審 査 の 結 果 の 要 旨

氏　　名　　池田　伸太郎

本研究は、「Building and District Energy Optimization using Metaheuristics and Machine Learning (メタヒューリスティクスおよび機械学習を用いた建物・地域エネルギーシステムの最適化に関する研究)」と題する。

主たる目的は、複雑な熱源システムにおける運用最適化手法を提案し、その利用可能性を明らかにすることである。具体的には、従来開発されてきた経験的・確率的な探索手法であるメタヒューリスティクス、特に ε-constrained differential evolution (εDE)の適用と改良版 εDE with random jumping (εDE-RJ)の提案およびその適用を中心に、不確実性への対応手法やリアルタイム最適化の方法論など当該手法を実務分野で利用するために必要な要素も提案している。

本論文は下記の全 10 章により構成される。

第 1 章は、本研究の背景、既往研究のレビュー、最適化事例の紹介、現状の課題、課題に対する本研究の目的および論文構成について述べている。

第 2 章は、熱源やポンプなどのコンポーネントに関するモデリングおよびその数学的な特性の解説を行っている。また、本研究の基礎的な知識となる線形計画法やメタヒューリスティクスのアルゴリズムに関する解説を行っている。

第 3 章は、単体建物の複雑なエネルギーシステムを対象に単目的および多目的な最適化を行っている。特に多目的最適化では、制約条件を考慮しつつ目的関数の最小化を行う手法の例が過去に見当たらないことから、εDE を多目的手法に拡張する方法を提案している。当該手法を ε-constrained multi-objective differential evolution (εMODE)と呼び、良好なパレート解の算出を通じてその探索能力を示している。

第 4 章は、小規模オフィスを仮定し、最適化計算により得られた最適運用パターンの傾向を示す新たな指標を提案している。当該指標を Area ratio of prices (ARP)と呼び、最適化計算を毎回行わずとも PV 発電電力の自家消費もしくは全量売電のいずれが最適であるかを判断することが可能であることを示している。

第 5 章は、熱需要や発電量の予測値と実測値にズレが生じた場合やデマンド

レスポンス要請によって機器運転計画を変更する必要がある場合に、機器の運用計画を再計算する方法に関して新たな方法論(Two-time steps recalculation (TtsR))を提案している。TtsR を利用することで、計算時間がかかる理想的な再計算方法と比較して計算の精度を維持しつつ、計算時間を短縮することが可能であることを示している。

第 6 章は、εDE-RJ を提案し、その手法を熱応答の時間的変動が重要な要素となる地中熱ヒートポンプを組み込んだ熱源システム最適化に適用している。従来制御と比較を通じて εDE-RJ による最適化効果を確認している。

第 7 章は、地中熱ヒートポンプおよび蓄熱槽の温度計算に要する時間を削減するために、人工ニューラルネットワークによるモデリング手法を提案している。そのモデリング手法と εDE-RJ を組合わせたハイブリッド手法を最適化に適用することにより、従来よりも計算時間を削減しつつ、運用最適化が可能であることを示している。

第 8 章は、上記のハイブリッド手法を地域冷暖房システムに適用することで、複雑なシステムへの当該手法の利用可能性を明らかにしている。更に、人工ニューラルネットワークによる蓄熱槽モデリングに関して、改良方法を提案し予測精度を上げつつ、計算時間を短縮できることを示している。

第 9 章は、地域冷暖房よりも複雑な地域熱融通システムを対象に、上記ハイブリッド手法を適用した。また、人工ニューラルネットワークの予測手法の更なる改善を行い、予測精度を維持しつつ、様々な蓄熱槽の運用パターンに対応することが可能であることを示している。また、ハイブリッド手法の導入効果検証のために、近年利用されている強化学習との比較を行っている。その結果、強化学習に比べた当該ハイブリッド手法の優位性を明らかにしている。

第 10 章は、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について示している。

本論文は、従来の手法では機器特性の簡易化など無しに、現実的な時間で解くことが困難であった最適化問題に対して、メタヒューリスティクスと呼ばれる経験的・学習的探索手法を適用し、最適化問題の特性に限定されない汎用性の高い最適化が可能であることを示している。また、単体建物や地域エネルギーシステム、単目的や多目的など多様な条件での適用を行っている。本論文の知見は、学術分野のみならず実務分野の発展にも貢献するものであり、工学的、社会的な有用性は極めて高い。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。