

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26282084

研究課題名(和文)電気自動車による物流とエネルギーの統合管理システムの開発

研究課題名(英文)Integrated system for logistics by electric vehicle and energy management

研究代表者

森田 浩(Morita, Hiroshi)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：60210176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,300,000円

研究成果の概要(和文)：電気自動車の活用が見込まれる物流配送分野においても、その普及にあたっては必要電力の確保と電力の有効利用を実現させるには、電気料金の変動や供給電力の制限など新たな要因を考慮することが必要となる。本研究では、複数の電気自動車で宅配を行う場面を想定して、全体最適を実現する配送計画のための数理計画モデルを構築している。供給電力の価格が変動する状況においては、コストを抑えるために電気自動車の運用計画と電力の利用計画を連動させることが望まれる。エネルギーの供給側の価格変動を考慮しつつ、需要側の運用計画を立案するための混合整数計画モデルを作成し、効率的な配送業務計画を実現させた。

研究成果の概要(英文)：It is expected to utilize electric vehicles in the field of logistics and delivery. In order to secure the necessary electric power and make effective use of electric power, it is important to consider new factors such as fluctuations in electricity rates and power supply restrictions.

We have considered a mathematical planning model for a delivery plan by multiple electric vehicles that realizes overall optimization. In the situation where the price of the supply electricity fluctuates, it is desirable to link the operation plan of the electric vehicle and the utilization plan of the electric power in order to reduce the total cost. Considering the price fluctuation on the supply side of energy, we made a mixed integer planning model for planning the demand side operation plan and realized an efficient delivery work plan.

研究分野：オペレーションズリサーチ

キーワード：エネルギー効率化 数理工学 システム工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気自動車導入の背景：

太陽光や風力などの自然エネルギーの導入による供給電力量の不確実性ととも、需要側でも蓄電池や燃料電池などさまざまな機器が導入され、電力融通や協調運用などの必要性も出てきている。地球温暖化ガスの削減にも寄与するといわれている電気自動車の普及は、電力の需要形態を大きく変える可能性がある。

電気自動車は、自動車としての移動運搬の機能だけでなく、電力源としての蓄電池の機能を活用することも考えられている。しかし、走行車両としての本来の機能を充足した上での余剰電力の利用でなければならず、特に、集配を行う物流配送業やバスなどの交通機関において今後電気自動車の導入が進んでいくためには、集配や輸送の機能を果たすことが前提でなければならない。電気自動車の導入にあたっては、エネルギー利用の観点から事業所などにおける統合的なエネルギー管理の一助となるべく働きが期待されている。

(2) 事業所における電気自動車の利用形態：

一般家庭における電気自動車の利用形態と異なり、業務で使用する電気自動車はあらかじめ運行計画が決められている場合が多い。また、複数の電気自動車があることによる台数効果によって、充電に要するピーク電力の削減効果も期待できる。

本研究では、複数の電気自動車が配備されている事業所を想定し、電気自動車の経路計画や運行計画とエネルギー管理を一元化した運用計画の立案システムを構築する。このシステムでは、供給側の不確実性を吸収するように需要側が対応したり、需要側の要求にあった電力を供給したりするだけでなく、供給側と需要側が協調して電力エネルギーの不確実性に対処するものである。

(3) これまでの研究実績：

企業との共同研究によって、電気自動車の充放電スケジューリングとエネルギー管理システムの開発を行ってきた。蓄電機能の活用や充放電のタイミングの調整によってピーク電力の削減や平準化を実現した。しかし、ここでの車両の走行計画はユーザに依存するものであり、管理者側で走行計画を立てるものではなかった。

また、配送や生産現場などにおける経路計画問題に対する数理最適化モデルに関する研究にも取り組んできた。時空間ネットワークモデルによる動的な問題の定式化や不確実性下における意思決定などの研究成果もある。

本研究課題は、これらの知見を融合させて活かすことができるテーマとして着想するに至った。

(4) エネルギーと運行計画の一体管理：

電力のエネルギー管理と電気自動車の運行管理を一体として実現することで、たとえば、エネルギー管理に重点を置きたいときには配送効率を落とすとか、エネルギーのコストはかかっても配送を重視させたいとかの判断を反映させた運用を示すことも可能となる。エネルギーの供給のみならずエネルギーの利用をあわせて勘案した全体最適を模索することを目的としており、相互の妥協点を見出し、全体最適な運用方策を示すことを目指す。

2. 研究の目的

(1) 電気自動車の充放電計画と運行計画を統合したエネルギー管理システムの構築：

複数の電気自動車による余剰電力の融通や一般の電力需要への放電のための充放電スケジューリングによって電力平準化を実現し、運行計画立案のための配送計画スケジューリングシステムと統合する。エネルギー管理と運行管理の連携を図ることにより、電気自動車のもつ不確実性を低減させ、普及促進に寄与する管理システムを構築する。

(2) エネルギー管理のための適応的最適化モデルの開発：

太陽光発電の出力や需要負荷に伴う不確実性に対する頑健性と車輛の走行計画に対する柔軟性を兼ね備え、変化する状況に適応的に対処できるシステムを実現する。たとえば天候に応じて発電量の予測精度が変わったり、走行計画通りに実現できる可能性が見込まれたりする。このような場合に、予測精度や不確実性の程度に応じて頑健性のレベルを変化させるなどの適応的な最適化モデルを構築する。また、大規模な最適化問題に対応しうる解法アルゴリズムも開発する。

(3) 数理最適化への貢献：

最適なエネルギー管理方策を導くための基盤技術として、大規模化と不確実性への対応が可能な最適化技術は非常に大きな役割を担う。ルールベースのシミュレーションでは不確実性には対応できるものの最適性は保証されない。不確実性のもとでの最適化手法である確率的計画法やロバスト最適化などの既存解法では柔軟性や大規模問題への対応は十分とはいえない。

そこで、最適性に対する厳密性を追求するだけでなく、良好な実行可能解を求めるための高速で効率的な解法が望まれる。分解法や列生成法などの解法を組合せ最適化問題へ展開して、問題の規模を縮小したり、混合整数計画問題を連続緩和して求解したりすることで、大規模問題に対する効率化を目指す。さらに、不確実性に適応的に対応することで頑健性も持たせる適応的最適化法を開発する。

(4)エネルギー管理への社会的要請と産業応用：

省エネルギーといえば、必要なエネルギーでも節約して通常の生活や活動が制限されるものと思われがちであるが、経済的な発展や生活水準の維持向上には、必要なエネルギーは十分に確保されなければならない。物流や配送の分野では、配送の時間枠などの顧客の多様な要求や輸送時間の不確実性などに対処したうえで、コストや人員や車両配置の最適化を行っている。配送車はあらかじめ決められた計画にしたがって運行されるため、電気自動車の効率的な運用とエネルギーの有効利用を実現することができれば、その相乗効果により電気自動車の導入がより進むことが期待できる。

特定業務の制約を満たすため車両の利用計画を立案するニーズは古くからあるが、電気自動車を対象としてエネルギー管理の視点から、平準化、ピークカット、電気の融通などの制約を導入した実務的な研究は類例がない。古典的な研究と実務の両者を踏まえつつ、エネルギー管理の視点を制約に取り込んだ数理モデルとスキームを設計し、実務家にも受け入れられやすい現実的な解を得る実装を行う。

3. 研究の方法

まず、エネルギー管理において必要となる不確実環境下でも大規模最適化問題の効率的な解法アルゴリズムの開発に取り組み、次に、不確実性に対して頑健性と柔軟性をもった適応的最適化手法によるエネルギー管理システムを構築する。その後、電気自動車の運行管理とエネルギー管理を統合させることにより、両者のトレードオフを取り扱うことのできるシステムを構築する。

有効性を検証するための実証研究は企業の実務担当者との連携により実現する。研究分担者および連携研究者とは、定期的な会合によって進捗状況をお互いに把握しつつ研究を進めていく。また、国内外の学会を通じた情報収集や最新動向の把握を行うとともに、得られた成果については積極的に学会発表を行う。

4. 研究成果

(1)時間制約を考慮した電気自動車の経路探索モデル：

環境的理由や経済的理由から電気自動車が注目を集めているが、充電に関わるさまざまな問題点があってあまり普及していない。最適化の分野における電気自動車の研究の1つがエネルギー効率の良い経路と充電計画を立てることである。エネルギー効率や充電を考慮した問題を制約付きの最短路問題としてモデル化する。これまではスタート地点とゴール地点が定まっている2点間の制約付き最短路問題に対するアルゴリズムの提案をメインとしているが、本研究で想定して

いる電気自動車による観光ツアーでは、複数の観光地を巡ることになるため、単純な2点間の最短路問題にはならない。

また、走行計画を立てているときには、時間制約も重要な観点となる。本モデルでは区間ごとに経路を求めて、最終的に全区間の経路を繋ぎ合わせている。訪問地点への到着時間の制約がなければ、区間ごとに独立して消費電力が最も少ない経路を求めて繋ぎ合わせれば最適解を求めることができる。しかし、時間制約がある場合には、ある区間で消費電力の少ない経路を選択しても、移動時間が多くかかると、その後の区間において移動時間の短縮を余儀なくされて消費電力の多い経路を通らなければならなくとも生じる。そのため、経路計画の際にはどの区間にどのくらい時間がかかるかを考えることが必要になる。消費電力と時間のトレードオフを考慮しなければならなくなるため、消費電力と時間を目的としたパレート解を区間ごとに求め、各区間から1つ経路を選択して、時間制約を満たしている中で最も消費電力が小さな経路の組合せを求めることとした。

さらに、蓄電量によっては、途中で充電スポットへの立ち寄りも計画しなければならない。訪問地間の各区間においてパレート解を求めたように、区間の出発地点から充電スポット、充電スポットから区間の到着地点への経路のパレート解もそれぞれ求めておく必要がある。

経路生成問題は、負の閉路を含まないグラフ上の2目的最短路問題として定式化できる。負閉路を作らないようにコストと時間の線形加重和による1目的最短路問題として、ベルマン・フォード法により解く。ただし、下り坂で充電されるために、消費電力が電気自動車の最大蓄電量を超えることがあるため、各頂点のラベルを更新する際に、消費電力が最大蓄電量を超えていないかのチェックも行わなければならない。頂点における消費電力が最大蓄電量を超えていれば、ラベルが小さくなる場合でも更新はしない。

パレート解を求めるために、加重和を取るときに重みの値は、2分探索法を基にして探索範囲を限定しながら求めている。



図 1. A 時間制約を考慮した電気自動車の経路

数値実験で得られた結果によると、このモデルでは遠回りになっても消費電力が少ない経路が選ばれている(図 1. A)。時間制約を満たす中で許容できる範囲での遠回り経路や、電力消費量は多くなっても時間制約を守るような経路が示され、柔軟な走行計画が得られるようになっている。



図 1. B 最短経路



図 1. C 消費電力を最小とする経路

電力消費を考慮しないで、最短となる経路を示したのが図 1. B である。起伏のある経路であっても距離の短い経路が選ばれている。消費電力を最小とする経路を示したのが図 1. C である。消費電力は少ない経路が選ばれているので、平坦な道を遠回りしているため、時間制約が満たされなくなっている。

提案手法では、これらを距離と消費電力を両立させた柔軟な経路を示すことを実現している。

(2) 電気自動車による配送計画と充電計画の統合モデル

電気自動車による配送にかかる消費電力量が最小となる経路を選んだとしても、電力価格が変動する状況では充電を行う時間帯によっては、コストが多くかかってしまう可能性がある。電気料金の高い時間帯には配送を行い、安い時間帯で充電を行うことができれば総コストを抑えることができる。配送ルートと充電タイミングを同時に考えて計画を立案するモデルを構築する(図 2)。



図 2 配送と充電計画の例

本研究では、それぞれの電気自動車に割り当てられる経路の集合をあらかじめいくつか用意しておき、それらの中からすべての目的地を巡回できるような経路の組み合わせを選んで電気自動車に割り当てることを考える。

経路集合の初期値として、それぞれの電気自動車の使用可能な電力量、すなわち初期充電量をいくつか設定して、その場合に応じて目的地を巡回できる経路を与えるものとした。充電計画においては、経路の電気自動車への割り当てそれぞれの電気自動車の充電を行うタイミングを求める。

本問題では、複数の電気自動車と充電スタンドを所有するデポから、それぞれの電気自動車が配送を開始するものとする。充電はデポでのみ可能である。目的地間の最短距離をOD表に求めておき、目的地を頂点、目的地間の最短経路長を枝の長さとするグラフを作成する。充電計画を解く前に、このグラフを元に経路を複数生成しておく。

充電計画では、複数の電気自動車について、経路の割り当てとともに充電スタンドの利用計画をたてる。いつ充電を始めるか、充電時間の長さを決定し、電気料金の変動に応じて充電コストが最小となるようにする。電気料金が低い時間帯などでは、必要な電力量が充電できれば良いため必ずしも満充電されるとは限らない。つまりそれぞれの電気自動車が配送に使用できる電力量は一定ではない。したがって、充電のタイミングを決めるとともに、それぞれの電気自動車がどの経路を担当し、いつ配送を行うかも決める必要がある。本問題では、いくつかの時間帯に分けて、それらの時間帯に各電気自動車が配送、充電もしくは遊休のいずれかの状態が割り当てられるものとする。

経路探索問題では、電気自動車の電力残量に基づいて巡回可能な目的地を探索して、巡回路を生成する。与えられた充電量でできるだけ多くの目的地を訪問する経路を求める問題を0-1混合整数計画問題として定式化して、巡回路の初期集合を得る。ここでは、電力残量が十分ある場合でもすべての目的地を巡回できないことも想定しているため、訪問した目的地を除外しながら複数回に分けてすべての目的地を巡回する経路を求めている。

充電計画問題では、経路集合が与えられたときに、その経路を巡回できるだけの電力を確保できるような充電計画のうちで電気コストが最小となるものを求めている。充電スタンドには限りがあるため、同時に充電できる電気自動車の台数にも制限があり、場合によっては充電を待つ間の遊休時間が発生することもある。電気料金の安い時間帯に効率的に充電できるような電気自動車の走行計画を求めようとしている(図3)。

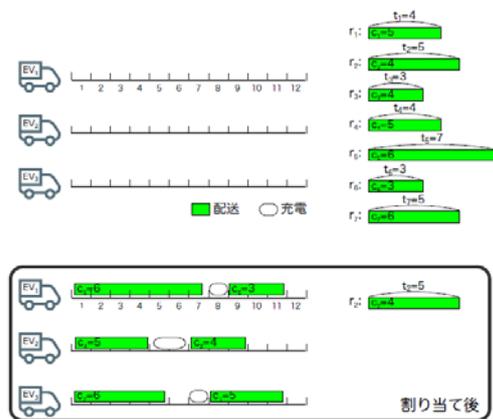


図3 候補経路を充電割り当ての例

充電コストの総和を最小化する問題は 0-1 混合整数計画問題として定式化して、充電計画を求めている。経路候補となる経路集合を更新していきながら、経路探索問題と充電計画問題を繰り返し解くことで、よりよい解が得られていくことが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Keisuke Murakami and Hiroshi Morita, A column generation model for the electric and fuel-engined vehicle routing problem, Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2015年

[学会発表] (計10件)

- ① 前田 慎一、森田 浩、電気自動車による配送と充電計画、日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年春季研究発表会、2018年
- ② Shinichi Maeda and Hiroshi Morita, Electric vehicle routing problem under the limited energy supply, The Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) Annual Meeting 2017, 2017年
- ③ 前田 慎一、森田 浩、電気自動車による配送計画と充電可能性、スケジュールリングシンポジウム 2017、2017年

- ④ 前田 慎一、森田 浩、エネルギー供給に応じた電気自動車による配送計画、第61回システム制御情報学会研究発表講演会、2017年
- ⑤ 前田 慎一、電気自動車における空調機の利用を考慮した配送計画、日本オペレーションズ・リサーチ学会関西支部 2016 年度若手研究発表会、2016年
- ⑥ 村上 啓介、森田 浩、充電と時間制約を考慮したプラグインハイブリッド電気自動車の最適経路計画、日本オペレーションズ・リサーチ学会 2015 年秋季研究発表会、2015年
- ⑦ Keisuke Murakami and Hiroshi Morita, A model and a heuristic algorithm for the electric and fuel-engined vehicle routing problem, International Symposium on Scheduling 2015, 2015年
- ⑧ 村上 啓介、森田 浩、ハイブリッド電気自動車を用いた最適経路計画、第59回システム制御情報学会研究発表講演会、2015年
- ⑨ 村上 啓介、森田 浩、電気自動車とガソリン自動車を併用した配送計画問題に対する解法、情報処理学会第101回数理解モデル化と問題解決研究発表会、2014年
- ⑩ 村上 啓介、森田 浩、時間制約と充電を考慮した電気自動車の最適経路モデルと解法、日本オペレーションズ・リサーチ学会 2014 年秋季研究発表会、2014年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 浩 (MORITA Hiroshi)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：60210176

(2) 研究分担者

村上 啓介 (MURAKAMI Keisuke)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号：90646457
(平成27年度まで)

(3) 連携研究者

梅谷 俊治 (UMETANI Shunji)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：80367820

蓮池 隆 (HASUIKE Takashi)
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：50557949
(平成26年度まで)

(4) 研究協力者

前田 慎一 (MAEDA Shinichi)