

京都大学	博士 (工学)	氏名	河野 洋平
論文題目	ビル内温度場におけるゾーン間の拡散ならびにドリフト輸送とそのデータ駆動型モデリング		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、空調制御への応用を念頭におき、ビル内温度場の時空間発展を実測データに基づきモデル化する手法に関して論じたものである。ビル内温度場は、ビル内の空間を人の滞在に合わせて数 m 単位の「ゾーン」に分割し、ゾーン間の熱移動を拡散現象（有効拡散）または移流現象（ドリフト輸送）として記述することができる。このようなモデル構築は、空調制御の新しい可能性の検討を可能にするものである。本論文は 7 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、研究の背景、意義、関連研究の状況を述べている。特に、ビル内温度場で生じる熱移動と関連する空調動作を時空間スケールに応じて整理し、室内の人の滞在や動き（人占有）による熱移動への影響、熱移動による複数空調機間の相互作用、およびアトリウム（吹抜け）を介した部屋間の熱移動をモデル化の検討対象としている。また、モデル化にあたり、熱移動の有効拡散としての記述と、熱移動を記述するためのパラメータである有効拡散係数および有効流速の推定が課題になることを述べている。</p> <p>第 2 章では、ビル内温度場のモデル化の方針について検討している。具体的には、まず、流体の保存則に基づく数値シミュレーションによりビル内の気流構造を調べ、室内および空調給気を有さない（自然換気型の）アトリウム内での熱移動を有効拡散、空調給気を有する（機械換気型の）アトリウム内での熱移動をドリフト輸送として記述する見通しを得た。また、既存の温度場のモデル化手法である均質化について説明している。本手法は気流の空間スケールと比べ、対象とする熱移動の空間スケールが十分大きいこと（スケール分離）を要請する手法であることを述べている。さらに、上記の数値シミュレーション結果から実際のビルではスケール分離は成り立たず、有限の時空間スケールにおいて熱移動を有効拡散として記述する枠組みが必要となることを示した。</p> <p>第 3 章では、第 5 章および第 6 章で用いる実測データとその分析手法を導入している。ここでは、モデル化の対象とするゾーンに対応して、人占有、温度および熱入力の実測データが利用できることを想定している。また、人占有データの分析手法である固有直交分解（POD）、温度および熱入力データの分析手法であるクープマンモード分解（KMD）を導入するとともに、熱移動および空調動作の解析に向け、クープマンモードの時空間振動成分を波動として解釈できることを示した。</p> <p>第 4 章では、有限の時空間スケールにおける有効拡散の記述について構築している。ここでは流速場を所与のものとし、粒子の初期分布をパルス（ガウス関数）として与え、その時空間発展から有効拡散の時定数および有効拡散係数を同定する手法を構築している。基本的な流れモデルへの適用を通して当該手法の妥当性を検証するとともに、気流構造に応じた有効拡散係数の振舞い（スケーリング則）が見られることを確認している。これより、室内および自然換気型アトリウム内での熱移動を有効拡散として記述する上での物理的な裏付けを得た。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	河野 洋平
<p>第5章では、室内温度場を時空間的に変化する拡散係数を有する拡散方程式を用いてモデル化している。ここでは、人占有データを熱入力項および有効拡散係数に組み込むにあたり、人占有データにPODを適用し、時空間スケールの異なる2つの効果（熱源効果および気流効果）を表現している。人占有が詳細に実測されている事務室空間に上記モデルを適用し、温度場のシミュレーション結果と実測データを比較することで、人占有の熱源効果および気流効果が適切に表現されていることを確かめた。</p> <p>第6章では、自然換気型と機械換気型の2つのアトリウムに対して、実測データに基づきアトリウム内の温度場をモデル化している。ここでは、温度場のモデル化に加え、アトリウムを介した熱移動および空調機間の相互作用を把握することを目的として、それぞれのアトリウムで得られる温度および空調給気の実測データにKMDを適用し、支配的な時空間振動成分を抽出した。当該振動成分を用いて有効拡散係数および有効流速を推定し、推定値がアトリウムの構造および空調給気の設定を反映した妥当なものであることを確かめた。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、本研究の空調制御への応用可能性について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、空調制御への応用を念頭におき、ビル内温度場の時空間発展を実測データに基づきモデル化したものであり、ビル内で生じる熱移動の数学的な記述、実測データの分析手法、およびこれらに基づくモデル化の検討により得られた一連の成果をまとめたものである。本論文により得られた主な結果は以下の通り要約される。

1. ビル内の気流の数値シミュレーションに基づき、室内および空調給気を有さない（自然換気型の）アトリウム内の熱移動を（有効）拡散、空調給気を有する（機械換気型の）アトリウム内の熱移動をドリフト輸送として記述する見通しを得た。
2. 温度場のモデル化に用いる実測データの分析手法として、人占有データに対し固有直交分解（POD）、温度および熱入力データに対しクープマンモード分解（KMD）を用いることを提案した。また、熱移動と関連する空調動作の把握に向け、KMDにより得られる時空間振動成分を波動として定式化した。
3. 有限時空間スケールにおける熱移動の有効拡散としての記述可能性を検討した。初期分布としてガウス関数を与えた際の粒子の分布の時空間発展に基づき有効拡散を定式化した。これをビル内気流の基本的なモデルに適用し、拡散係数が気流構造に応じたスケーリング則を示すことを明らかにした。
4. 室内温度場の時空間発展を、拡散方程式によりモデル化する手法を構築した。人占有データを熱入力項および拡散係数に組み込むことで、時空間スケールの異なる2つの効果（熱源効果および気流効果）を表現した。組みみにあたり、人占有データにPODを適用し、人の数時間スケールの滞在と秒スケールの移動を含む成分を抽出した。以上の手法を実ビルに適用し、上記2つの効果が表現されることを示した。
5. アトリウム内の温度場を、実測データに基づきモデル化する手法を構築した。自然換気型ないし機械換気型アトリウムを有する2つのビルに関して、得られた温度および空調給気データにKMDを適用し、主要な振動成分を抽出した。当該成分の波数ベクトルから、アトリウムを介した部屋間の熱移動が生じること、および複数空調機が連携しこれを打ち消そうと動作することを明らかにした。また、当該成分を用いて熱移動を記述するパラメータを推定し、上記2つのビルの構造および空調の運転設定を反映した妥当な値が得られることを示した。

上記のように本論文は、ビル内のゾーン間で生じる熱移動を記述する枠組みと温度場の時空間発展をモデル化する手法を与えるもので、ゾーン内の流体運動および空調機の動作と熱移動との関係性を明確にしたものである。課題の抽出、設定、および分析手法とそれによるモデル化は極めて独創的であって、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）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月27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、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。