

日常の走行特性を踏まえた電気自動車航続性能に関する研究

広島大学大学院工学研究科	学生員	山本 航
広島大学大学院工学研究科	正会員	塚井誠人
広島大学大学院工学研究科	正会員	桑野将司

1. はじめに

現在市販されている電気自動車の航続距離は160km程度であり、ガソリン自動車の400~700kmと比較してかなり短い。電気自動車がガソリン自動車と同等の性能を確保するためには、電池容量を拡大し、現在の航続距離を3~4倍程度伸ばさなければならない。よって近い将来では、通勤や買物、送迎など日常生活圏内での近距離移動の目的で利用されると考えられる。

本研究は通勤・通学を除く日常的な自動車利用に着目し、そのような自動車利用行動に対応できる、電気自動車の航続性能を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の方法

現状ではまだ電気自動車が普及していないので、データの収集が極めて難しい。そこで先述の利用目的のうち、充電施設配置が難しい非通勤かつ近距離中心で利用されている自動車を対象に、紙面調査とGPS調査を活用してその利用実態を明らかにする。次に、ドライブレコーダーによって収集した自動車走行軌跡データを用いて、電気自動車に乗り換えた場合の電力消費エネルギー算定方法を開発する。そして、世帯属性や居住地属性、メインドライバー属性と電力消費エネルギーの関係を表現する数理モデルを生存時間モデルによって定式化する。定式化したモデルを用いて、電池容量の変化による充電量と電力消費エネルギーからの充電切れ確率を分析し、電気自動車に必要な航続距離性能について検討する。

3. 使用データの概要

本研究では、2009年11月-12月にかけて自動車利用予定・実態調査と自動車走行軌跡調査を実施した。調査の概要を表1に示す。2つの調査は同一被験者に対して1週間行った。

自動車利用予定・実態調査は、1週間の世帯の自動車利用予定・実態についての紙面調査である。利用予定調査の質問項目は、1トリップごとの出発地、出発時

刻と到着時刻、目的地、運転者、同乗者、目的地までの走行距離である。また、利用実態調査の質問項目は、出発地、目的地、運転者、同乗者である。

自動車走行軌跡調査は、ドライブレコーダーを調査対象車に搭載して、移動経路、総移動距離、停止地点、停止時間の情報をメモリ上に蓄積した。

表1 調査概要

調査名	自動車利用予定・実態調査・・・(1) 自動車走行軌跡調査・・・(2)		
期間	2009年11月-12月		
対象世帯	自動車利用世帯 (長距離・週末のみ利用車は除く)		
対象地域	広島市、三次市、安芸高田市		
方法	(1)	紙面	
	(2)	ドライブレコーダー	
サンプル	(1)	広島市内	13台
		広島市以外	12台
	(2)	広島市内	11台
		広島市以外	12台

4. 電力消費エネルギー算定方法

1) 実態電力消費エネルギー

自動車の電力消費エネルギー $W[J]$ は、自動車の運動方程式から算出する。時刻 t において自動車にかかる力は、空気抵抗 $R_a(t)$ 、転がり抵抗 $R_r(t)$ 、勾配抵抗 $R_e(t)$ 、および加速度抵抗 $R_c(t)$ である。これらはそれぞれ、以下の式(1)~(4)で表わされる。

$$R_a(t) = \lambda \times s \times v_t^2 \quad (1)$$

$$R_r(t) = w \times \mu \quad (2)$$

$$R_e(t) = w \times \sin \theta_t \quad (3)$$

$$R_c(t) = (b_t / g) \times w \quad (4)$$

ここで、 λ は空気抵抗係数、 s は車両前面投影面積、 v_t は時刻 t の加速度、 w は車輛重量、 μ は転がり抵抗係数、 θ_t は時刻 t の勾配、 b_t は時刻 t の加速度、 g は重力加速度である。なお、 λ 、 μ はそれぞれ $0.2[N/kg]$ 、 $0.32[kg \cdot sec^2/m^4]$ と仮定する¹⁾。

力 F_t と仕事 W_t の関係は、 $W_t = F_t \times D_t$ である。ただ

し D_t は、 F_t の継続時間である。本研究では、データを 1 秒間隔で加工したので、 $D_t = v_t \times \Delta t = v_e$ である。以上より、自動車走行に必要な消費エネルギー W は、

$$W = \sum_{t=t_0}^{t_e} W_t = \sum_{t=t_0}^{t_e} F_t \times v_t \quad (5)$$

$$= \sum_{t=t_0}^{t_e} (R_a(t) + R_r + R_e(t) + R_c(t)) \times v_t$$

で求められる。ただし、 t_0 は走行開始時刻、 t_e は走行終了時刻である。本研究では、充電可能地点を自宅のみと考えて t_0 は自宅出発時刻、 t_e は帰宅時刻とした。なお、実際には加速度エネルギー $R_e(t) \times v_t$ は、

$$R_e(t) \times v_t = (1/2) \times w \times (v_t^2 - v_{t-1}^2) \quad (v_t > v_{t-1}) \quad (6)$$

$$R_e(t) \times v_t = 0 \quad (v_{t-1} > v_t)$$

として算出し、減速時の回生ブレーキによるエネルギー回収量は無視した。GPS より得られる標高情報は、精度が極めて低いため、勾配抵抗 $R_e(t)$ については、 $\theta_t = 0$ として無視した。

2) 予定電力消費エネルギー

メインドライバーの予定電力消費エネルギー $y[J]$ は以下の構造式の回帰分析から、期待値を算出した。なお、予定総走行距離を $x[km]$ とする。

$$y = \alpha x^2 + \gamma x \quad (7)$$

ここで α 、 γ は 1 日の実態総走行距離と 1 日の電力消費エネルギーの関係から求める換算係数である。

3) 自動車利用予定行動と実態行動の関係

1 日の実態・予定電力消費エネルギーの散布図を図 2 に示す。有効サンプルは 113 日である。図 2 より、1 日の実態・予定電力消費エネルギーは 2 つの電力消費エネルギーが等しければ実線上に分布する。しかし多くの場合、実線よりも上の領域に分布しており、実態電力消費エネルギーの方が予定電力消費エネルギーより大きい傾向が見られる。航続距離が短い電気自動車にとって、ドライバーが正確に走行可能距離を把握している限り実態電力消費エネルギーが予定電力消費エネルギーを上回る場合、充電切れが発生する可能性がある。

4) 1 日の駐車時間と 1 日の電力消費エネルギー

現状の自動車走行パターンの中で、充電切れが発生するかどうかを検討するため、駐車時間とそれに引き続く電力消費エネルギーに関する散布図を図 3 に示す。有効サンプルは 113 日である。現在の一般的な電気自動車の航続距離 160km に必要な電力消費エネルギーを 57.6MJ、フル充電に必要な時間を 14 時間と想定する。図 3 より、電池の充電時間と充電量の間には線形性を仮定すると、充電時間が 14 時間未満の場合の充電量は実線で表される。したがって、実線よりも下の領域では充電切れは発生せず、上の領域は充電切れが発生する。多くの場合、実線よりも下の領域に分布している。すなわち図 2 で明らかになったように、実態電力消費エネルギーが予定電力消費エネルギーを上回っていても、充電切れは起こりにくい。つまり、今回の対象車が自宅のみでの充電を行う場合、現在の使用状況下では（充電切れが起こらないという意味で）電気自動車への転換可能性は高いことが分かる。

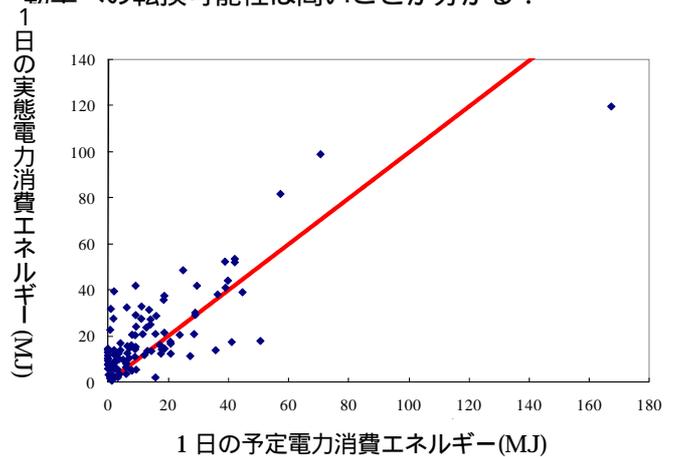


図 2 1 日の予定・実態電力消費エネルギー

5. 電力消費エネルギーモデル

1) 生存時間モデル

生存時間モデルは、基準時刻から、関心のある事象が生起、または終了するまでの時間（生存時間）を解析するモデルである²⁾。事象が生起するまでの時間の分布を生存関数 $S(W)$ およびハザード関数 $h(W)$ で表す。本研究では、式(5)で求めた 1 日の消費エネルギー W を対象として分析する。生存関数とハザード関数は、確率分布関数 $F(W)$ と確率密度関数 $f(W)$ により、それぞれ式(8)、式(9)で表される。

$$S(W) = 1 - F(W) \quad (8)$$

$$h(W) = f(W) / S(W) \quad (9)$$

なお本研究では、ハザード関数に特定の分布形を仮定するパラメトリックアプローチを採用する。また共変量は、消費エネルギー W の計量軸が、個体の特性を表す共変量 Y によって伸縮する加速モデルを採用する。加速モデルのハザード関数は、式(10) で表される。

$$h(W | Y) = h_0(W \exp(-\beta Y)) \exp(-\beta Y) \quad (10)$$

ここで、 h_0 は共変量が 0 のときのハザード関数であり、基準ハザード関数と呼ばれる。 β は未知パラメータベクトルである。

2) 分布形の決定

パラメトリックアプローチを用いる場合、基準ハザード関数に何らかの確率分布を仮定する必要がある。本研究では、基準ハザード関数の確率分布として、既存の研究で多く用いられてきた 1)指数分布、2)ワイブル分布、3)対数正規分布、4)対数ロジスティック分布を、それぞれ当てはめ候補としてモデルの推定を行い、最も当てはまりがよい分布形を実証データに基づいて決定する。このとき、尤度関数 L 、対数尤度関数 LL は、それぞれ式 (11)、(12) で表される。

$$L = \prod_{i=1}^N \{h(en_i | Y_i) \times S(en_i | Y_i)\} \quad (11)$$

$$LL = \sum_{i=1}^N \ln\{h(en_i | Y_i) \times S(en_i | Y_i)\} \quad (12)$$

パラメータ数の多い複雑なモデルは、安定性のないノイズまで抽出する。そこで以下の分析では、赤池情報量基準(Akaike's Information Criterion)の中から、パラメータ数とサンプル数を考慮した修正赤池情報量基準(以下 $c-AIC$)を用いて、モデルの当てはまりを判断する。式(13)に $c-AIC$ を示す。

$$c-AIC = -2LL + \frac{2 \times N \times (k+1)}{N-k-2} \quad (13)$$

k : モデルのパラメータ数, N : サンプル数

それぞれの分布形を仮定した場合の $c-AIC$ を表 2 に示す。表 2 より、対数ロジスティック分布を仮定した場合の $c-AIC$ が最も低く、当てはまりがいいことが分かる。次いで $c-AIC$ が低いのは、対数正規分布、ワイブル分布であり、指数分布の $c-AIC$ が最も高い。

3) モデルの推定結果

$c-AIC$ が最も低い対数ロジスティック分布を仮定したときのモデル推定結果を表 3 に示す。パラメー

タ値は、正で絶対値が大きくなるほど 1 日の電力消費エネルギーは大きくなり、負で絶対値が大きくなるほど 1 日の電力消費エネルギーは小さくなる傾向を示す。

メインドライバー属性に関するパラメータ推定結果に着目すると、性別と世帯年収に関するパラメータは、それぞれ負で有意な値を得た。これは、メインドライバーが女性、または世帯年収が低い世帯ほど、1 日の電力消費エネルギーが大きくなる傾向にある事を示している。1 日の駐車回数に関するパラメータは、正で有意である。よって、駐車回数が多いメインドライバーの方が、電力消費エネルギーが大きくなる傾向を示している。曜日に関するパラメータに着目すると、正で有意な値となった。これは、休日に運転するほど電力消費エネルギーが大きくなることを示している。世帯属性の自動車保有台数-免許保有者数に関するパラメータに着目すると、負で有意な値を得た。これは、保有自動車と比較して、免許保有者数が多いほど、自動車の利用に競合が生じる結果、1 日の電力消費エネルギーが大きくなることを示している。

居住地属性に関するパラメータ推定結果に着目すると、居住地と最寄りの鉄道駅までの距離に関するパラメータは、それぞれ負で有意な値となった。これは、居住地が広島市外、または最寄りの鉄道駅までの距離が短い世帯では 1 日の電力消費エネルギーが大きくなる傾向を示している。

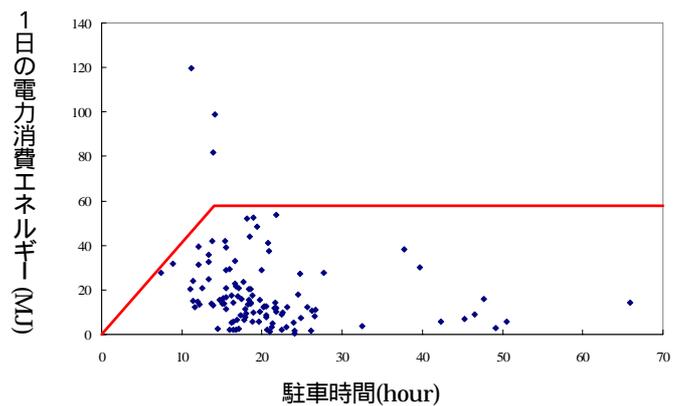


図 3 駐車時間とそれに引き続く電力消費エネルギー

6. シミュレーション分析

1) シナリオの設定

本調査対象者について、平均的なドライバーが電気自動車を利用する場合を想定し、電気自動車への転換可能性の検討を行う。ここで、平均的なドライバーとは、

推定したモデルのメインドライバーに関するそれぞれの共変量について、サンプル全体に対する期待値を代入したドライバーを指す。

電気自動車に転換した場合の2007年のCO₂排出量(試算値)とガソリン車のみでの1990年のCO₂排出量(実測値)を比較することで、電気自動車の電池容量がCO₂排出量の削減に及ぼす効果を分析する。2007年の日本全体のCO₂排出量を基準に電気自動車普及によるCO₂削減量を式(14)で表す。

$$CO_2^{07} = E \times 10^6 \times T \times C \times F \times S \times Pr(b) \quad (14)$$

E : 1304Mt (2007年CO₂排出量), T : 運輸部門の排出割合 20%, C : 自動車割合 90%, F : 自家用車割合 50%, S : 非通勤目的の近距離自動車割合 40%, $Pr(b)$: 充電切れが起こらない確率(式(8)の推定結果より), b : 電池容量(MJ)

2) シミュレーション結果

表4にシミュレーション結果を示す。表4より、現在、市場で販売されている電池容量60MJの電気自動車が充電切れを起こさない確率は、90.88%であることが分かる。これは、現在の自動車利用に大きな変化が無い場合、最大で90.88%の非通勤で近距離中心の自動車が電気自動車に転換が可能であることを示している。その場合のCO₂排出量は2007年比で-16.36%、1990年比で+3.38%となった。さらに、電池容量を40MJまで低下させた場合でも、電気自動車への転換可能性は82.91%、削減量は2007年比で-14.92%、1990年比で+5.16%であることが明らかとなった。以上の結果は、現在、市販されている航続性能が低い電気自動車よりも、航続性能を低下させた場合の電気自動車の普及可能性は高く、またCO₂排出量の削減にも寄与することを示している。

7. おわりに

本研究では、非通勤で近距離中心で利用される電気自動車に求められる航続性能を明らかにした。分析の結果、自動車利用の実態走行距離は、予定走行距離を上回っていたが、調査対象ドライバーでは充電切れはほぼ発生しないため、ガソリン自動車から電気自動車への転換可能性は高いことが明らかとなった。さらに、電池容量を40MJまで低下させても、CO₂排出量削減

効果が大きいことが明らかとなった。

表2 $c - AIC$ の比較

確率分布	$c - AIC$
ワイブル分布	881.39
対数ロジスティック分布	858.46
対数正規分布	858.91
指数分布	969.40

表3 モデル推定結果

共変量	推定値	t 値
メインドライバー属性		
性別(男性=1, 女性=0)	-1.14	** -3.94
年齢(高齢者=1, 高齢者以外=0)	-0.45	-1.21
世帯年収(万円)	-9.77E-04	** -3.62
1日の駐車回数	0.17	** 7.35
日にち属性		
曜日(休日=1, 平日=0)	0.26	+ 1.65
世帯属性		
自動車保有台数-免許保有者数	-0.30	* -2.15
居住地属性		
居住地(広島市内=1, 広島市以外=0)	-0.27	+ -1.71
最寄りの鉄道駅までの距離(km)	-0.05	** -4.44
尺度パラメータ	3.33E-03	** 3.91
形状パラメータ	2.21	** 15.08
サンプル数(人×日)	113	
$c - AIC(c)$ 注)	911.44	
$c - AIC(\beta)$	858.46	

**): 1%有意, *): 5%有意, +): 10%有意,
注): 形状パラメータと尺度パラメータ以外のパラメータを0としたときの $c - AIC$

表4 シミュレーション結果

電池容量 (MJ)	航続距離 (km)	最大転換可能率 (%)	CO ₂ 排出量 (運輸) 増減比 (%)	
			07年	90年
0	0	0	0	+23.6
5	14	11.65	-2.10	+21.01
10	28	31.29	-5.63	+16.64
15	42	47.71	-8.59	+12.99
20	56	59.77	-10.76	+10.31
25	69	68.43	-12.32	+8.38
30	83	74.72	-13.45	+6.98
35	97	79.38	-14.29	+5.94
40	111	82.91	-14.29	+5.16
45	125	85.63	-15.41	+4.55
50	139	87.77	-15.80	+4.07
55	153	89.49	-16.11	+3.69
60	167	90.88	-16.36	+3.38

参考文献

- 1) 北村隆一, 佐々木邦明, 山本俊行, 森川高行, 藤井聡: 交通行動の分析とモデリング, 技報堂出版, 2002.
- 2) 野崎博路: 基礎自動車工学, 東京電機大学出版局, 2008.