

# 1 電池劣化度の推計手法

本研究では、ローレンスバークレー国立研究所が開発した「V2G-Sim」[1]を用いてEVに搭載されたリチウムイオン電池の劣化度を推計する。なお、本論文では劣化度とは電池容量の減少度合いを表すものとし、例えば電池劣化度が30%の場合、電池の容量が新品時の70%に減少した状態である。また、電池の劣化は電池容量のみを考慮し、パッケージなどの物理的な劣化は考慮しない。以降で説明するモデルとデータを用いて電池劣化度を10年分推計する。

## 1.1 電池劣化度の推計に用いるモデル

### 1.1.1 電池劣化度推計モデル

V2G-Simに搭載されている電池劣化度の推計モデルについて説明する。

EVに広く用いられているリチウムイオン電池の劣化は、経年劣化と充放電サイクルによる劣化に分けて計算することができる。まず、経年劣化は次の式で表すことができる[2]:

$$Q_{loss}^{calendar} = f e^{-E_a/RT} t^{1/2}. \quad (1)$$

ここで、 $Q_{loss}^{calendar}$  は経年劣化 (% / day)、 $f$  は頻度因子 ( $14876 \text{ day}^{-1/2}$ )、 $E_a$  は活性化エネルギー (24.5 kJ/mol)、 $R$  は気体定数、 $T$  はバッテリーの絶対温度 (K) である。また式1を偏微分し、ある時間変位  $\Delta t$  での経年劣化  $\Delta Q_{loss}^{calendar}$  を求めると次のように表される

[3]:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{loss}^{calendar}(\hat{t}) &= \frac{\partial Q_{loss}^{calendar}(t)}{\partial t} \Big|_{t=\hat{t}} \Delta t, \\ &= 0.5 f e^{E_a/RT} \hat{t}^{-0.5} \Delta t.\end{aligned}\quad (2)$$

次に、充放電サイクルによる劣化は充電と放電の比、そして電池を通過した電荷量に影響され、以下のように表すことができる [2]:

$$\begin{aligned}Q_{loss}^{cycle} &= B_1 \cdot e^{B_2 \cdot I_{rate}} \cdot A_h, \\ B_1 &= a \cdot T^2 + b \cdot T + c, \\ B_2 &= d \cdot T + e.\end{aligned}\quad (3)$$

$$a : 8.89 \times 10^{-6} \quad [\text{Ah}^{-1} \text{K}^{-2}]$$

$$b : -0.0053 \quad [\text{Ah}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

$$c : 0.7871 \quad [\text{Ah}^{-1}]$$

$$e : 2.35 \quad [1/\text{C} - \text{rate}]$$

ここで  $Q_{loss}^{cycle}$  は充放電サイクルによる劣化度 (%),  $B_1$  と  $B_2$  はともに頻度因子で温度の関数である。また,  $I_{rate}$  は充電と放電の比であり C-rate と呼ばれる。  $A_h$  は電池を流れた電荷の量で,  $A_h = (\text{cycle number}) \times (\text{depth of discharge}) \times (\text{full cell capacity})$  で表される。なお,  $A_h$  はある時間変位  $\Delta t$  と  $I_{rate}$  を用いて,

$$A_h(\Delta t) = I_{rate} \times \Delta t \quad (4)$$

と表せる。また式 2 と同様に、式 3 を偏微分してある時間変位  $\Delta t$  での充放電サイクルによ

る劣化  $Q_{loss}^{cycle}$  を求めると次のように表される [3]:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{loss}^{cycle}(\hat{t}) &= \frac{\partial Q_{loss}^{cycle}(t)}{\partial t} \Big|_{t=\hat{t}} \Delta t, \\ &= B_1 \cdot e^{B_2 \cdot I_{rate}} \cdot I_{rate} \Delta t.\end{aligned}\quad (5)$$

以上で求めた経年劣化（式 2）と充放電サイクルによる劣化（式 5）を足し合わせたものが、リチウムイオン電池の劣化度である [3]:

$$Q_{loss}(t) = \sum_{\hat{t}=0}^t (Q_{loss}^{cycle}(\hat{t}) + Q_{loss}^{calendar}(\hat{t})). \quad (6)$$

なお、この推計式は実験値であり、電解質に NMC111 を用いた 18650 型電池でのみ有効な値である。他の種類のリチウムイオン電池での劣化度推計式は異なる式になる可能性がある。

### 1.1.2 電池温度モデル

1.1.1 で述べた電池劣化度推計モデルは温度の関数である。ここでいう温度とは電池の温度であり、V2G-Sim は以下のモデルを用いて電池温度を計算している [4][3]:

$$M_c \frac{dT_c}{dt} = K_{ac}(T_a - T_c) + K_{bc}(T_b - T_c) - q_{rad} + q_{hvac}, \quad (7)$$

$$M_b \frac{dT_b}{dt} = K_{ab}(T_a - T_b) + K_{bc}(T_c - T_b) - q_{btms} + Q. \quad (8)$$

なおここで、 $T_a$  は外気温、 $T_b$  は電池温度、 $T_c$  は客室内の温度である。また、 $K_{ab}$  は外気と電池間の、 $K_{ac}$  は外気と客室内間の、 $K_{bc}$  は電池と客室内間での有効熱伝達率である。 $M_c$  は客室の熱容量、 $M_b$  は電池の熱容量である。 $q_{rad}$  は日射量であり、場所や時間帯によって変化する。 $q_{hvac}$  は客室内の空調システム（HVAC : cabin heating, ventilation and air

conditioning) によって与えられる熱量であり、 $q_{btms}$  は電池温度管理システム (BTMS : battery thermal management system) によって与えられる熱量である。  $Q$  はバッテリーから発生する熱量で、電池に流れる電流を  $I$ 、内部抵抗を  $R$  とすると、

$$Q = I^2 \times R \quad (9)$$

と表される。電池に流れる電流は走行速度や加速度によって変化するため、電池劣化と同様に EV のパワートレインもモデル化し推計する。今回の推計で用いた値は Table1 に示す。

## 1.2 V2G-Sim に入力するデータ

### 1.2.1 電力を系統に供給する条件

V2G-Sim で電池劣化度を推計するにあたり必要なデータとしてまず V2G で電力を系統に供給する条件がある。そもそも V2G とは余剰電力を電気自動車の蓄電池へ蓄え、電力需要がひっ迫した際に系統へ供給するものであるから、V2G の導入をシミュレートするには電力系統の需要カーブと太陽光発電など再エネ発電量の時間別発電量データを考慮してシミュレートするのが妥当である。しかし、系統の需要カーブを V2G-Sim に入力するデータを作成できなかったため、本論文では系統の需要などは考慮せずに、毎日 17 時から 19 時にかけてバッテリー容量の 20% 分を系統に供給するとし、走行時以外は常に充電器へ接続し、充電もコントロールしないものとする。

### 1.2.2 日射量・気温データ

1.1.2 に用いる時間ごとの日射量と気温データは 2018 年度の仙台市でのデータを用いる。

### 1.2.3 旅程データ

1.1.2で必要となるバッテリーを流れる電流  $I$  は、自動車の走行データをもとに推計する。本論文ではその走行データを旅程データと呼ぶ。先行研究 [3] では旅程データとして米国運輸省の NHTS[5] (National Household Travel Survey) をもとにして作成した旅程データを用いている。NHTS をもとにして作成した旅程データの例を Table2に示す。対象地域が米国であれば NHTS のデータを用いれば良いが、本研究では日本を対象としたので、日本における旅程データを用いて推計する。しかし、日本には NHTS のような統計データは存在しないため、自動車乗車時間などから仮想的な旅程データを作成する。

家庭用の乗用車を推計の対象とする。午前7時に家を出発して仕事にむかい、午後7時に職場から家へ向かうものと仮定する。職場への通勤時間は往復で平均乗車時間 [6] となるようにする。平均乗車時間データを Fig.1に示す。職場までの走行距離は、平均走行速度 [7] に通勤時間を乗じて求める。また、EV は家庭では出力 1440W の低速充電器 (L1) に、職場では出力 7200W の高速充電器 (L2) に常に接続するとする。以上のように作成した旅程データの例を Table3に示す。このような旅程データを平均乗車時間ごとに作成して V2G-Sim の入力データとし、V2G-Sim の出力を平均乗車時間データの割合を用いて加重平均をとることで乗用車の電池劣化度とする。

## 参考文献

- [1] Lawrence Berkeley National Laboratory, “V2G-Sim.” [Online]. Available: <http://v2gsim.lbl.gov/>
- [2] J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, and M. W. Verbrugge, “Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel–cobalt–manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation,” *Journal of Power Sources*, vol. 269, pp. 937–948, dec 2014. [Online]. Available: <http://10.0.3.248/j.jpowsour.2014.07.030https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.030https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877531401074X>
- [3] D. Wang, J. Coignard, T. Zeng, C. Zhang, and S. Saxena, “Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services,” *Journal of Power Sources*, vol. 332, pp. 193–203, 2016. [Online]. Available: <http://10.0.3.248/j.jpowsour.2016.09.116https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>
- [4] J. Neubauer and E. Wood, “Thru-life impacts of driver aggression, climate, cabin thermal management, and battery thermal management on battery electric vehicle utility,” *Journal of Power Sources*, vol. 259, pp. 262–275, aug 2014. [Online]. Available: <http://10.0.3.248/j.jpowsour.2014.02.083https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.083https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775314002766>
- [5] U.S. Department of Transportation, “National Household Travel Survey,” 2017. [Online]. Available: <https://nhts.ornl.gov/>

Table 1 電池温度モデルに用いたパラメータ

Parameter	Value	Unit
$K_{ab}$	4.343	$\text{WK}^{-1}$
$K_{ac}$	22.6	$\text{WK}^{-1}(T_c < T_a)$
	22.6 + 1500	$\text{WK}^{-1}(T_c > T_a, \text{key-on})$
$K_{bc}$	3.468	$\text{WK}^{-1}$
$M_b$	182000	$\text{JK}^{-1}$
$M_c$	101771	$\text{JK}^{-1}$
$q_{hvac}$	+4	$\text{kW}(T_c < 292, \text{key-on})$
	-4.5	$\text{kW}(T_c > 297, \text{key-on})$

Table 2 NHTS をもとにした旅程データの例

Start time	End time	Event type	Distance/charger level	Location
0:00	8:45	Plugged in	L1	Home
8:45	9:45	Driving	39.6 mi	N/A
9:45	16:30	Parked	L2	Work
16:30	17:00	Driving	5.0 mi	N/A
17:00	17:30	Parked	N/A	Restaurant
17:30	18:00	Driving	5.0 mi	N/A
18:00	21:00	Parked	L2	Work
21:00	22:00	Driving	39.6 mi	N/A
22:00	0:00	Plugged in	L1	Home

Table 3 作成した旅程データの例

Start time	End time	Event type	Distance/charger level	Location
0:00	7:00	Parked	L1	Home
7:00	7:15	Driving	5.45 mi	N/A
7:15	19:00	Parked	L2	Work
19:00	19:15	Driving	5.45 mi	N/A
19:15	0:00	Parked	L1	Home

- [6] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, “室内暴露にかかわる生活・行動パターン情報,” 2017. [Online]. Available: [https://www.nite.go.jp/chem/risk/expofactor/{\\\_}index.html](https://www.nite.go.jp/chem/risk/expofactor/{\_}index.html)
- [7] 国土交通省, “自動車燃料消費量統計年報,” 2016. [Online]. Available: [https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1{\&}layout=datalist{\&}toukei=00600370{\&}kikan=00600{\&}tstat=000001051698{\&}cycle=8{\&}year=20161{\&}month=0{\&}result{\\\_}back=1{\&}result{\\\_}page=1{\&}tclass1val=0](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1{\&}layout=datalist{\&}toukei=00600370{\&}kikan=00600{\&}tstat=000001051698{\&}cycle=8{\&}year=20161{\&}month=0{\&}result{\_}back=1{\&}result{\_}page=1{\&}tclass1val=0)



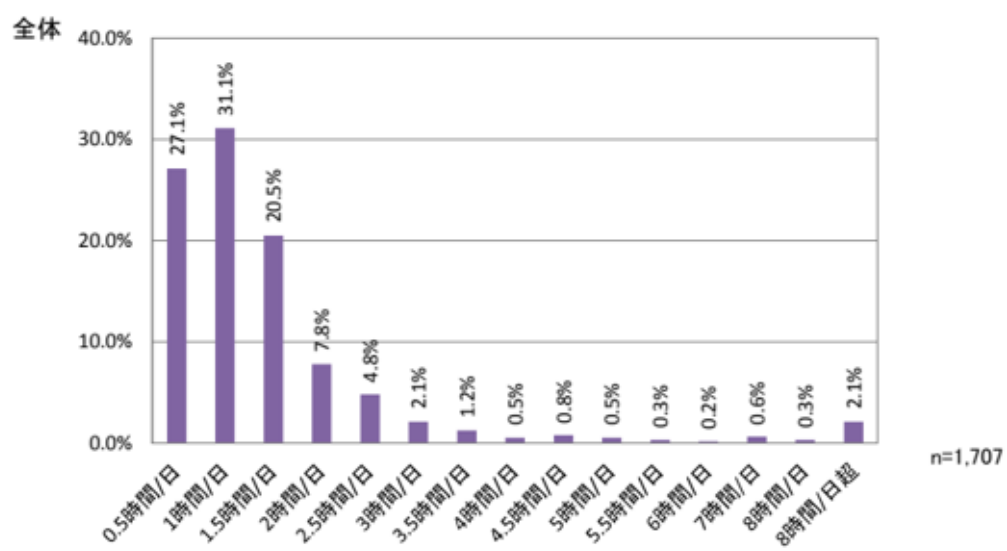


Fig. 1 平均乗車時間 [6]