

# カーシェアリングに基づいたEVの効率的運用 スケジューリング

上田 知幸<sup>1</sup> 孫 為華<sup>2</sup> 柴田 直樹<sup>1</sup> 伊藤 実<sup>1</sup>

**概要：**近年、環境問題対策として電気自動車（EV）が注目されている。EVは環境負荷の少ない自動車だが、ガソリン車に比べ航続距離が短く、充電時間が長いという欠点がある。本研究ではカーシェアリングの仕組みを利用し、多数のユーザがEVを共同利用する環境で、EVを効率的に運用するスケジューリング手法を提案する。ユーザは、電力残量の少ないEVの乗換・充電を繰り返し、EVによる長距離移動が可能である。提案システムは、ユーザスケジュール算出部と配車スケジュール算出部で構成される。ユーザスケジュール算出部は、ユーザ入力に対し最も満足度（希望通り巡回できたか示す指標）の高い巡回経路、行動（EV乗換・充電）を含むスケジュールを算出し、配車スケジュール算出部では、目的地毎のEV台数を調整するため、各EVが時刻毎に配置される目的地を決定する。また、地図データに劣化係数を定義し渋滞が移動時間や航続距離に与える影響を考慮する。提案手法の有効性を確認するためシミュレータを実装し、ユーザに対して実用的な計算時間でスケジュールを算出ができるか、また前述の満足度を定以上確保できるか評価する。

## The efficient operation scheduling of Electric Vehicles based on the car-sharing service

UEDA TOMOYUKI<sup>1</sup> SUN WEIHUA<sup>2</sup> SHIBATA NAOKI<sup>1</sup> ITO MINORU<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年、地球温暖化の原因の一つとして、自動車による温室効果ガスの排出が問題となっており、その一対策が電気自動車（EV）である。EVは走行時に排出ガスを出さない、ガソリン車よりエネルギー効率が高い、振動や騒音が少ない、家庭の電力貯蔵装置として利用可能といった長所を持ち、環境負荷の少ない自動車である。しかし、EVはガソリン車に比べて航続距離が短く、充電時間が長いという欠点がある。一方、国内の車両保有台数の増加や人口の都市部集中が原因で渋滞や駐車場不足が大きな問題となっている。このような問題に対して、登録を行った会員間で特定の自動車を共同利用するカーシェアリング方式が注目されている。カーシェアリングは登録を行った会員間で特定の

自動車を共同利用する仕組みである。欧米ではカーシェアリングの事業規模が増加し、自動車保有台数の減少や走行距離の減少などの環境改善効果が報告されている。また、カーシェアリングの利用者にとって、車両の維持費を分散できるため国内でも普及し始めている。近年ではEVを共同利用するサービスも増え、環境負荷の低減や駐車スペースの問題解決が期待されている。

EVとカーシェアリングを組み合わせた研究がされており、山本らは京都パブリックカーシステムを事例とした再配車を必要としないEV共同利用システムの効率性を分析している [1]。その結果、駐車場のスペース数が10の場合、車両数は6台程度にするとシステムの効率的運用が可能であることを示している。また、武内らはEVの共同利用による二酸化炭素削減量を精査している [2]。その結果、ガソリン車の共同利用と比較して二酸化炭素排出量を1/5に削減できることを明らかにしている。しかし、前述のEVの欠点からこれらの研究におけるカーシェアリングの規模は小さい。今後カーシェアリング事業が拡大し、多くのユー

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Graduate School of Information Science, Nara Institute of  
Science and Technology

<sup>2</sup> 大阪大学 サイバーメディアセンター  
Cybermedia Center, Osaka University

ザがカーシェアリングを利用する場合を想定した研究が必要である。著者らが所属する研究グループでは多数のユーザーに対して、各移動経路、各目的地における混雑を同時に考慮した複数ユーザー同時巡回スケジューリング手法を提案している [3]。大規模な道路網において現実的な時間内でスケジュールの算出することが可能である。しかし、この手法ではEVの利用を想定しておらずEVの航続距離や充電時間などの問題が考慮されていない。

そこで本研究では多数のユーザーがEVを共同利用する環境において、EVの効率的運用スケジューリング手法を提案する。提案手法ではユーザーが、電力残量の少なくなったEVの乗換、もしくは充電を繰り返すことでEVの欠点を補い、長距離移動することも可能である。各ユーザーのスケジュールは、ユーザーの入力後、提案システムが行う。ユーザーが出発地と出発時刻、帰着地と帰着時刻、希望する目的地群、目的地の重要度および時間制約を設定すると、提案システムが制約時間内で巡回可能かつ最も満足度（満足度はユーザーが希望通りに巡回できたかを示す指標）が高くなるような巡回経路と各目的地への到着、出発予定時刻、各目的地における行動（乗換、充電）を含むスケジュールを算出しユーザーに提示する。ユーザーが乗車するEVの航続距離や移動時間は渋滞の影響を受けるため、提案システムで利用する地図データに混雑度を表す重み（劣化係数と呼ぶ）を定義し、これらの影響を考慮している。

提案システムは、ユーザーのスケジュール（移動経路や目的地毎の行動）を決定するユーザースケジュール算出部と、各目的地におけるEV台数の偏りを調整する配車スケジュール算出部で構成される。ユーザースケジュール算出部は、ユーザーの入力がある度にシステムが計算を行うが、配車スケジュールはバックグラウンドで常に計算されている。本研究では、スタッフが配車スケジュールをもとにEVの配車を行うと仮定している。

提案手法の有効性を確認するためにシミュレータを実装し、1,000~10,000程度のユーザーに対して実用的な計算時間でスケジュールを算出ができるか、また前述の満足度を一定以上確保できるか評価する。評価実験において地図データは日本道路交通情報センター（JARTIC）が公開する東京都内の道路地図を利用する。

## 2. 関連研究

本章では、本研究に関連する研究について述べ、次に本論文の位置づけについて述べる。

### 2.1 カーシェアリング

カーシェアリングの普及に伴い保有自動車の削減、駐車スペースの削減、環境負荷の低減などの効果が期待されている。山本らはセカンドカー型自動車共同利用システムを対象として、世帯内での自動車利用の最適化を考慮した上

で自動車共同利用システムの需要及び、共同利用システムの導入による保有自動車の削減量を分析している [1]。分析の結果、軽自動車保有世帯がセカンドカーとして自動車共同利用システムを利用する可能性が高く、平日で35%、休日で55%の保有自動車を削減できることを示している。武内らはEVを共同利用した場合の二酸化炭素削減量を精査している [2]。カーシェアリングに小型EVを導入することにより、従来のガソリン車と比較して、二酸化炭素排出量を1/5に削減できることを明らかにしている。しかし、これらの研究はカーシェアリングによる車両数削減や環境改善の効果の分析を目的としており、EVの共同利用の効率性の分析や、EVによる長距離移動を目的としていない。

EVを共同利用する場合、航続距離や充電時間の問題から、駐車場に行つてすぐに車両を利用できないなどの問題が発生する。この問題に対して、EVを利用したカーシェアリングの効率性に関する研究がなされている。中山、山本らは京都パブリックカーシステムを事例として、EV共同利用システムの効率性に関する分析を行つており、EV配置台数、充電器数、駐車スペース数などについて最適化を行なっている [4,5]。しかし、カーシェアリングの規模（EV台数、駐車場数、会員数など）が小さく、今後EVやカーシェアリングが普及した場合のシステムの挙動が把握できない。

また、都心の渋滞緩和や環境改善のため自動車と公共交通機関を結合させたパークアンドライド方式も普及し始めている。伊志らは、昼間時に遊休化している通勤車両を共同利用する交通システム「通勤車利用型カーシェアリング（CSCC）」を提案している [6]。沖縄県那覇市においてCSCCによるモーダルシフト効果を検証した結果、公共交通機関利用の増加、自動車利用の減少を確認している。しかし、EVを対象としたカーシェアリングではないため、EVが抱える航続距離や充電時間などの欠点に伴う問題は考慮されていない。

### 2.2 車両の省エネルギー化について

近年、地球温暖化などの環境問題が報じられており、車両が環境に与える影響も大きい。そこで車両の排気ガスを影響を最小限に抑える研究がなされている。Miguelらは、商業車を対象に運搬経路問題（VRP：Vehicle Routing Problem）を発展させたEVRP（Emission Vehicle Routing Problem）を取り扱い、車両から排出されるガスを最小化するスケジューリング手法を提案している [7]。その結果、商用車の運用において自動車の排出量を考慮することで温室効果ガスの影響を抑えられる可能性を示している。しかし、ガソリン車のみを考慮しているためEVの航続距離や消費電力量などを考慮していない。また、Hunstonらは、電力網と駐車場に停車した自動車の双方向から電力の流れを制御し、その結果得られる収益を最大化する研究を行

なっている [8]。500 台の各車両に対して充電・売電・待機のスケジュールを策定した結果、一日あたり約 2,000 ドルの収益が期待できるとしている。しかし、電力の流れを最適化することを目的としており、EV の航続距離などは考慮されていない。

### 2.3 多数ユーザ同時巡回スケジューリング

本研究では、多数のユーザに対して最も満足度の高い巡回経路を提示する。著者らが所属する研究グループでは多数のユーザに対して、各移動経路、各目的地における混雑を同時に考慮した複数ユーザ同時巡回スケジューリング手法を提案している [3]。評価実験の結果、20,000 のユーザに対して 8 分程度の時間で満足度の高いスケジュールを提示している。大規模な道路網において現実的な時間内でスケジュールを算出が可能であるが、現実の都市においてこの手法を運用するためにはより詳細な道路網、多くのユーザを取り扱う必要がある。

本章で挙げたこれまでの研究では、カーシェアリングによる環境改善効果、交通量削減などの有効性が示されている。しかし、多数のユーザが EV を共同利用する環境において、各ユーザのスケジュール、各 EV の配車スケジュールを策定し、EV の効率的運用を目指した研究は行われていない。本論文では多数ユーザ環境下における EV の効率的運用スケジューリング手法を提案する。

## 3. EV をとりまく環境

本章では国内の EV の特徴、充電インフラ、カーシェアリングの現状について述べる。

### 3.1 国内の電気自動車

近年、地球温暖化など環境問題が報じられており、EV はその一対策として注目されている。

表 1 国内自動車メーカーから発売されている主な EV の仕様

メーカー	三菱自動車工業	日産自動車
車種	i-MiEV	リーフ
普通充電 (100V)	14 時間で満充電	28 時間で満充電
普通充電 (200V)	7 時間で満充電	8 時間で満充電
急速充電	約 30 分で 80% 充電	約 30 分で 80% 充電
総電力量	16kWh	24kWh
航続距離	180km	200km

国内で販売されている主な電気自動車は三菱自動車工業が発売している i-MiEV と日産自動車が発売しているリーフである。これら二種類の自動車の特徴を表 1 にまとめる。EV は走行中に排気ガスを出さない、ガソリン車よりエネルギー効率が高い、振動や騒音が少ないといった長所を持ち、環境負荷の少ない自動車である。さらに、EV を自動車としての役割だけでなく家庭の電力貯蔵装置とし

て利用できるという利点もある。しかし、ガソリン車に比べて一回の充電による航続距離が短く、充電時間が長いなどの欠点が原因で本格的普及に至っていない。

### 3.2 国内の充電インフラ

国内の充電施設の特徴と規模について述べる。3.1 で挙げた EV の実走行距離は高速走行やエアコンの利用、渋滞や勾配などの道路状況によって低下する。EV は自宅などでの普通充電が基本だが、EV の充電切れの不安感の軽減や利便性を担保するために街中・出先で充電できる充電インフラの整備が重要となる。充電施設は普通充電施設と急速充電施設に分けられ、三菱自動車工業の i-MiEV を利用する場合、普通充電施設では 100V 用で約 14 時間、200V 用で約 7 時間の充電時間を要し、急速充電施設は電池容量の約 80 % の充電に約 30 分の時間を要する。2013 年 5 月現在で国内の急速充電器は約 1,700 基である。

### 3.3 国内のカーシェアリング

2012 年の国内における車両保有台数は約 8,000 万台であり、都市部では駐車場不足や車両の維持費の高騰が大きな問題となっている。同様の問題に直面した欧米では登録を行った会員間で特定の自動車を共同利用するカーシェアリング方式が発明され、日本を含めて多くの国々で利用されるようになった。カーシェアリングとは、会員間で特定の車両を共同利用するサービスである。カーシェアリングはレンタカーと類似したサービスであるが、表 2 に示すように対象利用者、利用時間、貸渡場所・方法などに違いがある。国内における配備車両数は 6,000 台以上、会員数は 16 万人を超え、カーシェアリングと EV を組み合わせたサービスも見られる。

表 2 カーシェアリングとレンタカーの違い

	レンタカー	カーシェアリング
利用者	不特定の顧客	会員限定
利用時間	半日または 1 日単位以上	15 分から利用可能
貸渡場所	営業所	近隣専用駐車場
貸渡方法	人が営業時間に行う	24 時間無人管理

### 3.4 EV の電力消費推定モデル

EV の実走行距離は運転方法や、渋滞や勾配などの道路状況に影響を受ける。そのため、EV の航続距離を推定する研究がなされている [9-12]。これらの研究では、EV にかかる走行抵抗  $F_d [N]$  と走行距離や勾配に応じて消費電力量  $[Wh]$  が変化すると仮定している。一般的に加速時と巡航時には図 1 に示すような力が車両にかかっている。自動車には路面やタイヤの状況による転がり抵抗  $F_r$ 、速度や大気の状態による空気抵抗  $F_w$ 、加速による加速抵抗  $F_a$ 、斜面の上り下りによる登坂抵抗  $F_g$  がかかり、これらの総和に

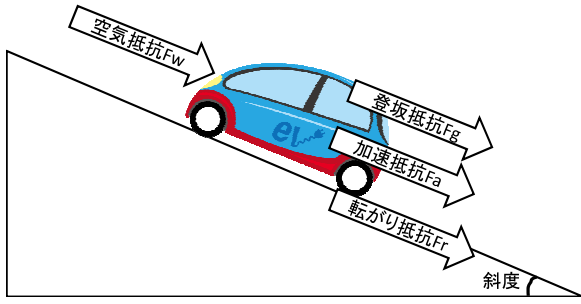


図 1 自動車にかかる抵抗

つり合うようにモータに駆動力  $F_d[N]$  がかかる。これらの抵抗を表す運動方程は式 (1)~(5) のようになる。式 (1)~(5) におけるパラメータを表 3 に示す。

$$F_r = \mu Mg \quad (1)$$

$$F_w = \rho C_d S v^2 / 2 \quad (2)$$

$$F_a = Ma \quad (3)$$

$$F_g = Mg \sin \theta \quad (4)$$

$$F_d = F_r + F_w + F_a + F_g \quad (5)$$

表 3 運動方程式のパラメータ

パラメータ	単位	意味	取得方法
$\mu$		転がり摩擦抵抗係数	定数
$M$	kg	車両総重量	カタログ値
$g$	m/s <sup>2</sup>	重力加速度	定数
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	空気密度	定数
$C_d$		空気抵抗係数 (Cd 値)	カタログ値
$S$	m <sup>2</sup>	前面投影面積	カタログ値
$v$	m/s	車両の走行速度	GPS から算出
$a$	m/s <sup>2</sup>	車両の加速度	GPS から算出
$\theta$	rad	斜度	地図データ

次にこの  $F_d$  を利用して時刻  $t$  における瞬間消費電力  $P_e(t)[W]$ 、および時刻  $t_{start}$  から  $t_{end}$  までの 1 回のトリップによる消費電力量  $E_e[kWh]$  を推定する。時刻  $t$  における EV の速度が  $v(t)$  のとき、モータの仕事率  $P_d(t)[W]$  は式 (6) で与えられる。

$$P_d(t) = F_d(t) \times v(t) \quad (6)$$

ここでモータの電気エネルギー変換効率を  $\eta$  としてモータが電気エネルギーを運動エネルギーへと変換することを考える。EV は減速時に運動エネルギーの一部を電気エネルギーに変換して充電を行う、エネルギー回生技術が用いられている。回生を行う際のエネルギー変換率は  $\eta$  と同等とする。このことから  $P_e$  は式 (7) のように表せる。

$$P_e(t) = \begin{cases} \frac{1}{\eta} \times P_d(t) & \text{if } P_d(t) \geq 0 \text{ (力行)} \\ \eta \times P_d(t) & \text{otherwise (回生)} \end{cases} \quad (7)$$

以上のことから時刻  $t_s$  から  $t_e$  における消費電力量  $E_e$  は、式 (8) のように求められる。ただし、 $c[Wh/J]$  は定数である。

$$E_e = c \int_{t_s}^{t_e} P_e(t) dt \quad (8)$$

## 4. 問題設定

### 4.1 想定する環境

多数のユーザがそれぞれ希望する複数の目的地を選び巡回を行い、最終的な目的地に到着した際に巡回を終了する環境を想定する。各ユーザは出発地点から道路網上の目的地に向かって移動し、到着した目的地においてサービス（観光、EV の乗換・充電など）を受け終えるまでの時間を消費し、次の目的地を目指す。各目的地において、各ユーザが乗車する EV の電力残量が少なくなった場合は、EV の充電もしくは乗換を行う。目的地間で渋滞が発生した場合は、混雑度に応じて EV の電力残量、移動速度が低下する。

ユーザは、入力として希望する巡回目的地群、およびその重要度（その目的地への訪問を希望する強さの程度）、出発時刻、最終目的地への希望帰着時間を設定する。各ユーザは目的地を訪問できれば、自身が設定した重要度に相当する満足度が得られる。ただし、ユーザの希望帰着時間以降に、目的地を訪問した場合には、ペナルティとして、その目的地の満足度を加算しない。本研究が対象とする問題は多数のユーザが EV を共同利用する環境において、全ユーザの満足度の合計を最大化することである。

ユーザの入力は情報センタ（サーバ）に収集される。サーバが行う計算はユーザスケジュール算出部と配車スケジュール算出部に分けられる。ユーザスケジュール算出部では、ユーザの入力を受ける度に、移動経路、各目的地の出発・到着時刻、EV の乗換・充電スケジュールを定めたユーザスケジュールを算出し、ユーザに提示する。ユーザスケジュール算出部はユーザインタフェースの一部であるため数秒でユーザスケジュールの算出を行う。

一方、ユーザの増加に伴い、各目的地の EV 台数に偏りが生じ、ユーザが目的地に到着しても乗り換える EV が存在しない、待ち時間が増えるなどの問題が予想される。このような問題に対して本研究では、各 EV について時刻毎の配置場所を定めた配車スケジュールの算出を行う。各 EV の配車スケジュール算出により、各 EV の時刻毎の配置場所を決定後、各目的地に配備されている充電ブースにて時刻毎にどの EV を充電するか定めた充電ブーススケジュールを決定する。充電ブーススケジュール算出を含む配車スケジュール算出部の計算はバックグラウンドでサーバが常に行なっている。

ユーザはユーザスケジュールによって、ユーザスケジュール内の目的地を巡回できること、目的地間で乗車する EV

が確保できることを保証される。ただし、サーバはユーザ入力の際に行うユーザスケジュール算出、さらにバックグラウンドで行う配車スケジュール算出を繰り返しながら、ユーザスケジュールを更新する。例えば、ユーザがある目的地においてEVの乗換を必要とする場合、ユーザは目的地にて乗換用のEVを確保できることは保証されるが、どのEVに乗車するかは、サーバがユーザスケジュール・配車スケジュール算出を繰り返す中で変化している。

また、本研究では配車スケジュールをもとにスタッフがEVを配車する。サーバはユーザの移動を利用してEVの配車スケジュール算出を目指す。例えば、あるEVを地点Aから地点Bへ移動する場合、地点A-B間を移動するユーザが存在すれば、その移動を利用してEVの配車を行う。しかし、地点Aにユーザが存在しない場合や地点Bへ向かうユーザが存在しない場合、スタッフがEVの配車を行う。

#### 4.2 想定する環境に対する仮定

想定する環境に対し、それぞれ以下のように仮定を置く。

**情報センタ（サーバ）に対する仮定** サーバは無線ネットワークを介して全ユーザの出発地と出発時刻、希望する複数の目的地と時間制約、重要度を収集し、各ユーザのスケジュール算出後、ネットワークを介して配送する。サーバはユーザからの入力がある度に、各目的地に配置されているEVの予約状況や台数、充電率を確認した上でスケジュールを算出する。サーバがユーザの希望を満たすスケジュールを算出できない場合は、ユーザにスケジュールの変更を促す。

**ユーザに対する仮定** ユーザは携帯電話などの通信端末を利用し、あらかじめ訪問を希望する目的地群、重要度、出発時刻、最終目的地への希望帰着時間をシステムに入力する。

**地図データに対する仮定** 本研究では地図データを道路網を示すグラフとして表現する。地図データの交差点をノード、交差点を結ぶ道路をリンクとする。各ノードにはユーザが訪問する目的地、各リンクには距離、法定速度、重み（劣化係数と呼ぶ）を定義する。ノード間を移動するEVは、常にノードに設定されている法定速度で移動すると仮定する。また劣化係数を利用して、渋滞がEVの航続距離、移動時間に与える影響を考慮する。本手法で定義する劣化係数について述べる。

- **混雑度劣化係数** ノード間の混雑度を表す重みを時間毎定義したものをとする。この劣化係数が大きい程、道路の混雑度が高く、EVの移動時間は長くなり、消費電力量も多くなる。また、時間に応じて劣化係数を定義しているため、同じリンクであってもEVが通過する時間によって混雑度が異なり移動時間、消費電力量は変化する。

**目的地に対する仮定** 目的地にはEVの充電ブースを設

置した場所と、設置していない（充電できない）場所が存在する。また各目的地には、あらかじめ複数のEVを配置し、ユーザはEVの充電ではなく、乗換を行い次の目的地へ移動できる。ユーザは目的地に到着後、目的地に設定されているサービス（観光、EVの充電・乗換など）を受け終わるまでの時間を消費し、次の目的地へ移動する。

**充電ブースに対する仮定** ユーザが電力残量の少ないEVを充電する際、EVと各目的地に設置された充電ブースのプラグを接続し充電を行う。充電ブースには単位時間あたりの充電電力量が設定されている。

**EVに対する仮定** 本研究ではすべて同モデルのEVを利用する。EVの消費電力量は3.4に示した方法で決定する。消費電力量を計算する際、地図データに設定されている法定速度、混雑度劣化係数を利用する。

**スタッフに対する仮定** ユーザが次の目的地を目指す際、現在の目的地にEVが配置されている必要がある。本研究では、目的地毎のEV台数の偏りの解消や、目的地を訪れるユーザの増加に備えるためスタッフがEVの配車を行うと仮定する。また、配車を行うスタッフは限りなく存在すると仮定している。

#### 4.3 問題定義

##### 4.3.1 入力

入力は、あらかじめ与えられたデータベース入力とユーザ入力からなる。

##### データベース入力

- 地図データ：道路網を示すグラフ  $G = (V, E)$  として与えられる。道路網を構成する交差点をノードを  $v_i \in V$ 、交差点間の道路をリンクとする。ノード  $v_i, v_j \in V$  間のリンク  $e_{ij} \in E$  は、以下の項目を持つ。
  - $dist_{ij}$ ：ノード  $v_i, v_j$  間の距離
  - $speedLimit_{ij}$ ：ノード  $v_i, v_j$  間の法定速度
  - $\theta_{ij}$ ：ノード  $v_i, v_j$  間の道路勾配
  - $congestion_{ij}(t)$ ：時刻  $t$  におけるノード  $v_i, v_j$  間の混雑度劣化係数
- 目的地データ：ユーザの希望目的地の集合を  $D = \{d_1, \dots, d_n\}$  で与える。各目的地  $d_i \in D$  は、以下の項目を持つ。
  - $v \in V$ ： $d_i$  が位置するグラフ上のノード
  - $evNum_i$ ：システム開始時における  $d_i$  のEV台数
  - $plugNum_i$ ： $d_i$  の充電ブース設置数
  - $B_u \in B$ ： $d_i$  に設置される充電ブースの集合
  - $stayTime_i$ ： $d_i$  に滞在する時間
- 充電ブースデータ：EVの充電を行う充電ブースの集合を  $B$  とする。それぞれの充電ブース  $b_i \in B$  は以下の項目を持つ。
  - $d \in D$ ：ブース  $b_i$  が設置されている目的地

- $charge_i(t)$ : 時刻  $t_c$  だけ充電した際の充電電力量
- EV データ: 全 EV の集合を  $W$  とする. 各 EV,  $w_i \in W$  は以下の項目を持つ.
  - $d \in D$ : システム開始時に  $w_i$  が配置される目的地
  - $maxPow_i$ :  $w_i$  の最大電力量
  - $initPow_i$ : システム開始時における  $w_i$  の残り電力量
  - $M_i$ :  $w_i$  の車両総重量
  - $Cd_i$ :  $w_i$  の空気抵抗係数
  - $S_i$ :  $w_i$  の全面投影面積

**ユーザ入力** 全ユーザの集合を  $U$  と表記する. 各ユーザ  $u_i \in U$  は以下の 6 つのデータを入力とする.

- $pd_s$ : 出発地点
- $pd_g$ : 最終目的地
- $pt_s$ : 希望出発時刻
- $pt_g$ : 希望帰着時刻
- $D_u \in D$ : 訪問を希望する目的地の集合
- $imp(d_j)$ :  $d_j \in D_u$  である各目的地の重要度

### 4.3.2 出力

解となるスケジュールは, 提案手法を利用するユーザ数分のユーザスケジュールと提案手法で利用される全 EV の配車スケジュール, 目的地に配置される充電ブースの充電ブーススケジュールで構成される. これら 3 つのスケジュールについて述べる.

**ユーザスケジュール** ユーザスケジュールは, 各ユーザの巡回候補となる目的地のリストを表すスケジュールである. ユーザスケジュールは提案手法を利用するユーザ数分のスケジュールで構成され,  $Su = [s_1^u, s_2^u, \dots, s_n^u]$  で表す.  $s_i^u$  は, ユーザ  $u_i \in U$  のスケジュールであり,  $s_i^u = [d_1^u, d_2^u, \dots, d_n^u]$  と表記する. ここで,  $d_j^u \in D_u$  はユーザ  $u_i$  が  $j$  番目に訪問する目的地である.

**配車スケジュール** 配車スケジュールは, 各 EV が時刻毎に配置される目的地を表すスケジュールである. 配車スケジュールは, 提案手法で利用される EV 分のスケジュールで構成され,  $Sw = [s_1^w, s_2^w, \dots, s_n^w]$  で表す.  $s_i^w$  は, EV,  $w_i \in W$  のスケジュールであり,  $s_i^w = [d_1^w, d_2^w, \dots, d_n^w]$  と表記する. ここで,  $d_j^w \in D$  は EV,  $w_i$  が  $j$  番目に訪問する目的地である.

**充電ブーススケジュール** 充電ブーススケジュールは, 各充電ブースが時刻毎にどの EV を充電するかを表すスケジュールである. 充電ブーススケジュールは, 提案手法で利用されるステーション分のスケジュールで構成され,  $Sd = [s_1^d, s_2^d, \dots, s_n^d]$  で表す.  $s_i^d$  は, ステーション  $d_i \in D$  のスケジュールであり,  $s_i^d = [w_1^d, w_2^d, \dots, w_n^d]$  と表記する. ここで,  $w_j^d \in W$  はステーション  $d_i$  が  $j$  番目に充電する EV である.

**制約条件** 本研究では, 3.4 で示した消費電力モデルと混雑度劣化係数を利用して EV の走行に伴う消費電力量を推定する. ここで, ユーザが EV,  $w_k \in W$  に乗車し, 目

的地  $d_j, d_{j+1} \in D_u$  間を走行した場合の  $w_k$  の消費電力量について考える. まず, 隣接したノード  $v_i, v_{i+1} \in V$  を結ぶリンク  $e_{i,i+1} \in E$  の消費電力量を求める.  $e_{i,i+1}$  における登坂抵抗  $F_{ge_{i,i+1}}$  は 3.4 の式 (4) に勾配  $\theta_{ij}$  を利用して, 式 (9) のように与えられる.

$$F_{ge_{i,i+1}} = Mg \sin \theta_{i,i+1} \quad (9)$$

$F_{ge_{i,i+1}}$  を利用して  $e_{i,i+1}$  における  $w_k$  の走行抵抗  $F_d(e_{i,i+1})$  は式 (10) のようになる.

$$F_d(e_{i,i+1}) = F_r + F_a + F_g + F_{ge_{i,i+1}} \quad (10)$$

$F_d(e_{i,i+1})$  を利用して  $e_{i,i+1}$  における消費電力  $P_d(e_{i,i+1})$  は式 (11) のように与えられる.

$$P_d(e_{i,i+1}) = F_d(e_{i,i+1}) \times speedLimit_{i,i+1} \quad (11)$$

エネルギー回生を考慮した消費電力  $P_e(e_{i,i+1})$  は式 (12) のようになる (3.4 の式 (7) に相当).

$$P_e(e_{i,i+1}) = \begin{cases} \frac{1}{\eta} \times P_d(e_{i,i+1}) & \text{if } P_d(e_{i,i+1}) \geq 0 \text{ (力行)} \\ \eta \times P_d(e_{i,i+1}) & \text{otherwise (回生)} \end{cases} \quad (12)$$

$P_e(e_{i,i+1})$  を利用して,  $w_k$  が  $e_{i,i+1}$  を時刻  $t_s$  から  $t_g$  まで走行した際の消費電力量を求める. 3.4 では出発時刻から到着時刻までの速度を車両から取得し, 瞬間消費電力から消費電力量を推定している. (式 (6)~(8)). 本研究では,  $w_k$  は  $e_{i,i+1}$  を一定の速度  $speedLimit_{i,i+1}$  で走行すると仮定しているため  $e_{i,i+1}$  における消費電力量は  $\sum_{t=t_s}^{t_g} P_e(e_{i,i+1}) \times congestion_{i,i+1}(t)$  である. ここで, 混雑度劣化係数  $congestion_{i,i+1}(t)$  により渋滞が消費電力に与える影響を考慮している. これより,  $w_k$  が目的地  $d_j, d_{j+1}$  を移動した際の消費電力量  $cons(d_j, d_{j+1})$  は式 (13) のようになる.

$$cons(d_j, d_{j+1}) = \sum_{i=vid_1}^{vid_n} \sum_{t=t_s}^{t_g} P_e(e_{i,i+1}) \times congestion_{i,i+1}(t) \quad (13)$$

ここで,  $vid$  は  $d_j$  から,  $d_{j+1}$  までに通過するノード  $v \in V$  の  $id$  である. 例えば, ノード  $v_1 \in V$  である目的地  $d_1 \in D$  から,  $v_2 \in V$  を通過し, ノード  $v_3 \in V$  である目的地  $d_2 \in D$  へ移動する場合の消費電力量  $cons(d_1, d_2)$  は  $v_1, v_2$  間の消費電力量と  $v_2, v_3$  間の消費電力量の和となる.

次にユーザが目的地  $d_j$  に到着後,  $w_k$  を時間  $t_c$  だけ充電し, 次の目的地  $d_{j+1}$  へ移動する場合の  $w_k$  の残り電力量  $RemPow(d_j)$  についてを考える. 目的地  $d_j$  にて  $w_k$  を時間  $t_c$  だけ充電した場合の充電電力量は  $charge(t_c)$  なので  $RemPow(d_j)$  は式 (14) で与えられる.

$RemPow(d_j) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} Min( \\ \quad RemPow(d_{j-1}) - cons(d_{j-1}, d_j) + charge_j(t_c), \\ \quad maxPow_k \\ ) \\ \quad initPow_k \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{if } j > 0 \\ \text{otherwise} \end{array} \quad (14)$$

ユーザ  $u_m \in U$  のユーザスケジュール  $s_m^u$  は以下の制約を満たさなければならない。

- 目的地間を走行している EV の残り電力量は負の値にならない。EV の残り電力量に関する制約条件を式 (15) で示す。

$$\forall d_j, d_{j+1} \in D_u, cons(d_j, d_{j+1}) \leq RemPow(d_j) \quad (15)$$

- ユーザは希望帰着時刻までに最終目的地へ到着する。時間制約条件を式 (16) に示す。

$$\sum_{d_j \in D_u} \left[ \sum_{t=t_s}^{t_g} \frac{dist_{j,j+1}}{speedLimit_{j,j+1}} \times congestion_{j,j+1}(t) \right] + \sum_{d_j \in D} stayTime_j \leq u_i.pt_g - u_i.pt_s \quad (16)$$

$u_i.pt_g$  と  $u_i.pt_s$  はそれぞれ希望帰着時刻と出発時刻である。

- $u_m$  がリンク  $e_{i,i+1} \in E$  を移動する際、 $u_m$  と対応する EV、 $w_k \in W$  が必ず存在する

$$\exists w_k \in W, s_m^u.w(e_{i,i+1}) = w_k \quad (17)$$

ここで、 $s_m^u.w(e_{i,i+1})$  は  $u_m$  のユーザスケジュールにおいてリンク  $e_{i,i+1}$  で乗車している EV を表す。

- 時刻  $t$  において  $w_k$  を充電する際  $w_k$  は  $d_j$  に滞在する。

$$\exists d_j \in D, s_m^u.d(t) = d_j \quad (18)$$

ここで、 $s_j^w.d(t)$  は  $w_j$  の配車スケジュールにおいて時刻  $t$  に滞在する目的地を表す。

**目的関数** ユーザは、各目的地の選好度に応じて、それぞれ異なった重要度を設定する。ユーザ  $u_i \in U$  のスケジュール  $s_i^u$  の満足度を与える関数  $Sat(s_i^u)$  を式 (19) で定義する。

$$Sat(s_i^u) = \sum_{d_j \in D_u} imp_u(d_j) \quad (19)$$

本研究の目的はユーザ入力を与えられたときに、全ユーザの満足度の合計を最大化するスケジュールを算出することである。以上のことから本問題の目的関数を式 (20) のように定義する。

$$Maximize \sum_{u_i \in U} Sat(s_i^u) \quad (20)$$

## 5. 多数ユーザ同時巡回スケジュールリング手法

### 5.1 提案手法の概要

本手法はユーザスケジュール算出部と、EV の配車スケジュール算出部から構成される。まずユーザスケジュール算出部では、各ユーザのユーザスケジュール（経路、EV の乗換・充電予定など）を算出する。次に、配車スケジュール算出部ではユーザスケジュールを満たすために EV の配車スケジュール及び各目的地の充電ブースについて時刻毎に充電を行う EV を決定する充電ブーススケジュールを算出する。以下、これらについて詳しく述べる。

### 5.2 ユーザスケジュール算出部

ユーザスケジュール算出部では、各ユーザに対して希望する目的地を高い満足度で巡回できるスケジュールを算出する。このユーザスケジュールを算出するためには2つの手順が必要である。

1つ目は各目的地間を結ぶ経路の探索である。提案するアルゴリズムではA\*アルゴリズムを利用する。

2つ目は指定した目的地間を巡回する順序の決定である。これは、巡回セールスマン問題（TSP）に出発・帰着点やEVの電力残量、充電時間、混雑度、時間制約等を含めたものであり探索空間が指数的に増大するため、現実的な時間で最適解を求めることは困難である。そこで、実用的な時間で計算を行うために準最適解を求めることができる手法を使用する。TSPの準最適解を求めるアルゴリズムには様々なものがあるが、本手法では遺伝的アルゴリズムを利用する。

遺伝的アルゴリズムは、探索空間の集団内に複数の近似解を持っている。したがって、ユーザに複数の経路を提示し、ユーザ側でそれらの中から好みにあった経路を案内することが可能となる。また、解探索を一定時間で打ち切っても解候補が得られるため、実用的な時間に合わせた探索が可能になる。

**A\*アルゴリズムによる最短経路探索** 全ての目的地間の最短経路をA\*アルゴリズムで求める。ヒューリスティック値として、目的地までの直線距離を使用する。これを元に求めた経路の距離を、想定する移動速度で割った値を移動時間として利用する。

#### 遺伝的アルゴリズムによる巡回順序の決定

- (1) ユーザが指定した目的地集合に対する巡回順序を遺伝情報として持つ個体群を生成し、個体の評価を行う
- (2) エリート個体を選択
- (3) 選択と交叉
- (4) 2-opt, 目的地追加による突然変異
- (5) 個体の評価

(6) (2) から (5) までを繰り返す

**染色体表現** 本アルゴリズムでは、訪れる目的地の順序を変長のリスト構造を持った染色体としてコーディングする。リストの要素は目的地を示すノードとし、目的地を巡回する順序で並んでいる。

**選択** 個体群の中で最大の評価値を持った個体をエリートとして保存する。次にルーレット選択により個体を選択し、エリート個体を加え新しい世代の個体群とする。

**交叉** 親1と親2の染色体の1地点をランダムに選び、一点交叉を行う。このとき、交換する染色体に同じ目的地が含まれていたなら削除する。これによって同じ目的地が複数含まれないようにする。また、これにより一部の目的地を削除することも可能である。

**突然変異** 個体群の多様性を維持するために、2-opt法と目的地追加の突然変異の操作を行う。2-opt法は、同一染色体上でランダムに選んだ2地点を交換する操作である。目的地追加は、交叉によって短くなった染色体に、ランダムな位置に、削除された目的地を追加していく操作を行う。

**個体の評価** 前章で述べた式(19)に従って個体の評価値を計算する。

### 5.3 配車スケジュール算出部

配車スケジュール算出部では、まず各EVが時刻毎に配置される目的地を表した配車スケジュールを算出する。その後、配車スケジュールをもとに、各充電ブースが時刻毎に充電するEVを表した充電ブーススケジュールを算出する。

**配車スケジュール算出の概要** 配車スケジュールは、各EVに対して時刻毎に配置される目的地を表したスケジュールである。本手法では、各目的地毎に配置されたEVの台数、充電ブースの稼働率から、将来どれだけのユーザーに対して、乗り換えるEVを提供できるかを示す余裕度を定義する。余裕度が高いほど、将来多くのユーザーに乗換用のEVを提供できる。この余裕度を目的関数とし、各EVの余裕度の合計が最大になるよう配車スケジュールを算出する。本手法では、各目的地の余裕度を配置されたEV台数と充電ブースの稼働率の加重平均とする。

充電ブーススケジュールは、各充電ブースに対して時刻毎に充電するEVを表したスケジュールである。本手法では、各充電ブーススケジュールに到着したEVから充電を行う。したがって、充電ブーススケジュールは配車スケジュールから一意に決定される。

ユーザースケジュール算出が増加する度に、各目的地のEV台数に偏りが生じるため、配車スケジュール算出部は、バックグラウンドで常に計算が行なわれている。また、配車スケジュールをもとに目的地間のEVの移動をスタッフが行う。

## 6. 評価実験の見通し

提案手法の有効性を確認するためシミュレータを実装し、1,000~10,000程度のユーザーに対して実用的な計算時間でユーザースケジュールが算出できるか、またユーザーの満足度を一定以上確保できるか評価する。

### 6.1 実験環境

**地図データ** 本手法では、地図データは日本道路交通情報センター(JARTIC)が公開しているデータを利用する[13]。JARTICは一般道路、高速道路における渋滞情報を公開しており、JARTICの地図データの交差点をノード、交差点を結ぶ道路をリンクとしたグラフで表現し利用する。JARTICが公開している渋滞情報を参考に、本手法における混雑度に対する劣化係数の値を決定する。道路網上のノード(交差点)数は68、リンク(交差点間の道路)数は108である。

### 6.2 評価項目

提案手法の有効性を確認するため以下の項目に基づき評価を行う。

- **平均満足度** 全ユーザーの満足度の平均値。ユーザーは希望する目的地を制約時間内で訪問できた場合、ユーザーの設定した重要度に応じた満足度を得られる。各ユーザーの平均満足度を算出し、システムの有効性を評価する
- **平均計算時間** ユーザーがリクエストを入力後、システムからスケジュールを与えられるまでの平均時間を測定し、ユーザーのストレスにならない演算の最適化を検討する。
- **スケラビリティ** ユーザー数が増加すると、配車スケジュールを算出するうち、各目的地毎のEV台数に偏りが生じシステムのサポートできる最大ユーザー数が増えると考えられる。そのため、提案システムのサポートできる最大のユーザー数を測定する。

## 7. 考察とまとめ

本論文では、多数のユーザーがEVを共同利用する環境において、EVの効率的運用スケジュールリング手法を提案した。今回はスタッフがEVの配車を行うと仮定し、スタッフの数に制限を加えていない。しかし、スタッフの件費などを考慮すると、スタッフの数に制限がないことは現実的ではない。今後は、各目的地におけるスタッフの数に制限を加えた上でEVの配車スケジュールを決定する。

また、今後はパークアンドライドの導入を検討している。パークアンドライドを導入することで、ユーザーは出発地点から最寄り駅までEVで移動し、目的地までは公共交通機



関で移動できる。公共交通機関は一度で多くのユーザを運べるため、各目的地毎の EV 台数に余裕ができる、EV の充電時間を確保ができるなどのメリットが期待できる。一方で、ユーザはパークアンドライド方式を利用するための料金を払う必要があるが、支払う料金が增えることは一般的に望ましくない。したがって、パークアンドライド導入する場合、ユーザスケジュール算出部ではユーザが支払う料金を満足度に反映し、希望する目的地を巡回でき、かつ支払う料金もできるだけ少なくするスケジュール算出を目指す。

## 参考文献

- [1] 山本俊行, 木内大介, 森川高行: “自動車共同利用による車両数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).
- [2] 武内博孝, 谷内利明: “カーシェアリングにおける小型 EV 導入による CO<sub>2</sub> 削減効果”, 信学技報, Vol.110, No.65, pp.37-42, (2010).
- [3] Kuriyama, H., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K., Ito, M.: “Congestion Alleviation Scheduling Technique for Car Drivers Based on Prediction of Future Congestion on Roads and Spots”, Intelligent Transportation System Conference, 2007. ITSC, pp. 910-915.
- [4] 中山晶一郎, 山本俊行, 梅木亮, 北村隆一: “電気自動車の共同利用システムの効率化に関するシミュレーション分析: 京都パブリックカーシステムを事例として”, 土木計画学研究・講演集, No.24, (2001).
- [5] 山本俊行, 中山晶一郎, 北村隆一: “再配車を必要とし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”, 土木計画学研究・講演集, No.786, pp.11-20, (2005).
- [6] 伊志嶺拓人, 赤嶺有平, 遠藤聡志: “通勤車利用型カーシェアリングシステムによるモーダルシフト効果のシミュレーション分析”, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No.10, pp.1986-1994, (2010).
- [7] Miguel, F.: “Vehicle Routing Problem for Emissions Minimization”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp. 1-7, (2010).
- [8] Hunston, C., Venayagamoorthy, G.K., Corzine, K.A., : “Intelligent Scheduling of Hybrid and Electric Vehicle Storage Capacity in a Parking Lot for Profit Maximization in Grid Power Transactions”, Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE, pp. 1-8, (2008).
- [9] 笛田尚希, 萩本真太郎, 出口達, 富井尚志: “電気自動車の走行ログを蓄積する DB の構築と EV 消費電力推定手法”, 第 4 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2012), (2012).
- [10] 安土光男, 福田達也, 大澤進, 藤井馨一郎: “EV の走行可能範囲を予測するナビシステム”, Pioneer R&D, Vol.20, No1, pp.1-7, (2011).
- [11] 清水太郎, 國府方久史, 松本修一, 川嶋弘尚: “道路勾配などを考慮した電気自動車の最適経路問題”, 社会技術研究論文集, Vol.8, pp.53-59, (2011).
- [12] 栗栖嵩, 高橋清, 松久浩: “EV の航続可能範囲の視覚化と観光周遊行動分析に基づく充電施設配置に関する研究”, 土木計画学研究, Vol.44, (2011).
- [13] 日本道路交通情報センター: JARTIC 入手先 (<http://www.jartic.or.jp/>)(2013.05.17).