

学位論文題名

巨視的凍上理論の研究

学位論文内容の要旨

本論文は水分飽和土の一次元凍上現象に関する凍上量予測理論(凍上理論)を提案するものである。本論文の内容を以下に要約する。

1. 凍上現象とその研究の工学的必要性

凍上現象は土が凍結するときに生ずる凍土の膨張現象であり、未凍土から凍土への水分移動とその凍結による凍土の体積増加よりなる。凍上現象の特徴として、移動水分が凍土内の特定の場所で集中的に凍結すると、アイスレンズと呼ばれる純氷の層ができる。「アイスレンズ成長面」(移動水分が凍結する面)は水分移動の終端面であり、凍上現象を理解する上で重要である。

工学分野では凍土が土中構造物に及ぼす影響を把握するために凍上理論が必要となるが、現状では応用可能な、信頼に足る凍上理論が確立されていない。

2. 研究の背景

既往の理論的な研究では凍上現象の微視的な側面を重視する傾向が強く、凍上量予測理論全体におけるこれら各微視的な現象の重み付が不十分であった。そこで、本論文第2章では、既往の凍上理論で中心的な役割を果たす「一般化クラウジウス-クラペイロンの式」(GCCE)に関する既往の理論的研究と実験的研究から、GCCEが水分移動のない場合の状態式(静的状態式)であることを確認し、かつ、既往凍上理論の熱力学的な矛盾点を指摘した。この検討から、凍上現象の枠組みを決定するような巨視的な研究、言い換えれば熱移動と水分移動の相互関係を熱力学的に検討する基礎研究が必要であることが判明した。

3. 基本課題と目的

さて、凍上研究の基本課題は①給水駆動力の特定、②水分移動量(凍上量)の特定、③アイスレンズ成長面位置の特定、である。上述の必要性を満たすため、本論文では凍上現象を熱力学モデルに置き換えて検討することにより、これらの課題に対する理論を逐次明らかにし、この結果を統合して熱力学的に整合性のある凍上理論を構築することを目的とする。この目的は、凍上の原因となる水分移動量を特定し、凍上量の理論的な予測を可能にすることと同じである。

4. アイスレンズ成長面の動的状態式

本論文第3章は基本課題①に対応する。最も単純な凍上現象、すなわちアイスレンズ成長面だけで凍上が生ずる定常状態の凍上現象を考える。この単純な凍上現象について、アイスレンズ成長面を挟む微小要素を検討対象系として、この系に関する水分移動のエンタルピバランスをとることにより、水分移動がある場合の状態式(「動的状態式」)を導出した。得られた動的状態式は、「アイスレンズ成長面で発生する有効エネルギーが給水面からアイスレンズへの水分移動に必要な力学エネルギーを賄う」という物理的な意味をもち、水分移動がない条件下ではGCCEに一致する。

動的状態式の実験的検証用に、アイスレンズ成長面位置が固定できる特殊な凍上実験装置と、アイスレンズ成長面間隙水圧が測定できる間隙水圧計を新たに開発した。この装置を用いて凍上中のアイスレンズ成長面の間隙水圧を測定し、静的条件下で GCCE が成立すること、および動的条件下で動的状態式が成立することを実験的に確認した。

5. 氷晶析出率と凍上理論

本論文第4章は基本課題②と③に対応する。まず、アイスレンズ成長面の動的状態式を拡張すべく、「フローゼンプリンジ」(凍結面とアイスレンズ成長面の間の領域)内の微小要素を検討対象系として水分移動に関するエンタルピバランスをとり、フローゼンプリンジに適用可能な動的状態式(「一般化動的状態式」と「氷晶析出率関数」を導出した。この一般化動的状態式は物理的には「フローゼンプリンジ内の微小要素に流入して析出凍結する水分を地中深部の給水面から微小要素に移動させるために必要な力学エネルギーは、微小要素内で析出凍結する水分と温度降下のために単純凍結する水分とが凍結するときに発生する有効エネルギーにより賄われる」ことを意味する。また、氷晶析出率関数は、単位体積のフローゼンプリンジで単位時間に析出凍結する水分体積(氷晶析出率)と定義される。

次に、一般化動的状態式を利用してフローゼンプリンジの状態量変化を考察し、フローゼンプリンジが、析出凍結を生ずる「過冷却領域」と単純凍結のみが起きる「平衡領域」に分けられることを示した。この結果は、「フローゼンプリンジは平衡領域のみで構成される」とする既往の凍上理論の想定を否定するものである。

さらに、析出凍結を勘案した水分移動方程式と熱移動方程式を導き、これらと氷晶析出率関数が凍上理論の基礎方程式となることを示した。同時に、動的状態式がアイスレンズ成長面の境界条件であることを含め、凍上理論の境界条件を明らかにした。以上が基本課題②に対応する理論である。

最後に基本課題③「アイスレンズの移動」に関する以下の仮説を提案した。すなわち、過冷却領域では、温度降下による透水係数の減少により間隙水圧の降下が加速される一方、析出凍結による水分体積流束の減少により間隙水圧の低下が抑制される。これら相反する事象に起因して、間隙水圧分布に変曲点が現れ、動的状態式を満足する位置が変わる結果アイスレンズ成長面位置が移動する。

以上より、本論文が提案する凍上理論でアイスレンズの移動が説明できることが分かり、アイスレンズ成長面を移動内部境界として扱うる非定常凍上理論の構築ができた。

6. 凍上能解析と検証

本論文第5章では、凍上能解析と呼ばれる疑似定常簡易数値解析により本論文で提案する凍上理論の妥当性を検証した。3つの研究グループによる凍上実験について凍上能解析を実施、解析結果が実験結果と合うことを確認した。

7. 結論

以上に述べたごとく、本論文により熱力学的に整合性のある凍上理論が初めて提案された。この提案内容を本論文の結論として以下に記す。

- ①凍上量予測理論の構築には凍上現象を巨視的に検討すれば十分である。
- ②熱力学的検討よりアイスレンズ成長面に適用可能な動的状態式を導出し、実験的に検証した。
- ③熱力学的検討よりフローゼンプリンジに適用可能な一般化動的状態式を導出し、これより氷晶析出率を氷晶析出率関数として定量化した。
- ④氷晶析出率関数、水分移動方程式、熱移動方程式を基礎方程式とし、動的状態式をアイスレンズ成長面の境界条件とする凍上理論を構築した。
- ⑤アイスレンズ成長面が移動する理由を明らかにした。
- ⑥凍上能解析(数値解析)結果が凍上実験結果と合うことを確認し、本論文が提案する凍上理論の凍上量予測に関する妥当性を検証した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎

副 査 教 授 福 田 正 已 (低温科学研究所)

学 位 論 文 題 名

巨視的凍上理論の研究

本論文は水分飽和土の一次元凍上現象に関する凍上量予測理論(凍上理論)を提案するものである。

凍上現象は土が凍結するとき生ずる凍土の膨張現象であり、未凍土から凍土への水分移動とその凍結による凍土の体積増加よりなる。凍上現象の特徴として、移動水分が凍土内の特定の場所で集中的に凍結すると、アイスレンズと呼ばれる純氷の層ができる。「アイスレンズ成長面」(移動水分が凍結する面)は水分移動の終端面であり、凍上現象を理解する上で重要である。工学分野では凍土が土中構造物に及ぼす影響を把握するために凍上理論が必要となるが、現状では応用可能な、信頼に足る凍上理論が確立されておらず、また既往の理論的な研究では凍上現象の微視的な側面を重視する傾向が強く、凍上量予測理論全体におけるこれら各微視的な現象の重み付が不十分であった。

そこで、本論文第2章では、既往の凍上理論で中心的な役割を果たす「一般化クラウジウスークラペイロンの式」(GCCE)に関する既往の理論的研究と実験的研究から、GCCEが水分移動のない場合の状態式(静的状態式)であることを確認し、かつ、既往凍上理論の熱力学的な矛盾点を指摘した。この検討から、凍上現象の枠組みを決定するような巨視的な研究、言い換えれば熱移動と水分移動の相互関係を熱力学的に検討する基礎研究が必要であることが判明した。

さて、凍上研究の基本課題は①給水駆動力の特定、②水分移動量(凍上量)の特定、③アイスレンズ成長面位置の特定、である。

そこで本論文の目的は、上述の必要性を満たすため、凍上現象を熱力学モデルに置き換えて検討することにより、これらの課題に対する理論を逐次明らかにし、この結果を統合して熱力学的に整合性のある凍上理論を構築することにある。この目的は、凍上の原因となる水分移動量を特定し、凍上量の理論的な予測を可能にすることと同じである。

本論文第3章は基本課題①に対応する。最も単純な凍上現象、すなわちアイスレンズ成長面だけで凍上が生ずる定常状態の凍上現象を考える。この単純な凍上現象について、アイスレンズ成長面を挟む微小要素を検討対象系として、この系に関する水分移動のエンタルピバランスをとることにより、水分移動がある場合の状態式(「動的状態式」)を導出した。得られた動的状態式は、「アイスレンズ成長面で発生する有効エネルギーが給水面からアイスレンズへの水分移動に必要な力学エネルギーを賄う」という物理的な意味をもち、水分移動がない条件下ではGCCEに一致する。

動的状態式の実験的検証用に、アイスレンズ成長面位置が固定できる特殊な凍上実験装置と、アイスレンズ成長面間隙水圧が測定できる間隙水圧計を新たに開発した。この装置を用いて凍上中のアイスレンズ成長

面の間隙水圧を測定し、静的条件下で GCCE が成立すること、および動的条件下で動的状態式が成立することを実験的に確認した。

本論文第 4 章は基本課題②と③に対応する。まず、アイスレンズ成長面の動的状態式を拡張すべく、「フローズンフリッジ」(凍結面とアイスレンズ成長面の間の領域)内の微小要素を検討対象系として水分移動に関するエンタルピバランスをとり、フローズンフリッジに適用可能な動的状態式(「一般化動的状態式」と「氷晶析出率関数」)を導出した。この一般化動的状態式は物理的には「フローズンフリッジ内の微小要素に流入して析出凍結する水分を地中深部の給水面から微小要素に移動させるために必要な力学エネルギーは、微小要素内で析出凍結する水分と温度降下のために単純凍結する水分とが凍結するときが発生する有効エネルギーにより賄われる」ことを意味する。また、氷晶析出率関数は、単位体積のフローズンフリッジで単位時間に析出凍結する水分体積(氷晶析出率)と定義される。

次に、一般化動的状態式を利用してフローズンフリッジの状態量変化を考察し、フローズンフリッジが、析出凍結を生ずる「過冷却領域」と単純凍結のみが起きる「平衡領域」に分けられることを示した。この結果は、「フローズンフリッジは平衡領域のみで構成される」とする既往の凍上理論の想定を否定するものである。

さらに、析出凍結を勘案した水分移動方程式と熱移動方程式を導き、これらと氷晶析出率関数が凍上理論の基礎方程式となることを示した。同時に、動的状態式がアイスレンズ成長面の境界条件であることを含め、凍上理論の境界条件を明らかにした。以上が基本課題②に対応する理論である。

最後に基本課題③「アイスレンズの移動」に関する以下の仮説を提案した。すなわち、過冷却領域では、温度降下による透水係数の減少により間隙水圧の降下が加速される一方、析出凍結による水分体積流束の減少により間隙水圧の低下が抑制される。これら相反する事象に起因して、間隙水圧分布に変曲点が現れ、動的状態式を満足する位置が変わる結果アイスレンズ成長面位置が移動する。

以上より、本論文が提案する凍上理論でアイスレンズの移動が説明できることが分かり、アイスレンズ成長面を移動内部境界として扱いる非定常凍上理論の構築ができた。

本論文第 5 章では、凍上能解析と呼ばれる疑似定常簡易数値解析により本論文で提案する凍上理論の妥当性を検証した。3 つの研究グループによる凍上実験について凍上能解析を実施、解析結果が実験結果と合うことを確認した。

以上に述べたごとく、本論文により熱力学的に整合性のある凍上理論が初めて提案された。この提案内容を本論文の結論として以下に記す。

- ①凍上量予測理論の構築には凍上現象を巨視的に検討すれば十分である。
- ②熱力学的検討よりアイスレンズ成長面に適用可能な動的状態式を導出し、実験的に検証した。
- ③熱力学的検討よりフローズンフリッジに適用可能な一般化動的状態式を導出し、これより氷晶析出率を氷晶析出率関数として定量化した。
- ④氷晶析出率関数、水分移動方程式、熱移動方程式を基礎方程式とし、動的状態式をアイスレンズ成長面の境界条件とする凍上理論を構築した。
- ⑤アイスレンズ成長面が移動する理由を明らかにした。
- ⑥凍上能解析(数値解析)結果が凍上実験結果と合うことを確認し、本論文が提案する凍上理論の凍上量予測に関する妥当性を検証した。

これを要するに著者は、1次元凍上がおこりつつある水分飽和土中での動的状態方程式を導出し、その妥当性を実験的に検証し、これを用いて熱力学的に整合性のある凍上量予測理論(凍上理論)を開発しており、熱工学上有益な多くの新知見を得たものであり、熱工学の進歩に貢献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あるものと認める。