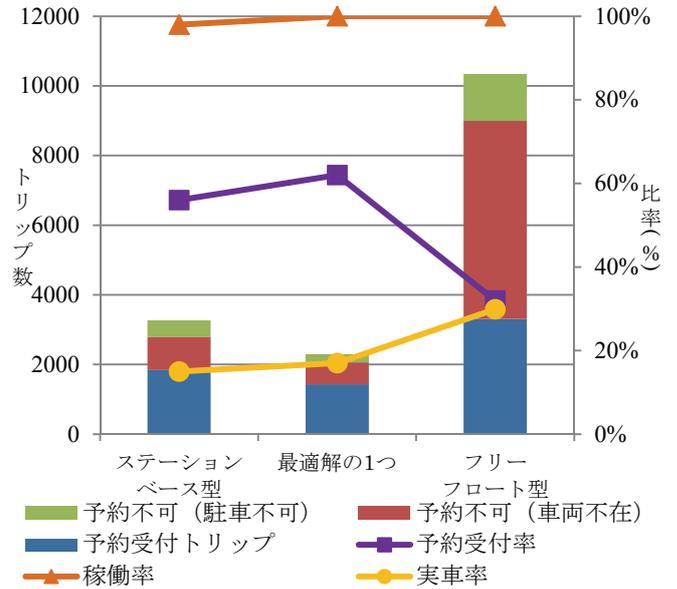


図-10 最適解の1つとの効率性評価値の比較

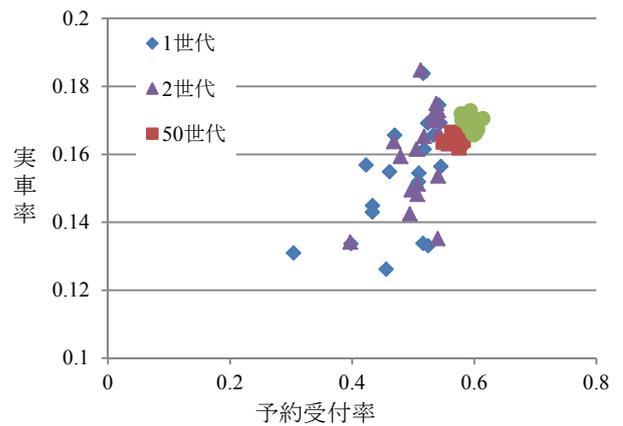


図-11 世代別の適応度の評価

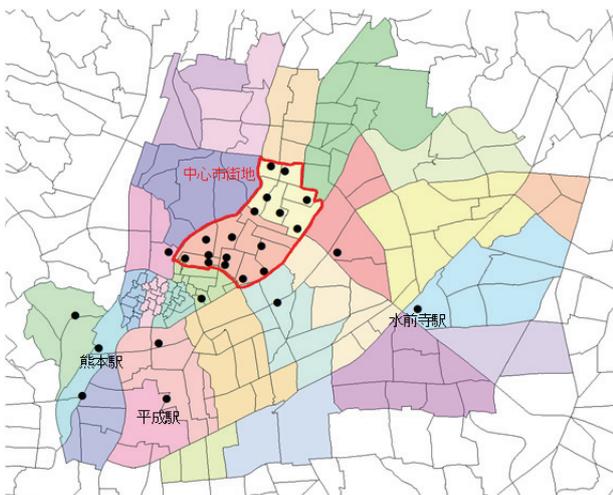


図-9 最適解の1つ

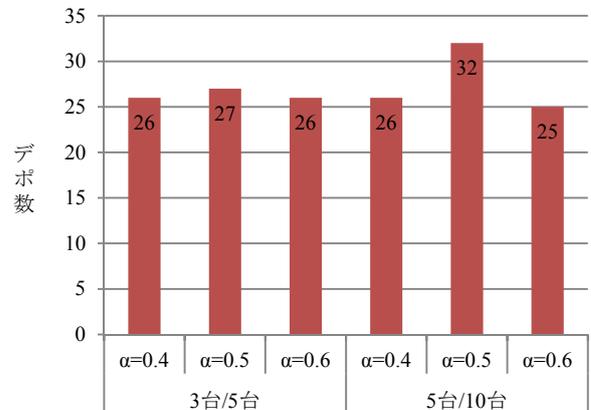


図-12 ケース毎の最適化結果

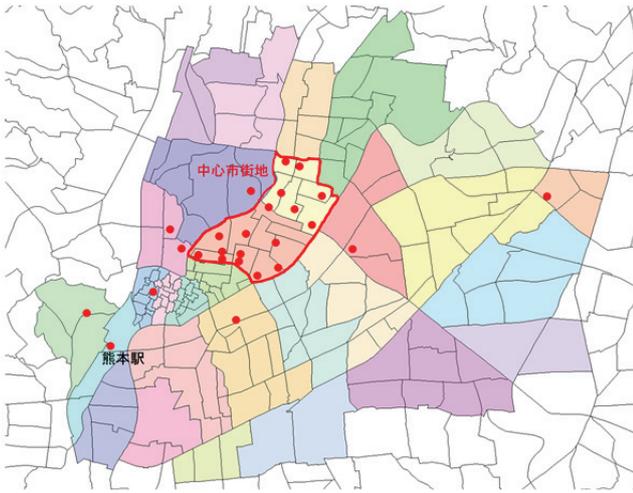


図-13 $\alpha=0.4$, 3台/5台時の最適解の1つ

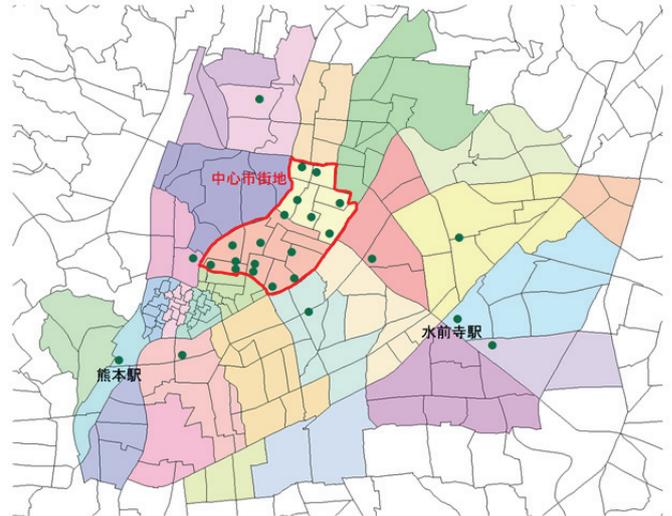


図-14 $\alpha=0.6$, 3台/5台時の最適解の1つ

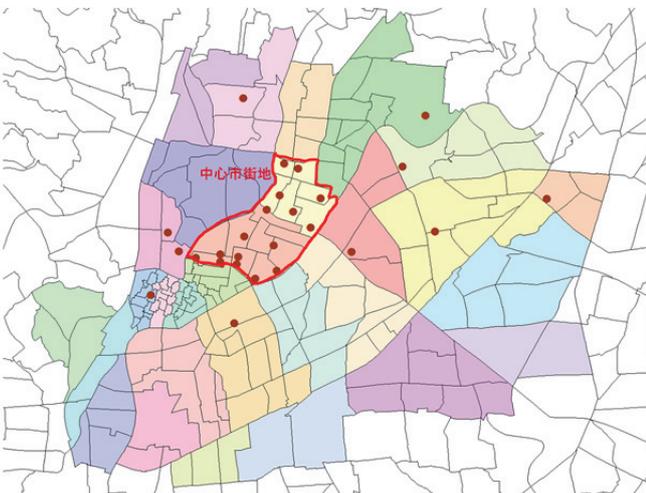


図-15 $\alpha=0.4$, 5台/10台時の最適解の1つ

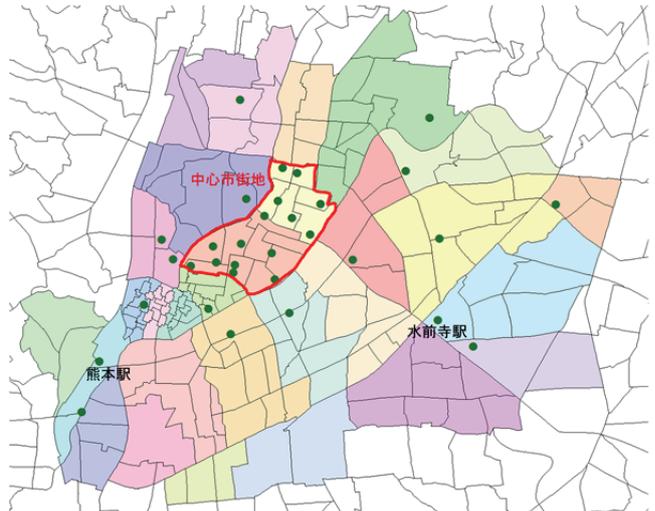


図-16 $\alpha=0.5$, 5台/10台時の最適解の1つ

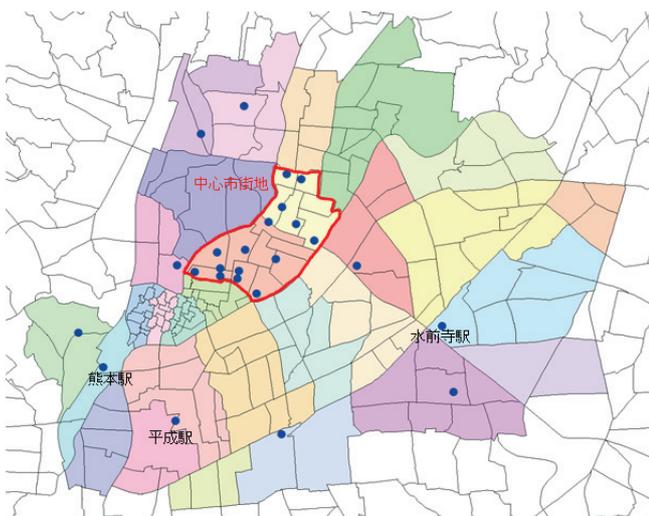


図-17 $\alpha=0.6$, 5台/10台時の最適解の1つ

6. おわりに

以下に、本研究で得られた主な成果と今後の課題を併記する。

- 1) 車両の偏在により予約が受けられないリスクを考慮したモデルを構築した。このモデルを組み込んだシミュレーションを行うことによって、OWSシステムの挙動を予測することができた。
- 2) 料金、事前予約条件、デポの駐車スペース、配車数がシステムに与える影響について検証し、ステーションベース型のOWSの場合、料金設定の変動がシステムに与える影響が大きいこと、予約受付トリップ数、予約受付率を考慮した場合、駐車スペースに対し0.4~0.6倍の配車数にすることが効率的であることを明らかにすることができた。
- 3) フリーフロート型のOWSの場合、車両数の増加とともに予約受付トリップは増加するが、対象地域の規模で

は 160~170 台の配車数が最も効率的であることを明らかにすることができた。

4) ステーション型の OWS についてデポ配置の最適化を行った結果、中心市街地へのデポの集積と公共交通機関と連結させる配置が効率的な運用につながることを明らかにできた。

5) 本シミュレーションモデルは、同様のシェアリングサービスを行っている自転車シェアリングシステムにも適用可能であり、近年、多くの都市圏でその導入が拡大している都市型自転車シェアリングシステムの駐車ロットの配置や規模の決定などへも応用できる。

参考文献

- 1) 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団HP, 我が国のカーシェアリング車両台数と会員数の推移
http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_graph2015.3.html
- 2) 国土交通省都市・地域整備局街路交通施設課, 国土交通省自動車交通局技術安全部環境課: 「超小型モビリティの活用に関する実証実験等による調査業務」, 2011.
- 3) 国土交通省都市局・自動車局: 超小型モビリティ導入に向けたガイドライン, 2012.
- 4) 中村謙太, 溝上章志, 橋本淳也: ワンウェイ型MEVシェア

リングシステムの導入可能性に関するシミュレーション分析, 第49回土木計画学研究発表会・講演集, No.248.

- 5) Kek, A.G.H., Cheu, R.L., Meng, Q., Fung: A decision support system for vehicle relocation operations in car sharing systems, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (1), 149–158, 2009.
- 6) Nourinejad, M., Roorda, J.M.: A dynamic car sharing decision support system, *Transportation Research Part E* 66, 36–50, 2014.
- 7) Correia, G., Antunes, H.A.P.: Optimization approach to depot location and trip selection in one-way car sharing systems, *Transport. Res. E: Logist. Transport. Rev.* 48, 233–247, 2009.
- 8) Constain, C., Ardon, C., Habib, K.N.: Synopsis of users' behavior of a car sharing program: a case study in Toronto, *Transport. Res. A: Policy Pract.* 46, 421–434, 2012.
- 9) Habib, K.M.N., Morency, C., Islam, T., Grasset, V.: Modelling user's behaviour of a car sharing program in Montreal: application of zero inflated dynamic ordered probit model, *Transp. Res. A* 46, 241–254, 2012.
- 10) 原祐輔, 羽藤英二: 乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案, 土木学会論文集, Vol.70, No.4, pp.198-210, 2014

(2015. 7. 31 受付)

A SIMULATION ANALYSIS FOR INTRODUCTION OF ONE-WAY CAR SHARING SYSTEM

Kenta NAKAMURA, Shoshi MIZOKAMI, Junya HASHIMOTO

Car-sharing systems offer an alternative mode of transportation in urban areas. The concept of car sharing is becoming popular all over the world. One-way car sharing is convenient because users can access vehicles in one depot at any time and then return them to another. This “one-way car sharing” has spread globally. However, problems can arise, mainly as a result of the uneven distribution of vehicles, which can make it impossible to reserve a vehicle in some locations.

In this research, we set out to verify the possibility of introducing one-way car sharing by creating a model of such a scheme, which we applied to an analysis of the operations not only for station-base type but also for free-float type scheme. We also optimize depot arrangement.