

学位論文題名

凍結を伴う土壌熱源ヒートポンプの採熱特性に関する研究

学位論文内容の要旨

土壌は膨大な熱容量を有し、存在の普遍性、温度レベルの安定性を有するため、古くからヒートポンプの熱源として有望であると考えられ、多くの研究がなされてきた。しかしながら、土壌をヒートポンプの熱源として利用するシステムはいまだ欧米の一部を除いて普及には至っていないのが現状である。普及を阻んでいる最大の原因は、土壌の熱伝導性が悪いために地中に設置する土壌熱交換器の規模が大きくならざるを得ないことに問題がある。また、熱利用量に大きな影響を及ぼす土壌の熱物性値が土壌の種類や含水状態によって大きく異なることや複数の熱交換器の設置方法などが問題を複雑にしており、解析的、実験的な裏付けのある設計法が確立されていないことにも原因がある。本システムの普及の鍵は、設置する熱交換器と土壌の伝導性を高め、通過抵抗をできるだけ低くすることにより土壌熱交換器の規模を縮小させることにあるといえる。このためには、土壌中の水分の凍結潜熱の利用と凍土の高い熱伝導率を利用することが非常に有効であると考えられる。

通常、土壌中には体積割合で20~60%の水分が含まれており、0℃において莫大な潜熱量を放出しながら凍結する。一方、凍土の熱伝導率は未凍土に比べて上昇し、飽和に近ければ未凍土の2倍前後にまで達することが知られている。従来、凍結を伴う土壌の熱利用に関していくつかの研究があるが、いずれも飽和土壌を対象にしたものであり、また短い期間で採熱能力を評価しているものがほとんどである。しかしながら、ヒートポンプの熱源として考えるならば、長期間にわたっての解析からその評価が必要であると考えられる。

この様な現状に基づき、本論文では、ヒートポンプの熱源としての土壌のより効果的な利用方法として、凍結を伴う熱利用について取り上げ、その採熱特性を長期間にわたる実験と解析から究明することを目的としている。まず、自然状態に近い不飽和土の凍結・融解による熱物性値の変化の機構を定量的に明らかにし、次に、ヒートポンプの熱源としての採熱特性と長期的利用可能性を求め、埋設方式の異なる2つの形態、垂直方式と水平方式についてフィールド実験を行い、それらの特性を把握した。さらに、設計に必要な基本的な指針と知見を与え、負荷に見合う適正な土壌熱交換器の規模を示した。特に、従来この分野では解析例がない自然状態に近い土壌を対象に数年間にわたる実験と解析から採熱能力の評価にとどまらず、夏期の自然回復や長期間の使用可能性について明らかにした。

本論文は8章より構成されている。第1章は、序論であり、土壌をヒートポンプの熱源として用いることの意義と土壌の凍結を伴う熱利用についての有効性について述べた。

第2章は、土壌を熱源とするヒートポンプシステムの従来の研究について概説するとともに、土壌の凍結を伴う熱利用、および不飽和土壌における凍結現象に関する従来の研究について解説し、本研究の目的および位置付けを明らかにした。

第3章では、凍結を伴わない0℃以上での熱利用に関して、長さ20mの垂直埋設管を用いた実験と解析から検討を行った。2年間にわたる連続採熱実験および放熱・採熱の繰返し実験を行い、顕熱移動による採熱量が10~20W/mとその能力は小さいことを示した。さらに、Kelvinの線源理論を応用して凍結を伴わない土壌の熱利用の限界熱量について検討し、各種条件下での限界採熱量を提示した。

第4章では、凍結を伴う土壌の熱利用を研究する際の基礎となる、凍結・融解過程における熱伝導率について5種類の土壌を対象に実験を行い、温度と含水率に対する熱伝導率の変化を明らかにした。また、凍土中の不凍水分量の定量を行い、各種土壌の熱伝導率の変化の相違を説明した。以上の実験の結果を踏まえ、数値計算において必要となる未凍土・凍土を連続的に扱うことができる熱伝導モデルを新たに提案した。これは、未凍土の直並列型の3相モデルを発展させ、不凍水分量および含水率を考慮することで凍土領域まで拡張したものである。計算値は実測値と比較的良好一致を示しモデルの汎用性を実証した。

第5章では、採熱量および土壌温度の予測のために必要な、凍結・融解を伴う熱・水分同時移動の基礎理論とその数値解法を示し、土壌採熱の研究分野で初めて自然状態に近い不飽和土壌を対象にした、採熱量および土壌温度、土壌水分量等を計算するコンピュータプログラムの開発を行った。熱伝導率の予測には、第4章で提案した熱伝導モデルを適用し、精度良い予測を可能としている。また、土壌採熱に関する室内実験を行い、本計算プログラムが実際の現象を精度良く再現することを明らかにした。

第6章では、凍結を伴う垂直埋設管による土壌採熱のフィールド実験と解析を行った。直膨型ヒートポンプを用いて実用規模での採熱実験を120日間にわたって行い、凍結を伴う場合の採熱量および土壌温度の推移の特性を明らかにした。期間平均の単位長さ当たりの採熱量は28W/mであり、この値を単位温度差当たりに換算すると約2.1W/m/℃と、凍結を伴わない場合の2倍程度となることを明らかにした。また、第5章で開発したプログラムがフィールドでも適用可能なことを検証した後、凍結による採熱量増大のメカニズムについて検討を行った。その結果、凍結を伴う場合の採熱について潜熱変換量は積算採熱量の25%程度であり、凍結による採熱量の増大分のかなりの割合を占めているのを明らかにした。

第7章では、凍結を伴う水平型埋設管の採熱能力と土壌温度の自然回復、暖房熱源としての長期利用可能性を実験的に明らかにした。4種類の水平型埋設管を深さ1.0~1.8mに水平に埋設し、2か年にわたり実験を行った。初年度の実験から暖房期間を通して単位溝長さ当たり50MJ/(m・d)前後の日積算採熱量が安定して得られ、この値は埋設溝が同じであれば熱交換器の形状によらずほぼ同じであることを示した。採熱終了後は夏期の放置期間で十分に土壌温度が回復することを示した。第2年度は、これらの水平型埋設管にヒートポンプを接続して住宅の暖房負荷を模擬した条件での実験を行い、その結果、期間平均採熱温度は1.6℃であり、長期間安定した暖房運転が可能であることを実証した。

第8章では、土壌の凍結を伴う水平並列型埋設管を用いた暖房シミュレーションを行い、口径、間隔、埋設面積、埋設深さ等の設計因子について検討を行った。まず、従来は相互の熱干渉がないように決められていた埋設間隔について、新たに埋設面積を重視した考え方を示し、熱媒の循環動力を考慮した口径と間隔の関係について最適値が存在することを明らかにし、これらの関係を定量的に示した。次に、暖房の熱源としての長期的な使用可能性について採熱温度および土壌温度の経年変化から評価するとともに、負荷に対する必要埋設面積を示した。また、地表面熱収支を含む年間のエネルギーフローを求め、採熱量の90%以上が夏期の外界からの入熱により賄われていることを初めて定量的に示すとともに、限界埋設深さを明らかにした。

第9章は総括であり、本研究で得られた結果を要約して述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 落 藤 澄
副 査 教 授 持 田 徹
副 査 教 授 荒 谷 登
副 査 教 授 工 藤 一 彦

学位論文題名

凍結を伴う土壌熱源ヒートポンプの採熱特性に関する研究

ヒートポンプは適当な低熱源が存在するならば省エネルギー機器として優れた性能をもっている。土壌は莫大な熱容量を有し、存在の普遍性、温度レベルの安定性から低熱源の代表的なものといえるが、いまだ欧米の一部を除いて利用されていない。これは、土壌が一般に熱の伝導性が低く、地中に設置する熱交換器規模が大きくならざるを得ないことに加え、設計法が確立されていないことに起因する。工学的課題は土壌と埋設管の伝熱性能を高め埋設する熱交換器の規模を縮小することにある。このためには、凍土の高い熱伝導率と土壌中の水分の凍結潜熱の利用が非常に有効であると考えられる。

本論文は土壌と埋設管の採熱能力を改善するために土壌に含まれる水分の凍結を積極的に利用する採熱特性の実験と解析に関する研究をまとめたものであり、さらに設計に必要な基本的な指針と知見を与えたものである。

本論文は8章より構成されている。第1章は本研究の意義とその有効性、第2章では、本研究の目的と位置付けを述べている。

第3章では、凍結を伴わない0℃以上での熱利用に関して、長さ20mの垂直埋設管を用いて、2年間にわたる実大実験を行い、顕熱移動による採熱量が10~20W/mとその能力は小さいことを明らかにしている。さらに、Kelvinの線源理論を応用して各種条件下で凍結を伴わない場合の限界採熱量を提示している。

第4章では、土壌の熱利用を検討する際の基礎として凍結・融解過程における熱伝導率の変化を実験的に明らかにするとともに、土壌種類による変化の相違を凍土中の不凍水分量の違いから説明している。また、数値計算において必要となる未凍土・凍土を連続的に扱うことができる熱伝導モデルを従来の未凍土の直並列型の3相モデルを発展させ提案し、実測値からモデルの汎用性を実証している。

第5章では、凍結・融解を伴う土壌内の熱・水分同時移動の基礎理論とその数値解法を示し、熱伝導率の予測には第4章で提案したモデルを適用し採熱量および土壌温度、土壌水分量等を計算するコンピュータプログラムの開発を行っている。あわせて、土壌採熱に関する室内実験を行い、本プログラムの有効性を確認している。

第6章では、直膨型ヒートポンプを用いた実用規模での土壌凍結を伴う採熱実験を行い、凍結を伴う場合の採熱量および土壌温度の推移の特性を実験的に明らかにしている。期間平均の単位長さ当たりの採熱量は約28W/mであり、単位温度差当たりでは凍結を伴わない場合の2倍程度となることを実証している。さらに、第5章で開発したプログラムがフィールドでも適用可能なことを検証した後、凍結による採熱量増大のメカニズムについて検討を行い、潜熱変換量が採熱量の増大分の70～80%を占めていることを解明している。

第7章では、凍結を伴う水平型埋設管の採熱能力と土壌温度の自然回復、暖房熱源としての長期利用可能性を、深さ1.0～1.8mに水平に埋設した4種類の水平型埋設管を用いた実証実験から明らかにしている。その結果、暖房期間を通して単位溝長さ当たり50MJ/(m・d)前後の日積算採熱量が安定して得られ、この値は埋設溝が同じであれば熱交換器の形状によらずほぼ同じであること、採熱終了後は夏期の放置期間で土壌温度が十分に回復することを明らかにしている。

第8章では、水平並列型埋設管についてまず、熱媒の循環動力を考慮した口径と間隔の関係について適正な値が存在することを明らかにしている。次に、土壌熱源ヒートポンプによる住宅暖房の省エネルギー性と長期の土壌温度の変化を求め、併せて年間のエネルギーフローから、大気と土壌の間の年間の熱収支および季節間の蓄熱とヒートポンプ採熱のメカニズムを定量的に解明し、さらに札幌における熱交換器の適正な埋設深さは1.2～1.8m、必要埋設面積は暖房面積の1.5倍程度であることを示している。

第9章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、本研究は土壌を熱源とするヒートポンプの採熱特性を解明し、凍結を伴う採熱の有効性と省エネルギー性を明らかにするとともに、ヒートポンプの応用に関する数多くの知見を得ており、冷暖房工学ならびに熱環境工学の発展に寄与するところ大である。

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。