

沖縄観光における電気自動車導入プロジェクト

田中謙司, 堀江英明, 今裕介, 松島和史

EV Installation Design Study for Rent-a-car Business in OKINAWA

Kenji Tanaka, Yusuke Kon, Kazufumi Matsushima, Hideaki Horie,
The University of Tokyo,

要 旨

EV には走行中の CO2 排出がないという利点を持つ一方、エネルギー源の二次電池に性能が左右され、現状では一充電走行距離が短い課題がある。特に航続距離は、車両の電池性能とともに、走行地域での走り方によって大きく異なり利用の制限やインフラ整備の方法へ影響するため、地域の特性に合わせた導入計画及びインフラ整備が必要となる。本研究では、導入地域の特性を織り込んだ EV の車両性能、走行モードに基づいた航続距離を推定する手法を開発し、沖縄における試験走行をもとにして走行モードを作成し、渋滞時・一般走行時・高速走行時における推定走行距離を算定し、観光を想定した実走行ルートを検証した。

Keyword

EV, drive range, rechargeable battery, driving mode, charging location arrangement

1. はじめに

資源エネルギー枯渇問題に加え、二酸化炭素（CO₂）排出による地球温暖化問題といった世界的な環境意識の高まりとともに電気自動車（EV）が有望な次世代環境対応車として注目を集めている。EVは、ハイブリット車、燃料電池車やプラグインハイブリット車と比較した中で走行距離当たりのCO₂排出量は最も低く、また現時点において唯一、走行時のゼロエミッションを達成できる方式である。2010年には複数の既存自動車メーカーから一般向け量産型EVが発売された。しかしながら、実社会での導入実績がないEVは充電インフラ整備などEVの普及にあたって解かなければならない課題が山積している。EVには走行中のCO₂排出がないという利点を持つ一方、エネルギー源の二次電池に性能が左右され、現状では一充電走行距離が短いという課題がある。特に航続距離は、車両の電池性能とともに、走行地域での走り方によって大きく異なり利用の制限やインフラ整備の方法へ影響する。エコカーの電池消費をモニタリングする研究として、石谷ら(1985、1991))は、市街地や山間部での走行状況を計測することで、EV (Electric Vehicle) の燃費を算出する手法を示し、坂本(2009)は、HEV (Hybrid Electric Vehicle) に関して、人工衛星を用いてHEVの座標・高度などの位置情報を、HEV自身で電池残量情報のログを取得し、それらに関連付けて電池消費を計測するシステムを提唱した。SHIAUら[4]は、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) をベースとし、PSAT (Powertrain Systems Analysis Toolkit) というシミュレータを用いて車両の各種スペックと航続距離との感度分析を行い、経済的コスト・CO₂排出量などを最小化するための最適電池容量を提示した。しかしいずれの研究も静的なマクロ分析となり、地域導入に必要となる具体的な充電器配置計画、配車計画を立てるための車両の空間的・時間的管理には対応していない。したがって、具体的な実地の導入計画へ研究を応用することは難しかった。

そこで、本研究では、EV社会構築のための第一歩として、導入地域のEVの車両性能、走行モードに基づいた航続距離を推定し、シミュレーションに反映させる組合せの手法を提案し、実利用可能な具体的な充電器の配置計画を提案する手法を開発する。

2. 沖縄EV導入プロジェクト

沖縄では、民間を中心に二次電池を組み込んだ環境社会システムの構築を目指した沖縄グリーン・ニューディールプロジェクトを進め、東京大学がこれら実現への支援を行っている。本研究はこのプロジェクトの支援研究の一つである。その第一段階として沖縄レンタカー協会が、観光レンタカーにEVを導入し、那覇商工会議所メンバーが中心となって充電インフラを整備する会社を設立してインフラ整備を支援することでEV利用の先進地域とする計画である。沖縄は年間約600万人が訪れる観光立県であるが、観光客の約4割はレンタカーを利用する最大の移動手段であり、観光客に対するインパクトが大きい。このレンタカーは使用後に県内で中古車として販売されるため、EVの一般市民への二次波及効果も期待でき、沖縄EV化のドアオープナーとしてはふさわしい。沖縄は島嶼地域であるため、EV普及の課題である航続距離が問題になりやすく、充電インフラ整備も小規模の投資で一定レベル以上の密度に達しやすいという利点もある。本ケースは民間企業が主体となりビジネスベースで取り組み、実証実験をこえて初めから社会普及を行う初めてのケースである。

本プロジェクトを進めるに当たり、EV車体価格の高さと充電インフラの効率的な設置が問題となった。価格問題に関しては、レンタカー会社が高価なEV導入においてコストをユーザへ全額負担を強いることは現実的ではなく、収益を生み出すためのコスト軽減が必須であった。そこで、田中ら(2009)は、新車購入後

3-5 年はレンタカーとして利用、中古車として売却後廃車時に、二次電池を取り出し、定置用の二次電池として再利用するモデルを提案した (Fig.1)。EV 価格の高さの原因は、価格の約半分を占める二次電池にある。通常の車両は廃車時に価値はゼロとなるが、二次電池を再利用することで電池は資産価値を持ち、つまり中古車価格を向上させることができる。堀江(2008)によると自動車用 Li 電池は長寿命で、自動車用途としてのライフサイクルが終了した後も、定置用途のように要求最大出力の小さいシステムであれば 20 年以上利用することができる可能性が高い (Fig.2)。沖縄では、これら再利用電池を沖縄のスマートハウス・スマートコミュニティの電力蓄電用で活用する。これらシステムでは二次電池を大量に必要とするため、安くかつ初期不良チェックも済んだ再利用電池を活用できることは定置利用にとってもメリットが大きい。沖縄全体として定置用にも二次電池を導入することで、レンタカー会社は、使用後の二次電池の中古流通による価格顕現化を見込み、実質的な車償却負担が軽減される。その結果、ユーザのガソリン代差益分と相殺できる程度の負担増でレンタカーサービスを提供できる収益モデルである。次に問題となったのは、民間主導による充電インフラの設置である。効率的な配置のあり方および収益モデルについて、次節以降で説明する。

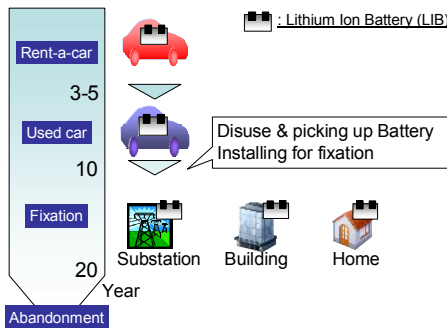


Fig. 1 Battery re-use lifecycle model

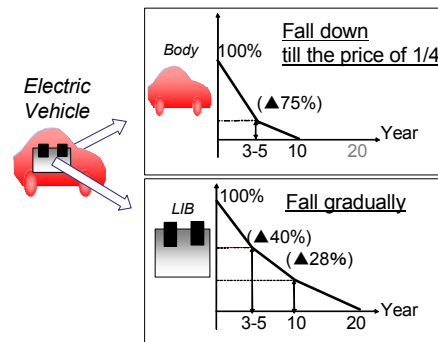


Fig.2 An example of Residue Price Trend

3. EV 消費電力量推定法

3.1 EV の要因別消費電力量評価

EV の最大の特徴は、ガソリン車のエンジンと変速機にあたるキーコンポーネントが、モータと電池に置き換わる点である。モータによる動力はエンジンのそれと比較して効率が高い。エンジンは回転数がゼロの時にトルクがかからないのに対し、モータは大きなトルクを出すことができるためである。さらに回生ブレーキにより運動エネルギーを回収することで効率を上げている。Fig.3 に示す通り自動車の消費エネルギーは、機会損失、走行抵抗による損失、ブレーキ損失の 3 つにエアコンなどの動力以外の消費エネルギーを加えたものとなる。なかでも走行に必要な出力 P (W) は、転がり摩擦抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗の 4 つで式(1)に示す。

$$P = \left(\frac{1}{\eta \cdot \varepsilon} \right) \cdot u \cdot F = \left(\frac{1}{\eta \cdot \varepsilon} \right) \cdot u \cdot \left\{ g \cdot r_{Roll} \cdot M + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S \cdot u^2 + g \cdot M \cdot \sin \theta + a(1 + k_{Rotat}) \cdot M \right\} \quad (1)$$

第 1 項は転がり摩擦抵抗、第 2 項は空気抵抗、第 3 項は勾配抵抗、第 4 項は加速抵抗を表す。EV の性能および道路状況によって異なる。出力 P を時間積分したものがガソリン車の燃費である。EV においても同様に求められるが、1 点異なるのは $P < 0$ の時に回生ブレーキから充電する点である (Fig.3)。この式を用いて 2010 年に発売が予定されている EV のうち、最も量産数を多く予定されていた C セグメント車を想定し

米国カルフォルニア州の燃費計算モードである LA4 モード走行時の電費を計算したものを Fig.4 に示す。LA4 モードは、都市走行を想定した運転モードである。抵抗要因別に 10%改善した場合に電力消費量へ与える影響の大きさの感度分析を行った結果、Fig.4 に示されるように、重量 M 、転がり摩擦抵抗 r_{roll} 、回生効率 ϕ の準備電費が改善する。特に、重量 M は 8.4%の改善がみられ、軽量化が EV の消費電力量低減に大きく寄与することが分かる。

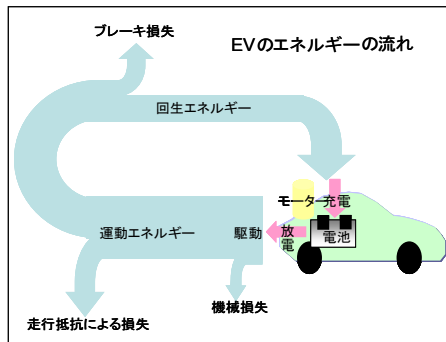


Fig.3 The Energy flow of EV

		initial value	10% improvement	change of energy consumption	
energy consumption	rolling resistance	M	1700kg	1530kg	-8.4%
		r_{Roll}	0.015	0.0135	-4.7%
	air resistance	Cd	0.28	0.252	-1.6%
		S	2.2	1.98	-1.6%
	accelerating resistance	M	1700kg	1530kg	-8.4%
		k_{Rotat}	0.08	0.072	-0.3%
	regenerative energy		50%	60%	-4.2%

Fig.4 sensitivity analysis

3.2 知識活用した走行モード推定法

応用先での実航続距離の推定には試験用走行モードではなく実際の走行モードによる分析が必要となる。対象地域利用者の走行知識をモデル化し、その代表的な走行モードを実験結果により定義する。まず対象地域利用者への運転状況ヒアリングを実施し、特定地域の交通状況、目的地、時間帯を分析する。その結果に基づいて、地域特有の走行モードを選定し、その対象道路、時間帯を決定する。典型例として、渋滞モード、一般道モード、高速道モードなどが考えられる。これらは地域の交通状況によって千差万別である。走行実験によって地域特有の走行モードを定義する。Fig.5 にその走行モード例を示す。走行中設定時間毎に速度を計測したデータから時系列速度変化を示す。

4. 充電器設置場所・基数の決定法

充電器設置場所・基数の決定法の各手順の概略を Fig.6 に示す。①対象地域・期間・EV ユーザの選択：充電器配置計画をたてる地域と、シミュレーションの対象とする期間と EV ユーザを決定する。②地域条件設定：地域によって異なる EV ユーザ・施設・地図・外気温・急速充電器設置候補地からなる対象地域のデータと、導入する EV と急速充電器の仕様を示す機器データの 2 種類を入力する。③観光 EV ドライバーのモデル化： 空港到着便スケジュールや観光ルートなどのデータを基に、発生させる観光客数と各観光客の到着日時・出発日時・滞在日数・宿泊ホテル・高速道路利用の有無・充電する目安となる電池残量のパラメータを与える。④ EV ユーザ行動シミュレーション： EV ユーザの行動をシミュレーションにより再現し、EV の消費電力量と充電需要が発生する場所と時刻を記録する。EV の消費電力量は、転がり摩擦抵抗・空気抵抗・勾配抵抗・加速抵抗・エアコンの使用による消費電力量 P を、式(1)で計算した。⑤行動シミュレーションの結果として、需要発生分布データと観光客の行動履歴を出力する ⑥急速充電器設置場所・基数の決定：急速充電器設置候補地データと、④の行動シミュレーションから得られたデータから急速充電器の設置場所と基数を決定する。まず、各 VCP から距離が近い順、充電需要の多い順に候補地をランク付けし、設

置場所を決定する。次に、決定された設置場所に、各 VCP における充電回数の時系列データを集約し、いかなる時間においても EV の充電需要を満たす需要ピークに対応した、各点の充電器設置基数を決定する。

充電設備設置基数は、数を多くする場合の待ち行列をなくすことによる顧客満足度向上と、数を少なくする場合の設備稼働率向上というトレードオフの関係がある。したがって、普及シナリオに従い EV 普及初期においては地域全体のユニバーサルサービスを優先して地域漏れのないような配置を行い、将来的に台数が増えてきた場合に、待ち行列の解消のため基数増設を行う方針を取る。また、今回は初期段階として EV レンタカーを念頭としているため、充電インフラ会社の収益モデルは、レンタカー借上げ毎に、基本料金 (2000 円程度)、急速充電毎に従量料金 (500 円程度) を貸すことを想定している。ただし、金額は普及台数のシナリオによって目標年度の黒字化を達成するように設定する。初期において地域集中した充電インフラを配置することで、後発で充電インフラが設置された際も、地域内ではこの枠組みに参加することを促すなど、優位な位置を確保することが見込まれる。

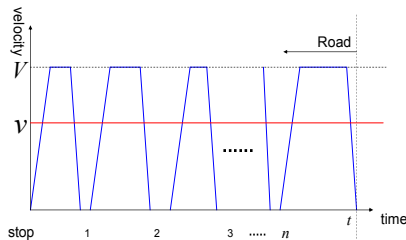


Fig.5 An example of a Driving mode

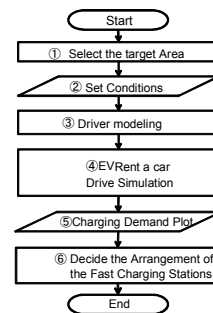


Fig.6 The decision flow of charging point arrangement



Fig.7 An example of driving route

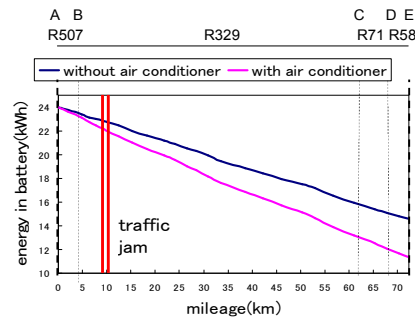


Fig.8 An example of energy consumption along with the measured driving mode

5. 本手法の沖縄地域への応用

5.1 沖縄での実走行調査

本研究では、EV の導入地域として沖縄を想定し、現地での走行調査を行った。沖縄を選んだ理由としては、島嶼圏であり航続距離の短い EV 導入に有利であること、地域交通の大半を自動車が担っていること、観光が主力産業であるためレンタカーが多く EV 導入が進みやすいことなどが挙げられる。実測調査では、7 つのルートを選択し 5 分毎の走行距離と停止回数を記録した。

走行のモデル化と走行調査結果を用いて、7 つの走行ルートで消費電力量を計算した。平日市街地渋滞、休日市街地渋滞、一般郊外道路、高速道路などを走行実験した。7 ルートは地元のレンタカー関係者はじめ

複数人からヒアリングを行い、那覇市への通勤渋滞と道路事情による市街地渋滞などの渋滞ルート、主要な幹線を通過する国道ルート、高速道路移動ルート、主要観光ルートの代表的なルートと時間帯を設定した。Fig.7 は走行実験のルート例を示している。このルートは市街地から渋滞を抜け主要幹線道路で北上するルートであった。このルートの実験結果に基づいた走行距離ごとの消費電力量推定を Fig.8 に示す。エアコンありとなしの場合の 2 ケース示している。7 つの走行実験の結果では走行ルートによって電力消費率は 10～15%程度の差があった。

5.2 沖縄での EV 性能評価

走行調査結果を基に走行モードを市街地、郊外、高速道路、渋滞の各モードに分類し、モード別の航行距離を評価した。Table1 に結果を示す。C セグメント車の一充電走行距離が LA4 モードで 159km であったのに対し、最も航続距離が短かったのはエアコン使用時の渋滞モードで 108km となった。渋滞時は、平均速度が低く走行時間が相対的に長くなるのでエアコンの消費電力が EV の性能に大きく影響することが分かる。逆に市街地モード・エアコンなしでは 222km と大きく上振れしている。

Table1. The cruising range of each driving mode

Drive Mode	Drive range
①Congestion mode(With Conditionar)	108km
②City mode (With Conditionar)	140km
③Highway mode (With Conditionar)	154km
④Urban Area mode (With Conditionar)	155km
⑤Highway mode	175km
⑥Urban mode	204km
⑦City mode	222km

5.3 沖縄における充電インフラ配置計画

対象 EV ユーザを EV レンタカー利用観光客とし、充電器配置計画をたてる。シミュレーションの期間として、観光客が最も多く、EV 内のエアコン使用により、1年を通して最も充電需要が多くなると予想される 8月を対象とする。シミュレーションの条件として、EV レンタカーが約 4000 台走行、導入する EV は日産リーフ、使用する急速充電器は 30 分で 80%の充電が可能であるとする。Fig. 9 にシミュレーションの結果と実際の沖縄での配置を示す。Fig.9 左図は、行動シミュレーションにより得られた充電需要発生地点の分布と充電需要発生回数を示す。Fig.9 の中図は、需要発生分布を実際に急速充電器の設置可能な候補地へ集約した設置場所と基数を示し、24 箇所 27 基の充電器を提案している。これを基にして、沖縄の充電インフラ会社が実際に配置したものが Fig.9 右図であり、18 箇所の 27 基を設置しているが、配置、設置基数ともにはほぼ再現していることが分かる。沖縄本島の中部に充電需要の分布と充電器設置が相対的に多い。これは、観光客が観光を終えた帰り道に充電需要が発生するパターンが多いためである。次に、シミュレーションに用いた前提条件から、EV の電池容量・急速充電の時間をそれぞれ変化させてパラメータ・スタディを行った結果を Fig.10 に示す。EV の電池容量を増加させた場合、必要となる急速充電器数は指数関数的に減少した。また、急速充電時間を短くした場合、必要となる設置基数は比例するように減少した。

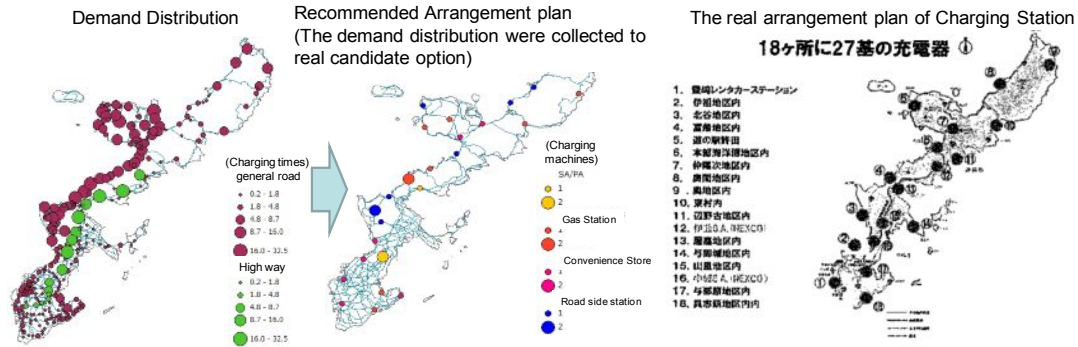


Fig. 9 Simulation Result (left: charging demand distribution based on the simulation result, center: Recommended arrangement plan based on the charging demand distribution result, right: the arrangement in Okinawa)

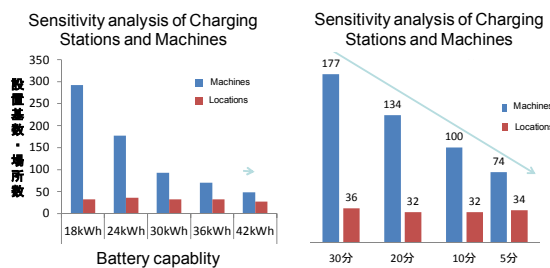


Fig. 10 Sensitivity Analysis of battery capacity and Time duration

6. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- (1) EV 用リチウムイオン二次電池の長寿命性に着目し、定置用などへ再利用することで利用者負担を軽減させる二次電池の普及促進モデルを提案した。これに基づき、EV レンタカー、充電インフラ会社の収益モデルを提案し、顧客に受け入れられかつ収益性を確保できる料金設定算定できることを示した。
- (2) EV 普及にあたり当面の課題となる EV 航続距離と充電インフラ配置問題に関して、EV 性能と地域特有の走行モード別に基づいて特定地域の航続距離を推定し、これをシミュレーションに適用させ、配置場所および設置の計画を策定する手法を開発した。
- (3) 本手法を用いて沖縄地域における EV の実走行距離を推定した行動シミュレーションを行い、沖縄本島のEV レンタカー導入計画において、実利用可能なレベルの具体的な充電インフラ配置計画を示し、本手法の有効性を示した。

今後は、走行モードの精緻化のために GPS 等を用いてより高度な走行距離推定を行うとともに、沖縄における充電インフラ利用状況を検証することで、他地域へ応用可能な手法の開発を行う予定である。

◆ 参考文献

堀江英明、リチウムイオン二次電池の性能と拡がり、二次電池による社会システムイノベーション第1回フォーラム講演資料、2008年

Hisashi ISHITANI, Masakazu FUKAGAWA, and Yasuaki TAKEUCHI, Simulation Models to Estimate Fuel Economy of Passenger Cars in City Areas, Journal of the Japan Society for Simulation Technology 4(3), pp.136-145, 1985

Hisashi ISHITANI, Yasuko BABA, and Hiroshi SHIMIZU, Development and Evaluation System of new concept Electric Vehicles by running simulation models, Journal of the Japan Society for Simulation Technology 10(1), pp.394-403, 1991

Toshiyuki SAKAMOTO, Battery SOC State of a Hybrid Electric Vehicle : (A Study of Up-hill Drive Way with a Number of Start-stop Modes), Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics 2(2), pp.121-132, 2009

C. S. SHIAU, C. SAMARAS, R. HAUFFE, and J. J. MICHALEK, Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles, Energy Policy 37, pp.2653-2663, 2009

石谷久、深川正一 他:「市街地走行における乗用車の燃料消費推定モデル」, シミュレーション, 第4巻第3号, pp.16-25, 1985

清水浩、内藤正明 他:「電気自動車の基本設計のための性能評価用シミュレーションプログラムの開発」, シミュレーション, 第10巻第3号, pp.63-72, 1991

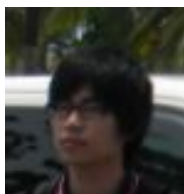
K. Tanaka et al, EV Installation Design Study for Rent-a-car Business, the 6th Int. Sym. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2009, (100224)



田中謙司 工学博士。東京大学大学院工学系研究科卒業 現在同大学大学院システム創成学専攻助教。マッキンゼー・アンド・カンパニー、日本産業パートナーズ株式会社を経て 2006 年より現職。二次電池社会システム研究会理事。データマイニング手法、シミュレーション手法を用いた社会システム、経営システムの設計の研究を行う。



堀江英明 工学博士。東京大学大学院理学系研究科卒業。現在同大学生産技術研究所特任教授。兼日産自動車株式会社 EV 技術開発本部 EV エネルギー開発部エキスパートリーダー。二次電池社会システム研究会理事。日産自動車にて 90 年代前半より自動車用リチウムイオン二次電池の研究開発を行う。二次電池を用いた定置用エネルギー貯蔵工学を研究。



今祐介 工学学士。東京大学工学部システム創成学科卒。観光レンタカーへの EV 導入計画の事業性の研究や行動シミュレーションを用いた沖縄やハワイのフィージビリティスタディを行う。

松島和史 工学修士。東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻修士課程卒、現在同大学大学院工学系研究科博士課程。2007 年より株式会社フレームワークスにてサプライチェーン分野のコンサルティングに従事。グローバル企業のサプライチェーンに関する研究を行う。