

## 消費電力量の不確実性を考慮したEVバス導入計画

05001195 早稲田大学 \*鈴木淳也 SUZUKI Atsuya  
01205890 早稲田大学 椎名孝之 SHIINA Takayuki  
デンソー 濱田龍之介 HAMADA Ryunosuke

## 1. 研究の背景と目的

CO2排出量の削減を目的として環境負荷の少ないEVバス (EV, Electric Vehicle) の導入が世界的に進められている。最近では、短時間での充電を可能とする急速充電器の開発が進んでいる。この技術を用いた「継ぎ足し充電型」のEVバス運用モデルは、総所有費用の観点から優れており注目されている。一方で、安定的な運行を可能とする充電ポイントを十分に設置する必要があり、高度な充電計画が求められる。さらに、EVバスの消費電力量は、様々な要因によって大きく変動することが知られている。それゆえ、運用計画を立てる際は消費電力量の不確実性を考慮しつつ、蓄電池容量と充電器配置を同時に最適化する必要がある。本研究では、継ぎ足し充電型EVバス問題を確率的制約条件を含む混合整数計画問題によって定式化する。確率的制約条件を含む問題は一般的に計算困難であるため、切除平面法の適用により計算を効率化する。そして、EVバスシステムに必要な充電器数や蓄電池容量を求め、EVバスの普及に寄与する知見を提供する。

## 2. 従来研究

継ぎ足し充電型のEVバス問題に関して、Kunith et al.[1]の先行研究があり、当問題の現状と課題を説明している。応用事例は、ドイツのベルリン市交通局のバス路線を対象としており、日本国内の環境とは異なる点がある。例えば、バス車両は路線ごとに固定され、同一のバスターミナル間を往復運行している。一方国内では、運行ごとに行き先を変更して走行する場が多い。そのため、本研究ではバス車両を各路線に固定せず、運行ごとに行き先が変わるモデルを検討する。

## 3. 研究モデル

Kunith et al.[1]の継ぎ足し充電型EVバス問題を消費電力量の不確実性を考慮した確率計画問題として定義する。定式化の際に利用した記号の定義を以下に示す。

## 3.1. 記号の定義

集合	
$I$	バスターミナル $i$ の集合
$J$	運行 $j$ の集合
$K$	バス車両 $k$ の集合
$N$	蓄電池タイプ $\nu$ の集合
パラメータ	
$C_\nu^{BATTERY}$	蓄電池タイプ $\nu$ の購入費用 [万円]
$C^{STATION}$	充電器の設置費用 [万円/台]
$C^B$	電力の月基本料金 [万円/月]
$C^E$	電力量料金 [万円/kWh]
$CAP_\nu^{BATTERY}$	蓄電池タイプ $\nu$ の容量 [kWh]
$IDLETIME_j^k$	バス車両 $k$ , 運行 $j$ の起点ターミナルにおける停車時間 [h]
$S_j^k$	バス車両 $k$ , 運行 $j$ の起点となるターミナル
$LP$	充電器の充電出力 [kW]
$OP$	EVバスの運用期間 [月]

$DAY$  | 月の日数 [日]  
 $\alpha$  | 消費電力量に対する予備率 [%]  
 $\epsilon$  | 制約が成立しない確率 (危険率)

変数  
 $bat_\nu^k$  | バス車両  $k$ , 蓄電池タイプ  $\nu$  の選択を表す 0-1 変数  
 $e_j^k$  | バス車両  $k$ , 運行  $j$  の起点ターミナルにおける充電量 [kWh]  
 $idle_j^k$  | バス車両  $k$ , 運行  $j$  の起点ターミナルにおける充電時間 [h]  
 $z_i$  | 充電器の設置を表す 0-1 変数  
 $\xi_j^k$  | バス車両  $k$ , 運行  $j$  の消費電力量 [kWh] を表す確率変数 (取り得る値は  $\xi_j^{ks}$ ,  $s \in S$ )

## 3.2. 定式化

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in I} z_i \cdot C^{STATION} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{\nu \in N} bat_\nu^k \cdot C_\nu^{BATTERY} \\ & + OP \cdot \{C^B + C^E \cdot DAY \cdot LP \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} idle_j^k\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad e_j^k = e_{j-1}^k - \bar{\xi}_{j-1}^k + LP \cdot idle_{j-1}^k, \quad \forall j = \{2, \dots, J+1\}, k \quad (2)$$

$$e_1^k = \sum_{\nu \in N} CAP_\nu^{BATTERY} \cdot bat_\nu^k, \quad \forall k \quad (3)$$

$$e_j^k + LP \cdot idle_j^k \leq \sum_{\nu \in N} CAP_\nu^{BATTERY} \cdot bat_\nu^k, \quad \forall j, k \quad (4)$$

$$\sum_{\nu \in N} bat_\nu^k = 1, \quad \forall k \quad (5)$$

$$idle_j^k \leq IDLETIME_j^k \cdot z_{S_j^k}, \quad \forall j, k \quad (6)$$

$$idle_j^k \geq 0, \quad \forall j, k \quad (7)$$

$$\text{Prob}(e_j^k + LP \cdot idle_j^k \geq (1 + \alpha) \cdot \bar{\xi}_j^k, \quad \forall j) \geq 1 - \epsilon, \quad \forall k \quad (8)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \quad (9)$$

$$bat_\nu^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k, \nu \quad (10)$$

目的関数 (1) は充電器設置費用と蓄電池購入費用、充電費用の最小化を表す。制約 (2), (3) は蓄電池の充電量に関するフロー制約、制約 (4) は充電量の上限を表す。制約 (5) では車両ごとに蓄電池タイプ  $\nu$  を決定する。制約 (6), (7) は充電時間の上下限を表す。制約 (8) は安定的な走行を保証するための確率的制約条件である。Luedtke et al.[3]より、制約 (8) に含まれる確率変数が有限分布に従う場合、以下のパラメータと変数を追加

し, SMIP(stochastic mixed integer programming) として制約 (11)–(14) に展開することができる.

追加パラメータ

$\pi^s$  | 消費電力量に関するシナリオ  $s$  の発生確率

追加変数

$E_j^k$  | 充電量から予備率を減じた値  
 $w^{ks}$  | シナリオ  $s$  の成立を表す 0–1 変数

$$(e_j^k + LP \cdot idle_j^k)/(1 + \alpha) - E_j^k = 0, \forall j, k \quad (11)$$

$$E_j^k + \xi_j^{ks} \cdot w^{ks} \geq \xi_j^{ks}, \quad \forall j, k, s \quad (12)$$

$$\sum_{s \in S} \pi^s \cdot w^{ks} \leq \epsilon, \quad \forall k \quad (13)$$

$$w^{ks} \in \{0, 1\}, \quad \forall k, s \quad (14)$$

## 4. 解法

Luedtke et al.[3] は, 上記の SMIP に対して妥当な強スター不等式を示している. 解法として強スター不等式を用いた切除平面法を適用する. 消費電力量  $\xi_j^{ks}$  が  $\xi_j^{k,1} \geq \xi_j^{k,2} \geq \dots \geq \xi_j^{k,s}$  (シナリオ番号の降順) に並んでいるものとする. ここで  $y = E_j^k$ ,  $h^s = \xi_j^{ks}$ ,  $p := \max\{k : \sum_{s=1}^k \pi^s \leq \epsilon\}$  とする. また任意のシナリオ添字集合  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_L\}$  において,  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_L$ ,  $h^{t_{L+1}} := h^{p+1}$  と定義する. この場合, EV バス導入計画に対する強スター不等式は以下のように表せる.

$$y + \sum_{l=1}^L (h^{t_l} - h^{t_{l+1}}) w^{t_l} \geq h^{t_1}, \quad \forall T = \{t_1, \dots, t_L\} \subseteq \{1, \dots, p\} \quad (15)$$

式 (15) を用いた切除平面法のアルゴリズムを示す.

- 
- STEP0: SMIP の連続緩和問題を解き, 最適解を  $(y^*, w^*)$  とする.  
STEP1: 緩和問題  $w^*$  が 0-1 整数条件を満たしていれば終了.  
STEP2: 強スター不等式 (15) の左辺に緩和問題  $(y^*, w^*)$  を代入し, 逸脱量最大化問題を等価な最短路問題とみなして解く.  
STEP3: 最短路問題の最適解が式 (15) の不等式関係を満たさなければ, 緩和問題  $w^*$  を取り除くような妥当不等式を切除平面として SMIP に追加. STEP0 に戻る.
- 

図 1: 強スター不等式を用いた切除平面法のアルゴリズム

## 5. 数値実験

環境省 [4], 国土交通省 [5], 経済産業省 [6] のデータを参考に充電器購入費用や蓄電池容量, 電力料金などを設定する. さらに, EV バスの導入事例を参考に仮想のバス路線と交番表データを生成し, 数値実験を行う.

## 6. 結果

まず, 問題を SMIP と切除平面法を導入した SMIP+Star で解き, 計算時間の比較を行う. 表 1 の結果より,  $\epsilon = 0.01, 0.1$  で SMIP+Star の方が短時間で解けており, 切除平面法の有効性を示すことができている.

表 1: シナリオ  $S = 300$  の計算時間

$S$	$\alpha$	$\epsilon$	SMIP+Star		
			SMIP Time(s)	Time(s)	Cuts
300	0.1	0.01	329	149	62 本/1 反復
		0.1	> 36000	1951	426 本/11 反復
	0.2	0.01	278	166	64 本/1 反復
		0.1	> 36000	2788	430 本/11 反復

次に予備率  $\alpha$  を変化させ, EV バスシステムに必要な急速充電器数や蓄電池容量を観察する. 予備率  $\alpha = 0.1, 0.2, 0.3$  で比較すると充電量の下限が上がる分,  $\alpha = 0.3$  の総費用が最も高くなる. 必要な充電器数は電費が悪いケースで差が出たものの, 全体的な変化は少ない. 一方で, 蓄電池容量は電費が良好なケースで差が出ている. 充電器数と蓄電池容量はトレードオフの関係にあるため, 予備率  $\alpha$  を変化させた場合は, 蓄電池容量の拡大によって必要な電力量を補う傾向にあるといえる.

最後に, 運行の停車時間  $IDLETIME$  や充電器の充電出力  $LP$  を変化させたときの総費用の推移を観察する. 低出力の充電器を使用した場合に電欠が起きてしまう結果を得た. これは全てのバスターミナルに充電器を設置しても, 十分な電力量を補えないことを表している. また, 停車時間, 充電出力によって総費用の増加割合も変化することも示した.

## 7. 結論

本研究では, EV バスに係る消費電力量の不確実性を考慮し, EV バスシステムの導入費用を最小化するようなモデルを開発した. 解法として, 切除平面法の適用による計算の高速化を示した. 数値実験においては, 消費電力量に対する予備率やバス車両の停車時間, 充電器の充電出力によって必要な充電器数や蓄電池容量が変化することを示した. これより, 国内における EV バスの普及に寄与する知見を得ることができた.

## 謝辞

会津バス様, みちのりホールディングス様, および株式会社デンソーの関係者の皆様にご支援いただいたことに感謝申し上げます.

## 参考文献

- [1] A. Kunith, R. Mendeleevitch, D. Goehlich, Electrification of a city bus network-An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems, International Journal of Sustainable Transportation, Vol. 11, pp. 707-720, 2017.
- [2] 椎名 孝之, 確率計画法, 朝倉書店, 2015.
- [3] J. Luedtke, S. Ahmed, G. Nemhauser, An integer programming approach for linear programs with probabilistic constraints, Math Program, Vol. 122, pp. 247-272, 2010.
- [4] 環境省, 令和元年度 EV/FC バス・トラック等のユースケース毎の航続距離等の特性に関するデータ収集及び事業性検証委託業務.
- [5] 国土交通省 自動車局, 電動バス導入ガイドライン.
- [6] 経済産業省, 「次世代蓄電池・次世代モータの開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装の方向性.