

論文の内容の要旨

論文題目 電気自動車を介した電力系統と交通網のマイクロ連成シミュレーション
Microscopic Simulation of Coupled Electric and Traffic Grids
via Electric Vehicles

氏 名 内田 英明

持続可能な低炭素社会の実現は世界的な要請である。地球上の平均気温上昇やそれに伴う海面上昇など様々な問題が指摘されるようになり、1988年、国連に「気候変動政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)」が設置された。2015年末にはフランス・パリにおいて国連気候変動枠組条約第21回締約国会議 (Conference of the Parties 21: COP21) が開催され、温室効果ガスの排出削減に向けた枠組みである「パリ協定」が採択された。パリ協定は世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べ1.5°Cに抑えることを長期的目標とし、途上国を含む全参加国に排出削減の努力を求める枠組みとなった点において画期的であった。日本国内においては温室効果ガス排出量のほとんどをエネルギー起源二酸化炭素が占めていることから、化石燃料由来のエネルギー消費を低減することが重要視されるようになってきている。エネルギー消費において大きな割合を占める運輸部門においては、近年環境性能の高い電気自動車 (Electric Vehicle: EV) が注目を集めており、国内では2030年時点で新車販売台数の3割程度を普及目標として掲げている。航続距離の短さや充電設備 (Charging Station: CS) の未整備により現状の普及率は1%未満に留まるが、海外に目を向けても、税制優遇やガソリン車の将来的な製造中止などEVへの転換の機運が高まっている状況は同様である。ただし、EVの普及に伴い化石燃料の消費が増大してしまうことは本末転倒であり、充電には太陽光・風力・水力といった再生可能エネルギーが利用されることこそが本質的である。

2009年に開始された太陽光発電の「余剰買取制度」は、発電量から自家消費分を除いた電力の買取を電力会社に義務付けたものであり、2012年より現在の「固定価格買取 (Feed-in Tariff: FIT) 制度」として適用範囲を制裁可能エネルギー全体に拡大する形となっている。しかし、国内で主要な太陽光、世界的に導入量の大きな風力はいずれも天候により大きく出力変動する電源であり、大量に電力系統に連系すると系統運用上の問題、例えば余剰電力による配電系統の電圧上昇や周波数変動等の課題が指摘されて

いる。このような余剰発生時においては変動電源の出力抑制が認められているものの、低炭素化の取り組みを念頭に置くと回避すべき事象であることは明らかである。対策の一つとしては電力貯蔵技術が挙げられており、その有力な候補のひとつとしてEVが系統の安定化に資するものと期待されている。

このように、低炭素社会の実現に向けてはEVが大きな役割を果たすと考えられており、その際には再生可能エネルギーを有効に利用することが重要である。これまでガソリンを燃料として自動車が行っている道路交通網と、主に出力制御可能な電源によって維持されていた電力系統は互いに影響しあうことは考えられなかったが、今後普及していくEVを介して相互作用が発生することが予想される。社会におけるEVの需要のされ方や、再生可能エネルギーの利用可能性については様々な研究が行われており、対象となる課題は多岐にわたる。このような将来の課題は常に不確定性を内包しており、厳密な解決は困難であることから、有力な方法論のひとつとしてシミュレーションによるアプローチが採用される。しかし、これまでの検討の多くは道路交通網、ないしは電力系統のどちらかに着目したものであり、双方のメカニズムにまたがる相互作用については十分なシミュレーションモデルの開発がなされてこなかった。例えば、主要な課題である充電設備の導入計画においても、EV普及途上の段階では充電需要充足が最大の目的であり主に交通施策としての側面を持つが、一方でEVの普及完了時には充電需要の集中が配電系統での電圧低下を引き起こし得るため適切な需要分散が必要になる可能性がある。これらは道路交通網と電力系統の双方にまたがると同時に、EVの普及過程において時間的にも広がりをも有しており、本来的には整合性の担保された条件下で一元的なシミュレーションモデルによって取り扱われることが望ましい。そこで、本研究ではこれらの2つのメカニズムをモデル化し、相互作用を表現可能な連成シミュレーションモデルを開発する。続いて、この連成効果が大きいと考えられる配電系統網における電圧不安定化現象を再現し、交通状況が系統に対してどのような影響を及ぼすかを明らかにする。持続可能な低炭素化社会の実現に対するEVの役割の評価と、リスクの予見に寄与することが本研究の最終的な目的である。

本研究では、著者の所属する研究室において開発された知的マルチエージェント交通流シミュレータ ADVENTURE_Mates (Multi-Agent-based Traffic and Environment Simulator) を採用するものとする。電力系統との連成を考慮する場合、運転者の充電に関する意思決定を明示的に表現可能なマルチエージェントによるモデル化を行っていること、様々な時間スケールでの課題を対象とする場合に十分な時空間解像度を有することなどが重要である。運転者の意思決定機構を分類すると (1)OD (Origin-Destination) 決定 (2)経路決定 (3)挙動決定 (4)駐車中挙動決定 の4つに大別できる。このうち、EVに特有の意思決定は充電行動に関連する(2)経路決定 であるため、本稿では充電行動を考慮した経路決定モデルについて

その概要を述べる。EV の経路決定に関する問題設定は次のとおりである。交通シミュレーションにおける EV は最終目的地へと移動する”通常走行”と CS へ移動する”充電走行”の 2 つの走行モデルに従うものとする。走行モデルの切り替えは充電残量 (State of Charge : SoC) が閾値 T_s 以下という条件のもと実行される。このとき閾値 T_s は走行を特徴づける重要なパラメータであるが、既存研究においては環境に依存した恣意的な固定値を取ることが多い。しかし、EV の意思決定に恣意性が介在する場合、これを前提として実行される連成シミュレーションに影響が波及するため、本研究ではこの T_s に関する恣意性を排除することを目指す。具体的には T_s を必要としない階層的アプローチと、周辺状況あわせ適応的な値を獲得する試行錯誤的アプローチの 2 つの手法を提案する。マルチエージェント環境における数値実験の結果、定常的な環境ではどちらの手法も既存手法に対し効率的な経路を生成したことから、充電行動の考慮においてより現実的であることが示された。また、階層的な手法は計算量について実質的に既存手法の定数倍程度に留まることから、環境の概要を把握するための試験的なシミュレーション実行の際に採用されるべきであると考えられる。一方試行錯誤的手法は強化学習の収束に多大な計算資源を要するものの、複雑な環境下でも良い性能を見せることから、交通施策検討のための感度分析など、同一環境で多数のシナリオを仮定するシミュレーション実行の際に採用されるべきであると考えられる。

続いて、ここまで述べた ADVENTURE_Mates と連成させることを前提とした電力系統解析として、潮流計算の実装と検証を行う。電力系統の運用・計画のために系統内部各所の電圧や電線・変圧器を流れる電力の分布を把握することは重要であり、その基礎的な解析が潮流計算である。この解析により充電需要の集中による電圧低下を再現することが可能である。場の方程式は電力方程式であり、ノードの指定条件は主にスラックノード・発電機ノード・負荷ノードとなる。系統構成と設備定数に対応するアドミタンス行列及び各ノードにおいて指定条件が与えられる。しかし対象とする配電系統網では設備の抵抗がリアクタンスに対して比較的小さい値をとることから、潮流計算において一般的に利用される Newton-Raphson 法や Fast-Decoupled 法を適用することが困難である。したがって本研究では、配電系統の特徴である木構造や比較的大きな抵抗を持つ設備を含む場合においても適用可能な Backward Forward Sweep 法を採用し、ADVENTURE_Mates との連成を念頭に C++ で実装した。既存研究において配電系統を対象に実施された数値実験結果を参照解とした検証を行い、系統の各地点にて正しく潮流が計算されていることを確かめた。また太陽光発電による発電、CS での充電需要をノードの条件として取り込み電圧変化の傾向を把握できることを確かめ、交通シミュレーションとの連成を可能とした。

ここまで述べてきた交通網と電力系統のメカニズムを連成させたシミュレーションモデルを開発し、EV を介した相互作用のある課題の検討を行う。本研究では現実の環境として和歌山市中心部の道路ネットワークを使用し、簡易的な配電系統網を模擬することで都市

の潮流分布を精緻に再現することを目的とした。この際考慮する条件としては一般需要家の需要の時間変化に加え、家庭用太陽光発電の普及率及び発電量の時間変化、そしてEVの普及率とそれに従って交通シミュレーションによって再現されるEVの充電行動である。このうち、太陽光発電とEVの普及率を変化させることによって時間的な潮流分布の変化を再現した。シミュレーションの結果より、基準電圧からの逸脱を含めた電圧不安定化現象が観測されるなど、交通状況が電力系統、特に低圧の配電系統に与える影響を確認することが可能な連成モデルが開発されたことを確かめた。

本研究では、低炭素社会の実現に向けた流れとしてEVの普及を背景とした交通網と電力系統間の相互作用に着目し、両システムにまたがる課題を一元的に扱う連成シミュレーションモデルを開発した。はじめに交通シミュレーションについて、EVに特有なモデル化として2つの経路探索手法を提案し、それぞれ既存手法より優れた性質を持つことを示した。これにより既に交通工学の分野において十分に検証のなされたADVENTURE_Matesに対して、依然として確立された意思決定機能のなかったEVモデルを実装し電力系統との効果的な連成を可能とした。続いて電力系統シミュレーションについて、実装された潮流計算の概要を述べた。既存研究において配電系統を対象に実施された数値実験結果を参照解とし、開発モデルが十分な精度を有することを確かめ、CSでの充電需要を負荷ノードの条件として取り込むことにより交通シミュレーションとの連成を可能とした。最後に2つのシミュレータを連成させ、和歌山市中心部を対象とした数値実験により、交通行動に起因する電圧低下現象の再現やEVの普及率によるパラメトリックな解析を可能とした。