

土壌熱を利用した暖冷房方式の評価と エネルギー自律型住宅への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

エネルギーの有効利用および地球環境負荷の低減化の観点から、住宅や個々の建築物における自然エネルギーの適正な導入手法とエネルギー自律化のための新たな技術開発が必要不可欠である。普遍的に存在し、膨大な熱容量を有する大地(土壌)は、暖房および冷房用の熱源として優れた特性を有している。しかし、複雑な地盤性状を有する日本国内においては、既往の技術の援用は困難であり、特に地中熱交換器とその周囲土壌の伝熱特性、地盤内の凍結・融解過程、および地下水の流動性などを総合的に評価し得る独自のプログラム開発と実証のための実験が必須となる。さらに、土壌熱利用を導入したエネルギー自律型住宅の可能性を明らかにするためには、地盤内の熱挙動、自然エネルギーの複合的活用、暖冷房方式、および建物を統合したトータルシステムとしての評価を行うことが必要である。

本論文は、熱源として、あるいは蓄熱体としての多様な利用形態の可能性をもつ大地を利用したエネルギーシステムの評価方法を確立し、その特性と実用可能性を明らかにするとともに、戸建て住宅における導入効果を総合的に評価し、土壌熱の利用を中心に据えたエネルギー自律化のあり方について提案することを目的としている。まず、札幌における実態調査に基づき、現状の戸建て住宅のエネルギー消費量に関する寒冷地型の特性を明らかにした。次に、土壌熱利用にとって基本となる地中温度の長期測定を行い、全国に適用可能な予測方法を確立した。

土壌熱利用システムについては、地下水流および複数管の相互干渉の影響を明確化するとともに、2つの利用形態すなわちヒートポンプの熱源利用と蓄熱利用に分類した新しい指標に基づき、省エネルギー性評価方法を提案した。次いで、土壌熱利用システムの導入可能性の実証に当たっては、実規模の実験施設を建設し、長期間の運転実績に基づいて暖冷房への適用性の評価を行った。暖房は、低温水利用による成績係数向上を可能とする床暖房方式を取り上げ、地中熱交換器の必要規模の算定方法を示した。さらに、土壌熱利用システムを導入したエネルギー自律型住宅の設計と評価方法を示し、採用した要素技術を実測と解析の両面から評価するとともに、システムの適正規模と省エネルギー効果について明らかにした。

本論文は10章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、環境負荷低減化を考慮した自律型エネルギーシステムの方向性を示し、大地を利用したシステムの導入効果と住宅におけるエネルギー自律化を研究対象とすることの意義を述べるとともに、本論文の構成を示した。

第2章では、世界のエネルギー自律型住宅の事例を要約し、要素技術のデータベース化を行い、寒冷地の温熱需要への適用技術とその問題点を述べた。また、土壌熱利用システムを導入するための従来の地中温度資料を取り上げ、その欠点と詳細な測定

値に基づく予測手法の構築の必要性を述べた。さらに、土壌熱利用システムの既往の研究を要約し、新しい評価方法を提案することの意義を明確化し、本論文の位置づけを示した。

第3章は、現状の戸建て住宅におけるエネルギー消費量とその特性に関する調査を目的としており、札幌における世帯あたりの年間エネルギー消費量が約94GJであることを示すとともに、灯油への依存度が高く、環境負荷の面からも自律化が必須であることを述べた。また、エネルギー消費量は断熱性の向上により、過去の調査結果に対して低下しているものの、本州と比較すると依然として大きいことを確認した。

第4章は、土壌熱利用のための基礎資料の作成を目的として、地中温度の長期測定と予測手法の開発を行ったものである。まず、地中温度測定基地を建設し、詳細な地質調査を行った。次いで、長期間にわたる測定値のデータベース化を行い、不易層温度が約10.3℃であることを示した。さらに、積雪地に適用可能なプログラムを開発し、実測値との比較を行い、地中温度、積雪深の計算値が実測値をよく再現することを示した。また、国内主要都市の地中温度解析を行い、設計用の指針を与えた。

第5章では、土壌熱利用システムの設計方法を示し、熱源型と蓄熱型の利用形態が考えられることを示した。また年間サイクル特性を標準熱回収率および採放熱比と温度条件により評価する新たな方法を提示した。次いで、これらの手法により単管方式は地下水の流動性に関わらず熱源型、複数管においては蓄熱型が有効であり、現実の応用では、両者の組み合わせも考えられることを示した。さらに低コストU字管型地中熱交換器の伝熱特性について解析を行い、従来の鋼管井戸型熱交換器に匹敵する性能が得られることを明らかにした。

第6章では、実規模の土壌熱利用システム実験施設を建設し、長期間にわたる運転実績に基づく評価を行った。まず、U字管型地中熱交換器の伝熱特性に関する実験結果が計算値とほぼ一致することを示した。また、土壌熱源ヒートポンプの実証試験を行い、安定した採・放熱温度により、長期的な暖冷房利用が可能であることを明らかにした。暖房期間の単位埋設管長さあたりの平均採熱量は約36W/mに達した。さらに、地下水流の影響による熱特性の解析によって、地下水流速の面からも、熱源型としての利用に適していることを示した。

第7章は、土壌熱利用を想定した低温水床暖房実験と戸建て住宅への応用について検討したものである。試験室において形成される床暖房の温熱環境を測定し、高断熱仕様では室内の温度分布がほぼ一様となる良好な環境が得られるとともに、省エネルギー効果が高いことを確認した。また、高断熱住宅において床暖冷房を導入した場合の熱負荷解析を行い、土壌熱源ヒートポンプの必要規模の算定方法を示した。

第8章では、まず、戸建て住宅における建築的対応と土壌熱を中心とした自然エネルギー・未利用エネルギーの活用を考慮したエネルギー自律型住宅の概念を示し、さまざまな組み合わせの実験が行える住宅の基本計画を行った。次いで、それに基づき、実験住宅を建設し、断熱・気密性能、およびエネルギー自律化のための設備機器とその特性を明らかにした。その中で、暖冷房設備においては、冷媒R134aを使用した土壌熱源ヒートポンプを試作し、その性能評価を行い、採熱温度が0℃を下回る悪条件下においても成績係数が3を上回ることを示した。

第9章では、エネルギー自律型住宅に導入した要素技術の運転実績についてまとめた。土壌熱を利用した暖冷房に関しては、冷房時システム成績係数9.1、暖房期間成績係数4.0と高い値が得られた。総エネルギー利用のうち土壌熱は36%を占め、年間購入エネルギー量が従来型住宅の12.5%に低減化するとともに、二酸化炭素削減率は77%に達することを示した。次いで、エネルギー自律型住宅評価プログラムを開発し、運転実績による検証を行った結果、本計算の再現性が非常に高いことを示した。さらに、暖冷房のエネルギー消費が最小となる地中熱交換器の設計方法を示し、ペイバツ

クタイムによる評価を行い，エネルギー消費量，二酸化炭素排出量に関しては早い段階で回収が可能となることを明らかにした。

第10章では，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	繪内	正道
副査	教授	工藤	一彦
副査	助教授	横山	真太郎

学位論文題名

土壌熱を利用した暖冷房方式の評価と エネルギー自律型住宅への応用に関する研究

本論文は、熱源として、あるいは蓄熱体としての多様な利用形態の可能性をもつ大地を利用した暖冷房方式の評価方法を確立し、その温熱特性と省エネルギー性を明らかにするとともに、戸建て住宅における導入効果を総合的に評価し、土壌熱の利用を中心に据えたエネルギー自律化のあり方について研究したものである。

まず、戸建て住宅のエネルギー消費量の実態を詳細に調査し、寒冷地における消費構造を明らかにしている。次いで、土壌熱利用にとって基本となる地中温度の長期測定を行い、全国に適用可能な予測方法を確立している。土壌熱利用システムについては、地下水流、凍結・融解、および複数管の相互干渉の影響を明らかにするとともに、利用形態として蓄熱利用とヒートポンプの熱源利用に分類されることを示し、新しい指標に基づく省エネルギー性の評価方法を提案している。次いで、土壌熱源ヒートポンプの実験施設を建設し、長期間の運転実績に基づいて暖冷房への可能性を実証している。また、室内の暖房方式の被験者実験を行って、低温水床暖房の優位性を明らかにしている。次に、土壌熱利用システムを導入したエネルギー自律型住宅を建設し、各種要素技術の特性を実測と解析の両面から究明するとともに、省エネルギー効果とシステムの適正規模を明らかにしている。また、太陽光発電など、他の自然エネルギー活用技術と組み合わせたトータルシステムにおける土壌熱利用の位置づけとシステムの総合的な評価法を提示し、エネルギーと環境負荷の削減にとって、本方式が有効であることを明らかにしている。以下に各章の要旨を示す。

第1章は、本論文の目的と構成を述べている。

第2章は、エネルギー自律型住宅、土壌熱利用システムおよび地中温度に関する既往の研究を述べ、本研究の意義および位置づけを明らかにしている。

第3章は、現状の戸建て住宅におけるエネルギー消費量とその特性に関する調査を行っており、札幌における世帯あたりの年間エネルギー消費量が約 94GJ であること

を示すとともに、灯油への依存度が極めて高く、環境負荷の面からも自律化が必須であることを述べている。

第4章では、土壌熱利用にとって基本となる地中温度について長期測定を行い、積雪の影響を考慮した予測式を提案している。予測式による計算値は、実測値をよく再現している。また、国内各都市の地中温度予測に適用可能であることを示している。

第5章では、土壌熱利用システムの特性を明らかにし、設計上の指針を与えている。蓄熱型と熱源型の利用形態が考えられ、蓄熱の利用可能性を表す指標として、年間サイクル特性を標準熱回収率および採放熱比と温度条件によって評価する新たな方法を提示している。次いで、埋設管の伝熱量に及ぼす地下水流、凍結・融解、および複数管の相互干渉による影響を定量的に明らかにしている。これらの手法により単管方式は地下水の流動性に関わらず熱源型、複数管においては蓄熱型が有効であることを示している。

第6章では、実規模の土壌熱源ヒートポンプの実験施設を建設し、その適用可能性を明らかにしている。まず、低コスト U 字管型地中熱交換器の伝熱特性について、従来の熱交換器に匹敵する性能が得られ、実験結果が予測値とほぼ一致することを示している。また、土壌熱源ヒートポンプは、安定した採・放熱温度が得られ、単位埋設管長さあたりの平均採熱量は約 36W/m に達し、長期的な暖冷房利用の有効性を定量的に示している。

第7章は、土壌熱利用を想定した低温水床暖房の被験者実験と戸建て住宅への応用について検討している。高断熱仕様では 30℃以下の低温水においても、良好な温熱環境が形成され、省エネルギー効果が高いことを確認している。また、低温水床暖房を導入した場合の熱負荷解析から、地中熱交換器の必要規模の算定方法を示している。

第8章では、土壌熱利用システムを導入したエネルギー自律型住宅の建設と実験計画について述べている。高断熱・高気密住宅における自然エネルギー利用技術の目標値と構成を示し、各種設備機器の性能特性を求めている。特に新冷媒によるヒートポンプを試作し、0℃以下の採熱温度においても高性能が得られることを示している。

第9章では、エネルギー自律型住宅の実験結果をまとめ、太陽光発電などを含めた各種要素技術の特性と省エネルギー効果を明らかにしている。土壌熱利用システムに関しては、高い成績係数が得られ、土壌から得られる年間の熱量はエネルギー総供給量の 36%に達している。また住宅の年間購入エネルギー量は従来型住宅の 12.5%に低減し、二酸化炭素削減率は 77%に達することを示している。次いで、エネルギーと二酸化炭素に関する総合的な評価プログラムを開発し、計算値と実験値がよく一致することを検証している。さらに、土壌熱源ヒートポンプの最適容量および償却年数を求め、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量に関して、早い段階での回収が可能であり、本方式の有効性を明らかにしている。

第10章では、本研究で得られた結果を要約して述べている。

これを要するに、著者は、土壌熱を利用した暖冷房方式の評価方法を確立し、その熱特性と有効性を具体的に明らかにするとともに、戸建て住宅におけるエネルギー自律化の指針について知見を得たものであり、暖冷房工学、建築環境工学、エネルギー利用工学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。