論文審査結果の要旨

論文提出者氏名　猿谷友孝

本論文は「Numerical and experimental studies of ice lens formation with implication for interfacial melting」(アイスレンズ形成に関する数値的・実験的研究と界面融解への推察)と題し、全 7 章からなる。アイスレンズとは、粒子・流体混合系が凍結する際にしばしば形成される「粒子をほとんど含まない氷の層」を指す。アイスレンズが形成されると系は著しい膨張を示す。水・砂の混合系である土壌におけるこのような膨張は凍上 (frost heave)と呼ばれており、地上構造物に損害をもたらすため古くから研究されてきた。

本論文の主な目的は、アイスレンズ形成の微視的な物理過程に焦点を当てることによって、アイスレンズが形成する時間と場所を定量的に予言する理論を構築し、それを実験で検証することにある。第 1 章は論文全体への導入であり、凍上現象の概略と形成されるアイスレンズの定量的評価の必要性が説明される。第 2 章と第 3 章は先行研究についての解説である。第 2 章においては、これまでの実験的研究および理論的研究が俯瞰的見地から解説される。第 3 章においては、本論文が依拠するところの premelting 理論についてより詳しく説明される。本論文における premelting とは、粒子・流体混合系において粒子の表面効果と曲率効果により間隙水の融点が低下する現象を指す。アイスレンズ形成のためには粒子・流体混合系における流体の効率的な移動が必要であるが、この premelting によって融点を下回る低温環境でも流体の移動が可能となる。この融点以下での流体移動は、粉体粒子表面の液膜の流れなので「液膜流」と呼んで、Darcy 則に従う「間隙流」とは区別する。第 4 章では、申請者が行ったアイスレンズ形成の実験結果が述べられる。透明な容器を用いることにより、時間とともにアイスレンズが成長する過程を定量的に追跡することが可能になっている。また、ガラスビーズと水の混合系を用いることにより、空隙率や粒子の曲率など物性の細かい制御を可能にしている。とくに粒子曲率は表面効果による間隙流に大きな影響を及ぼすため、粒子直径を 0.6-100 ミクロンという広範囲で系統的に変えた実験を行い、形成されるアイスレンズの位置と厚さの粒子直径依存性を調べている。第 5 章では、第 3 章で説明された premelting 理論に基いてアイスレンズ形成モデルの数理が述べられる。アイスレンズ形成のためには、融点となっている場所で粒子が吐き出され、かつ十分な量の水が凍結前線まで移動できなければならない。間隙水の移動速度が融点の等温面の移動速度よりも小さければアイスレンズは形成されない。したがって、両者の移動速度が等しくなる場所と時間がアイスレンズ形成の場所と時間を決めることになる。ここではまず熱伝導

と移流的な熱移動を考慮することで温度の時空発展方程式を立てる。次に、間隙流と液膜流それぞれの寄与を考慮した流体移動速度を評価し、温度の時空発展方程式への入力として用いる。この発展方程式を第 4 章で述べられた実験の境界条件のもとで数値的に解き、系の温度の時空発展を計算している。この数値計算の結果を実験結果と比較し、両者が定量的に一致することを確認している。第 6 章では、第 4 章で解説された実験と第 5 章の理論との詳細な比較を行っている。とくに、アイスレンズの形成位置と厚さの粒子径依存性を、フィッティングパラメター無しで定量的に説明できたことは注目に値する成果である。第 7 章は結論にあてられている。
本論文での主要なオリジナルの結果は、第 4 章のガラスビーズと水を用いた凍上実験、第 5 章の理論モデル、および第 6 章で述べられる実験と理論モデルの比較である。これらの成果は Alan W. Rempel 氏（オレゴン大学）および指導教員の栗田敬氏との共著として、すでに 3 編の論文が刊行されている。実験については申請者本人が単独で行ったものである。理論モデルの基本概念は Rempel 氏の先行研究に基いてはいるが、実験との詳細な対応の検討に際しては申請者と Rempel 氏の緊密な連携のもとにモデルの状況設定を行い、実際の数値計算は申請者が主体的に行っている。よって、申請者の寄与は十分であると判断する。
以上の点から、本論文は博士（理学）の学位を授与するのにふさわしい内容であると審査員会は全員一致で判定した。