

# ワンウェイ型カーシェアリングシステムの導入可能性と最適ステーション配置

中村 謙太<sup>1</sup>・溝上 章志<sup>2</sup>・橋本 淳也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 日本工営株式会社 インフラマネジメント事業部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1-14-6)  
E-mail: a8112@n-koei.co.jp

<sup>2</sup>正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)  
E-mail: smizo@gpo.kumammoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>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-u.ac.jp

再配車を行わないワンウェイ型カーシェアリングは欧米をはじめとした世界のカーシェアリングサービスの主流になりつつある。本研究では、ワンウェイ型の中でもステーションベースとフリーフローティングのサービス運用シミュレーションモデルの構築を行う。また、我が国への導入可能性がより高いステーションベースのシェアリングサービスの運用効率を高めるための最適なステーション配置問題について検討した。これらを熊本都市圏パーソントリップ調査データに適用して、種々のタイプのワンウェイ型シェアリングシステムの運用性能の評価と導入の要件を比較し、我が国におけるカーシェアリングシステムの導入可能性を検討することを目的とする。

**Key Words:** car-sharing system, one-way type, station base, free floating, optimum allocation

## 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。図-1<sup>1)</sup>に示すように、我が国でも2009年にはカーシェアリングの会員数は約6,000人、車両台数は約500台であったものが、2010年以降は年々増加傾向にあり、2015年にはそれぞれ約680,000人、16,000台となっている。近年は国土交通省<sup>2)</sup>が平成25年から新たに認定制度を制定し導入を促進している超小型電気自動車MEV (Micro Electric Vehicle) を利用したシェアリングサービス、たとえばトヨタ自動車の提供するHa:mo<sup>3)</sup>などにも注目が集まっている。

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型と貸出し場所と返却場所が異なるワンウェイ型に大別される。後者は利便性が高い反面、需要の偏りによる車両の偏在が生じる。この場合は再配車を行っているが、経費がかかるため採算面で大きな問題となっている。このワンウェイ型にも、ステーションベースとフリーフローティングの2つのサービスがある。ステーションベースが専用の駐車デポを必要とするのに対して、フリーフローティングでは専用デポを必要とせず、サービス提供地域内であれば駐車可能な路側帯や公共駐

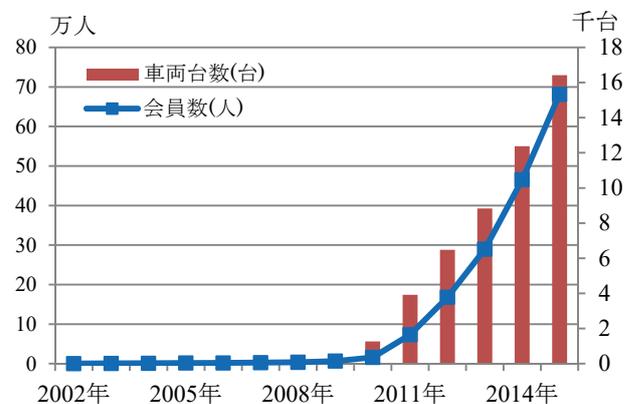


図-1 カーシェアリング車両台数と会員数の推移

車場に返却できる。ワンウェイ型フリーフローティングカーシェアリングは基本的に一般道路に路上駐車を認めている欧米の都市を中心に、近年、急速に導入が進んでいる。

我が国でもタイムズやオリックスなどによってカーシェアリングサービスが提供されているが、これらはラウンド型ステーションベースである。これに対して、ドイツやカナダで運用されているCar2goやイールドフランス内のAutolib'はワンウェイ型のサービスであり、会員登録さ

えしていれば、いつでも利用できる。たとえば、Car2goの場合、スマートフォンなどの移動体通信システムを利用して利用可能な車両の位置を簡単に検索でき、利用可能な車両を見つけたら、認証装置に会員証をかざして車両に乗り込み、暗証番号を入力すれば、そのまま運転を始められる。利用料金は1分単位の課金であり、利用距離にかかわらず乗車から降車までの利用時間に対して課金がされることも特徴の1つである。したがって、利用者はカーシェアリングの予約時間に自分のスケジュールを合わせる必要がなく、フレキシブルにカーシェアリングを利用できる。加えてCar2goはフリーフローティングであることから、近年は導入都市も利用者も格段に増加している。電気自動車によるAutolibはステーションベースであるものの、2015年12月末現在、ステーション数が1,042箇所、充電デポが5,838（1ステーション当たり平均5.6デポ）もあることから、実質的にはフリーフローティングといえる。

遅かれ早かれ、我が国でも同様のサービスが導入され、市民に利用されるようになると思われる。しかし、同一の車両をシェアすることへの市民の意識、どの程度の空間的密度で車両やステーションが配置されていけば良いか、他者の利用のために希望するときに予約ができず利用できないようなリスクをどう考えるかなど、サービスへの選好意識や投入規模や料金などに対するサービス導入後のシステム全体の運用状況などをあらかじめ想定しておくことが重要である。これに対して、著者らは、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ワンウェイ型カーシェアリングへの転換モデルを組み込んだ運用シミュレーションシステムを開発し、熊本都市圏においてステーションベースのサービスを導入した場合のシステムの挙動を既存研究<sup>4)</sup>で分析した。

本研究では、(1)ワンウェイ型のうちステーションベースとフリーフローティング（以後、SB-OWCS、FF-OWCSと記す）システムの運用シミュレーション分析、(2)FF-OWCSサービスの導入が難しい我が国では現実的なサービスとなるSB-OWCSシステムに対して、効率的な運用方法を行うための最適ステーション配置計画を検討することを主目的とする。

SB-OWCSだけでなくFF-OWCSサービスについても分析を行ったのは、SB-OWCSとどの程度、性能が異なるかを確認するためである。また、後述するSB-OWCSの最適ステーション配置計画をゴールプログラミングで解く際、実車率などの達成目標の参照値としてFF-OWCSの性能を利用するためである。

本論文は6章から構成されている。まず、第2章でカーシェアリングに関する国内外の研究のレビューを受けて、本研究の目的を述べる。第3章ではOWCS選択モデルとそれを組み込んだ運用シミュレータについて紹介し、それ

らの特徴について概説する。第4章では熊本都市圏を対象としたSB-, FF-の両OWCSの運用シミュレーション分析を行い、それぞれの特性を比較検討する。第5章ではSB-OWCSの効率的運用を達成する最適ステーション配置計画を定式化し、解く。最後に第6章で本研究の成果と今後の課題について述べる。

## 2. カーシェアリングに関する研究レビュー

カーシェアリングに関する海外の既存研究は、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解決法に関するものや、カーシェアリングに対する選好意識、利用による自動車所有や利用距離の変化などのインパクトの評価に関するものが多い。前者に関するものでは、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Kekら<sup>5)</sup>の研究がある。そこでは、シンガポールのカーシェアリング会社を対象とした適用によっ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している。Nourinejad and Roorda<sup>6)</sup>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、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%を削減できることを示している。Correia and Antunes<sup>7)</sup>は車両の再配置数、デポサイズ、および潜在的なデポ配置問題に対して、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カーシェアリング事業収益の最大化を目指した混合整数最適化MIPアプローチを提案している。この結果、100トリップあたり22.7台が最適であると結論づけている。

一方、後者に関する研究では、Costainら<sup>8)</sup>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分析モデルを開発した。そこではカーボン・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高い環境意識を持つ人はカーボン・オフセットを好んで選択することなどを明らかにした。Habibら<sup>9)</sup>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するなど、カーシェアリング利用者の行動の詳細を示している。

北米の幾つかの都市で、主としてCar2go利用者を対象としてWebアンケート調査を実施したMartinら<sup>10)</sup>は、カーシェアリング利用によって自家用車保有率が1世帯当

たり平均で0.2台減少し、シェアリング車両1台によって自家用車の4~6台分を代替したなどの効果を報告している。2種類のカーシェアリングに関する調査を実施したメトロバンクーバーの報告書<sup>11)</sup>や生津・Dowlatabadi<sup>12)</sup>では、1台のシェアリング車両が自家用車3台分の代わりになったことやシェアリングプログラムに加入した自家用車所有者の1/3が自動車利用距離を減らしたことなどの効果が示されている。その他、パリのAutolib'ユーザーを対象にした調査に対する6t bureauの報告書<sup>13)</sup>には、登録後に自動車所有者が23%も減少したこと、1台のシェアリング車両が3台分の自家用車と2カ所の駐車スペースの代替となっていること、Autolib'の利用距離を加えても自動車の利用距離が11%も減少したことなどの効果が示されている。

このように、海外の研究はカーシェアリングサービスがすでに導入された地域における利用実態や利用者意識の分析、インパクト評価となっている。一方で、新たな地域に導入するための各種条件の検討や事前の運用シミュレーション分析などは見当たらない。

我が国では、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するような研究が多い。1)としては、斉藤・羽藤<sup>14)</sup>や安藤ら<sup>15), 16)</sup>が、2)としては、山本ら<sup>17)</sup>が、3)としては、山本ら<sup>18)</sup>、原・羽藤<sup>19)</sup>の研究があるが、詳細については文献4)で紹介されているので、ここでは省略する。

筆者らの研究<sup>4)</sup>のように、現在行っている1日のトリップチェーンのうちどの部分のトリップをシェアリングサービスに置き換えるかといった意志決定構造の解明、シェアリングサービスの導入可能性の検証についてモデル分析を行った研究はほとんど見受けられない。そこでは、発ステーションでの利用可能な車両の有無や着ステーションでの返却可能なデポの有無といった他者の行動結果に依存する相互作用と、過去に転換を希望しても予約が受け付けられなかったことによるリスクの逐次更新プロセスを考慮したOWCSシステムの運用シミュレーションシステムが開発されている。本研究では、このシステムをベースに、新たにFF-OWCSの性能評価、およびSB-OWCSでの最適ステーション配置の検討を行う。さらに、これらを熊本都市圏パーソントリップ調査データに適用して、種々のタイプのOWCSシステムの運用性能の評価を比較し、我が国におけるOWCSシステムの導入可能性や導入の要件などについて検討することを目的とする。

表-1 OWCS 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
	ステーションにMEVがない確率の逆数	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	

### 3. OWCS運用シミュレータの構築

#### (1) SP調査データによるOWCS選択モデル

本研究では、MEVによるOWCSサービスに対する利用意向を把握すること、OWCSへのトリップの転換モデルを推定することを目的として、SP (Stated Preference) 方式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。また、以下で紹介するOWCS選択モデルを組み込んだOWCS運用シミュレータも文献4)で開発したものであるため、ここでは概説にとどめる。

OWCS選択モデルは、個人ごとにOWCSに転換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、「転換する」、または「条件によっては転換しても良い」とした現在のトリップごとに設定したOWCS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。トリップ属性としては、私用・業務目的ほど、トリップ時間が長いトリップほど、OWCSの事前予約リードタイムが短いほど、「ステーションにMEVがない確率の逆数」の値が大きくなる、つまりステーションにMEVがない確率が小さくなるほど、既存トリップは現利用手段からOWCSに転換する確率が高くなる。また、個人属性では、男性の方が、年齢は高くなるほどOWCSシステムへの転換の効用は高いことがわかる。

通常は導入される選択肢固有定数を説明変数に加えると、適合度は向上するものの、「時間料金」と「事前予約時間」を除く説明変数が統計的に有意な変数でなくなる。また、本OWCS選択モデルの独創性を支える説明変

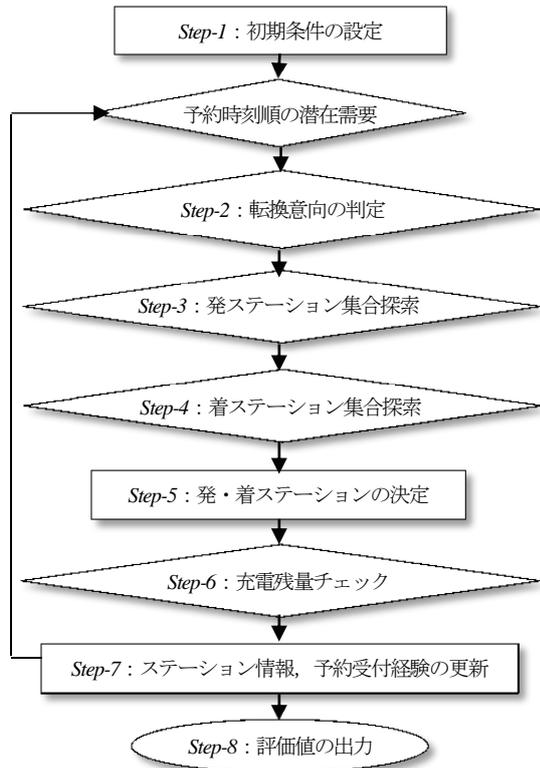


図-2 運用シミュレーションのフロー

数である「ステーションにMEVがない確率の逆数」を有意な変数としてモデルに導入できなくなることを避けるために、ここでは選択肢固有定数は説明変数に導入していない。

## (2) OWCSの運用シミュレータの概要

本シミュレータでは、予約時刻の早いトリップから順にOWCSへ転換するか否かの判定を行うと同時に、1分ごとにすべてのシェアリング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 (基本条件の設定)** : ステーションの数と配置, 1ステーション当たりの駐車デポ数, 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 (転換意向の判定)** : 予約時刻が早い順にトリップごとのOWCSへの転換確率を表-1より算出し, OWCSへの転換意向の有無を判定する。

**Step-3 (発ステーション集合探索)** : 発ノードから300m以内にステーションがあるかを探索し, さらにその中で利用可能な車両が1台以上あるステーションを探索し, 発ステーション集合を決定する。

**Step-4 (着ステーション集合探索)** : 着ノードから300m以内の距離にステーションがあるかを探索し, さらにその中で空き駐車デポがあるステーションを探索し, 着ステーション集合を決定する。

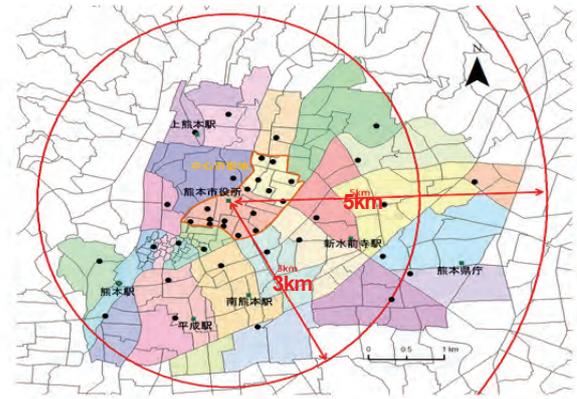


図-3 OWCSの導入エリアと設定ステーション

**Step-5 (発・着ステーションの決定)** : 発ステーション集合と着ステーション集合との間で最短距離のステーションの組み合わせを探索し, 当該トリップに用いる発着ステーションを決定する。

**Step-6 (充電残量チェック)** : 利用する車両の充電残量が目的地までのトリップを実行するのに十分な量かどうかをチェックする。十分でない場合は利用不可とする。

**Step-7 (ステーション情報, 予約受付経験の更新)** : 発, 着ステーションにおける車両台数や車両ごとの充電残量の更新, および個人ごとの予約受付の可否の経験を更新し, 蓄積する。

**Step-8 (評価値の出力)** : すべてのOWCSの潜在需要に対して予約時刻順にこれらの操作を実行する。最終的に総利用トリップ数や予約受付率, 稼働率など, OWCS導入可能性の評価のための指標を出力する。

Step-3とStep-4で発, 着ステーション集合を探索するのに, 発, 着ノードから発, 着ステーションまでの距離を300mとしたのは, パリ都市圏で運用されているSB-OWCSのAutolib'の平均ステーション間距離364mを参考にしている。また, MEVは1日のサービス開始時には100%充電されているものとする。発ステーション内にある利用可能なMEVのうち, 利用距離から必要な充電残量をチェックし, あらかじめ付けられた車両番号の小さい車両から順に利用されるとする。MEVの航続距離は80kmとして充電量を計算している。

本来ならOWCSへの転換によって目的地までの所要時間が変化する場合, その後の活動や活動を行う目的地までの利用手段などが変化するはずである。今回のシミュレーションでは, 簡単のために上記のような活動や利用交通手段の変化は考慮しない。

予約時刻は, 予約リードタイムから $N(30,10)$ の正規乱数の値だけ前になるよう, トリップ毎に設定している。従って, トリップによっては, トリップ開始時刻は遅いものの, 発生した乱数値が大きい場合には, 事前予約時刻が早くなるために, 車両や返却デポの予約が受け付け

表-2 基本条件の設定値

	ステーション数	1ステーション 当たりデポ数	1ステーション 当たり配車台数	総配車台数	料金 (円/分)	予約リードタイム
SB-OWCS	42	5	3	126	20	30分前まで
FF-OWCS	262	-	-	126	20	30分前まで

表-3 SB-OWCS と FF-OWCS, および最適ステーション配置計画の解

	SB-OWCS 型		FF-OWCS 型		最適ステーション配置計画			
	平均	変動係数	平均	変動係数	線形化による解		満足化による解	
					平均	変動係数	平均	変動係数
予約受付トリップ数	1,842	0.04	3,308	0.04	1,434	0.03	1,297	0.02
予約受付率	0.56	0.03	0.32	0.05	0.62	0.01	0.63	0.01
車両不在による予約不可トリップ数	952	0.10	5,690	0.12	625	0.06	568	0.02
駐車不可による予約不可トリップ数	473	0.12	1,343	0.08	237	0.11	196	0.08
車からの転換トリップ数	442	0.06	1,239	0.05	230	0.03	214	0.03
徒歩からの転換トリップ数	943	0.04	1,012	0.05	854	0.03	866	0.03
バスからの転換トリップ数	95	0.11	188	0.08	39	0.12	42	0.19
使用台数	124	0.01	126	0.00	81	0.006	60	0.00
稼働率	0.99	0.01	1.00	0.00	1.00	0.006	1.0	0.00
実車率	0.16	0.04	0.30	0.04	0.17	0.03	0.20	0.03
利用時間(分)	28,568	0.04	54,224	0.04	18,349	0.03	16,949	0.03

られるが、その影響でトリップ開始時刻が早いトリップであっても、逆に予約が受け付けられないようなトリップが生じる可能性もある。このように、OWCSの予約の可否は転換確率による利用意向だけによって決まるのではなく、事前予約時刻前後の他の利用者の予約受付の可否に依存する。従って、本シミュレーションは上記のような他者の行動結果との相互作用を考慮したマルチエージェント型になっている。

さらに、一日ごとに更新されるOWCSへの転換確率は、OWCS選択モデルに車両の偏在のために借りたいステーションのMEVが予約できないというリスクを表す「ステーションに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、予約受けの可否の経験が更新されることによって変化する「ステーションにMEVがない確率」の値によって翌日の転換確率が算出される。従って、利用可能なMEVが不在であるとか、返却ステーションでの駐車ができないなど、予約が受け付けられないことが続く転換確率は低下していくという構造になっている。ただし、シミュレーションの中でのそれは予約が受けられない経験の蓄積によって逐次更新される主観的確率であるのに対して、SP調査で尋ねている「ステーションにMEVがない確率」は客観的確率であり、本質的には異なるものである。しかし、ここでは、選好に影響を与える閾値をSP調査では客観的確率として提示したと考える。

#### 4. OWCSの運用に関するシミュレーション分析

##### (1) 導入エリアと検討するOWCSの種類

本研究では、図-3に示す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圏内にある29の熊本都市圏PT調査CゾーンをOWCSの導入エリアとし、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、OWCS選択モデルを適用する潜在需要とする。これにより151,040トリップが抽出された。シミュレーションには熊本都市圏PT現況ネットワークデータを用いる。対象地域内には262のノードがあるが、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。そこで、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になるよう、トリップごとにセントロイドをランダムに割り当てることにした。

以下では、SB-OWCSとFF-OWCSの2つのタイプのOWCSサービスに対して運用シミュレーション分析を行い、評価指標の比較を通して導入可能性と導入のための要件についての検討を行う。

##### (2) 基本条件の設定

ステーション数と1ステーション当たりデポ数、総配車数、料金、予約リードタイムの基本条件の値を表-2に示す。これらの値は、現在運用されている海外のカーシェアリングサービスの水準を参考にして設定した。シミュ

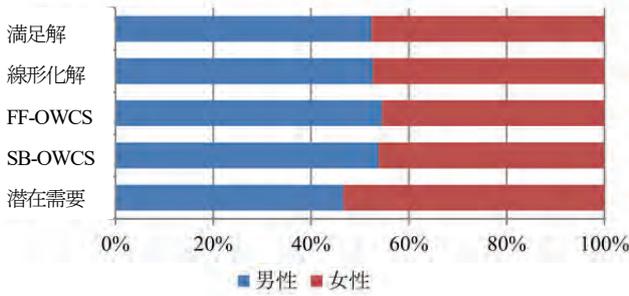


図4 男女別のOWCSへの転換

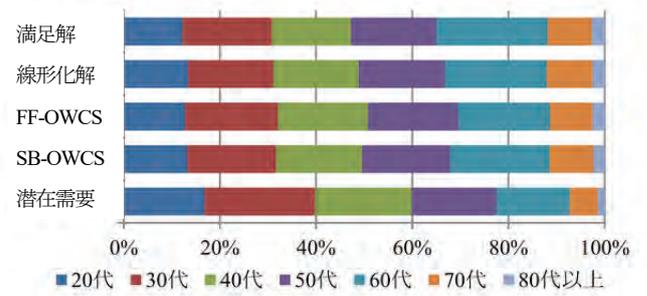


図5 年齢別のOWCSへの転換

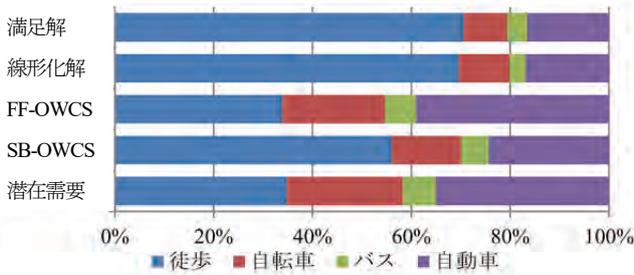


図6 交通手段別のOWCSへの転換

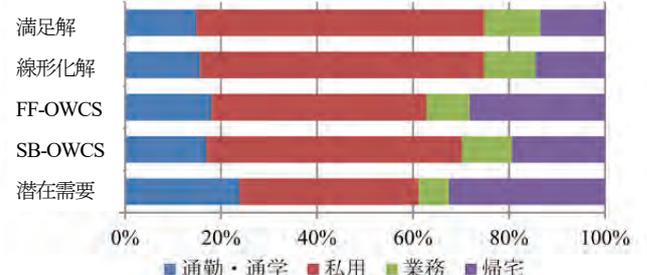


図7 目的別のOWCSへの転換

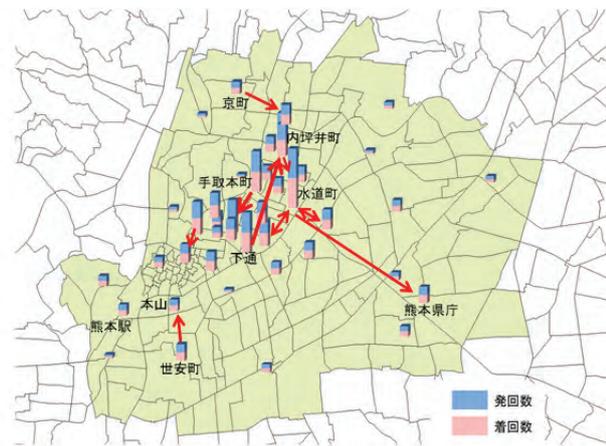


図8 ステーション別平均発着回数 (SB-OWCS型)

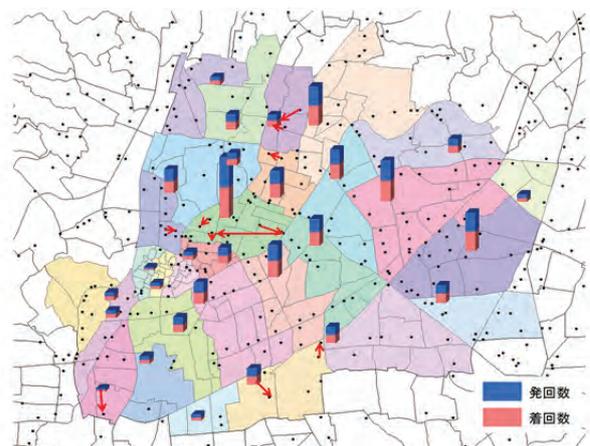


図9 ゾーン別平均発着回数 (FF-OWCS型)

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、SB-OWCSのステーションの配置位置を●で示す。ステーションは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箇所ずつ配置して配置密度を高めた。FF-OWCS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、簡易的に対象地域内にあるすべてのノードを1つのデポを持つステーションとしてシミュレーションを実行する。従って、ステーション数 (=デポ数) は全ノード数の262となる。SB-OWCSの場合と総配車台数を一致させるために、初期には126台の車両をこれらにランダムに配置した。料金、予約リードタイムはSB-OWCSと同様の値である。

基本設置のもとで90日間のシミュレーションを100回実行したときの予約受付トリップ数や予約受付率などの

評価指標の平均値と変動係数を表-3の第1欄と第2欄に示す。表中の予約受付率とは、シミュレーションフローのStep-2の条件を満たす転換意向トリップのうち、予約が受け付けられ、OWCSに転換したトリップの比率である。車両不在 (駐車不可) による予約不可トリップとは、予約時に発ステーションに利用可能な車両 (着ステーションに空の駐車デポ) がないために予約を受け付けられなかったトリップである。使用台数は、総車両台数126のうち実際に利用された台数、利用時間はOWCSに転換した全てのトリップの総トリップ時間である。また、稼働率は全車両のうち使用された車両数の比率であり、実車率は車両1台当たりのサービス提供時間に対する実車時間の比率である。これらは共に値が大きいほど効率的な運用となっていることを示すが、特に実車率はサービス提供者の収益に直結する指標である。

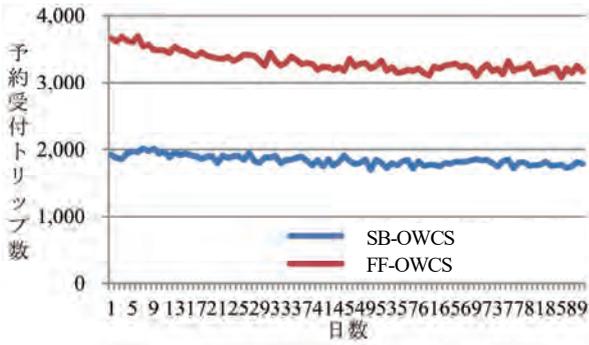


図-10 90日間の予約受付トリップ数の推移

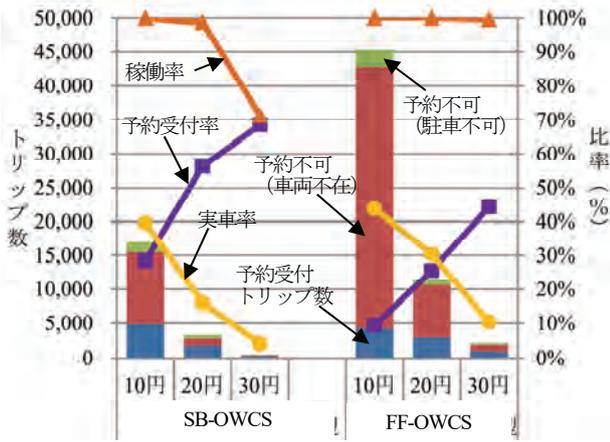


図-11 設定料金による感度分析の結果

SB-OWCSでは1,842トリップ(約1.2%=1,842/151,040×100%)が、FF-OWCSでは3,308トリップ(約2.2%)がシェアリングサービスを利用するという結果が得られた。両者を比較すると、FF-OWCSでは予約受付トリップ数そのものは大きいのにに対して、予約受付率はかなり小さい値を示している。これは、FF-OWCSは利便性が高いため、転換意向トリップは多いが、配車数に制約があるため、車両不在や駐車不可による予約不可トリップ数も多くなるためである。稼働率は両者ともほぼ100%であり、実車率はSB-OWCSが16%であるのに対して、FF-OWCSでは30%となり、運用効率はより高い。

図-4、図-5にそれぞれのタイプのOWCSを導入したときの男女別・年齢別のOWCSへの転換割合を示す。男女ともに転換の割合はほぼ等しく、20代~60代で高い転換割合となっている。図-6に交通手段別の転換割合を示す。SB-OWCSでは徒歩からの転換の割合が高い。SB-OWCSでは徒歩からの転換が6割近くあり、自動車からは25%程度である。FF-OWCSでは自動車からの転換が全体の4割で最も大きい、徒歩と自転車を合わせると5割以上となる。今回の試算ではCSサービスに期待されている自動車利用の抑制は容易でないという結果になった。これに対してFF-OWCSでは、徒歩と自動車からの転換が高い。図-7に目的別の転換割合を示す。共に私用目的での利用が

表-4 導入前後のCO<sub>2</sub>排出量と削減効果

	CO <sub>2</sub> 排出量 (tCO <sub>2</sub> )	
	SB-OWCS 型	FF-OWCS
OWS 導入前	1577.51	
OWS 導入後	1571.97	1552.15
削減効果	5.53 (0.35%)	25.35 (1.58%)

高く、FF-OWCSでは帰宅目的のトリップでも転換が多い。

図-8、図-9に両システムのデポごとの平均発着回数を示す。FF-OWCSではゾーン別に集計した平均発着回数を示す。図中には特に利用頻度の高いODを矢印で示した。SB-OWCSでは中心市街地のステーションでの利用頻度が高いことやステーションごとに利用頻度が異なること、ステーション間の距離が60m~1,500mのトリップの利用頻度が多いが分かる。一方、FF-OWCSでは周辺部でも発着回数が多いゾーンがあり、郊外部での利用も高まった。距離的に90m~800m程度のトリップの利用頻度が高くなり、SB-OWCSと比較して短距離のトリップの転換が多くなっていることがわかる。

図-10に90日間の予約受付トリップ数の推移の比較を示す。予約が受け付けられない経験の蓄積により、両システムとも予約受付トリップ数は下降推移している。90日間での予約受付トリップ数の最大値と最小値の差は、SB-OWCSが約300トリップであるのに対して、FF-OWCSは600トリップ数であり、FF-OWCSの方が予約受付トリップ数に与える経験の蓄積の影響が大きい。転換意向トリップは増加するが、配車数に制約があるため車両不在や駐車不可による予約不可の日が増加し、SB-OWCSよりも予約が受け付けられない経験が更新・蓄積されるためである。

### (3) OWCS導入による環境負荷削減効果

基本条件のもとでのSB-OWCS、FF-OWCS導入による環境負荷、ここではCO<sub>2</sub>排出量削減効果を算出した。CO<sub>2</sub>排出係数は環境省が定めるCO<sub>2</sub>排出係数(ガソリン0.0183tC/GJ、電力0.000387tCO<sub>2</sub>/kWh)を使用し、車両の電力量消費率は現在販売されている電気自動車でも最も低い電力量消費率(0.106kWh/km)を使用した。OWCS導入前のCO<sub>2</sub>排出量は、自動車からOWCSに転換したトリップが転換前と同様に自動車によるトリップを行った場合の排出量であり、OWCS導入後のCO<sub>2</sub>排出量は、OWCSに転換したトリップがMEV車両を利用した場合の排出量である。

OWCS導入前後のCO<sub>2</sub>排出量を表-4に示す。90日間SB-OWCSでは5.53tCO<sub>2</sub>(0.35%)、FF-OWCSでは25.35tCO<sub>2</sub>(1.58%)のCO<sub>2</sub>削減効果がみられた。CO<sub>2</sub>削減効果はOWCSへの転換トリップ数が多いFF-OWCSの方が大き

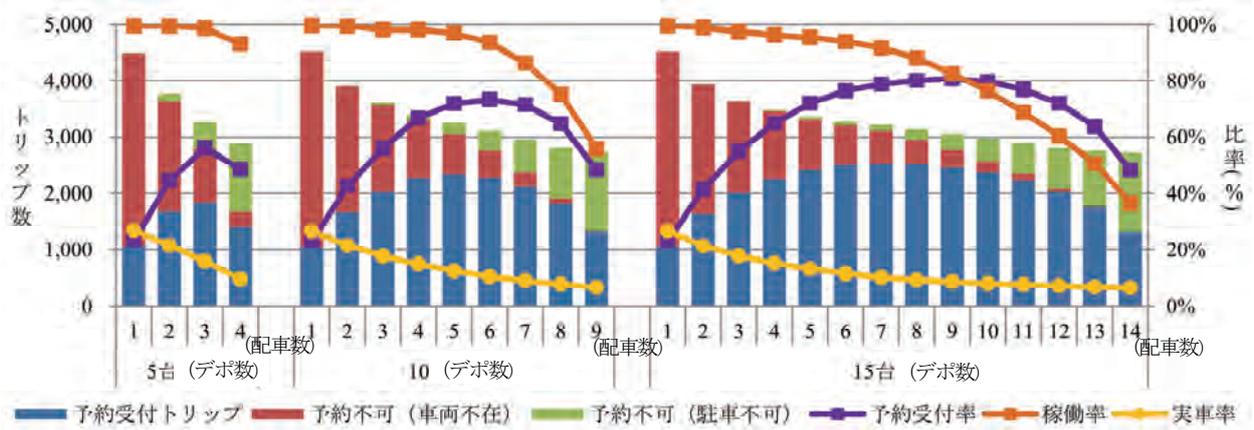


図-12 1ステーション当たりのデポ数, 配車数別の感度分析の結果

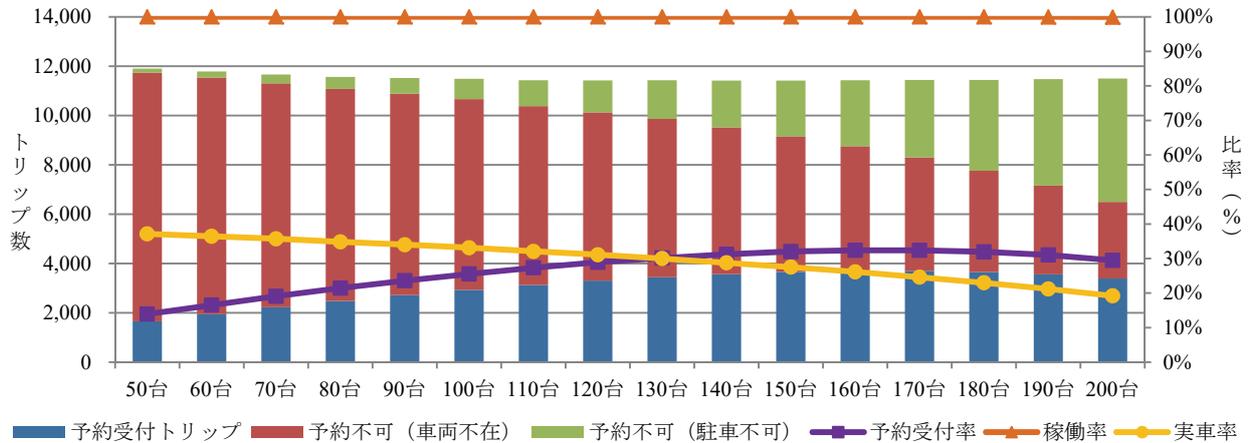


図-13 総車両台数別の感度分析の結果

い. 熊本市の運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出量が年間958千tCO<sub>2</sub>であるから, わずかではあるもののMEVによるOWCSの環境負荷削減効果が確認された。

(4) 基本設定条件に対する感度分析

料金や1ステーション当たりのデポ, 配車数がOWCSの運用に与える影響を分析する。以下では, 運用効率性を表す予約受付トリップ数, 予約受付率, 稼働率, および実車率の感度を比較する。

a) 料金

他の条件は基本条件値のままにし, 料金だけを基本条件値の20円/分から10円安価の10円/分, 10円高価の30円/分としたシミュレーションを行ったときの効率性評価指標値を図-11に示す。SB-OWCSでは10円/分とした場合, 予約受付トリップ数は基本設定値の時の約1.5倍に増大し, 30円/分とした場合は約0.3倍に減少するように, 料金が利用数に与える影響は非常に大きい。料金が安価なほどOWCSを利用する効用が高くなるため予約受付トリップ数は増加するが, 同様に予約不可トリップ数も増加する。特に車両不在により予約不可となるケースが多い。稼働率は10円/分で100%となるが, 30円/分では70%程度

に低下する。FF-OWCSでは, 料金を10円/分とした場合, 予約受付トリップ数は基本値の約1.3倍に増大するが, 30円/分とすると約半分減少する。料金が安くなり転換意向トリップが増加しても車両不在のため予約が受けられるトリップに制約があるため, 転換意向トリップが一定の値を超えると予約不可が増えて効率的な運用ができなくなる。

b) 駐車スペースと配車数

SB-OWCSについて, 1ステーション当たりの駐車デポ数を5, 10, 15台の3ケース設定し, それぞれのケースで配車数を1台ずつ増やしていった場合のOWCSの運用効率性指標の感度を比較する。図-12には, すべてのステーションに対して, 1ステーション当たりの配車数を1台からデポ数-1台まで順次, 増加させていった場合の効率性指標値を示す。1ステーション当たりの配車数が少ないと, 発ステーションでの車両不在のケースが増えるために予約受付率は低くなる。一方, 配車数が多くなりすぎると, 着ステーションでの駐車不可が増えるため, 同様に予約受付率が低くなる。予約受付率の視点から考えると, 文献17)でも主張されているように, 1ステーション当たりのデポ数に対して車両を0.5~0.6となるように配車する

ことが望ましいと考えられる。一方、実車率は、駐車デポ数に対する配車数の比が増加するにつれて単調に減少していく。実車率も考慮するとデポ数の半分以下の範囲で配車するのが望ましい。このように、予約受付率と実車率にはトレードオフの関係があることが分かる。実車率は低下するものの、配車数には一定の余裕が必要であり、実際にはデポ数の半分程度の車両を配車しておくことが望ましい。

FF-OWCSについては、車両の総台数を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-13に示す。提供する総車両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の予約不可、予約受付率ともに増加し、実車率は低下していく。予約受付トリップ数は160台程度で最大となっている。ここで分析対象としたエリアの規模や交通特性では、この程度の台数の車両を提供することが最も効率的と考えられる。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回は使用される。実車率については、総車両数の増加につれて単調に逡減するもの、逡減率はそれほど大きくはない。

## 5. SB-OWCSの最適ステーション配置計画

日本では路上や公共駐車場に駐車スペースを確保することは容易ではないため、FF-OWCSの実用化には解決すべき課題が多い。以下では我が国において導入の可能性が高いSB-OWCSの運用効率性を高める最適ステーション配置計画について検討する。

### (1) 問題の定式化

これまでのSB-OWCSの導入可能性の分析では、あらかじめ対象地域内にステーションを配置した上で、各種の政策変数に対する感度分析を行ってきた。実際のサービスでは需要の偏りを考慮して適切な位置にステーションを配置することが望まれる。このとき、利用者にとっては予約受付トリップ数が多く、一方でサービス提供者にとっては実車率が高くなるようなステーション配置が望ましいと考えられる。前述したように、1ステーション当たりの配車数がデポ数の半分までの場合は、利用者から見た評価指標の予約受付率とサービス提供者から見た評価指標の実車率はトレードオフの関係となる。このことを考慮しながら、以下では、SB-OWCSで配置していた42箇所のステーションを候補地とし、予約受付率と実車率とを同時に最適にするようなステーション配置計画を検討する。

まず、候補地  $p$  にデポを配置するとき 1、そうでない

とき 0 の値をとる離散的な解変数  $\delta_p$  と、時刻  $t$  から  $t+t_{pq}$  の時間にトリップ  $i$  が車両  $n$  でステーション  $p$  からステーション  $q$  へ移動するとき 1、そうでないとき 0 の値をとる離散的な状態変数  $x_{p,q,t+1}^{i,n}$  を導入する。また、 $V$  は転換意向トリップ数、 $C_p$  はステーション  $p$  のデポ数、 $S$  はステーション候補地集合、 $N$  は総車両数、 $t_{pq}$  はステーション  $p$  から  $q$  までの旅行時間であり、これらは既知である。一方、 $a_p(t)$  は時刻  $t$  でのステーション  $p$  に存在する車両数であり、 $t$  の経過により変動する変数である。

これらの変数を用いると、予約受付率と実車率とを同時に最適化するステーション配置を決定する多目的計画問題は以下のように定式化できる。

$$\max_{\delta, x} \left( \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q,t+1}^{i,n}(t)}{V}, \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q,t+1}^{i,n}(t)_{pq}}{T \cdot N} \right) \quad (1)$$

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

$$x_{p,q,t+1}^{i,n}(t) = \{0,1\} \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_s \sum_n \delta_p x_{p,q,t+1}^{i,n}(1) + \sum_p \delta_p a_p(1) = N \quad (4)$$

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

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

$$\delta_p a_p(t) = \delta_p a_p(t-1) - \sum_i \sum_n \sum_q \delta_p x_{p-1,q,t-1}^{i,n}(t-1) + \sum_i \sum_n \sum_q \delta_p x_{q,t-1}^{i,n}(t-t_{qp}) \quad (7)$$

ここで、目的関数式(1)は予約受付率と実車率という2つのベクトル目的関数の最大化を意図したものである。

一方、制約条件のうち、式(4)は初期時点  $t=1$  での配車台数と移動する車両の台数は総車両数に等しいという初期制約条件である。また、式(5)はステーション  $p$  での配車数に対する非負条件、式(6)はステーションには駐車デポ数以上の車両は駐車できないことを表す容量制約条件である。式(7)は時刻  $t$  でのステーション  $p$  に存在する車両数は、時刻  $(t-1)$  での車両数からステーション  $p$  から出発する車両数と駐車する車両数の入出の和になるという保存条件を表している。

### (2) GAの適用

最適ステーション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となる。またOWCSシミュレーションから得られる状態変数を求めながら最適化を行うため、厳密解法で最適解を求めることは容易でない。そこで、メタヒューリスティック手法である遺

伝的アルゴリズム (GA) を用いて最適化計算を行う。

GA では、各遺伝子に対して適応度という評価値を持っており、適応度の評価結果に応じて選択、交叉、突然変異の操作を行っていく。最適ステーション配置計画ではOWCS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った。遺伝子長はステーション候補地と同じ42とし、0, 1の値でステーションの有無を表現する。この遺伝子により表現された配置でOWCSシミュレーションを実行して適応度を算出する。その他のパラメータは、それぞれ個体数20, 交叉率0.5, 突然変異確率0.2と設定した。終了は100世代を超えた時点とした。

最適ステーション配置の厳密解を求める解法を開発することが本研究の目的ではない。また、メタGAにより性能の高いパラメータ値を推測することも可能であるが、学術的に明確な指針が定まっているわけではない。ここでは、標準的なGAの手順と操作方法をとっているが、計算の簡略化を図るために個体数を抑える一方で、交叉率や突然変異のパラメータ値を高く設定するなどの工夫を行っている。

(3) 解法

a) 線形化による解法

多目的計画のパレート最適解を求めるためには、ベクトル目的関数を何らかのスカラ関数に変換する必要がある。まず、線形化による解法を試みた。

$$\max_{\delta, x} \alpha \left( \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q,t}^{i,n} (t)}{V} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q,t}^{i,n} (t)_{pq}}{T \cdot N} \right) \quad (8)$$

s.t. (2)~(7)

目的関数式(8)は、前述したような予約受付率と実車率とのトレードオフ関係を表現するために、両目的関数をウェイト $\alpha$ で線形加重和することによってスカラ化したものである。制約条件式は前節と同じものである。線形加重和によって解を求める理由は、両目的関数の値域は[0.0, 1.0]であることから解の解釈がしやすいこと、次節で導入する満足化による解法のため、最適時の両目的関数値がそれぞれの程度の値になるかといった情報をあらかじめ得ておきたいためである。

基本条件値のように、1ステーション当たりのデポ数

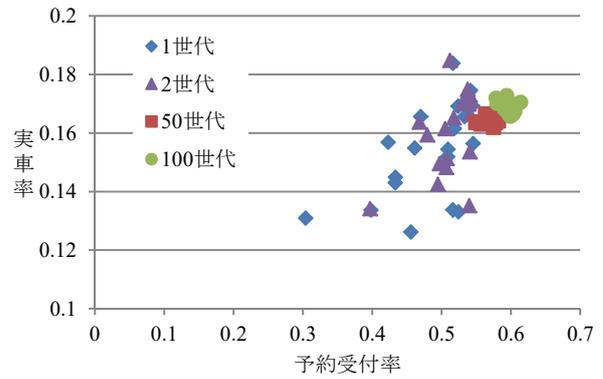


図-14 世代別の適応度の評価

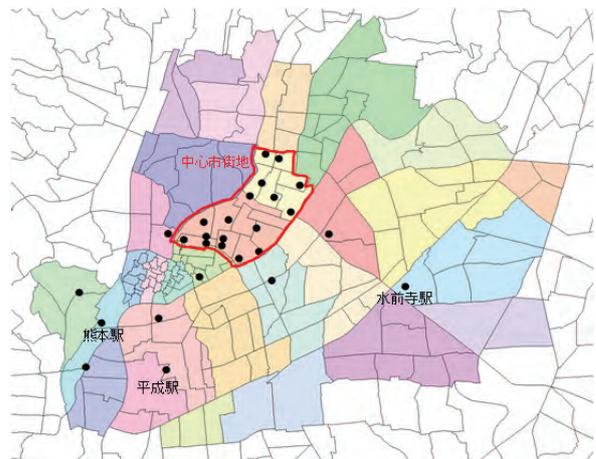


図-15 線形化によるステーションの最適配置

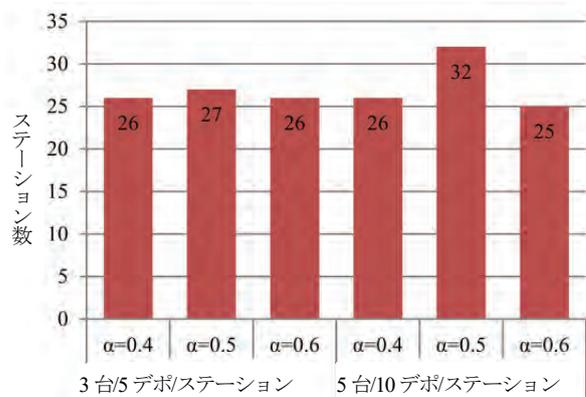


図-16 ケース毎の最適解

を5, 各ステーションへの配車台数を3とし、 $\alpha=0.5$ , 適応度を評価するシミュレーションの実行日数をここでは計算の簡略化のために10日として最適化を行った。世代別の予約受付率と実車率をプロットしたものを図-14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おり、世代を経る毎に解は改善され、GAが有効に働いていることがわかる。

最適なステーション配置結果を図-15に示す。また、最適時の各種効率性指標値を表-3の第3欄にSB-OWCSとFF-OWCSの評価値と比べて示す。最適解ではステー

ション数が27となり、車両数は81となった。SB-OWCSやFF-OWCSと比較してステーション数と車両数は減少し、システムの規模は小さくなっている。予約受付トリップ数も少なくなるが、予約受付率は高くなるとともに、実車率も高くなり、パレート改善している。また、稼働率も改善されている。中心市街地内のステーションはすべて解となっている上、周辺部でも熊本駅、平成駅、新水前寺駅周辺のステーションも解となっており、公共交通機関との結節ポイントが解になることがわかった。図-4、図-5に男女別・年齢別のOWCSへの転換割合を他の2つの場合と比較したものを示す。いずれも転換割合に大きな違いはみられなかった。しかし、図-6に示す交通手段別の転換割合については、ステーションの最適配置を行うと徒歩からの転換割合が高くなる。OWCSの予約が受けられたトリップの元の利用手段が徒歩であるトリップの起終点である公共交通機関との結節ポイントのステーションが解として残っているためである。図-7に示すように、私用目的トリップの比率も高くなる。

ステーション当たりの駐車デポと配車数ごとに、ウェイト $\alpha$ を0.4, 0.5, 0.6として最適化を行った解を図-16に示す。 $\alpha=0.6$ のときは予約受付率を高めるために利用意向のあるトリップが制限され、 $\alpha=0.5$ の場合よりも最適なステーション数は減少する。 $\alpha=0.4$ の場合、実車率を高めるようなステーション配置となるため、 $\alpha=0.5$ の場合よりもステーション数は減少する。しかし、いずれのケースでも中心市街地のステーションは解となり、熊本駅、水前寺駅などの公共交通機関周辺を除いて、周辺部のステーションは解とならない。中心市街地、および公共交通機関との結節点への配置が効率的な運用につながることをわかる。

b) 最適満足化による解法

OWCSを事業化するには一定の収益性を見込んだサービスの提供を行う必要がある。ここでは、収益を左右する実車率を適切な水準に確保することを条件としてステーション配置を行うことを目的として、ゴールプログラミングを用いた求解(以後、この解を満足解と記す)を試みる。ゴールプログラミングとは、目標達成という概念を導入し、その目標を不等式あるいは方程式で表して多目的計画問題の実行可能解を得る一つの解法である。

ここでは、収益に直結する実車率に対して目標値を設定した最適ステーション配置計画問題を以下に示す。

$$\max_{\delta, x} \frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q_{t+1},pq}^{i,n}(t)}{V} \quad (9)$$

s.t. (2)~(7)

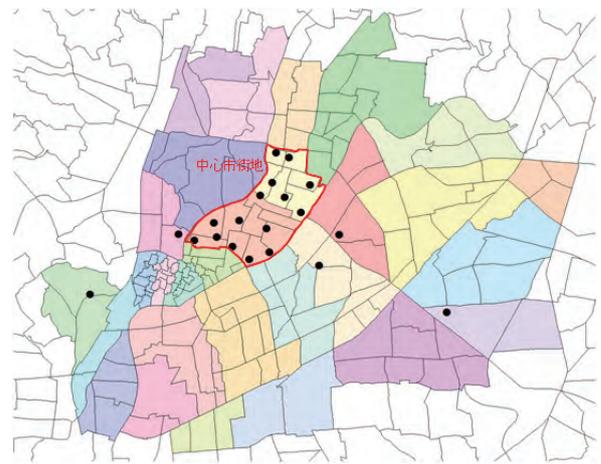


図-17 ゴールプログラミングによる最適ステーション配置

$$\frac{\sum_t \sum_i \sum_n \sum_{pq} \delta_p x_{p,q_{t+1},pq}^{i,n}(t)}{T \cdot N} \geq 0.2 \quad (10)$$

制約条件式(2)~(7)は前節のものと同じであるが、目的関数が式(9)のように予約受付率だけとなり、実車率について目標値を設定して制約条件式(10)としたことが異なっている。ここでは、目標値を0.2と設定した。これは、実際のOWCSにかかる車両などの初期費用や維持管理費用などは不明であり、詳細な収益の計算はできないため、前節の線形化による解法から得られた実車率0.17を参照し、これより高い収益が見込めるステーション配置を目指す。

ここでも、1ステーション当たりのデポ数を5、各ステーションへの配車台数を3とし、前節と同様にGAを適用して最適化計算を行った。満足解のときのステーションの配置を図-17に、そのときの各種指標を表-3の最右欄に示す。表-3の第3欄に示した線形化による解と比較すると、予約受付トリップ数は減少しているが、予約受付率はあまり変わらないまま、実車率は目標値を達成するような解が得られた。ステーション数は20、車両数は60となり、サービスの規模はさらに小さくなっている。ステーションは中心市街地だけが解となった。一定の収益を確保するようなOWCSサービスを展開するには、ステーションを中心市街地に配置し、車両の偏在を最小限に抑え、近距離のステーション間で行われるトリップを獲得して乗車率を向上させるようなサービスが望ましいことがわかる。

図-4、図-5に男女別・年齢別のOWCSへの転換割合を比較したものを示す。SB-OWCS、FF-OWCSと比較すると、転換割合には大きな違いはみられなかったが、図-6、図-7に示す交通手段別、目的別の転換割合については、線形化による解と同様、徒歩から、および私用目的トリップからの転換が高くなる。

## 6. おわりに

以下に、本研究で得られた主な成果を述べる。

- 1) 車両の偏在による予約不可リスクが逐次更新されることによってOWCSの選択確率も日々変動するという特徴を持つ独自開発のOWCS運用シミュレータにより、料金、予約リードタイム、ステーション当たりのデポ数、配車数などがシステムに与える影響について感度分析を行った。SB-OWCS, FF-OWCSとも料金が各種評価指標に与える影響が最も大きいことが明らかになった。
- 2) 利用者の視点から見た場合、配車数をデポ数の約半数まで増加させると予約受付率も増加して利便性は向上するが、運営の効率性を示す実車率は逆に減減するというトレードオフの関係がある。
- 3) 我国への導入化可能性が期待できる SB-OWS について、予約受付率と実車率の2つのベクトル目的関数を持つ最適ステーション配置計画問題を定式化した。線形化による解法の結果、中心市街地への集積と公共交通機関との結節点へのステーション配置が効率的な運用につながることを明らかにした。一方、実車率に目標値を設定した満足化による最適化の結果では、おおむね中心市街地だけにステーションを配置し、より規模を小さくするような解となった。
- 4) 今回の試算では、SB-, FF-とも自動車からよりも徒歩・自転車からの転換の方が大きくなっている。OWCS サービスに期待されている自動車利用の抑制は容易でないことも明らかになった。

次に、今後の課題について箇条書で述べる。

- 1)自動車保有意識の高さや共同利用に対する抵抗感など、我が国固有で詳細な選好要因や評価構造を反映したOWCS システムへの転換モデルの構築
- 2)徒歩や公共交通機関から OWCS への転換による移動時間短縮などによって1日の活動の変化も考慮できるようなアクティビティシミュレーションとの連携
- 3)発着ステーション選択肢集合、予約時刻の決定メカニズムの精緻化のための意識調査とモデル化
- 4)ステーション位置だけでなく、配車数などの変数も同時決定変数とした最適 OWCS サービスの定式化と求解法の改良

**謝辞**：本研究は、平成28年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」助成の支援を受けて実施したものの一部である。

### 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\\_gra](http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_gra)

- ph2015.3.html
- 2) 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.
- 3) トヨタ自動車：Ha:mo ハーモニアス・モビリティ・ネットワーク, <http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/its/hamo/>
- 4) 溝上章志, 中村謙太, 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, 土木学会論文集D3, Vol. 70, No. 5, pp. I\_805-I\_816, 2016.
- 5) Kek, A. G. H., Cheu, R. L., Meng, Q. and Fung, C. H. : A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 45, Issue 1, pp. 149-158, 2009.
- 6) Nourinejad, M. and Roorda, J. M.: A dynamic carsharing decision support system, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 66, pp. 36-50, 2014.
- 7) Correia, G. and Antunes, H. A. P.: Optimization approach to depot location and trip selection in one-way carsharing systems, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 48, Issue 1, pp. 233-247, 2009.
- 8) Constain, C., Ardon, C. and Habib, K. N.: Synopsis of users' behavior of a carsharing program: a case study in Toronto, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, pp. 421-434, 2012.
- 9) Habib, K. M. N., Morency, C., Islam, T. and Grasset, V.: Modelling user's behaviour of a carsharing program in Montreal: application of zero inflated dynamic ordered probit model, *Transp. Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, pp. 241-254, 2012.
- 10) Martin, E., Shaheen, S. and Lidicker, J.: Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings, *Journal of the Transportation Research Board*, DOI: 10.3141/2143-19, 2010.
- 11) Metro Vancouver: The Metro Vancouver Car Sharing Study; *Technical Report*, November 2014.
- 12) 生津路子, Hadi Dowlatabadi : カーシェアリングと自動車保有の変化 ; カナダ・バンクーバーの事例, 第53回土木計画学研究発表会・講演集, Paper No. 03-01, pp. 1315-1323, 2015.
- 13) 6t-bureau: One-way car-sharing: which alternative to private cars?, Executive Summary, 2014.
- 14) 斉藤いつみ, 羽藤英二 : 時間的選択構造に着目したEVシェアリングの加入・利用選択モデル, 都市計画論文集, Vol. 46, No. 3, pp. 271-276, 2011.
- 15) 安藤章, 山本俊行, 森川高行 : EU諸国のEVカーシェアリングの最新動向と市民の利用意向に関する分析, 都市計画論文集, Vol. 47, No. 3, pp. 757-762, 2012.
- 16) 安藤章, 山本俊行, 森川高行 : 路上乗り捨て型EVカーシェアリングが市民意識と交通行動に及ぼす影響分析ーパリ市・autolib'を例としてー, 都市計画論文集, Vol. 48, No. 3, pp. 465-470, 2013.
- 17) 山本俊行, 中山昌一朗, 北村隆一 : 再配車を用いない複数ステーション型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, 土木学会論文集, No. 786, pp. 11-20, 2005.
- 18) 山本俊行, 木内大介, 森川高行 : 自動車共同利用による自動車保有削減可能性に関する分析, 土木学会論文

集, Vol. 63, No. 1, pp. 14-23, 2007.

- 19) 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.

- 20) L.デービス: 遺伝アルゴリズムハンドブック, 森北出版, 1994.

(2016. 11. 22 受付)

## A FEASIBILITY STUDY ON INTRODUCING ONE-WAY CAR-SHARING SYSTEM AND ITS ALLOCATION OF STATIONS

Kenta NAKAMURA, Shoshi MIZOKAMI and Junya HASHIMOTO

Car-sharing systems offer an alternative mode of transportation in urban areas. The scheme of car sharing has become very popular all over the world. This study aims to investigate the possibility of introducing station-based as well as free floating one-way car-sharing services to Japan by using operating simulator which has developed on our own. This simulator is applied to a current car-sharing scheme in Kumamoto urban area. Consequently, we conclude that an effective allocation planning of car sharing stations which enhances operational efficiency as well as users' convenience was obtained.