

学 位 論 文 題 名

粒状潜熱蓄熱材を適用した
床吹出し空調システムに関する研究

学位論文内容の要旨

電力負荷需要の昼夜の極端なアンバランスは、機器容量の大型化や効率低下だけでなく、新たなインフラ投資につながる。この原因のひとつに事業系建物の空調用エネルギーがあり、蓄熱による負荷平準化は有望な改善策であるといえる。蓄熱方法としては、現在一般的である氷や水による蓄熱の他、潜熱蓄熱材(Phase Change Materials, PCM)の固液間の相変化熱を利用した潜熱蓄熱などがあげられる。潜熱蓄熱は、利用温度近くで高密度に蓄熱できる点や熱利用時に相変化温度付近においてほぼ一定温度が得られるなどの特徴を持つ。従来の潜熱蓄熱システムでは PCM を容器等に封入して用いてきたが、この場合、容器壁面近傍の固化層が熱抵抗となり熱交換性能が低下する点が問題であり、このため大規模なタンクを用いた蓄熱装置が必要であった。一方、近年採用例が増加している深夜電力を用いた躯体蓄熱は、建物躯体のコンクリートを蓄熱体として利用するものであり、非蓄熱型の空調システムから容易に変更できる利点を持つが、躯体の蓄熱容量のみではピーク負荷に対応する蓄熱量を確保できず、付带的に氷や水蓄熱の併用が必要となっている。また、躯体蓄熱時の床吹出し空調においては、始業時の床温低下に伴う室内温熱環境の悪化が改善すべき問題となっている。

本論文では粒径 2-5 mm の粒状 PCM 充填層と熱媒である空気との直接接触型の熱交換方式を提案している。この方式の特徴は熱交換面積が大きく、薄い充填層においても相変化中の高い熱交換性能が持続的に得られる点にある。本論文の目的は、この粒状 PCM と空気の直接接触による熱交換方式における基礎的な熱交換特性を明らかにし、躯体蓄熱床吹出し空調システムへ適用したときの蓄熱量増加と始業時の室内温熱環境改善の効果を定量的に評価することであり、これにより、適正な計画・設計方法を提供しようとするものである。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は、序論であり、空調分野における負荷平準化の意義について述べた。

第 2 章では、過去の研究について述べ、本研究の目的およびその位置づけを示した。

第 3 章では、粒状 PCM と空気の直接接触型熱交換方式における基礎的特性を明らかにした。空調への適用を想定し、相変化温度約 25°C の粒状 PCM を円筒カラム中に充填して通風実験を行い、PCM の相変化中にはほぼ一定の熱交換量が得られること、またその持続時間は面風速と温度の違いによらず、無次元滞留時間にステファン数を乗じた無次元数 t^* で予測できることを示し、本実験では $(2.0 \pm 0.5) \times 10^3$ となることを明らかにした。一方、今回用いた粒状 PCM の場合、面風速 3.0~5.5 cm/s の範囲では粒状 PCM と空気の温度を等しいとした計算方法が適用できることを実験と計算の結果から示した。

第4章では、潜熱蓄熱を活用した床吹出し空調システムの小型実験装置を用いた蓄放熱特性に関する実験結果を示した。ここでは、粒径3 mm程度の発泡ガラスビーズにパラフィン真空吸引にて保持させ、表面にはパラフィンの漏出・昇華防止のための樹脂コーティングを施した自作品を用いた。まず、送風温度をステップ変化させた実験により、粒状PCMを敷設した場合には通常の躯体蓄熱と比較して、室温変化の時定数が2倍前後になることを確認した。次に、オフィス空調を模擬した日単位の蓄放熱実験を行い、本粒状PCMを使用する場合に昼間の空調機負荷は大きく削減され、空調機負荷の夜間移行率 η_s は89%に向上することを示した。

第5章では、蓄熱型床吹出し空調システム解析のための数値解析プログラムを構築し、その中で必要となる種々の熱移動係数を小型実験システムの結果により同定した。システムの熱特性に最も影響を与えるパラメータは多孔OAフローアード上表面の熱移動係数であり、この値は8 W/m²/Kと同定された。第4章の実験で用いた粒状PCMの潜熱量を仮想的に増減させた計算により、 η_s を100%に向上するための条件と、躯体蓄熱のみの場合と比較して始業時の室温低下の改善効果が得られる範囲を定量的に明らかにした。

第6章では、数値計算により本システムの室内温熱環境の予測と評価を行った。ここでは、粒径数 μm のマイクロカプセル中にPCMを保持させ、ペレット状に成形した粒状PCM(FMC-PCM)について3種類の試作品の適用を検討した。これらの試作品はいずれも130 kJ/kg以上の高い潜熱量を示すことを確認した。標準的な中規模オフィスビルを対象として、第5章で作成した数値解析プログラムに室内の放射熱授受を考慮に加え、室内温熱環境評価を行った。相変化温度が20.0-22.9°CのFMC-PCMを12.5 kg/m²敷設した場合には η_s が100%となることに加え、設定室温を28°Cとしても、床面からの冷放射の効果により空調時間中の作用温度は設定室温より1.5°C程度低く保たれた。特に、始業時のグローブ温度は、躯体蓄熱のみの場合には、高さ0.3 m地点でも23.1°C程度であり夏期の快適温度域を下回る温度となったのに対し、上記PCMを敷設した場合には、PCMの一定温度での蓄冷効果により高さ0.1 m地点においてもグローブ温度は24.5°Cとなり、始業時の温熱環境の改善効果が示された。

第7章は、床面積9.2 m²の実規模の環境試験室を用いた実証実験について述べた。標準的な内部発熱と外界条件を与えた場合、躯体蓄熱のみで行う運転方式では夜間移行率 η_s は50%程度であったが、相変化温度が18.2~21.4°CであるFMC-PCMを12.5 kg/m²敷設し、蓄熱時の床下空間への送風温度を12°C、昼間の設定室温を28°Cとして運転した場合には、 η_s は92%となりほぼ全ての冷房負荷を夜間の蓄熱により賄うことができた。このとき、始業時の室温は24°C以上を維持しており、被験者の温冷感申告実験では「涼しい」との回答は見られなかった。これらの結果から、本提案システムにおいて全蓄熱運転を可能とする適正な運転方法を提示し、その場合執務時間帯には快適な室内温熱環境を維持できることが実証された。

第8章では、外気導入による省エネルギー効果の予測を行った。まず、PCM充填層を住宅の給気システムに導入した場合について検討し、換気負荷の削減効果は外気温の日較差の大きい都市ほど高くなり、京都では最大で63%の換気負荷が削減されとの結果を得た。また、東北以北の都市においては、換気負荷に加えて冷房負荷も大幅に削減できることを示した。これらの結果を踏まえ、粒状PCMを適用した床吹出し空調システムにおける外気導入による自然冷熱利用効果を予測した結果、札幌では冷房期間を通じた空調機負荷を37%まで低減できること、東京においても中間期には空調機負荷を半分程度に削減できることが明らかとなった。

第9章では、本研究で得られた結論を総括し、今後の研究の展望について記した。

本研究では、粒状 PCM を用いた床吹出し空調システムについて、実験と数値計算により蓄放熱特性と室内温熱環境を定量的に評価し、適正な計画・設計方法を示した。以上より、本システムが省エネルギーと室内温熱環境の面から非常に有用であることを結論づけた。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	長野 克 則
副査	教授	横山 真太郎
副査	教授	窪田 英 樹
副査	教授	繪内 正 道
副査	助教授	羽山 広 文

学 位 論 文 題 名

粒状潜熱蓄熱材を適用した 床吹出し空調システムに関する研究

電力負荷需要の昼夜の極端なアンバランスは、機器容量の大型化や効率低下だけでなく、新たなインフラ投資につながる。この大きな原因が事業系建物の空調用消費エネルギーであり、蓄熱による負荷平準化は効果的な改善策である。蓄熱方法としては、水や氷蓄熱の他、固液間の相変化を利用する潜熱蓄熱などがある。潜熱蓄熱は、利用温度近くで高密度に蓄熱できる点や熱利用時に相変化温度付近においてほぼ一定温度が得られるなどの特徴を持つ。従来の潜熱蓄熱システムでは相変化材料（Phase Change Material, PCM）を球状容器等に封入して用いてきたが、この場合、容器壁面近傍の固化層が熱抵抗となり熱交換性能が低下する点が問題であり、このため大規模なタンクを用いた蓄熱装置が必要であった。一方、近年採用例が増加している深夜電力を用いた躯体蓄熱は、建物躯体のコンクリートを蓄熱体として利用するもので非蓄熱型の空調システムから容易に変更できる利点を持つが、躯体の蓄熱容量のみではピーク負荷に対応する蓄熱量を確保できず、付带的に水や氷蓄熱の併用が必要となる。また、始業時の床温低下に伴う室内温熱環境の悪化が改善すべき問題となっている。

本論文では粒径 2~5 mm の粒状 PCM 充填層と熱媒である空気との直接接触型の熱交換方式を提案している。この方式の特徴は熱交換面積が大きく、薄い充填層においても相変化中の高い熱交換性能が持続的に得られる点にある。本論文の目的は、この粒状 PCM と空気の直接接触による熱交換方式における基礎的な熱交換特性を明らかにし、躯体蓄熱床吹出し空調システムへ適用したときの蓄熱量増加と始業時の室内温熱環境改善の効果を定量的に評価することであり、これにより、適正な計画方法と運転方法を提供しようとするものである。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は、序論であり、空調分野における負荷平準化の意義について述べている。

第 2 章では、過去の研究について述べ、本研究の目的およびその位置づけを示している。

第 3 章では、粒状 PCM 充填層と熱媒としての空気との直接接触型熱交換における基礎的な熱特性を解明している。空調への適用を想定し、相変化温度約 25℃ の粒状 PCM を円筒カラム中に充填して通風実験を行い、PCM の相変化中にはほぼ一定の熱交換量が得られること、またその持続時間は面風速と温度の違いによらず、無次元滞留時間にステファン数を乗じた無次元数 Pe^* で予測できることを示し、本実験では $(2.0 \pm 0.5) \times 10^3$ となることを明らかにしてい

る。一方、今回用いた粒状 PCM の場合には、面風速 3.0~5.5 cm/s の範囲では粒状 PCM と空気の温度を等しいとした計算方法が適用できることを実験と計算の結果から示している。

第 4 章では、潜熱蓄熱を活用した床吹出し空調システムの蓄放熱特性に関して小型実験装置を用いた実験から検討している。ここでは、粒径 3 mm 程度の発泡ガラスビーズにパラフィンを真空吸引にて保持させ、表面にはパラフィンの漏出・昇華防止のための樹脂コーティングを施した自作品を用いて、まず、送風温度をステップ変化させた実験により、粒状 PCM を敷設した場合には通常の躯体蓄熱と比較して、室温変化の時定数が 2 倍前後になることを確認している。次に、オフィス空調を模擬した日単位の蓄放熱実験を行い、本粒状 PCM を使用する場合に昼間の空調機負荷は大きく削減され、空調機負荷の夜間移行率 η_s は 89 %に向上することを明らかにしている。

第 5 章では、蓄熱型床吹出し空調システム解析のための数値解析プログラムを構築し、その中で必要となる種々の熱移動係数を小型実験システムの結果により同定している。システムの熱特性に最も影響を与えるパラメータは多孔 OA フロアーボード上表面の熱移動係数であることを示し、この値が約 8 W/m²/K となることを同定している。第 4 章の実験で用いた粒状 PCM の潜熱量を仮想的に増減させた計算を行い、 η_s を 100%に向上するための条件と、躯体蓄熱のみの場合と比較して始業時の室温低下の改善効果が得られる範囲を定量的に明らかにしている。

第 6 章では、数値計算により本システムの室内温熱環境の予測と評価を述べている。ここでは、粒径数 μm のマイクロカプセル中に PCM を保持させ、ペレット状に成形した FMC-PCM の 3 種類の試作品の適用を検討している。これらの FMC-PCM の潜熱量はいずれも 130 kJ/kg 以上と高い値を示すことが実測されている。標準的な中規模オフィスビルを対象として、第 5 章で作成した数値解析プログラムに室内の放射熱授受を加味した室内温熱環境評価を行っている。相変化温度が 20.0~22.9°C の PCM を 12.5 kg/m²敷設した場合には η_s が 100%となることに加え、設定室温を 28°C としても床面からの冷放射の効果により、空調時間中の作用温度は設定室温より約 1.5 °C 低く保てることを示している。特に、始業時のグローブ温度が、躯体蓄熱のみの場合には高さ 0.3 m 地点で 23.1°C と夏期の快適温度域を下回っているが、PCM を敷設した場合には、PCM の一定温度での蓄冷作用により高さ 0.1 m 地点においてもグローブ温度が 24.5°C となっており、始業時の温熱環境の改善に効果があることを明らかにしている。

第 7 章は、床面積 9.2 m²の実規模の環境試験室を用いた実証実験について述べている。標準的な内部発熱と外界条件を与えた場合、躯体蓄熱のみを行う運転方式では夜間移行率 η_s は 50%程度となるが、相変化温度が 18.2~21.4°C である FMC-PCM を 12.5 kg/m²敷設し、蓄熱時の床下空間への送風温度を 12°C、昼間の設定室温を 28°C として運転した場合には η_s は 92%まで上昇し、ほぼ全ての冷房負荷を夜間の蓄熱により賄うことができることを示している。このとき始業時の室温は 24°C 以上を維持しており、被験者の温冷感申告に「涼しい」との回答は見られなかった。これらの結果から、本システムにおいて全蓄熱運転を可能とする運転方法を示し、その場合執務時間帯には快適な室内温熱環境が維持できることを実証している。

第 8 章では、外気導入による省エネルギー効果の予測を行っている。まず、PCM 充填層を住宅の給気システムに導入した場合について検討を行い、換気負荷の削減効果は外気温の日較差の大きい都市ほど高くなり、例えば京都では最大で 63 %の換気負荷が削減されること、一方で東北以北の都市においては、換気負荷に加えて冷房負荷も大幅に削減できることを示している。これらの結果を踏まえ、粒状 PCM を床吹出し空調システムに適用した場合の外気導入による自然冷熱利用効果を予測したところ、札幌では冷房期間を通じた空調機負荷を 37 %まで低減できること、東京においても中間期には空調機負荷を半分程度に削減できることを明らかにしている。

第 9 章では、本研究で得られた結論を総括し、今後の研究の展望について記している。

これを要するに、著者は粒状 PCM 充填層と空気の直接接触による熱交換方式を提案し、この熱交換特性を明らかにすると共に、この応用例の一つとして粒状 PCM を用いた新しい潜熱蓄熱利用床吹出し空調システムを考案して、実験と数値解析から本システムの適正な計画方

法と運転方法を示し、それによる省エネルギー効果と室内温熱環境の改善効果を実証しており、人間環境計画学および空気調整工学の進展に寄与するところ、大なるものがある。
よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。