

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23555

研究課題名（和文）建築設備の革新的設計法を実現する最適化アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development of Optimization Algorithms for Innovative Design Methods of Building Equipment

研究代表者

池田 伸太郎（Ikeda, Shintaro）

東京理科大学・工学部建築学科・助教

研究者番号：00843525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、空調や給湯などの建築設備、とりわけ建築設備設計を対象に、数理アルゴリズムを用いた最適化による設計業務の自動化を目的とした。建築設備設計では設計者による試行錯誤で実施されているが、多種多様なエネルギーシステムを検討する場合、業務時間の関係から検討対象となるシステム構成を限定せざるを得ない。そこで、設計条件に沿った多様なシステム組合せを自動的に計算し、その中から評価が高い組合せを複数提示することができれば、設計業務の補助になるだけでなく、省エネルギーや省CO2にも貢献できる。今回の研究成果によって、従来の経験則によった設計と比較して大幅な省コスト、省エネ、省CO2を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来とは全く異なるアプローチの数理アルゴリズムを開発した。まず、建築設備の実機特性は非線形性を持ち、設備運転が数時間後に影響を与えるという時間的な依存性も有する。しかし従来は、大規模な最適化を実施するために線形化処理を行っていた。その上で、混合整数線形計画法と呼ばれる手法を用いて演算を行う研究が主流であった。しかし、本研究では、実現象を定式化するために非線形性を維持したまま最適化する手法として、複数のアルゴリズムを組合わせた手法を開発した。これにより、非線形性、時間依存性を考慮しつつ、大域的最適化を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to automate the design work of building facilities by optimization using mathematical algorithms. In building equipment design, which is carried out by trial and error by designers, when considering various energy systems, the system configuration to be considered has to be limited due to the time required for work. However, when considering various energy systems, the number of system configurations to be considered must be limited due to the time required for the work. Therefore, if it is possible to automatically calculate various system combinations that meet the design conditions and present several highly evaluated combinations from among them, it will not only assist the design work but also contribute to energy conservation and CO2 reduction. The results of this research have realized significant cost savings, energy savings, and CO2 reduction compared to conventional empirical design.

研究分野：建築設備

キーワード：最適化 メタヒューリスティクス 建築設備設計 建築設備運用 数理最適化

### 1. 研究開始当初の背景

従来主流の設備設計手法では、業務スピードを優先するあまり、新たな技術や機器を十分に検討することは稀で、高効率な機器が持つ潜在的な能力を活かしきれていない。学術研究界隈でも、膨大な計算量が壁となり、設計最適化の研究は滞っている。

そこで応募者は、設計最適化の革新的な方針転換として、汎用的かつ冗長的なシステムをあえて構築し、その多様な選択肢の中から人工知能によって組合せを探索させる「トップダウン式設計法」を直近の研究課題で提案した。これにより、従来の人間の知識にとどまらない新たな「解答」が得られると期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、トップダウン式設計法を実現するための設計業務の高速化・自動化に関するアルゴリズムの開発・検証である。当該アルゴリズムに必要とされる性能は次の3つである。

- 1) 高速性：実務の性質上、長くても1日、理想は2~3時間で最適解を探索する必要がある。
- 2) 高精度：多様なシステムプランを考慮しつつ、最低でも人間が考える従来システムより良い結果を導き出す必要がある。
- 3) 汎用性：建物はプロジェクト毎に要求条件が異なる。したがって、高い汎用性を有した状態で、ある程度のパッケージ化を行わなければならない。

以上の性能を満たすアルゴリズムはこれまで存在していない。従来の学術研究ではエキスパートシステムに代表される条件探索ベースの手法が主流だが、計算時間の問題が解決されず、問題スケールも小さいままである。線形計画法で近似する手法も多用されているが、近年の非線形特性および拡張性を考えると、非線形をそのままに最適化することが理想である。したがって、上記3点を達成するアルゴリズムの開発は学術的独自性を十分に有し、かつ、人工知能による未知のシステムの開拓という課題は、創造性に富むものであり、十分な新規性・創造性を有していると考えている。

### 3. 研究の方法

本研究で扱うトップダウン式設計法とは、従来設計方針(以下、ボトムアップ式設計法と呼ぶ)とは真逆のコンセプトを持つ革新的な手法である。ボトムアップ式設計法は、冷凍機1台にポンプ1台、冷却塔1系統などとシステムチックに決めていたが、トップダウン式設計法では冷凍機の付属機器や冷凍機の台数ならびに接続方法を人工知能が自由に探索することで、新たなシステムを構築するというコンセプトである(図1)。

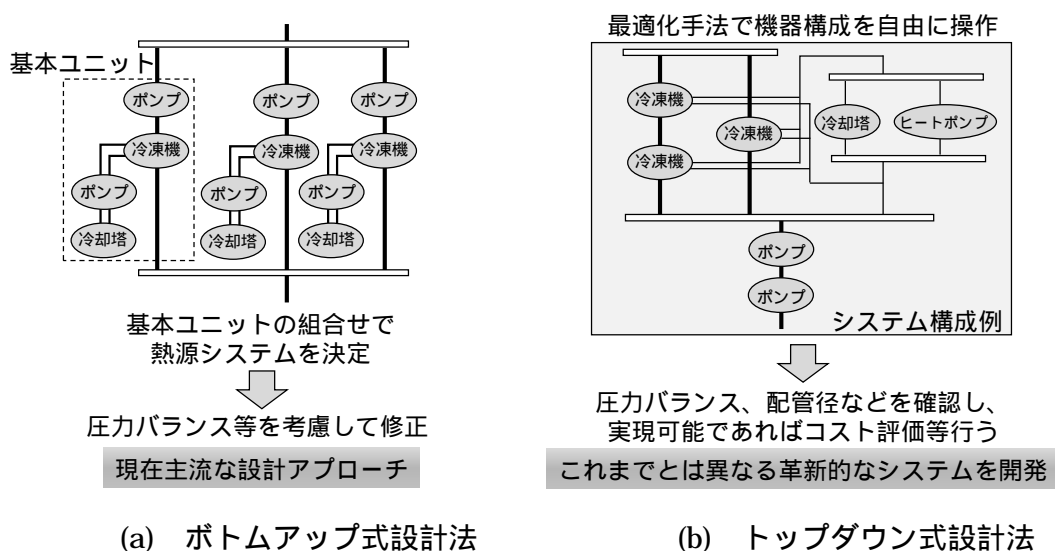


図1 従来の設計アプローチと新システム開発のための新しいアプローチの概念図

トップダウン式設計法はあくまで設計指針であり、実行するためには最適化をおこなうアルゴリズムが必要となる。アルゴリズムには大きく分けて下記の3種類がある。

- 1) 数値計画法：線形計画法や動的計画法などに代表される数学的アプローチを用いた手法
- 2) メタヒューリスティクス：遺伝的アルゴリズムや差分進化に代表される、ランダム性及び反復探索による最適化をおこなう手法

3) 強化学習: Q-learning や Deep Q-Network に代表される、最適化問題のモデル化を行いながら最適化をおこなう手法

上記の内、本研究では熱源容量・構成の組合せ最適化にメタヒューリスティクスと呼ばれる最適化手法の一種である eDE-RJ (epsilon constrained differential evolution with random jumping) を、蓄熱槽の運転計画最適化に動的計画法を、その他の熱源機負荷配分にラグランジュの未定乗数法を用いた。これら 3 つの手法を組み合わせることでトップダウン設計法を実現する。なお、eDE-RJ は研究代表者が提案した手法であり、これまで熱源機器の運用最適化において高い性能を発揮してきた。これを設計の最適化に転用することで従来には無い革新的なアルゴリズムを開発した。

#### 4. 研究成果

本研究ではある一棟の仮想ホテルを対象に設備設計の自動最適化を検証した。図 2 に最適化対象となる熱源システムを示す。熱源は全部で 10 台、蓄熱槽が独立に 3 槽、コジェネレーション及び太陽光発電を考慮している。ホテルは冷熱、温熱、電力、給湯の 4 種類の需要を持っている。このシステムに対して、15 年間のライフサイクルコスト (LCC, 機器導入コスト + 運用コスト + メンテナンスコスト) を最小化するような熱源構成、運転方法を最適化アルゴリズムによって求める。

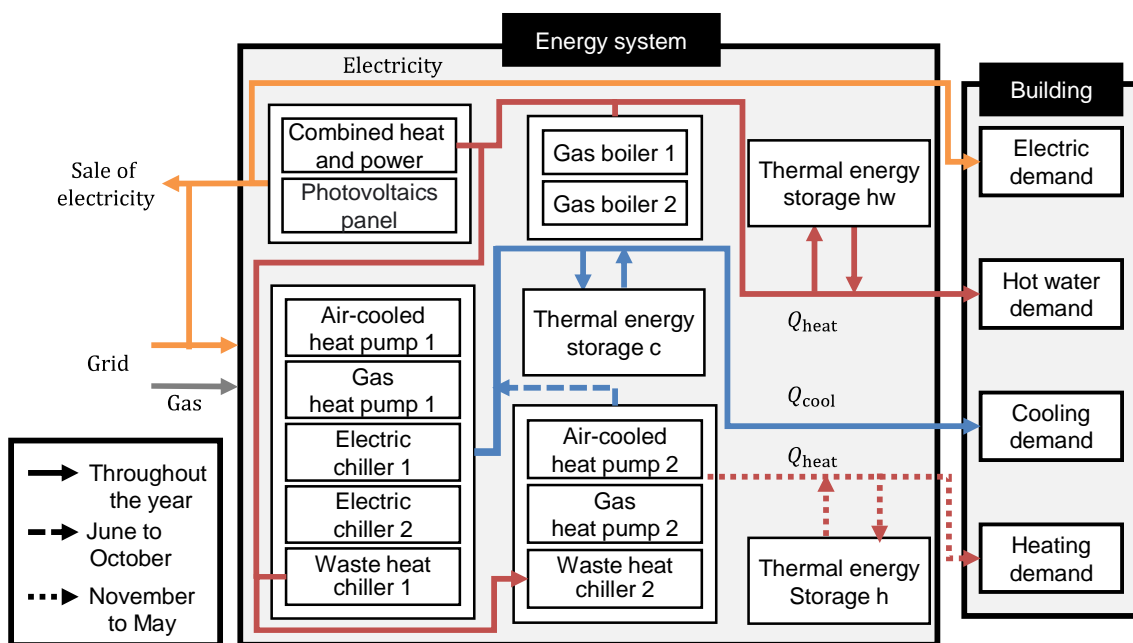


図 2 検証対象仮想オフィスビルの冗長熱源システム

検証 : 従来設計への運用最適化導入

まず設計は従来的な方法論に基づいて行い、運用を最適化したケースを検証した。これにより、運用最適化の効果を単独で検証することができる。図 3 に結果を示す。Case 1 は従来設計かつ従来運転であり本研究のベンチマークケースである。それに対して、蓄熱槽の運転のみを最適化し、その他の熱源については従来運転を実施した場合 (Case 2) には LCC が 2.4%削減、その他の熱源の運転を最適化し、蓄熱槽は従来運転を実施した場合 (Case 3) は LCC が 7.1%削減、蓄熱槽と熱源を同時に最適化した場合 (Case 4) は LCC が 8.2%削減となった。これにより、蓄熱槽と熱源では、熱源の方が最適化の効果が大きく、それ以上に、蓄熱槽と熱源、つまり全ての機器を同時に最適化することで相乗効果が得られることが明らかになった。

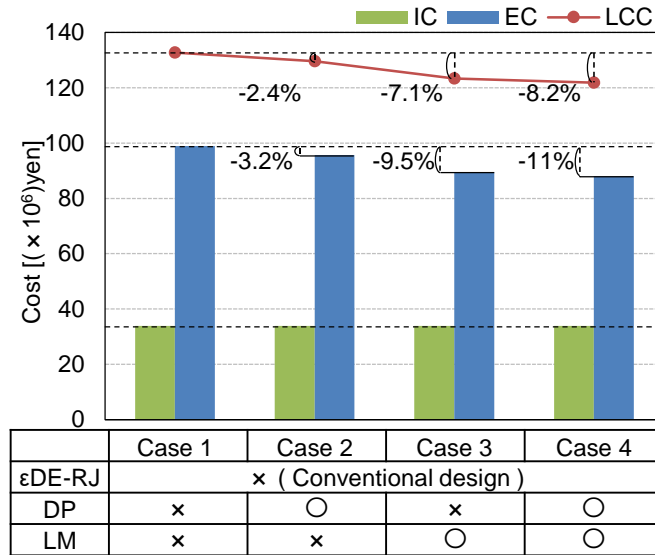


図3 従来設計システムへの運用最適化導入効果

検証 : 最適設計と最適運用の関係と最適化効果

次に、メタヒューリスティクス (εDE-RJ) による最適設計を前提とした場合に、蓄熱槽あるいは熱源の運転計画を最適化することによる最適化効果を検証する。図4に結果を示す。εDE-RJのみのケース (Case 5) では熱源の最適設計のみを実施したケースであるが、従来と比較して22%の削減が示された。つまり、運用計画の最適化にまで至らずとも、熱源機の構成や容量を最適化するだけでも従来から20%以上の削減が見込めるといえる結果である。図4のなかでCase 8が本研究の提案手法であり、従来設計法と比較して28%のLCC削減となった。従って、今回提案したハイブリッド手法を用いることでトップダウン設計法が実現でき、トップダウン設計法によってボトムアップ設計法によりも28%程度LCCの削減が可能になることを示した。

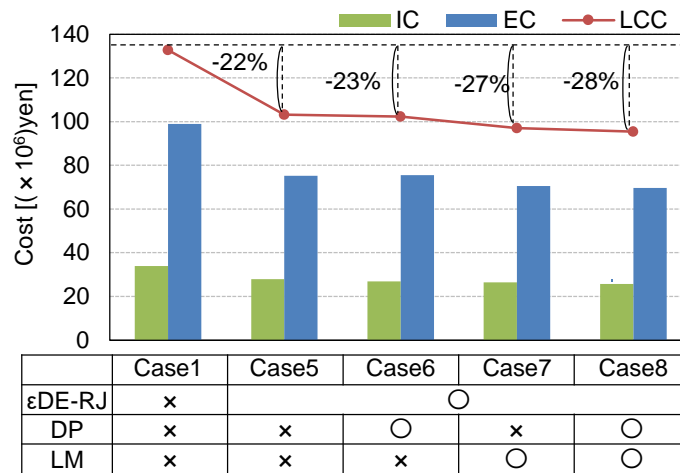


図4 提案アルゴリズムの効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 飯島二裕美、池田伸太郎、長井達夫
2. 発表標題 エネルギーシステムの統合的最適設計に関する自動化アルゴリズムの開発（第1報）知的最適化と動的計画法によるCHPと蓄熱槽を含むシステムの設計最適化
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯島二裕美、池田伸太郎、長井達夫
2. 発表標題 エネルギーシステムの統合的最適設計に関する自動化アルゴリズムの開発（第2報）知的最適化による設計最適化と多様な 機器構成の提案
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------