

# Optimal fast charging station locations for electric ridesharing with vehicle-charging station assignment

Tai-Yu Ma, Simin Xie, *Transportation Research Part D*, Vol.90 pp.1-15 , 2021

交通・都市・国土学研究室4年 平松正吾

# 研究のサマリー・良かった点・悪かった点

- 研究のサマリー

- 非個人所有のEVを題材に充電戦略を管理できる状況を仮定し、二段階最適化によって充電マネジメントと充電場所の最適配置を一緒に考慮した
- ルクセンブルクのバス事業者を題材にケーススタディを行った

- 良かった点

- 実際の都市の調査結果をもとにしたケーススタディでモデルの有用性を示す結果を出せたこと

- 悪かった点

- 単一レベルの充電機を配置するというモデルなので、「高価な高速充電機と安価な低速充電機を予算制約の中で配置する」といった分析までは至っていないこと

# 新規性・有用性・信頼度

- 新規性

- 個人所有でないEVを対象としていること
- 充電マネジメントについて同時に考慮していること

- 有用性

- アルゴリズムが簡潔
- とりわけパワフルでない計算機で10分程度で計算が完了できている

- 信頼性

- よく使われるNCPやFCFSポリシーと比較している
- 環境面の分析は、発電時のCO<sub>2</sub>排出量を考慮していない点で信頼性に欠ける

# 研究の前提（用語整理）

## PEVとe-fleet

- PEV (private electric vehicles)
  - 個人所有の電気自動車
  - 特徴：夜中に充電、毎日の行動のためのトリップチェーン
- e-fleet
  - シェア交通やオンデマンド交通のための、民間所有の電気自動車
  - 特徴：長い充電時間、充電マネジメントが必要

## 充電ステーションと充電ポート

- 充電ステーション
  - 充電機や充電ポートが集積している場所。
- 充電機・充電ポート
  - 高々1台の車が充電をする場所

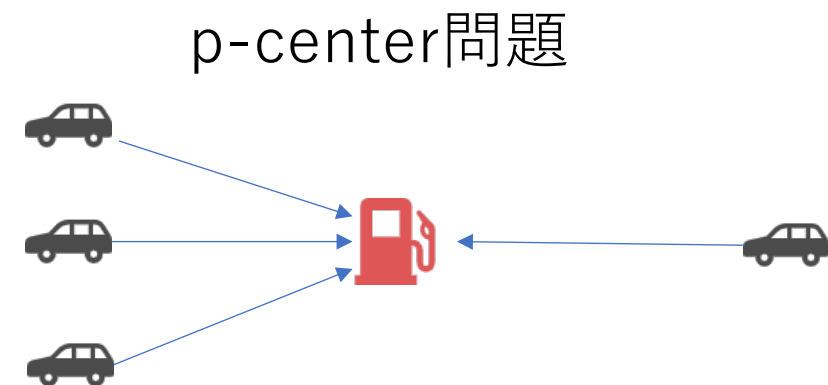
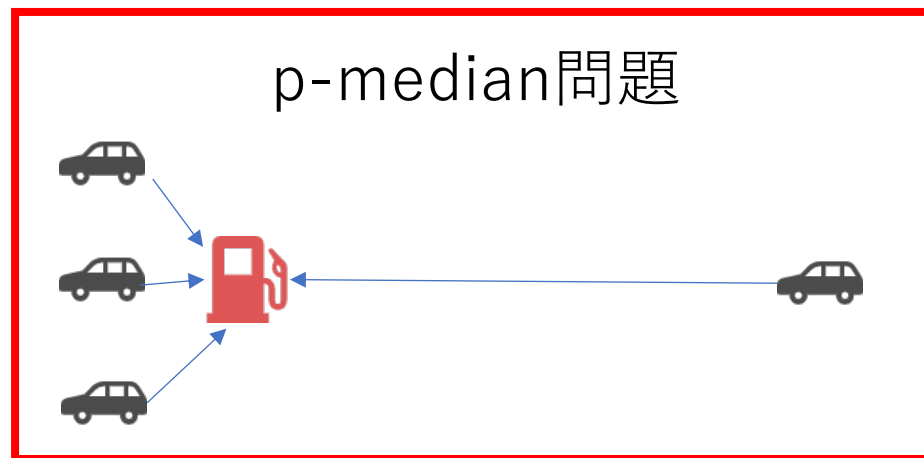
# 施設配置問題とは

配置することができる施設の集合と施設に割り当てる対象（人など）の集合を考え、配置する施設の選択および割り当てを行う問題。（NTT Data）

この研究においては…

配置する施設　：EVの充電場所

割り当てる対象　：e-fleet



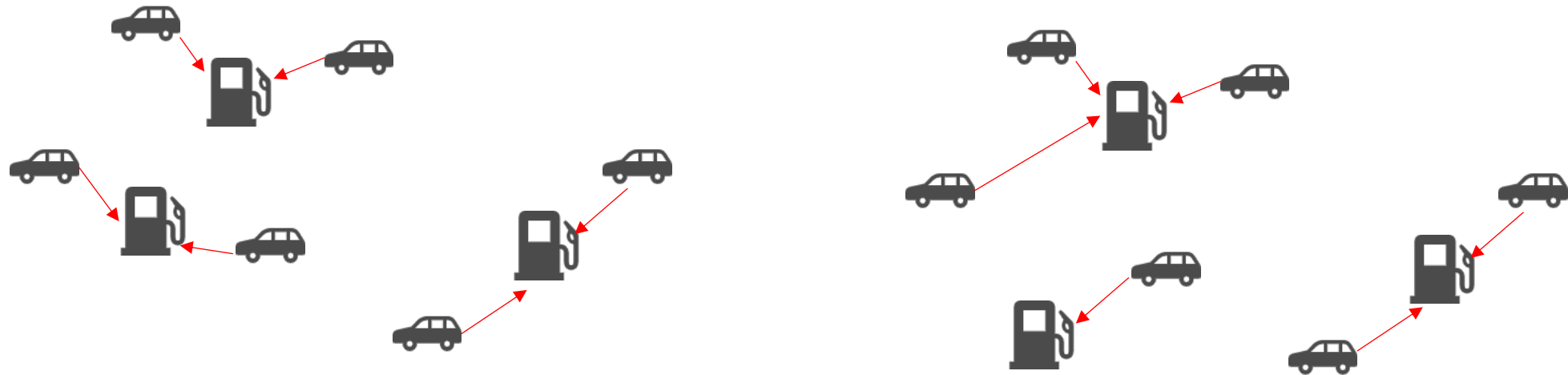
# 二段階最適化問題

- 上位問題：交通計画者側の政策決定モデル
  - この研究では「充電インフラの最適配置問題」
- 下位問題：利用者の行動記述モデル
  - この研究では「EVと充電ステーションの割り当てマネジメントを伴う動学的乗合問題」

# 二段階最適化問題

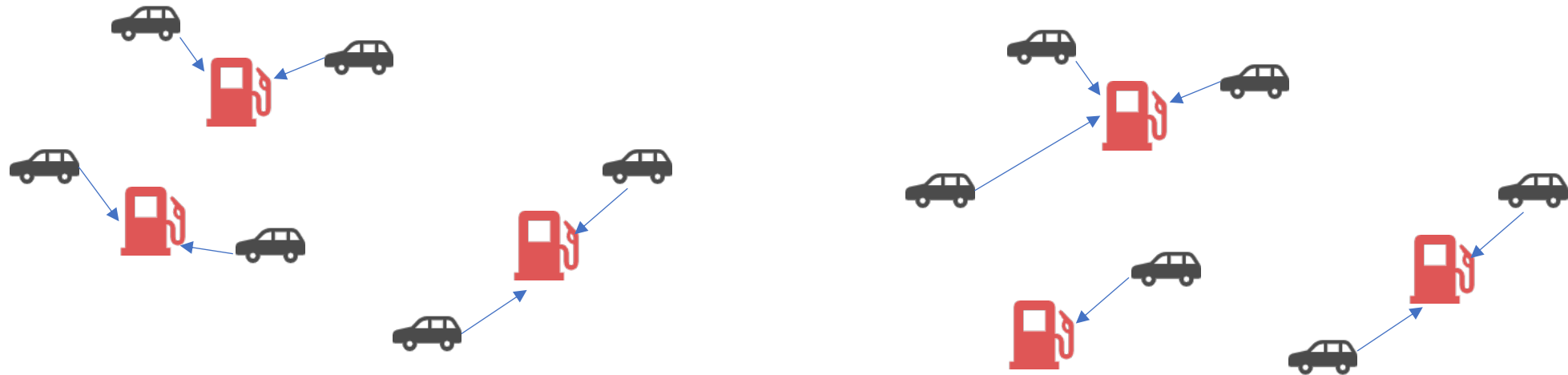
- 上位問題：交通計画者側の政策決定モデル
  - この研究では「充電インフラの最適配置問題」

- 下位問題：利用者の行動記述モデル
  - この研究では「EVと充電場所の割り当てマネジメントを伴う動学的乗合問題」



# 二段階最適化問題

- 上位問題：交通計画者側の政策決定モデル
  - この研究では「充電インフラの最適配置問題」
- 下位問題：利用者の行動記述モデル
  - この研究では「EVと充電場所の割り当てマネジメントを伴う動学的乗合問題」





# Index

1. Introduction

2. Related work

3. Methodology (手法)

4. Computational Study

5. Discussion and conclusion

# 研究の前提（用語整理）（再掲）

## PEVとe-fleet

- PEV (private electric vehicles)
  - 個人所有の電気自動車
  - 特徴：夜中に充電、毎日の行動のためのトリップチェーン
- e-fleet
  - シェア交通やオンデマンド交通のための、民間所有の電気自動車
  - 特徴：長い充電時間、充電マネジメントが必要

# 既往の研究と位置付け

主に消費者のアクセス時間を最小化するようなp-median問題

- Serra and Marianov, 1998
- Drezner and Hamacker, 2002
- 複数タイプの充電機を考慮して拡張
  - Wang and Lin, 2013

# 既往の研究

これまでの研究はPEVが対象

- Shen et al., 2019
- 確率的な運転行動を考慮した  
長期的充電インフラ拡大計画の最適化モデル
  - Davidov and Pantos, 2017
- トリップチェーン行動を考慮した  
充電可能台数を最大化する高速充電インフラ配置
  - Wu and Sioshansi, 2017
- 利用者均衡モデルを考慮した  
複数タイプの充電ステーション配置の三段階最適化シミュレーション
  - Liu and Wang, 2016
    - 上位：複数タイプの充電ステーション配置、社会福祉を最大化
    - 中位：購入するEVタイプの選択（プラグを挿すorワイヤレス）
    - 下位：利用者均衡下での、ツアーを基にしたトラベル需要と充電ニーズ

# 既往の研究

e-fleetを対象にした研究も、充電ステーションの最適配置を計画する際に充電マネジメント(EVの充電場所への割り当て)について取り組んでいない

- EVのカーシェア
  - Brandstätter et al., 2017
- e-taxi
  - Jung et al., 2014
  - Asamar et al., 2016
- 自動運転車のシェア
  - Zhang et al., 2019

↑ 非協調型の充電ポリシー

# 既往の研究

不確実性下で充電による遅れを最小化するe-fleetの運用

- 充電スケジュールモデルの導入
  - Yang et al., 2017
- 部分的に充電するというポリシーの提案
  - Yuan et al., 2019
    - ゾーンベースのシステム
- リアルタイムでe-taxiの充電ステーションを推奨するシステム
  - Tian et al., 2016
    - e-taxi全体の充電スケジュールを協調させていない

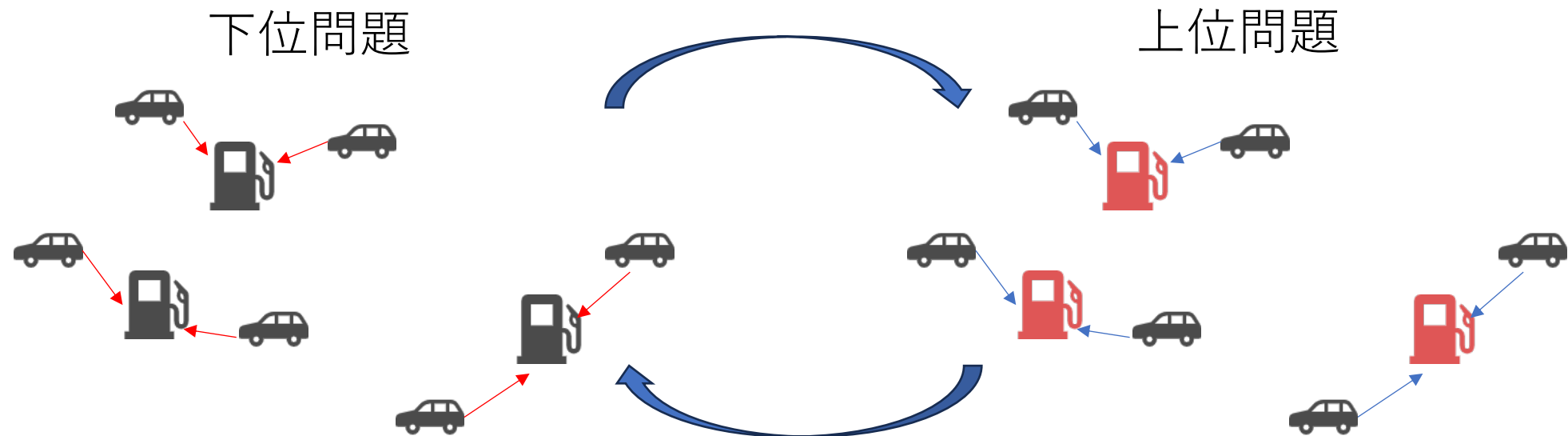
既存の充電ステーションの最適配置モデルは、  
動学的な充電マネジメントを組み入れられていない

# Index

1. Introduction
2. Related work
3. Methodology (方法論)
4. Computational Study
5. Discussion and conclusion

# 二段階最適化問題

- 上位問題：交通計画者側の政策決定モデル
  - この研究では「充電インフラの最適配置問題」
- 下位問題：利用者の行動記述モデル
  - この研究では「EVと充電ステーションの割り当てマネジメントを伴う動学的乗合問題」





# 上位問題（充電インフラの最適配置問題）

$$\min Z(\mathbf{u}) = \sum_v (T_v^A(\mathbf{u}) + T_v^G(\mathbf{u}) + T_v^W(\mathbf{u}))$$

subject to

$$\sum_{k \in K} u_k = U$$

$$0 \leq u_k \leq u_k^+, k \in K$$

$$u_k \in 0 \cup \mathbb{Z}^+$$

# 上位問題（充電インフラの最適配置問題）

$$\min Z(\mathbf{u}) = \sum_v (T_v^A(\mathbf{u}) + T_v^G(\mathbf{u}) + T_v^W(\mathbf{u}))$$

目的関数 $Z(\mathbf{u})$ は「無駄な時間」

$\mathbf{u}$ は各充電ステーションに高速充電機を配置する個数のベクトル

$T_v^A(\mathbf{u})$ ：車 $v$ の充電ステーションまでのアクセス時間

$T_v^G(\mathbf{u})$ ：車 $v$ の充電時間

$T_v^W(\mathbf{u})$ ：車 $v$ の充電ステーションでの順番待ち時間

# 上位問題（充電インフラの最適配置問題）

## 制約条件①

高速充電機の総数はU

$$\sum_{k \in K} u_k = U$$

## 制約条件②

各充電ステーションに導入する高速充電機の個数は最大値 $u_k^+$ 以下

$$0 \leq u_k \leq u_k^+, k \in K$$

## 制約条件③

各充電ステーションに導入する高速充電機の個数は非負整数

$$u_k \in 0\mathbb{Z}^+$$

# 下位問題

## 仮定

- 電力消費は移動距離に比例する
- 車のバッテリー残量が閾値（20%）を下回ると、  
配備センターにリクエストが飛ぶ
- 配備センターは充電ステーションの状況を把握
  - 利用できる充電ポートの数
  - 充電ポートの種類（高速か否か）
  - 各充電ポートの充電スケジュール

## 方針

- 24時間を時間枠に分解して、  
転々とする時間枠の中で充電マネジメント問題を解く

## 下位問題（動学的乗合問題）

e-fleetの既存ルートに新たなリクエストを挿入した場合の追加コストが最小になるような非近視眼的な配備ポリシーを利用

$$\{v^*, x_t^{v^*}\} = \operatorname{argmin}_{v \in V'} [c(v, \overline{x}_t^v) - c(v, x_t^v)]$$

where

$$c(v, x) = \alpha T(v, x) + (1 - \alpha) [\beta T(v, x)^2 + \sum_{n \in P_v} \overline{Y}_n(v, x)]$$

$c(v, x)$  : 運用コスト

$x$  : サービスツアー

$v$  : e-fleet

$\overline{x}_t^v$  : ツアー  $x_t^v$  に新たなリクエストを挿入した後の  $v$  のサービスツアー

$V'$  : 全乗客を運び終わった時に充電が十分、かつ充電の予定がない車の集合

# 下位問題（動学的乗合問題）

$$c(v, x) = \alpha T(v, x) + (1 - \alpha) [\beta T(v, x)^2 + \sum_{n \in P_v} \bar{Y}_n(v, x)]$$

運用コスト 客の不便さ

$T(v, x)$  : ツアー  $x$  の旅行時間

$\bar{Y}_n(v, x)$  : 客  $n$  の待ち時間と車内での旅行時間

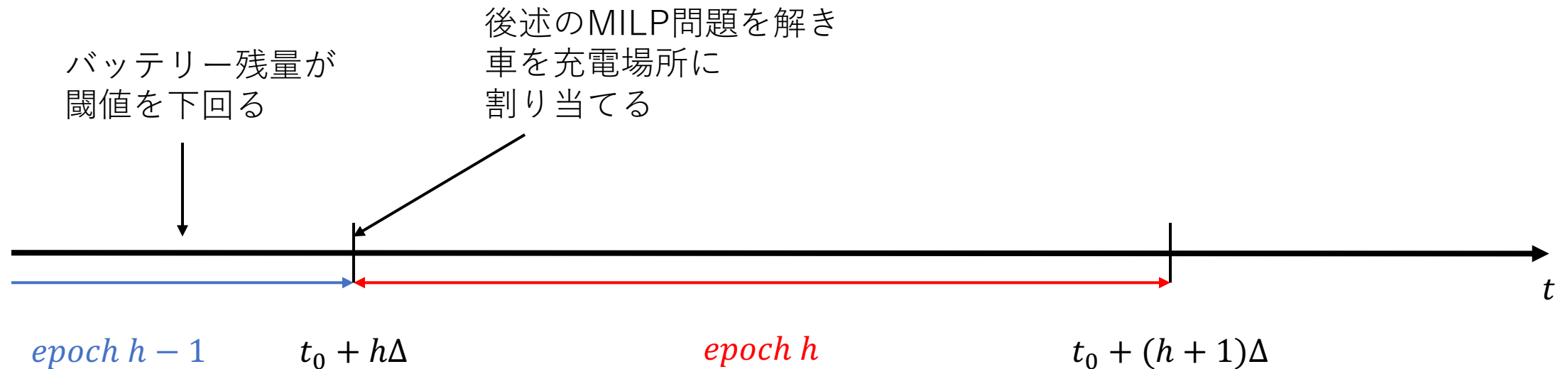
$P_v$  : e-fleet  $v$  に割り当てられた客の集合

$\alpha$  : 0 から 1 の間の重み。運用コストと客の不便さのトレードオフを示す

$\beta$  : 0 から 1 の間のパラメータ。  
現状の車配備の決め方から考えられる将来的な遅れ

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

1日を充電決定期 $H$ に分割して考える。 $H$ の間隔は $\Delta$ （固定）



# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

$$\min F(X, Y, W) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} X_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} / \varphi_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} W_{ij}$$

subject to

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = 1, \forall i \in I$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \leq 1, \forall j \in J$$

$$e_{min} \leq e_i - \mu d_{ij} X_{ij} + M(1 - X_{ij}), \forall i \in I, j \in J$$

$$e_{max} \leq Y_{ij} + e_i - \mu d_{ij} X_{ij} + M(1 - X_{ij}), \forall i \in I, j \in J$$

$$Y_{ij} \leq M X_{ij}, \forall i \in I, j \in J$$

$$t_j^A - t_{ij} X_{ij} - M(1 - X_{ij}) \leq W_{ij}, \forall i \in I, j \in J$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J$$

$$Y_{ij} \geq 0, W_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J$$



# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

$$\min F(X, Y, W) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \underbrace{t_{ij} X_{ij}}_{\text{充電ポートに到達するまでの時間}} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \underbrace{Y_{ij} / \varphi_j}_{\text{充電時間}} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \underbrace{W_{ij}}_{\text{充電ステーションでの順番待ち時間}}$$

$F(X, Y, W)$  : 「無駄な時間」の合計

$t_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ に到達するまでの時間

$X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0。

$Y_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ で充電される電気エネルギー

$\varphi_j$  : 充電ポート  $j$ で単位時間に充電できる電力

$t_{ij}$  : e-fleet  $i$ の充電ポート  $j$ での順番待ち時間（人工的に与える）

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

【 $|I| < |J|$ の時】

制約条件①

充電が必要などのe-fleet  $i$ も1つの充電機に割り当てられる

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = 1, \forall i \in I$$

制約条件②

1つの充電機に割り当てられるe-fleetは高々1台

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \leq 1, \forall j \in J$$

$X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0。

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

【 $|I| > |J|$ の時】

制約条件①

充電が必要などのe-fleet  $i$ は高々1つの充電機に割り当てられる

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq 1, \forall i \in I$$

制約条件②

1つの充電機に割り当てられるe-fleetは1台

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = 1, \forall j \in J$$

$X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0。

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

## 制約条件③

充電ステーションに到達した時のバッテリー残量が、  
バッテリー残量の最低値 $e_{min}$ を下回らない

$$e_{min} \leq e_i - \underline{\mu d_{ij} X_{ij}} + M(1 - X_{ij}), \forall i \in I, j \in J$$

充電ポートに到達する  
までのバッテリー使用量

- $e_i$  : epoch  $h$ 開始時のe-fleet  $i$ のバッテリー残量
- $\mu$  : 単位距離走行あたりの電気エネルギー使用量
- $d_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ に到達するまでに走る距離
- $X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0。
- $M$  : 大きな正の値（ $X_{ij} = 0$ の時にこの制約条件を無効化する）

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

## 制約条件④

充電を終えて充電ポートから帰った後のバッテリー残量が、 $e_{max}$ を以上

$$e_{max} \leq \underbrace{Y_{ij} + e_i}_{\text{充電後のバッテリー量}} - \underbrace{\mu d_{ij} X_{ij}}_{\text{充電ポートから帰る間のバッテリー使用量}} + M(1 - X_{ij}), \forall i \in I, j \in J$$

- $e_{max}$  : バッテリーの最大充電レベル
- $Y_{ij}$  : 充電ポートjがe-fleet iに供給する電力量
- $e_i$  : epoch h開始時のe-fleet iのバッテリー残量
- $\mu$  : 単位距離走行あたりの電気エネルギー使用量
- $d_{ij}$  : e-fleet iが充電ポートjから帰る間に走る距離
- $X_{ij}$  : e-fleet iが充電ポートjに割り当てられる時1。それ以外は0。
- $M$  : 大きな正の値（ $X_{ij} = 0$ の時にこの制約条件を無効化する）

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

## 制約条件⑤

充電ポートにe-fleetが割り当てられた場合のみ

充電ポートにて供給される電力量が正の値を取る

$$Y_{ij} \leq MX_{ij}, \forall i \in I, j \in J$$

$Y_{ij}$  : 充電ポートjがe-fleet iに供給する電力量

$X_{ij}$  : e-fleet iが充電ポートjに割り当てられる時1。それ以外は0。

M : 大きな正の値（ $X_{ij} = 1$ の時にこの制約条件を無効化する）

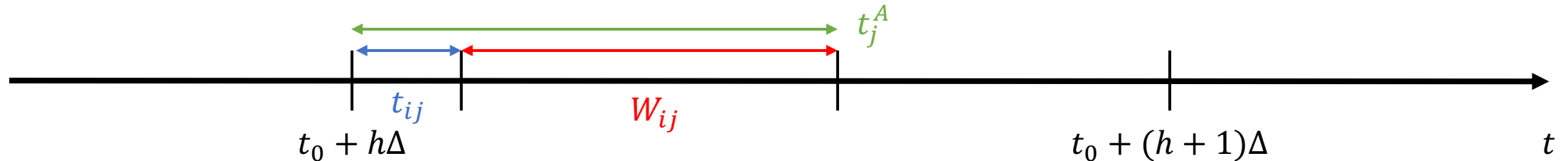
# 下位問題 (EVと充電場所の割り当てマネジメント)

## 制約条件⑥

e-fleet  $i$ の充電ステーション $j$ での順番待ち時間

= (充電ポートが空くまでの時間) - (充電ステーションに着くまでの時間)

$$t_j^A - t_{ij}X_{ij} - M(1 - X_{ij}) \leq W_{ij}, \forall i \in I, j \in J$$



$t_j^A$  : 充電ポート $j$ が空くまでの時間

$t_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ に到達するまでの移動時間

$W_{ij}$  : e-fleet  $i$ の充電ポート $j$ での順番待ち時間

$M$  : 大きな正の値 ( $X_{ij} = 0$ の時にこの制約条件を無効化する)

$X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0

# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

制約条件⑦, ⑧, ⑨

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J$$

$$Y_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J$$

$$W_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J$$

$X_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ に割り当てられる時1。それ以外は0。

$Y_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート $j$ で充電される電気エネルギー

$W_{ij}$  : e-fleet  $i$ の充電ポート $j$ での順番待ち時間



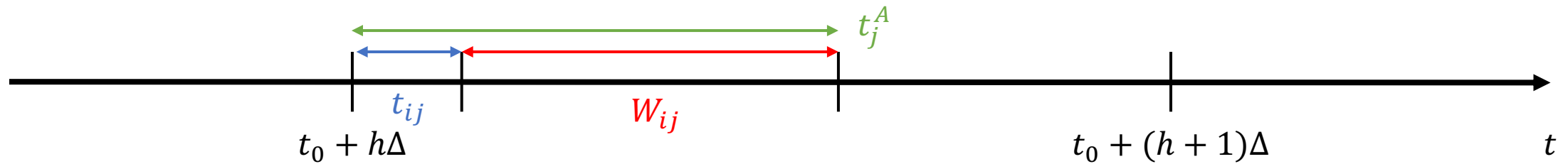
# 下位問題（EVと充電場所の割り当てマネジメント）

このMILP問題（混合整数線形計画問題）はNP-hardである  
→緩和が必要

- ラグランジュ緩和
  - 制約条件式から $Y, Z$ を消去し、 $\sum_{j \in J} X_{ij} \leq 1, \forall i \in I$ の条件を緩和
- サロゲートアシスト最適化アルゴリズム

# 提案ポリシー

- 以上の定式化で提案したポリシーをoptimal charging policy (OCP)と名付ける
  - epoch  $h$ の冒頭で占有されている充電ポートも $J$ は含む
- 派生形としてのOCP-A policy
  - epoch  $h$ の冒頭で占有されている充電ポートを $J$ は含まない



$t_j^A$  : 充電ポート  $j$  が空くまでの時間

$t_{ij}$  : e-fleet  $i$  が充電ポート  $j$  に到達するまでの移動時間

$W_{ij}$  : e-fleet  $i$  の充電ポート  $j$  での順番待ち時間

# 比較対象のポリシー

今回提案したポリシーの比較対象として  
2つの広く使われているポリシー

- nearest charging station policy (NCP)
  - 客を乗せておらずバッテリー残量が閾値（20%）より少ないEVは最も近くて空いている充電ステーションに行く
- first-come-first-served(FCFS) policy
  - EVの無駄な時間を最小化するように、現在の充電ステーションの状態に基づいてすぐに充電場所をRecommendする

# 比較対象のポリシー

## FCFSポリシーの定式化

e-fleet  $v$ が割り当てられる充電ポート  $j^*$ は以下のように決まる

$$j^*(v, t) = \underset{j \in J}{\operatorname{argmin}} \left\{ t_{ij} + \underbrace{\frac{e_{\max} - e_v(j, t')}{\varphi_j}}_{\text{充電にかかる時間}} + \widetilde{W}_{ij}(t) \right\}$$

充電にかかる時間

$t_{ij}$  : e-fleet  $i$ が充電ポート  $j$ に到達するまでの移動時間

$e_{\max}$  : バッテリーの最大充電レベル

$e_v(j, t')$  : 充電ポートに時刻  $t'$ に到達した時のバッテリー残量

$\varphi_j$  : 充電機  $j$ の充電スピード

$\widetilde{W}_{ij}(t)$  : 時刻  $t$ の充電ステーションの占有状況から推測される充電機  $j$ での順番待ち時間

# Index

1. Introduction
2. Related work
3. Methodology (方法論)
4. Computational Study
5. Discussion and conclusion

# コンピュータでの実装

ルクセンブルクのEVを利用したフレキシブルなバスサービスにおいて現実的なケーススタディを行った

- ①テストシナリオとパラメータの設定
- ②動学的なEVの乗合サービスの車の配置とルートポリシー、及びシミュレーションプラットフォームを記述
- ③OCP, OCP-A, NCP, FCFSを比較  
(Intel i5-6300U, 2Cores, and 8GB memory)

# 題材について

- ルクセンブルクのSales-Lentz社のdoor-to-doorなバスサービス
  - ハイブリッド車とEVのミニバスを運用している
- 現在のハイブリッド車をEVに変えることを想定して検証
  
- 既存の充電インフラ
  - 814の充電ポート (level-2)
  - 302の充電ステーション
- 既存の充電インフラに、高速充電ポートを10個追加する場合の配置を考える
  - 候補地は既存の302の充電ステーション
  
- 最新のモビリティ行動調査の結果から、ランダムに生成した客の需要を用いて検証する

**Table 2**  
System performance of different charging policies.

Number of customers	Charging policy <sup>1</sup>	Charging operation				Customer inconvenience		
		(1) Average charging waiting time <sup>2</sup> (SD)	(2) Average charging time <sup>2</sup> (SD)	(1)+ (2) (SD)	Total charging waiting time of the fleet (hours)	Mean passenger waiting time (min.)	Mean passenger journey time (min.)	Rate of served customers
1000	NCP	2.4(13.0)	65.1(2.6)	67.5 (13.2)	6.0	14.5	35.6	98.6%
	FCFS	3.7(14.8)	61.6(11.3)	65.3 (15.9)	9.3	14.7	35.6	98.4%
	OCP	1.5(10.1)	52.5(18.4)	54.1 (21.8)	3.7	17.2	39.7	94.0%
	OCP-A	0(0)	57.1(15.8)	57.1 (15.8)	0.0	16.6	39.0	93.0%
2000	NCP	1.9(12.5)	66.7(1.8)	68.6 (12.7)	4.0	30.1	54.5	55.5%
	FCFS	6.3(21)	62.4(12.1)	68.8 (19.6)	20.0	30.7	55.3	70.6%
	OCP	16.7(59.9)	59.2(15.2)	75.9 (64.0)	50.3	29.8	55.0	66.4%
	OCP-A	0.1(1.7)	62.0(12.2)	62.1 (12.4)	0.2	29.3	54.4	68.1%

Remark: 1. NCP: nearest charging station policy; FCFS: first-come-first-served policy; OCP: optimal charging policy; OCP-A: optimal charging policy using unoccupied chargers only. 2. Average charging waiting time and average charging time are measured as minutes/recharge/vehicle. 3 The average time of a simulation run is around 14.1 and 19.8 min for 1000 and 2000 customers under the OCP-A policy, respectively. 4. SD: standard deviation.



# 結果（運用側の視点）

## 客が1000人の時

- 平均充電運用時間  
OCP, OCP-A (54-57min)がNCP, FCFS(65-67min)より短い
- 充電で無駄にした時間の合計  
OCP, OCP-A (0-3.7h)がNCP, FCFS(6-9.3h)より短い

## 客が2000人の時

- 平均充電運用時間  
OCP-Aが最も短い(62min)、NCPとFCFSは67min、OCPは76min
  - OCPは、需要が大きすぎると充電ポートの占有を誤って推定してしまうため
- 充電の順番待ちの時間  
OCP-Aが最も短い(0.3h)、NCPが4h、FCFSが20h

OCP-Aポリシーはかなり充電並び待ち時間と充電時間を減らせる

# 結果（客の視点）

## 客が1000人の時

- 客の待ち時間はOCPやOCP-Aの方が約2分長い
- 客の移動時間はOCPやOCP-Aの方が約4分長い
- 客の対応率はOCPやOCP-Aの方が約5%低い
  - OCPやOCP-Aでは高速充電ポートの配置場所が南側に寄ってしまったため

## 客が2000人の時

- 客の待ち時間と移動時間はどのポリシーでも同様
- 客の対応率はFCFSやOCP、OCP-Aで高い(66.4%-70.6%)
  - NCPは55.5%

## 結果（計算時間）

OCP-AポリシーでSO (System Optimum)メソッドを用いて解いている

- 1度のシミュレーションに14.1分
- 計150回のシミュレーションに32.3時間
- SOは少ないexpensive functionで効率的に最小値を求解
  - expensive function：計算コストや実行時間が非常に高い関数

## 結果（環境的視点）

OCP-Aポリシーを適用して、EV適応の効果を検証

- 客が2000人の場合、年間で1225トンのCO<sub>2</sub>排出を削減
- 高速充電機がある場合、ない場合よりCO<sub>2</sub>排出を7.3t削減

これらの検証では発電時のCO<sub>2</sub>排出を考慮していない

# Index

1. Introduction
2. Related work
3. Methodology (方法論)
4. Computational Study
5. Discussion and conclusion

# Discussion and Conclusion

- 提案したモデルOCP, OCP-Aで充電運用時間を削減できた
- ルクセンブルクにおけるケーススタディによって、OCP, OCP-Aによって車の無駄な時間を効果的に減らすことができることが分かった

# Discussion and Conclusion

## 今後の展望

- 客の不便さを減らしたり運用者の利益を大きくするために、目的関数についてはもっと追求できるはずだ
- 車のサイズや異なる充電インフラ構成にも適用できるはずだ
- より現実的な動学的「呼び出し」モデルを設計するためには客の待ち時間の最大値やドライバーの勤務時間、それぞれの客の最大の乗車時間、迂回時間を考慮すべきだ
- 客の需要を予測するモジュールを導入することで、長期間にわたる年ごとの充電インフラ整備計画に拡張できるはずだ

# 所感

- 他段階最適化の問題の良い勉強になった
- 制約条件の定式化の緻密さにはいつも驚かされる
  - 制約条件を無効化する際にとっても大きな数 $M$ を導入するという方法が面白かった
- 詳しくは述べなかったが、ラグランジュ緩和について勉強する良い機会になった
- サロゲートについてはよくわからなかったので勉強したい