

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18037

研究課題名（和文）組合せ最適化に基づく電力割当制御システムのボトムアップによる広域化と高機能化

研究課題名（英文）Expansion and Enhancement of Power Allocation Management System Based on Combinatorial Optimization through a Bottom-Up Approach

研究代表者

森本 尚之（Morimoto, Naoyuki）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40739447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、組合せ最適化に基づく電力割当制御を広域化・高機能化し、電力消費を効率化するための手法を研究した。広域化としては、複数家庭を対象とした電力割当最適化問題や、電力割当制御に応用可能と考えられるいくつかの組合せ最適化問題に対する効率の良いスケジューリングのための最適化手法を提案した。高機能化としては特に、電力ネットワークにおける重要な要素である空調やバッテリーに着目し、IoT技術を活用したシステム構築により、電力割当のための最適化手法・制御手法の検討を行った。また、可能な限り実データを用いた検証を行いつつ、計算機シミュレーションも援用して有用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、複数家庭を想定した電力割当制御問題の定式化と最適化アルゴリズムの開発により、電力消費の効率化に貢献する点である。主に、エネルギー消費量の削減・室温の維持・換気の3つの要素を考慮した室温予測システム、および電力消費の効率化に応用可能と考えられる組合せ最適化アルゴリズムの研究を行なった。社会的意義としては、エネルギー管理システムの高機能化により、エネルギー消費量の削減や、快適で安全な室温・環境維持に寄与する点が挙げられる。これにより、持続可能なエネルギー利用と生活の質向上を両立させる社会の実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we studied methods to enhance and expand power allocation control based on combinatorial optimization, aiming to improve power consumption efficiency. For expansion, we proposed optimization methods for efficient scheduling of power allocation optimization problems involving multiple households and other combinatorial optimization problems applicable to power allocation control. For functionality enhancement, we focused on crucial elements in power networks such as air conditioning and batteries. We explored optimization and control methods for power allocation by constructing systems utilizing IoT technology. Additionally, we evaluated the usefulness of these methods using actual data whenever possible, supplemented by computer simulations.

研究分野：電力割当制御システム

キーワード：電力割当制御システム 組合せ最適化アルゴリズム IoT

1. 研究開始当初の背景

昨今の分散型電源(家庭や地域コミュニティに設置される太陽光発電設備など、比較的小規模な発電設備)の普及や電力不足時の電力消費抑制の必要性を背景として、効率的な電力供給管理の重要性が議論されている。例えば「デマンド・レスポンス」の仕組みにおいては、電力供給者が消費者に対して節電を要請し、その節電量を達成した消費者に報酬(電気料金の割引等)を与えることで電力需要を緩和し、電力需要と供給とのバランスを保つ。しかし、手作業による電力消費管理では確実に節電目標を達成できる保証はなく、また、節電行為を継続することは必ずしも容易ではない。そこで、情報通信技術を活用することで、節電の目標値を達成しつつ、電力を消費する機器(家庭内であれば家電など)や活動に割当てる電力の量を決定し、電力供給を自動的に制御することが考えられる(「エネルギーの情報化」[松山、2009]の考え方等)。

研究代表者は、このような電力割当制御を組合せ最適化問題として定式化し、アルゴリズムの理論的性能評価とシステムの実装評価の両面から研究を行い、実用的な時間で割当計算および制御が可能であることを示してきた。これまで行ってきた組合せ最適化に基づく電力割当制御システムの研究は単一の家を対象としてきた。一方で、近年は太陽光などの自然エネルギー発電設備や、バッテリーとしても活用できる電気自動車などの分散型電源が増加し、また複数の家庭間やコミュニティ間で分散型電源を共有するための設備の設置も進んでいる。また電力自由化や新しい電気料金体系の運用開始などの制度設計も進みつつある。したがって、単一の家レベルに止まらず家庭間や地域コミュニティに対しても電力を適切に割当てることで、電力消費をより広域的に効率化するとともに、災害時や電源障害時などにも頑強な電力供給体制の実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的の一つは、組合せ最適化に基づく電力割当制御を複数家庭・コミュニティレベルに広域化し、さまざまな分散型電源の活用や家庭間・地域コミュニティ間の電力活用による高機能な電力割当制御を実現するシステムを構築することである。複数家庭間や地域コミュニティ間の電力割当の決定もまた、いわゆる資源配分問題などの組合せ最適化問題として解釈できる。そこで本研究課題では、組合せ最適化に基づく電力割当制御の対象規模を実データを基にしてボトムアップにより広域化し、複数家庭や地域コミュニティといった規模でも電力消費を効率化するための手法を学術的に追究する。

また、電力割当の高機能化として、個々の家庭の利便性向上や電力消費の効率化と、複数家庭・コミュニティ全体の高機能化・効率化を両立することを目指す。理論やシミュレーションだけに基づくのではなく、これまでの研究で得られた単一家庭内の電力割当制御システムと実データを活用して、ボトムアップで広域化するアプローチで研究を進める。

電力割当を決定する組合せ最適化問題は、一般に、問題の規模の拡大に応じて必要な計算時間が急増するため、特に対象となる家庭の数が多い場合は、個々の家庭への割当を一括管理的に求めようとしても、計算に膨大な資源と時間を要するため現実的ではないと考えられる。この問題への対策の一つとして、複数の家庭を一定のスケールで集約して階層構造を作り、割当を階層ごとに決定することが考えられる。ただし集約すると、割当計算に要する時間と電力消費の効率化効果とはトレードオフになる。また集約したとしても、個々の集約単位の中での割当計算は困難であり、最適解を求めるのが難しいことには変わりはない。そこで、良い近似解を効率よく得られる割当アルゴリズムを追究する。また、電力需給の予測しづらい突発的な変動にも柔軟に対応できるアルゴリズムを追究する。

3. 研究の方法

本課題では3つの研究トピックを扱う。これらの遂行にあたっては、研究代表者がこれまで行ってきた電力割当制御デバイス・システムの研究開発に加えて、近似アルゴリズム(最適解を求めるのが困難な問題に対し、近似解を効率よく求めることができるアルゴリズム)とオンラインアルゴリズム(状況の変化に対応できるアルゴリズム)の研究知見を基にする。

- 1) 電力割当スケジューリングの組合せ最適化問題としての定式化とアルゴリズム構築: まず各家庭や各集約単位(集合住宅やコミュニティなど)は、将来の電力消費予定(例えば翌日の時間帯ごとの電力消費量)を申告する。電力割当制御システムは、各家庭が提示する電力消費スケジュールを、各種の制約(電源の時間帯ごとの発電量の上限値など)を満たすように組み合わせる。この組合せ最適化問題はNP困難であり、最適解を効率よく得ることは難しい。そこで良い近似解を実用的な計算時間で得られる近似アルゴリズムを追

- 究する。
- 2) 電力需給の変動への動的対応の組合せ最適化問題としての定式化とアルゴリズム構築:1)により電力消費計画を定めても需給の変動は発生するため、変動に動的に対応して割当を変更する必要がある。そこで、将来的にどのように変動するかがわからないという状況下で割当を決定するアルゴリズムを追究する。
 - 3) 集約・階層化のスケールに応じた電力消費効率化と計算効率とのトレードオフの明確化: 家庭の数が多いと割当の計算は複雑になり所要時間が爆発的に増加してしまうと考えられるため、一定のスケール(集合住宅やコミュニティなど)で複数の家庭を一つのかたまりに集約し、階層化することで対処する。ここで、集約のスケール(何個の家庭を一つのかたまりとしてみなすか)に応じて、電力消費の効率化効果と計算効率とはトレードオフになると思われる。そこで問題の定式化にあたっては、電力消費効率と計算効率とのバランスを両立できる集約スケールを追究する。

4. 研究成果

まず、家庭数・コミュニティのスケールに応じた電力消費効率化と計算効率とのトレードオフの明確化のため、複数家庭での電力割当制御問題ならびに関連する最適化問題の定式化の大枠を定め、アルゴリズム設計の方針を立てた。また、問題の定式化とアルゴリズムの方針に基づき、これまでの研究よりもより複雑な状況下で電力消費の最適化を行うためのプロトタイプシステムの開発に着手した。

本研究の目標は実際の電力消費データを用いて、割当制御アルゴリズムの性能評価を行い電力消費の効率化を成すことであるが、そのためのステップとして、当該システムでの計算機シミュレーションを行うことで、実データを用いた評価実験への足がかりとした。特に大きな規模での電力消費の最適化のためには、システムを中心に位置する電力割当制御マネージャだけが計算処理を担当するのは現実的ではなく、システムの末端に位置する電力消費機器、またはその制御を担う電力割当制御デバイスでの処理を高度化することも有用と考えられる。そこで、末端の電力供給制御デバイスであるスマートタップにおける処理の高度化のために、いわゆるエッジAIデバイスであるIntel Neural Compute StickやNVIDIA Jetson Nanoの活用手法を追究した。これにより従来のスマートタップでは困難であった、機械学習を用いた電力利用者の推定や、画像情報や音声情報を活用した電力制御といったシステム末端での処理の高機能化が見込まれ、システム全体の処理の効率化が期待される。並行して、電力割当制御に応用可能と考えられるが計算機での処理が難しい問題(NP困難問題)であるいくつかの組合せ最適化問題を題材として、近似的な解を求めることを目的として定式化を行い、効率の良いスケジューリングのための最適化手法を提案した。

2020年度以降は、新型コロナウイルスの影響で実データに基づく広域的な検証が難しくなったため、特に電力割当制御の高機能化に重点を置き、実データでの検証が可能である課題に着目して研究を行なった。本研究の目標であるボトムアップによる電力割当制御システムの高機能化として、エネルギー管理システムおよびアルゴリズムを主な対象として研究を進めた。主に、エネルギー消費量の削減・室温の維持・換気の3つの要素を考慮したエネルギー管理アルゴリズム、および電力消費の効率化に応用可能なタスクスケジューリング手法の研究を行なった。

特に、エネルギー消費の中で大きな部分を占める空調に着目し、空調の動作のスケジューリング手法の考案とIoTを活用したシステム構築を行った。部屋の環境の管理において、エネルギー消費量の削減、室温の維持、及び換気の3つはいずれも重要な要素であるが、全ての条件を完全に満足させることは難しい。昨今の社会状況を踏まえて、本研究では優先すべき要素を、感染症対策としての換気、快適さのための室温の維持、エネルギー消費量の削減の順であると考え、可能な限りこれら3つを共存させることを目標とした。特に、IoT機器を用いて過去の室温データを収集し、そのデータを組合せて室温の予測を行うこととした。この方針でのエネルギー管理システム実現の第一歩として、CO2濃度が一定値以下に収まるように換気を行う中で部屋利用終了時における室温を予測し、予測室温が条件を満たす場合に空調の消費エネルギーを削減するシステムを実装した。

室温はさまざまな原因により変動するため、その予測は容易ではない。室温の予測にあたっては、予測時点の室温及び過去の空調データが使われる。新型コロナウイルス感染症の影響で有人状態での実験の実施には制約があったため、空調データの収集及びシステムの評価実験は少人数または無人の状態での実施を中心として、適宜シミュレーションを援用した。室温については実際に計測を行い、予測値との比較により提案手法の精度を評価した。

次いで、システムの広域化や、より柔軟なエネルギー消費予測に対応できることを目指し、改善版の室温予測システムの構築にあたった。改善版システムでは、小型コンピュータRaspberry Piと温度センサーにより室温データを収集し、Microsoft Azure上に蓄積されたデータから室温予測モデルを構築する。次いで構築した予測モデルに基づき、天候の影響、換気の効果やエアコンによる環境の変動など、複数の条件設定で予測を行った。評価実験では予測値と実測値とのずれやその原因を評価した。

別の研究の方向性として、単一家庭レベルでもより広域的な複数家庭レベルでも、電力割当制御において特に重要な役割を担うバッテリーに着目した。バッテリーは小型化と大容量化が進み、本研究で構想する電力割当制御システムにおいても重要な役割を担う。一般的にバッテリーは充電と放電を繰り返していくなかで、最大充電容量が低下していく。バッテリーの最大充電容量の低下は経年劣化だけによらず、バッテリーの扱い方によっても影響を受ける。しかし、バッテリーの充電状態の情報(State of Charge)は常に明示的に得られるわけではないため、信頼性をもってバッテリーを活用するためには充電状態の推定が有用となる。そこで、バッテリーの充電状態を電流波形を用いて推定する手法を検討し、実際のバッテリーと実データを用いた実験により有用性を評価した。

以上より、広域化としては複数家庭を対象とした電力割当最適化問題としての定式化と最適化手法の検討、高機能化としては特に電力ネットワークにおける重要な要素である空調とバッテリーに着目し、電力割当のための最適化手法・制御手法の検討を行った。また、可能な限り実データを用いた検証を行いつつ、計算機シミュレーションも援用して有用性を評価した。一部の研究成果は学会などで未発表であるため、今後の学会などで発表を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 石野ちあき, 森本尚之, 山田俊行	4. 巻 14
2. 論文標題 機械の種類を考慮した調理手順最適化の値範囲とbig-M法を用いた離接制約の比較	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用	6. 最初と最後の頁 85-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kiichi Ogawa, Naoyuki Morimoto	4. 巻 2023
2. 論文標題 Social distance estimation system using low-resolution IR images with Boosting-CNN	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)	6. 最初と最後の頁 171-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10227044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 熊谷朋彦, 山田俊行, 森本尚之
2. 発表標題 施設の利用頻度と価値に応じた経路探索
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石野ちあき, 山田俊行, 森本尚之
2. 発表標題 調理手順最適化の並行作業を考慮した半順序制約
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Ishino, Toshiyuki Yamada, Naoyuki Morimoto
2. 発表標題 Disjunctive Constraints Using Integer Range for Food Preparation Scheduling
3. 学会等名 10th IS2EMU2020-C (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石野 ちあき, 森本 尚之, 山田 俊行
2. 発表標題 機械の種類を考慮した調理手順最適化の値範囲とbig-M法を用いた離接制約の比較
3. 学会等名 情報処理学会 第131回数理モデル化と問題解決研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小倉 拓也, 浅野 雄斗, 森本 尚之
2. 発表標題 天候と換気による室温推移を考慮した室温予測IoTシステム
3. 学会等名 電子情報通信学会 2024年総合大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>一般公開セミナー2件：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三重大学大学院工学研究科研究紹介「専攻別セミナー」情報工学編，2021年11月24日 ・三重大学大学院工学研究科研究紹介「専攻別セミナー」情報工学編，2023年12月7日

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------