

## (論文内容の要旨)

空調システムの省エネルギー及び快適環境性能を実現するためには、コミッショニングと呼ばれる性能検証プロセスが有効な手段であり、その重要性が近年世界中で認識されている。ここではコミッショニング作業の各フェーズにおける実施プロセスを明確にし、実施手段(ツール、特にシミュレーション手法)を整備することが重要である。本論文は、アースチューブ併用自然換気システムならびに蓄熱及び可変風量空調システムを対象にして、コミッショニングツールの開発を行い、その成果をまとめたものである。

本論文は2部と序章、終章より構成される。

序章では、コミッショニングプロセスの基本概念を示し、そこにおける本研究の位置づけを示している。

第1部は実測及び自然換気解析とCFDの連成解析によるアースチューブ併用自然換気システム性能の予測と検証に関する研究であり、4章から成る。

1章は序説であり、アースチューブ併用自然換気システムについて、自然換気解析とアースチューブの熱交換解析の既往研究の成果を整理し、本研究の目的、位置づけ及び第1部の論文構成について述べている。

2章では、本研究で提案するアースチューブの熱交換解析、室内の上下温度分布を考慮した自然換気及びCFDによる室内温度分布の予測の三つを連成する解析法について述べたうえ、特に自然換気のCFD連成解析部分について詳細に述べている。

3章では、企画フェーズにおいて、自然換気解析とCFDの連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムに対して性能検証を行い、以下の知見を得た。

(1)体育館の風上側開口に正面から風が吹くときには、アースチューブからの換気量より風力換気が圧倒的に大きいため、アースチューブからの自然換気は室内温熱環境に大きな影響を与えない。

(2)無風のときには、自然換気の駆動力は浮力のみとなり、アースチューブの導入は摩擦抵抗の増加により自然換気量の低減をきたすものの、必要な換気量は確保できる。

(3)床面のアースチューブよりの外気導入開口の風速は0.5 m/sの許容風速より小さく、卓球など風速制限の厳しい競技にも影響を及ぼさない。

(4)アースチューブの導入により、対象空間の居住域の温熱環境に幾分の改善が得られ、外気条件によっては7%~36%の負荷低減があり、これによる省エネルギー効果が認められる。

4章では、運用フェーズにおいて、実測及び自然換気解析とCFDの連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムに対して性能検証を行い、以下の知見を得た。

(1)冬期と夏期の室内上下温度分布は共に強い温度成層分布となっており、床上11mから急激な温度上昇が見られる。

(2)各季節の自然換気量は在室人数が40人の場合の必要自然換気量にほぼ満足できる。

(3)各種の外気条件でのCFD解析結果により室内各所の風速は許容風速0.5 m/s以下である。

(4)アースチューブの導入により、導入外気が予熱/予冷される。冬期には導入外気への顕熱か熱量が約1.7kWであり、導入外気温度を5.9°C上昇させることができる。夏期には導入外気への冷却熱量が0.8kWであり、導入外気温度を3.0°C降下させることができる。

(5)自然換気解析とCFDの連成解析法を用いて計画・設計フェーズでの情報や経験不足に起因する不具合原因を追及し、改修案のシステム性能を予測検証することができることを示した。これにより、本解析手法の運用フェーズでの活用法を明示するとともに、設計フェーズでの活用の重要性を示唆した。

第2部はパターン認識による空調システムの不具合検知・診断に関する研究であり、5章から成る。空調システムは熱源を含む水側システムと空調機を含む空気側システムにより構成され、本部は前者に水蓄熱システムを4章で、後者に可変風量システムを5章で扱った。

1章は序説であり、不具合検知・診断の重要性を述べ、不具合検知・診断ツールの開発に関する既往研究をレビューし、本研究の目的、位置づけ及び第2部の論文構成について述べている。

2章では、パターン認識を空調システムの不具合検知・診断に応用し、トレーニングデータの獲得、不具合検知・診断パラメータの導出、不具合検知・診断ベクトルの最適化、統計的汎距離によるシステム状態の識別と不具合の判定を組み合わせた、新しい不具合検知・診断法を開発した。最終の判定プロセスには、マハラノビスの汎距離を用いている。

3章では、不具合検知・診断ベクトルの最適化方法を記述している。一般にパラメータの数が多ければ多いほど不具合検知・診断の能力が強くなることが期待されるが、パラメータ同士の相関や類似性が存在するので、人間の外界事象に対する最適識別・判断過程を模擬するために有効なシステム状態を識別できる不具合検知・診断パラメータを選び出す必要がある。ここでは、既往の変数選択法、AIC変化量法に加えて、新たに開発した判別率増分法等の3つの不具合検知・診断ベクトルの最適化法のアルゴリズムを記述している。

4章では、蓄熱式空調システムを不具合検知・診断の対象としている。蓄熱式空調システムでは熱源側と2次側のシステム状態変動特性が蓄熱槽に集約され、水槽内の温度分布に現れる。そこで、蓄熱槽内温度プロファイルの実測値とそのフーリエ変換値に基づいて求めた最適化検知・診断ベクトルによる不具合検知を行い、開発したツールの有効性を明らかにした。

5章では、可変風量空調システムを不具合検知・診断の対象としている。可変風量システムは負荷変動と空調機の熱交換制御動作またはVAVダンパーの制御動作の正常・不具合がシステム状態の特徴値の変動に大きな影響を与える。ここでは、空調機の冷水出入口温度、給還気温度、冷水流量、給気風量、各ゾーンの温度、各VAV風量などのシステム状態の特徴値の計測データおよびそれらのフーリエ解析値を用いて、不具合検知・診断パラメータを導出し、上記の不具合検知・診断ベクトルの最適化方法より求めた最適検知・診断ベクトルによる不具合検知・診断を行い、開発した不具合検知・診断ツールを可変風量空調システムに適用する場合にも有効であることを明らかにした。

終章は総括であり、本研究で得られた成果を集約し、今後の課題を纏めている。

## (論文審査の結果の要旨)

空調システムの省エネルギー及び快適環境性能を実現するためには、コミッショニングと呼ばれる性能検証プロセスが有効な手段であり、その重要性が近年世界中で認識されている。ここではコミッショニング作業の各フェーズにおける実施プロセスを明確にし、実施手段(ツール、特にシミュレーション手法)を整備することが重要である。本論文は、アースチューブ併用自然換気システムならびに蓄熱及び可変風量空調システムを対象にして、コミッショニングツールの開発を行い、その研究成果をまとめたものである。以下に、その成果の概要を示す。

第1部は、自然換気解析とCFDの連成解析を用いたアースチューブ併用自然換気システム性能の予測と検証に関する研究であり、

1. 室内上下温度分布を考慮した自然換気解析とCFDとを連成させ、自然換気量と室内温熱環境を同時に求める方法を新たに開発し、これを用いた解析結果と実測値を比較することでこの方法が高い計算精度を持つことを示した。
2. この解析方法を、自然換気で環境調整を行うことを目指して設計された大空間を持つ体育館という実プロジェクトの企画フェーズ及び設計フェーズに適用した結果、各種の外界条件に対応したシステムの自然換気量と室内上下温度分布が同時に予測でき、これが実測値と概ね合致することを示した。
3. 運転フェーズにおいては、この解析法によって、実測データから発見された不具合を取り除いた場合の自然換気量、室内温熱環境などのシステム性能が推定できることを示した。

第2部は、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断に関する研究であり、

1. パターン認識を空調システムの不具合検知・診断に応用することを目指し、トレーニングデータの獲得、不具合検知・診断パラメータの導出、不具合検知・診断ベクトルの最適化、統計的汎距離によるシステム状態の識別と不具合の判定を組み合わせた、新しい不具合検知・診断法を開発した。
2. 最適な不具合検知・診断ベクトルを選び出すために、変数選択法、AIC変化量法並びに判別率増分法による最適化シミュレーションツールを開発した。
3. 実際の水蓄熱システムに対し、蓄熱槽内温度プロファイルの実測値及びそのフーリエ解析値に基づいて不具合検知・診断パラメータを導出し、上記の最適化手法で求めた最適不具合検知・診断ベクトルを用いて不具合検知・診断を行い、開発した手法の有効性を示した。
4. 実際の変風量空調システムに対して、空調機まわりの温度、流量等のシステム状態値及びそのフーリエ解析値に基づく不具合検知・診断パラメータを導出し、上記の最適化手法で求めた最適不具合検知・診断ベクトルを用いて不具合検知・診断を行い、開発した手法が複数の不具合の検知・診断にも有効であることを示した。

以上、本論文では、アースチューブ併用自然換気システム、水蓄熱システム及び可変風量空調システムを対象にしてコミッショニングを行うためのシミュレーション手法の開発及びその適用に関する研究を行っており、その成果は空調システムのコミッショニングプロセスならびコミッショニングツール開発の展開に、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位審査請求に値するものと認める。また、平成21年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。