

## 論文の内容の要旨

論文題目 建設プロセスにおける熱源システム設計・施工の段階的な最適化  
—Building Information ModelingとSystem Simulationの連携による  
最適化検討の効率化と拡張—

氏 名 矢島 和樹

本研究は、設計・施工・運用を通じて熱源システムの設計・制御を最適化することを目指し、設計・施工の段階的な最適化やBIMとシミュレーションの連携方法の研究成果についてとりまとめたものであり、以下の5章からなる。

第1章では、持続可能な開発や気候変動へ対応するためには、省エネルギーに関する取り組みが必要なことを述べた。省エネルギーが必要な分野として建築分野が挙げられ、とりわけ空調用エネルギー消費量およびCO2排出量が多いことを述べた。空調用エネルギー消費量やCO2排出量が多いのは、適切な設計、施工、運用がなされていないからであり、最適な設計や制御をすることでエネルギー消費量やCO2排出量を削減することができる。設計や制御の最適化については多くの研究・取り組みがなされており、その一例について示した。しかし、既往研究では基本設計段階、運用段階などある段階における最適化に関するものであり、施工段階のVEのような熱源システムの詳細な部分の最適化は行われていない。また、最適な設計や制御の考え方が広く普及していない理由として技術的な課題がある。

BIMを取り巻く環境やBIMと環境シミュレーションの連携に関する既往研究などを挙げながら、本研究のBIMとシミュレーションの連携の位置づけを明確にした。CFDや熱負荷計算にBIMの3次元形状データを活用するメリットは大きく、研究・実用化が進んでいるのに対し、設備用BIMとシステムシミュレーションの連携は進んでいない。しかし、本研究で目指す設計・施工の段階的な最適化には詳細なシミュレーションが必要であり、そのためには入力項目が多くモデル構築に時間がかかるという問題があった。BIMとシミュレーションを連携することでモデル構築が効率化できるため、設計・施工の段階的な最適化に必要なことを示した。

以上のような背景から、継続的に熱源システム構成に必要な環境性と経済性の情報を得られる設計・施工の段階的な最適化の構築という目的を示した。目的を実現するための具体的な研究開発内容として、エネルギーとコストの詳細なシミュレーションが可能なツールの開発およびそのツールとBIMとの連携プログラムの開発をすることを述べた。

第2章では、本研究の目的である設計・施工の段階的な最適化の特長に関して、主に既往の最適化と比較して述べた。はじめに一般的な設計・施工プロセスについて整理し、最適化は考慮されていないことを示した。つぎに冷却水温度設定値の最適化、冷却塔ファン周波数設定値の最適化、インバータターボ冷凍機と蓄熱槽を活用した熱源最適運転支援システムといった既往の最適化に関する導入事例を3件紹介した。各事例では、最適化の導出方法と導入後の実測による効果の検証を行い、各事例で数%のエネルギー消費量の削減効果が得られたことを示した。

前述した最適化の導入事例では、要望に合わせて最適化の検討のためのシミュレーションモデルを作成し、最適化の検討を行い、最適化導入および検証をして終わりという流れであった。それに対し、本研究の設計・施工の段階的な最適化では、BIMを活用したシミュレーションをベースとして、設計から運用まで情報的に途切れることなく、継続的に最適化を行うことを述べた。設計・施工の段階的な最適化の適用フローを示し、目的関数やパレート最適解の考え方、パレート最適解の中から最終的な選択解を決定する方法を示した。

第3章では、設計・施工の段階的な最適化を実現するための要素技術について述べた。要素技術は、エネルギーシミュレーション、コストのシミュレーション、最適化手法、BIMとシミュレーションの連携の4つである。

エネルギーシミュレーションは、流量バランス計算と部材1つ1つの圧力損失を反映させた計算を行っており、その計算方法を示した。また、熱源システムを構成する機器のモデル式を示し、その式を用いたシミュレーションモデルと実測との比較により、本研究のケーススタディに用いるモデルが十分な精度であることを示した。

コストのシミュレーションは、機器・部材、設備スペース、設備重量、制御導入コスト、メンテナンスコスト、補給水の使用量などを考慮しており、その計算方法を示した。一部の項目は実績に基づいた大まかな値を計算に用いており、今後体系的にまとめて精度を高める必要があるという課題について言及した。

最適化手法は、パターン探索を制御の最適化に用いており、パターン探索のアルゴリズムの概要を述べた。

BIMとシミュレーションの連携では、BIMとシミュレーションの連携プログラムの概要や今後の展望について述べた。

BIMとシミュレーションを連携することによるシミュレーションモデル構築の効率化

について、作業実験を行って作業時間と作業結果の精度を評価した。作業時間を連携プログラムがない「手作業」と連携プログラムがある「BIM連携」で比較した結果、BIM連携の作業時間のほうが短く、また対象システムが複雑なほど、その効果が大きいことが示された。作業者が作成したシミュレーション入力ファイルを基に計算を行った結果、エネルギー消費量とLCCの値はどちらも手作業と比較してBIM連携のほうが狭い範囲に集中した。BIM連携では、異なる人物がシミュレーションに取り組んでも同じような計算結果を得られ、精度が高いということが示された。以上の結果から、BIM連携のほうが手作業と比較して、作業時間と精度ともに優れていることが確認できた。BIMとエネルギー/コストのシミュレーションの連携が作業の大幅な効率化とシミュレーション結果の精度向上につながる可能性を示した。また、この作業時間と精度の差を既往研究と比較し、既往研究で見込まれている連携効果に対し、本研究のBIMとシミュレーションの連携が同等以上の効果があることが確認できた。

第4章では、第2章で考え方、第3章で要素技術を述べた設計・施工の段階的な最適化の手法を2つの実在の熱源システムに適用した。

1つは研究用途建物であり、吸収式冷凍機1台の簡単な熱源システムを対象とした。設計・施工の段階的な最適化を適用し、基本設計段階、実施設計段階、施工段階と順を追って最適な熱源システム構成を選択した。設計変数には継手や配管材料などVEに関わるような項目も含み、施工段階では干渉を避けるための配管ルートの検討を行った。各段階の選択解は、基準設計に対してエネルギー消費量とLCCともに小さく、最適化を適用することで環境的にも経済的にもメリットの大きい熱源システムを設計・運用することができることを示した。基本設計段階と実施設計段階の解を比較すると、実施設計段階のほうがエネルギー消費量とLCCが小さい部分に集中しており、設計・施工プロセスの段階が進むごとに設計変数の組合せが最適な解に近づいていることが確認できた。

もう1つは大規模複合用途建物であり、インバーターボ冷凍機が5台ある、研究用途建物に対して複雑な熱源システムを対象とした。研究用途建物と同様に設計・施工の段階的な最適化を適用し、基本設計段階、実施設計段階、施工段階と順を追って最適な熱源システム構成を選択した。設計変数は冷却塔の分配、バイパス数、バイパスの位置といった複雑なシステムならではのものについて検討した。各段階の選択解を比較すると、段階を追うごとにエネルギー消費量とLCCが小さくなっていくことが確認できた。

本研究では、運用も考慮しながら基本設計から施工段階の最適化を検討した。今後は、部材の耐用年数を考慮した長いライフサイクルでの最適化などを検討できるようにし、企画、運用、改修など適用範囲の拡大・継続を図る。

第5章では、第4章で得られた最適解と既往の最適化の最適解のエネルギー消費量とLCCを比較し、設計・施工の段階的な最適化の評価を行った。比較対象の既往の最適化

は、基準設計どおりの設計・制御としたものをケース①、設計のみ最適化を行い制御は定格仕様で行うものをケース②、設計は基準設計どおりで制御のみ最適化したものをケース③、設計・制御ともに最適化したものをケース④とした。

研究用途建物では、設計・施工の段階的な最適化は基準設計どおりのケース①に対して、エネルギー消費量が11.1%、LCCが4.5%削減された。しかし、設計・施工の段階的な最適化によるエネルギー消費量とLCCの削減効果は、既往の最適化と比較して同程度であった。エネルギー消費量は最も小さくなったものの差はわずかであり、LCCは既往の手法よりも高い場合があった。設計・施工の段階的な最適化における最適解の選択基準が、エネルギー消費量を重視してLCCは最低基準として設けただけだったので、最終的な選択解の設計変数がLCCが増加しつつエネルギー消費量の削減余地が小さい変数に偏ったことが原因と考えられる。

大規模複合用途建物では、設計・施工の段階的な最適化は基準設計どおりのケース①に対して、エネルギー消費量が23.2%、LCCが16.0%削減された。設計・施工の段階的な最適化による削減効果は、既往の最適化と比較して大きかった。研究用途建物に対して効果が大きかったのは、対象システムが複雑で設計の自由度が大きかったことと、最適解の選択基準をエネルギー消費量基準だけではなく加重和にしてエネルギー消費量とLCCともに考慮したことが理由だと考えられる。最適解の選択基準は、建築プロジェクトの目的や状況に合わせて適切に定める必要があることがわかった。

本研究の特長である最適化を検討できる設計変数の種類を既往研究から広げたことと、継続的な最適化を行うことの効果があるのか検証した。「既往の設計変数」での最適化、「基本設計段階のみ」の最適化、「実施設計段階のみ」の最適化、「施工段階のみ」の最適化と設計・施工の段階的な最適化のLCCの計算値で比較を行った。その結果、設計・施工の段階的な最適化の基準設計からの削減率が16.0%であるのに対し、それ以外の最適化では0.4%～14.1%であった。

以上より、本研究で構築しようとした設計・施工の段階的な最適化が有効であり、BIMを活用することでその検討を効率化できることが示された。本研究によって、設計から施工に至る建築プロセス全体での最適化を行うことができる方法論と有効性が示された。

本研究のBIMとシミュレーションの連携は、3D-CADの種類によらずシミュレーションと連携できるものとして開発し、また、シミュレーション部分もオープンとする。これにより、最適な設計や制御の考え方が広く普及できない理由として挙げた技術的な課題を軽減・解決し、熱源・空調システムの最適な設計・制御を業務の一環として行うことができるようになることを期待する。また、空調専門工事会社の技術的な課題を解決することを目的に開発したツールであるが、空調設備に関わるすべての技術者が活用できるようなツールとなることを期待する。