



長期蓄熱媒体としての地盤の有効利用法に関する研究

永井, 久也

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1996-03-13

(Date of Publication)

2015-02-17

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2017

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3116996>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002017>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	なが い ひさ や 永 井 久 也	（京都府）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）	
学位記番号	博ろ第138号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成8年3月13日	
学位論文題目	長期蓄熱媒体としての地盤の有効利用法に関する研究	

審査委員	主査 教授	松 本 衛	
		教授 森 本 政 之	教授 川 谷 健
		教授 日下部 馨	

論 文 内 容 の 要 旨

地球環境問題に象徴されるように、人間活動に伴うエネルギー消費の抑制が強く求められるようになってきている。この要求を満足しつつ、かつ環境に対して優しいシステムを構築していくためには、今後さらなる省エネルギーの徹底化、未利用・自然エネルギーの活用が必要である。

地盤は温度がほぼ一定であること、また場所的、時間的な利用のし易さと言った点で、極めて有効な熱源（蓄熱媒体）である。一方、地盤は固体であるため、水等の流体に比して熱の移動速度は非常に遅く、さらに地盤を蓄熱媒体として利用する場合には、その大部分が顕熱となるため、必要とする容量は大きくなる。また、蓄熱それ自体は、エネルギーの取得あるいは生産は無いから蓄熱に伴う周囲環境への熱損失は、そのままエネルギー損失となる。この損失が蓄熱システムを導入することによるシステム全体としての省エネルギー量以下でなければ蓄熱システムを導入する価値は無い。したがって、蓄熱システムとして有効に利用するためには、十分な精度の温度場、熱流場の特性把握およびその予測が必要となる。

冷房と暖房が必要な場合に、それに必要な年間のエネルギーは、それぞれの和すなわち負荷の絶対値の和で与えられる。もしこれを年間を通じて完全に時間的に平均化できれば、それに必要なエネルギーは負荷の単純和となり、その省エネルギー効果は極めて大きくなる。さらに、年平均気温が要求される室内温度に近い場合には、熱損失が小さくなり、蓄熱によるエネルギーの有効利用効果は更に増大する。一方、このような場合には、利用する温度と蓄熱温度の差は小さく、そのため必要な熱量を建物に供給するには、建物側で非常に大きな伝熱面積が必要となる。この欠点を避けるためには、よく知られているように、ヒートポンプを用いるのが有効な方法である。

これまで、地盤を熱源とするヒートポンプ技術に関する研究は多くなされてるが、地盤内の熱特性に強く影響を与える内部水分特性を適切に考慮した取り扱いはなされておらず、また、地盤の恒温性を有効に利用する最適利用法も明確に示されていない。そこで本研究では、実物大単純密閉型蓄熱井戸を用いたフィールド実験により、その熱的挙動、周辺地盤の熱水分性状の検討を行い、エネルギーの有効利用限界値を明らかにした。さらに、地盤内部の熱水分挙動を考慮した解析モデルを用いて実

験結果を解析し、挙動の特徴、予測精度の検討を行い、その設計方法の提案を行った。

第1章では、地盤を含む多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究のレビューを行った。また、既往の土壤熱源利用法、主にヒートポンプ熱源としての地盤利用法についてのレビューも行った。

第2章では、熱および水分の移動ポテンシャルとして温度および水分の化学ポテンシャルを用いた多孔質土壌中での、水分二相系の熱・水分同時移動の基礎方程式を記述した。これらの方程式は熱移動については伝導、対流を、水分移動に伴う熱流を、水分移動は液状水、水蒸気の形で起こるものを含んだ式となっており、その内部含水率の範囲に無関係に、乾燥状態から飽水状態までのすべての地盤内部含水状態に対して適用できるものである。

第3章では、負荷平準化の観点から行った2年間（2周期間）にわたる外径190.7mm、長さ10.5mの実物大単純密閉型蓄熱井戸（サーマルウェル）を用いたフィールド実験の装置概要および実験・計測法を述べた。また、サーマルウェルへの熱供給パターンの基本概念を論じ、これに基づいて算定したフィールド実験でのサーマルウェルへの供給熱量を示した。さらに、実験地の土質調査結果を示し、実験地盤が概ね砂質土壌で代表されること示した。

第4章では、密閉型蓄熱井戸によるヒートポンプ熱源としての2年間にわたる地盤蓄熱実験の実測結果を示し、その特性および周辺地盤の蓄熱性状を詳細に検討し、その有効性、安定性を示した。実験の結果、蓄熱井戸内水温の年振幅は、2年間（2周期間）とも設定通りにほぼ外気温年振幅と等しくなった。このことから、この形状、寸法の蓄熱井戸において、空気熱源ヒートポンプ以上の効率で年周蓄熱を行う場合の最大熱量は年周振幅で大略9.0Mcal/dayであることが明らかとなった。また、蓄熱井戸内水温の日変動幅については、最大でも3.0度程度であり、本蓄熱井戸は供給熱量の日変動に対して十分な緩和力を持っており、外気空気より安定した熱源であることも明らかとなった。

第5章では、第4章で示した2年間にわたる密閉型蓄熱井戸によるフィールド実験結果の理論解析に用いる地盤内物性値、熱・湿気伝達率等を示した。また、地盤内熱水分移動の支配方程式の差分化を行った。さらに、実験結果の理論解析に用いる地盤内熱・水分物性値を、第3章で示した実験地の土質調査結果から推定した。

第6章では、2年間にわたるフィールド実験で測定した蓄熱井戸への供給熱量および外界気象を用いて実験結果の解析を行った。その結果、蓄熱井戸内水温、地表面温度、地盤内温度および地盤内水分化学ポテンシャルの計算値はいずれも実験による実測値を極めて良く再現した。また、地盤井戸系熱収支式および熱水分同時移動方程式を用いた本解析法の計算精度の検討として、常水面位置の変化が、系に与える影響および蓄熱井戸上部断熱部の断熱性の影響を数値的に検討し、これらの影響は小さく、提案したモデルが十分な精度を有していることを確認した。

第7章では、フィールド実験の第1年度実測結果を基に、さらに詳細な蓄熱井戸およびその周辺地盤の熱性状を数値解析により検討を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1)フィールド実験では当初設計通りに年間積算供給熱量が0とならずに正となったが、この状態が3周期間続いた場合でも、蓄熱井戸内水温の平均値上昇は殆ど無く、本系の地盤は設定供給熱量に対して十分な熱容量を有している。
- (2)降雨量の増加は、地表面温度の低下をもたらす、これにより地盤内部の温度も低下する。
- (3)降雨量月別平均値を用いた場合には、現実の状況よりも水分蒸発量が増加し、地盤温度の低下を招くがその値は小さく、蓄熱井戸内水温へ与える影響は殆どない。したがって、蓄熱井戸水温予測には、月別平均値を用いれば十分な予測が行える。
- (4)本実験系のように、地盤内部の含水率が高い場合には、蓄熱井戸への供給熱量と蓄熱井戸内水温の

年振幅はほぼ比例関係にある。したがって、この系では地盤内蓄熱過程の非線形性は弱く、地盤内含有水量を適切に考慮した熱伝導率を用いれば単純熱伝導率による線形予測が可能である。

(5)非線形効果が生じる水分移動を考慮しても、管径の小さな蓄熱井戸ほど単位伝熱面積当たりの集熱効率は高くなる。

第8章では、蓄熱井戸の熱効率および周辺地盤内蓄熱性状に及ぼす、地下水流れおよび蓄熱井戸表面近傍の温度差による自然対流の影響、すなわち、熱移動の移流成分の影響をそれぞれ単純な2次元モデルで数値的に検討した。その結果、常水面高低差(圧力差)による帯水層内の地下水流れ(移流)の蓄熱井戸熱効率に与える影響は、流速16.0m/year(動水勾配1/50)の場合で最大5.0%程度であり、また、この時の周辺地盤温度分布に与える影響も小さく、勾配の大きい地形や飽水時の水分伝導率の非常に大きい礫層地盤を除き、実用計算においては、これを無視して計算できることを明らかにした。また、蓄熱井戸水温(表面温)年振幅が外気温年振幅と同程度であれば、自然対流の影響についても、非常に小さく無視し得る程度であることを明らかにした。以上の検討により、本論で提案した熱水分同時移動モデルは、例えば急勾配地形の様な地下水流速の比較的大きな場合を除けば、一般予測法として有効であることを示した。

第9章では、前章までの結果を考慮した上で、本地盤系の地盤内熱移動過程の線形近似化の可能性について検討を行った。その結果、本地盤系のように地盤内不飽和領域の含水率が比較的高い場合には、単純熱拡散方程式による温度場の予測が妥当な精度で可能であることが明らかとなった。ただし、この場合には、地盤内状態量として年平均含水率を把握し、地盤物性値(熱伝導率および熱容量)として適切な値を用いること、さらに、地表面での水分蒸発潜熱量を適切に考慮することが必要であることを示した。

また本章後半では、地表面近傍での熱水分場の設計用簡易計算手法の一つの方法として、非線形方程式系の擬線形化法について述べた。

第10章は、本研究によって得られた密閉型蓄熱井戸の熱性状およびその周辺地盤の熱水分性状特性に関する知見をまとめ、今後の課題と展望を述べた。

論文審査の結果の要旨

近年、暖冷房の普及とともに、建物で使用されるエネルギーは増加している。省エネルギー策として自然エネルギーの利用がある。その一つとして、地盤熱利用がある。地盤は、大容量の蓄熱体と考えることが出来、熱源として適切に利用すれば、恒温の熱源として利用できる。近年、太陽熱の蓄熱体あるいはヒートポンプ熱源として利用が試みられたが、必ずしも成功しているとは云えない。いずれも、十分な伝熱性状の解析なしに行われたためであり、十分な精度の伝熱解析にもとづく特性の予測法の確立が、建築設備工学上、重要な課題となっている。

本論文は、住宅等比較的小規模の建物への適応を前提に、野外に設置した密閉型井戸形式の実物大モデルを用いて、ヒートポンプの冷・温熱源として地盤を利用する場合の地盤内伝熱、蓄熱過程を、詳細に測定してその特性を明らかにし、降雨、地下水による地盤水分分布とその移動の影響を考慮した伝熱過程の解析、予測の方法を示し、さらに装置の設計法について述べている。

本論文は10章より構成されている。第1章は緒言であり、本研究の目的および従来の研究などを述べている。

第2章では、地盤内の非定常伝熱過程と水分の移動過程を解析するための支配方程式を示している。

すなわち気・液相水分を含む多孔質物体として地盤を取り扱い、水分の局所平衡を考えた熱及び水分の収支式より解析のための熱・水分の同時移動方程式を示している。気相水分を含まない飽和域に対しては、地下水流動、温度差による自然対流を考えた液水、熱の移動方程式についても取り扱っている。また地表境界について降雨を正当に評価した境界条件式を提示している。

第3章では、実験計画、実験装置および装置を埋設した地盤の土質調査結果を述べている。実験に用いた地盤蓄熱装置は、地盤に垂直に埋設した長さ10m、直径約20cmの底付き鋼管であり、ヒートポンプ用熱源媒体は、水を用いている。この密閉形式の蓄熱井戸に熱負荷を加えた場合の水温変化を測定している。地盤を有効な自然エネルギー源として利用するためには、蓄熱井戸内水温の年平均振幅は、ヒートポンプの空気熱源としての外気空気温の年振幅よりも小さくなくてはならず、その振幅が小さいほど、地盤熱は有効に利用できることになる。建物の熱負荷シミュレーションから冷暖房熱負荷パターンを求め、積算冷および温熱負荷が等しくなるように、装置に加える熱負荷を定め、それに応じる熱源装置（ヒートポンプ）、熱交換器、熱流計等を設計している。地盤内の温度分布、水分ポテンシャル分布を、熱電対、テンション計を用いて、また蓄熱井戸表面熱流を熱流計で測定している。また、ボーリングによる土質調査より、土壌の分布、常水面位置等を測定している。

第4章では、約2年間（約2周期）にわたる実験結果を述べている。蓄熱井戸に加える熱負荷振幅は、井戸内水温振幅が外気温振幅と等しくなるように設定して実験している。実験結果はほぼ予測通りの値となり、この時熱負荷振幅すなわち利用できる地盤熱の最大値は、約9Mcal/dayであった。地盤への熱流は周辺に一樣に拡散しており、また井戸表面の水分ポテンシャルの変化は、夏期にも大きくなく、地盤のdryoutの危険は、上記の熱負荷条件では生じない。また、2周期の実験より、周期定常状態が生じており、安定した継続的運転が可能であることを示している。建物負荷による熱負荷の日変動の水温への影響は小さく、この装置程度の水容量で日変動に対しては十分対応できることを示した。

第5章では、実験結果を解析するに必要な各種物性値の測定および推定を行っている。水分の平衡関係の現場測定より標準的な砂質であることを示し、計算に用いる水分伝導率、熱伝導率を従来の測定値を基に定めている。また地表境界の熱、水分伝達率を風速の測定結果から、地盤の日射吸収率を連続的に測定した反射日射量から定めている。ここでは、基礎式の数値解法についても述べている。

第6章では、2年間に亘る実験結果の解析を行っている。第2章で示した基礎式を用い、連続測定した日射、降雨、外気空気温、湿度および蓄熱井戸への供給熱量（熱負荷）を入力として、蓄熱井戸内水温、地表および地盤内各部の温度および水分ポテンシャルの時間経過を数値解析により計算している。常水面位置は、土質調査結果から推定し、計算領域は全て不飽和域として取り扱っている。温度、水分ポテンシャルとも計算結果は、実験値と極めて良い一致を示しており、蓄熱井戸の蓄、伝熱過程は、提案したモデルを用いれば十分な精度で予測できることを示している。

第7章では、各種入力に対する感度解析を行っている。まず、降雨量の影響について検討し、降雨量の減少により年平均地盤温は明らかに減少し、結果として蓄熱性状に無視できない影響を与えること、降雨は地表近傍の地盤水分伝導率を大きく変化させ、そのため降雨の影響は微視的には非線形性が大きい、蓄熱挙動への影響は月単位の平滑化が許されること、また蓄熱井戸への熱負荷振幅が2倍程度では水温振幅の変化はほぼそれに比例し、この程度の負荷の変化に対しては、系は線形と近似できること、すなわち基準解回りの擬線形化が可能であることを示している。

第8章では、ここで用いたシステムについて、地下水流、飽和相内自然熱対流の蓄熱熱流への影響を数値解析により検討している。水平に流れる地下水流の蓄熱熱流への影響は、流速16m/year

(動水勾配1/50)で最大5%程度であり、熱効率の向上は期待できないこと、従って、平坦地においては、飽和域内に蓄熱井戸がある場合でも地下水流の影響は大きくないことを示した。また自然対流の影響は極めて小さく、解析において無視し得る事を明らかにしている。

第9章では、設計計算のための線形近似の可能性について検討し、適当な地盤平均含水率を用いれば、大略の算定が可能なること、その場合の用いるべき地盤内含水率の定め方等について論じている。さらに、基準解を用いて、基準解近傍に関する擬線形化方程式を導出し、その計算法を示し、これを用いた設計法について論じている。

第10章では、本論文の総括を行っている。

本研究は、自然エネルギーを利用した冷暖房熱源として、密閉型蓄熱井戸による地盤熱利用に関する研究を行ったものであり、これまで行われていなかった地盤水分とその移動を考慮した解析モデルを提案し、これを用いて実験結果を詳細に解析してその蓄熱、伝熱挙動と各種気象要素の影響を明らかにし、さらにその知見を基に蓄熱システムの設計の方法を示すなど、多くの貢献と重要な知見を得たものであり、価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者 永井久也は、博士(工学)の学位を得る資格があるものと認める。