

学位論文題名

含水多孔質層の凍結熱伝達に関する研究

学位論文内容の要旨

含水した多孔質層の凍結現象は、寒冷環境下での土壌の自然凍結や樹木の凍結などに代表されるほか、工学の面においても、軟弱な地盤の固化を目的とした地盤凍結工法、汚泥の凍結融解処理、食品の冷凍保存・凍結粉碎および低温貯蔵庫の建設など種々の分野と密接に関連している。さらに近年、寒冷地において、土壌を潜熱蓄冷槽とした低温貯蔵庫が開発されるなど、冬期冷熱を夏期に有効に活用しようとする試みがなされている。また、都市部においては、深夜電力の効率的運用を目的とした氷蓄冷空調システムが利用されている。しかし、氷蓄冷槽の性能は、一般に、蓄冷材料すなわち水・水の熱的性質によってある範囲内に限定され、その利用目的に応じた伝熱特性を得ることが困難である。しかし、土壌を潜熱蓄冷槽として利用する場合と同様に、水と固体粒子より構成される多孔質層を蓄冷槽として利用した場合、その利用目的に応じて、固体粒子の種類、ならびに粒子量などを変化させることにより、幅広くその伝熱特性および蓄冷特性を変えることが可能となる。

このように、含水多孔質層の凍結は、自然界における問題のみならず、様々な工学の分野に関連する重要な問題である。したがって、その熱的特性や凍結挙動に関する詳細な検討が必要となっており、様々な条件下における凍結熱伝達特性を実験的に検討するとともに、凍結量および蓄冷熱量などを解析的に予測することは意義あることと考えられる。しかしながら多孔質層の凍結に関する従来の実験および解析的研究では、凍結量や温度分布に関する検討に主点がおかれ、多孔質物性や粒子径、ならびに温度条件が、蓄冷熱量および凍結熱伝達特性におよぼす効果に関しては、ほとんど研究がなされていない。

このような現状に基づき、本論文では、含水した多孔質層の凍結に関して実験的および解析的研究を行い、これまで不明であった粒子物性、粒子径、加熱・冷却温度条件、および未凍結層内に発生する自然対流が、凍結熱伝達特性、蓄冷熱量、および凍結界面形状におよぼす影響に関して詳細な検討を行っている。

本論文は、7章より構成されている。第1章は序論であり、含水多孔質層の凍結が関連する自

然現象および工学的問題について概説し、含水多孔質層の凍結熱伝達に関する研究の意義と本研究の概要を述べている。

第2章では、多孔質層の凍結問題に関連する基礎事項と従来の研究について、実験および解析の双方の観点から述べるとともに、これらの研究における問題点を指摘し、含水多孔質層の凍結に関する本研究の目的および位置付けを明らかにしている。

第3章では、含水した多孔質層の凍結に関する実験および解析に先立ち多孔質層の熱物性値に関して実験的検討を行った。ここでは、始めに自然界における多孔質層の身近な例として土壌を取り上げ、その温度伝導率の経時変化を種々の含水率のもとで測定することにより、温度勾配下において発生する土壌内での物質移動に関して検討を行った。次に、多孔質層の凍結熱伝達に関する数値解析および実験を行なうための基礎データを得ることを目的として、熱物性値の既知な粒子より構成されている多孔質層が空気、水、および氷で満たされた場合の熱伝導率、熱容量、および温度伝導率の測定を行い、粒子層の熱伝導率の算定に従来用いられているモデル式の妥当性、ならびに熱伝導率算定モデル式および体積熱容量より求められる温度伝導率の推定値の妥当性に関して検討を行っている。

第4章では、含水多孔質層の非定常ならびに定常状態における凍結熱伝達特性を、数値解析により詳細に検討することを目的として、最も基本的な構造である上下面を断熱壁、左右垂直壁をそれぞれ加熱壁、および冷却壁とした矩形多孔質層のモデルを導入し、界面移動をともなう相変化問題の解法として、凍結界面形状および界面近傍の温度応答を正確に算定することが可能な、境界固定法に基づいた数値解析手法について述べている。また、未凍結領域の運動量方程式には、固体壁面ですべりなしの条件を満足させるため、粘性の影響を、さらに高レイレー数領域への適用が可能となるように、速度の2乗に比例した慣性の影響を取り入れた拡張されたダルシー法則を採用するとともに、未凍結領域および凍結領域に対する各基礎方程式、ならびに凍結界面でのエネルギーバランス式の無次元化により多孔質層の凍結現象に影響する無次元数に関して検討を行っている。

第5章では、垂直な加熱・冷却壁を有する含水矩形多孔質層の定常および非定常状態における、凍結熱伝達および凍結層厚さにおよぼす、未凍結層内に生ずる自然対流の影響を明らかにするため、種々の加熱・冷却温度粒子径、および粒子物性の場合に関して、実験および第4章で述べた数値解析法による検討を加えている。実験においては、非定常状態での多孔質層への伝熱量の測定、赤外線温度計（サーモビューア）による温度分布の可視化、および定常状態での凍結界面形状の写真撮影を行い、数値解析結果との比較検討を行っている。

第6章では、工学的応用例として、実際に蓄冷される場合を対象として取り上げ、水で飽和された矩形多孔質層の一垂直壁から冷却が行われ、凍結が進行する場合を考え、その凍結量、蓄冷熱量、および凍結界面での熱伝達特性に関して実験的ならびに解析的検討を行っている。ここでは主として凍結量、蓄冷熱量、および凍結界面での伝熱特性に及ぼす、初期温度空隙率、および粒子物性の影響に関して検討を行っている。さらに、実測された凍結層厚さおよび蓄冷熱量に関する無次元整理式を提示している。

第7章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べており、含水多孔質層の凍結量および蓄冷熱量に関する解析方法および研究結果は、自然凍結に伴う凍害防止対策への情報となるのみでなく、多孔質利用蓄冷槽の開発設計の基礎資料となることを述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	福迫尚一郎
副査	教授	飯田誠一
副査	教授	谷口博
副査	教授	石黒亮二

含水多孔質層の凍結問題は、凍結界面上で潜熱の吸収あるいは放出が存在し、凍結界面が時空間的に変化する移動境界問題であることから、その熱移動現象は、未凍結層内での対流伝熱および凍結層内での伝導伝熱が複合した問題として取り扱わなければならない。

含水多孔質層の凍結は、寒冷環境下での土壌の凍結や樹木の凍結などの自然現象のみならず、地盤凍結工法、汚泥の凍結融解処理、食品の冷凍保存・凍結粉碎、およびLNG地下埋設タンクの建設など様々な工学の分野と密接に関連する重要な問題である。さらに近年、寒冷地において、土壌を潜熱蓄冷槽とした低温貯蔵庫が開発されるなど、その熱伝達特性や凍結挙動の解明が急務となっている。しかしながら、従来の研究では、凍結熱伝達特性および蓄冷熱量に関してはほとんど検討がなされていない、さらに、解析的研究においては、凍結界面の取り扱い方や未凍結領域内の温度場および流れ場の検討は、充分ではなかった。

本論文では、含水多孔質層の凍結に関して実験的および解析的研究を行い、これまで不明であった粒子物性、粒子径、加熱・冷却温度条件、および未凍結層内に発生する自然対流が、凍結熱伝

達特性、蓄冷熱量、および凍結界面形状におよぼす影響に関して詳細な検討を行い、その結果を7章にまとめている。

第1章は序論であり、含水多孔質層の凍結が関連する自然現象および工学的問題について概説し、含水多孔質層の凍結熱伝達に関する研究の意義と本研究の概要を述べている。

第2章では、多孔質層の凍結問題に関連する基礎事項と従来の研究について述べるとともに、これらの研究における問題点を指摘し、本研究の目的および位置付けを明らかにしている。

第3章では、多孔質層の熱伝導率、熱容量、および温度伝導率の測定を行い、粒子層の熱伝導率の算定に従来用いられているモデル式の妥当性、ならびに熱伝導率算定にモデル式および体積熱容量より求められる温度伝導率の推定値の妥当性に関して検討を行い、含水多孔質層の凍結に関して解析的検討を行う際の熱物性値の算定方法に関する指針を与えている。

第4章では、含水多孔質層の凍結熱伝達特性を、数値解析により詳細に検討することを目的として、最も基本的な構造である上下面を断熱壁、左右垂直壁をそれぞれ加熱壁、および冷却壁とした矩形多孔質層のモデルを導入し、界面移動をともなう相変化問題の解法として、凍結界面形状および界面近傍の温度応答を正確に算定することが可能な、境界固定法に基づいた数値解析手法について述べている。

第5章では、垂直な加熱・冷却壁を有する含水矩形多孔質層の定常および非定常状態における、凍結熱伝達特性および凍結層厚さにおよぼす、未凍結層内に生ずる自然対流の影響を明らかにするため、種々の加熱・冷却温度、粒子径、および粒子物性の場合に関して、実験および解析による検討を加えている。

第6章では、実際に蓄冷される場合を対象として、水で飽和された矩形多孔質層の一垂直壁から凍結が進行する場合の凍結量、蓄冷熱量、および凍結界面での熱伝達特性に関して実験的ならびに解析的検討を行うとともに、凍結層厚さおよび蓄冷熱量に関する無次元整理式を提示している。

第7章は結論であり、本研究において得られた結果を総括している。

これを要するに、本論文は、含水多孔質層の凍結に関して実験的および解析的研究を行い、粒子物性、および未凍結層内に発生する自然対流などの諸因子が、凍結熱伝達特性、蓄冷熱量、および凍結界面形状に及ぼす影響を明らかにするとともに、含水多孔質層の凍結量および蓄冷熱量の予測、ならびに凍結熱伝達の制御に関して指針を与えたものであり、その成果は伝熱工学に寄与するところ大である。よって著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。