

研究成果報告書

所属機関
北海道大学 大学院工学研究院

職名
准教授

氏名
葛 隆生

研究テーマ

浅層地中熱利用における地盤熱物性値の評価方法の確立

研究報告

1. 研究の背景と目的

地中熱ヒートポンプの熱源となる地中熱は再生可能エネルギー熱利用の一つとして定義されており、将来最も導入が期待されている再生可能エネルギー熱利用技術であるが、地中熱を利用するための地中熱交換器の設置コストが導入拡大の最大の課題となっている。また住宅などの比較的小規模な建物では敷地が小さいため、小規模な掘削機械で地中熱交換器を設置できることが求められている。それに対して、近年では比較的小規模な掘削機械で設置可能な、水平型地中熱交換器や、杭を利用した地中熱交換器、スパイラル型地中熱交換器などの開発が行われ、導入が進められているようになっている。これらを導入するには地中熱交換器の必要本数を決める必要があるが、この必要本数を求めるにあたっては、浅層部の地盤の熱物性値を評価することが重要となる。

浅層部の地盤の熱物性値を簡便に評価する試験方法として、垂直型地中熱交換器に対しては観測井にヒータを挿入して一定加熱を行い、加熱中の温度変化を元に物性値を評価する試験方法を、水平型地中熱交換器に対してはサーマルプローブを地中に水平に埋設してプローブから一定加熱を行い、加熱中の温度変化を元に物性値を評価する方法を提案する(方法の詳細は2に記載)。本研究ではこれらの試験方法を確立することを目的として、地表面や底部からの熱移動が試験によって得られる地盤物性値に与える影響を、数値解析を用いて分析するとともに、実フィールドにおいて観測井およびサーマルプローブを用いた地盤物性値評価試験を実施し、数値解析により得られる地表面や底部からの熱移動の影響があるかを検証した。

2. 研究成果および考察

浅層部の地盤の熱物性値を短時間で精度よく評価できる試験方法を確立するために、以下の研究内容を実施した。各項目の研究成果については後述する。

- ・数値解析による地表面や底部が地盤熱物性値評価試験に与える影響の分析
- ・実フィールドにおける観測井およびサーマルプローブを用いた浅層部地盤物性値評価
- ・実フィールドにおけるサーマルプローブの長期加熱試験による地表面の気温変動の影響評価

2. 1 数値解析による地表面や底部が地盤熱物性値評価試験に与える影響の検討

数値流体解析ソフトウェアStream Ver. 14を用いて、図-1に示すような観測井を設置し、線状ヒータを挿入し加熱を行う試験方法の計算モデルと、図-2に示すような水平にサーマルプローブを埋設し加熱を行う試験方法の計算モデルを作成した。観測井にヒータを挿入する試験方法のモデルについては観測井を口径50 mm、深さ10 mとして、観測井中心から周囲1 m、底部から5 mまでを計算領域と設定した。プローブの計算モデルについてはプローブ長さを1 m、口径10 mmとし、上部は深さに応じて、下部は2 mを計算領域と設定した。いずれのモデルについても実際の試験と同様に観測井のヒータ、プローブより一定の発熱を行い、観測井については発熱から720min経過以降(図-3参照)、プローブについては30min経過以降の温度変化の勾配をもとに有効熱伝導率を推定した。これを図-4に示すよ

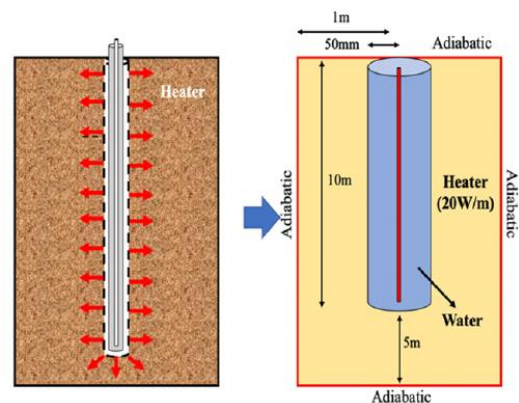


図-1 観測井を用いた地盤熱物性値評価試験のシミュレーション概念図

うな深さ毎に温度分布や、深さ毎に熱伝導率の違いを与えた上で、計算条件として与えたもとの地盤の有効熱伝導率との比較を行うことで、地表面や底部等が地盤熱物性値の評価試験に与える影響について分析を行った。

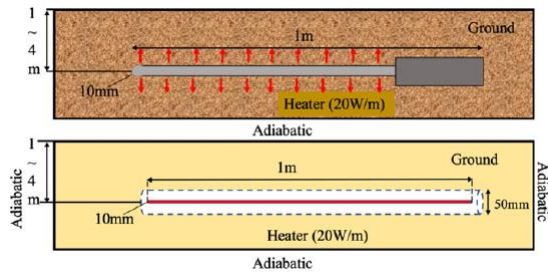


図-2 サーマルプローブを用いた地盤熱物性値評価試験のシミュレーション概念図

結果の一例として、図-4に示すような深さ毎に温度分布を与えた場合について、観測井にヒータを挿入して連続加熱を行った際の温度勾配から得られる有効熱伝導率の分布を図-5に示す。地表面温度の高い8月は地表面の付近の有効熱伝導率の推定値が計算条件として与える $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ よりも低く、地表面温度の低い2月は地表面の付近の有効熱伝導率の推定値が高い結果となった。また、5月については、地表面付近は有効熱伝導率の推定値が低くなるが、5 m付近では逆に高い値となった。また、9 m～10 mは下からの熱移動の影響で有効熱伝導率の推定値が高くなる結果が得られた。ただし、10 m地点を除いた有効熱伝導率の推定値の平均値は図-4に示す通りであり、元の値の5%以内にとどまることが分かった。このことから垂直型の地中熱交換器を用いる場合に対しては、平均値を与えて設計を行うことが一般的なので、地表面の温度が設計時に与える影響は小さいと言える。次に、プローブを深さ毎に設置して連続加熱を行った際の温度勾配から得られる有効熱伝導率の分布を図-6に示す。5月、8月の有効熱伝導率の推定値は低く、8月の有効熱伝導率の推定値は高くなることがわかり、深さ2 m地点までは10%程度の差が生じることとなった。

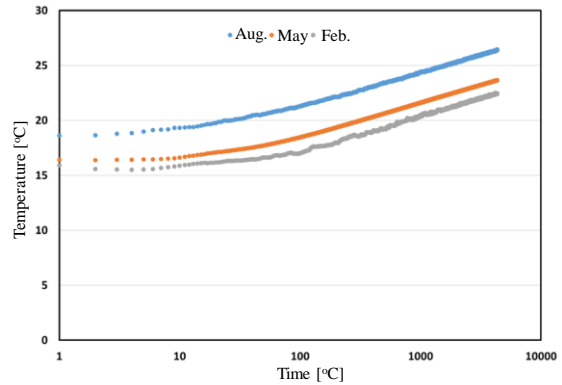


図-3 加熱による温度変化の一例

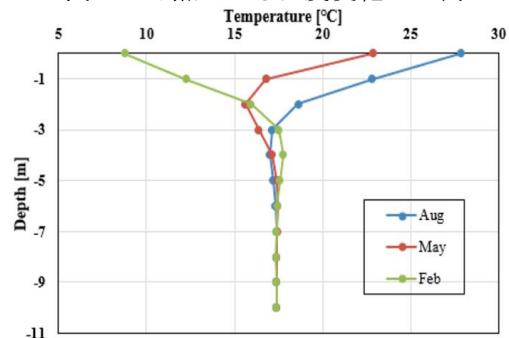


図-4 各月の深さ毎の地中温度分布

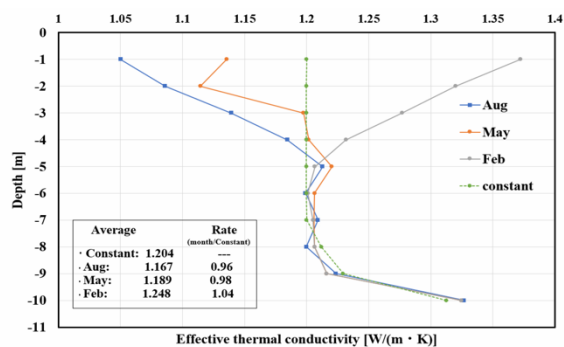


図-5 観測井を用いた地盤熱物性値評価試験によって得られる有効熱伝導率の分布

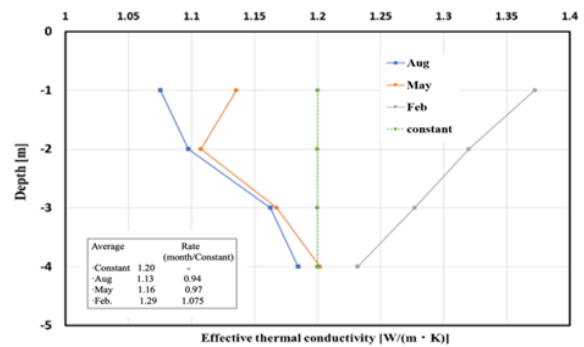


図-6 サーマルプローブを用いた地盤熱物性値評価試験によって得られる有効熱伝導率の分布

2. 2 実フィールドにおける観測井およびサーマルプローブを用いた浅層部地盤物性値評価

北海道大学構内(札幌市北区)に観測井を設置し浅層部地盤熱物性値評価試験を実施した。試験の系統図は図-7に示す通りであり、観測井には2本のUチューブが設置されているため、Uチューブの配管にヒータと温度センサーを設置して試験を行った。ヒータ長さが10mであったため、ヒータは深さ10mまで設置し、温度測定については0.5m間隔で深さ5mまで実施した。ヒータから20 W/mで約2日間一定加熱を行い、720min経過後の温度変化のデータをもとに熱伝導率を推定した。試験は2019年5月に2回実施

した。試験結果として、有効熱伝導率の推定値の垂直分布を図-8に示す。5月の温度分布を与えた数値解析の結果と同様に浅い地点で有効熱伝導率が低くなる結果となった。しかしながら、深さ5 m地点の有効熱伝導率(1.3 W/(m・K)、1.4 W/(m・K))と比較すると、深さ1~2 mは約0.8~1.1 W/(m・K)と20%以上の有効熱伝導率の低下となり、浅い地点の低下割合が大きい結果となった。これはこの地点の地下水位が6 mと比較的深い地点にあることから、浅い地点では土壌の水分含水率が低く、有効熱伝導率が低下したためと考える。また、地盤の条件が異なる地点の結果として、札幌市某所で2019年6月に実施した観測井を用いた浅層部地盤熱物性値評価試験の結果を図-8に示す。こちらについては観測井が3 mまでしか設置できず3 m地点と0.5 m地点の結果を比較すると10%程度の差となり、数値解析に近い結果となった。

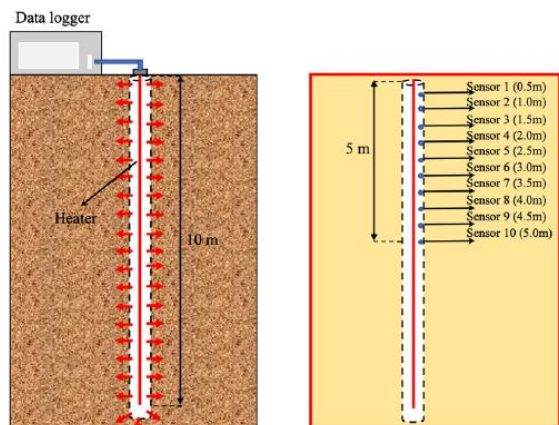


図-8 観測井を用いた地盤熱物性値評価試験の系統図

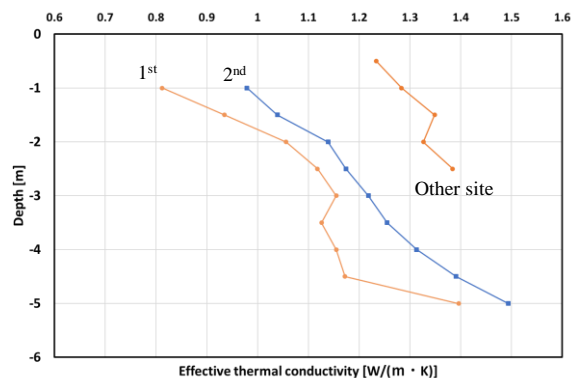


図-9 観測井を用いた地盤熱物性値評価試験によって得られた有効熱伝導率の分布

また、北海道大学構内(札幌市北区)にサーマルプローブを設置し浅層部地盤熱物性値評価試験を実施した。試験の系統図を図-10に示す。試験は深さ1 m地点に、口径10 mm長さ1 mのサーマルプローブを設置し、プローブ内に設置したヒータより約1.5時間6 W/mで一定加熱を行い、プローブ内に設置した3点の温度変化をもとに有効熱伝導率を推定した。試験は12月、2月、5月の3回にわたって実施した。結果として、それぞれの試験の加熱中の温度変化と、温度変化をもとに推定した有効熱伝導率を示す。推定された有効熱伝導率の平均値は12月、2月、5月でそれぞれ1.13 W/(m・K)、1.02 W/(m・K)、1.00 W/(m・K)となり、数値解析より2月の値が最も高いことが予想されたが、そのような結果にはならず、季節間での大きな差は見られなかった。

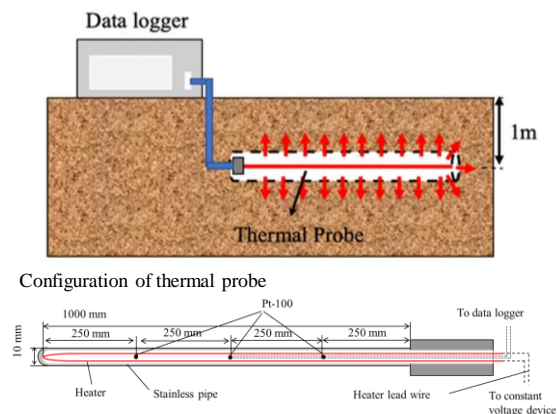


図-10 サーマルプローブを用いた地盤熱物性値評価試験の系統図

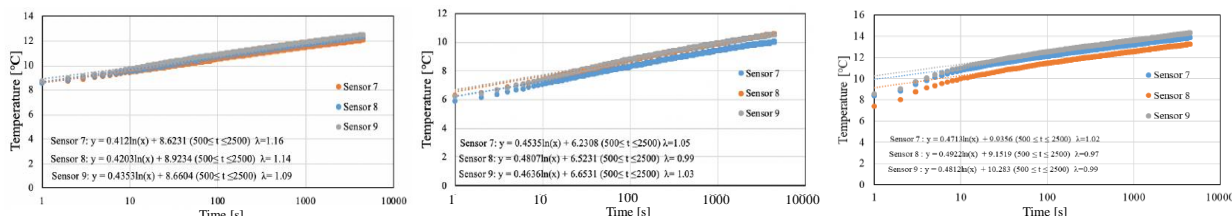


図-11 サーマルプローブを用いた加熱試験の温度変化と有効熱伝導率推定値(左 12月、中 2月、右 5月)

2. 3 実フィールドにおけるサーマルプローブの長期加熱試験による地表面の気温変動の影響評価

ここでは、北海道大学構内(札幌市北区)に図-10に示した浅層部地盤熱物性値評価試験と同様にサーマルプローブを設置し、ヒータより6 W/mで連続加熱を行い、加熱されているヒータ周辺の温度に対して地表面の気温変動が与える影響について評価を行った。試験は2019年11月より開始し、現時点(2020

年5月においても継続中である)。試験結果として連続加熱を行っているプローブ(プローブA)の内部温度変化と、一部の時間帯を除いて加熱を行っていないプローブ(プローブB)の内部温度変化を図-12に示す。プローブA内部の温度はプローブB内部の温度よりも5℃程度高い傾向にあるが、プローブB内部の温度と同様の変化を示していることがわかる。この結果より連続加熱を行っているプローブの内部温度の変化は、加熱を行っていないプローブの内部温度変化にプローブの加熱による温度変化を加えることで再現できることが示唆された。またこの結果から地中に深さ1 mに埋設したプローブ内部の温度変化は地表面の降雪や降雨にはほとんど影響を受けないことが確認できた。

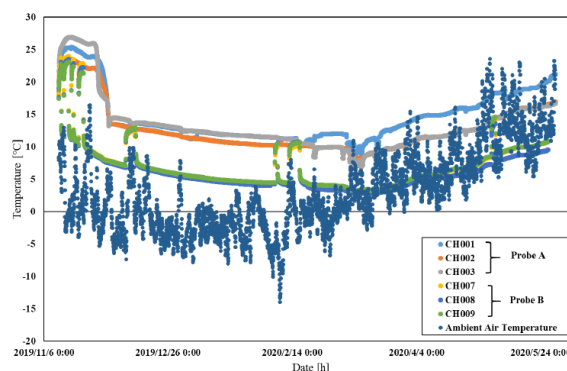


図-12 連続加熱のプローブ内部の温度変化と連続加熱を行っていないプローブ内部の温度変化

3. 将来展望

数値解析の結果から、垂直熱交換器に対応する、観測井を用いた地盤熱物性値評価試験については、各計測地点の平均値を用いるため、地表面の影響を受けても元の値と大きな差がないことが確認できた。また、フィールド試験の結果から、水平熱交換器に対応する、サーマルプローブを用いた地盤熱物性値評価試験については、推定される有効熱伝導率の値に季節間での大きな差が見られないことが分かった。これらの事から提案した2方式については、浅層地盤の地中熱利用のための地盤熱物性値評価試験として十分適用可能であることが確認できた。さらに、口径40 mmの観測井を用いた地盤熱物性値評価試験については約10時間、口径10 mmのサーマルプローブを用いた地盤熱物性値評価試験については約1.5時間の加熱で有効熱伝導率の推定が可能であり、試験時間を大幅に短縮できることが確認できた。

ただし、サーマルプローブの試験については、サーマルプローブ設置のための掘削が人力では困難であることが分かった。なるべく小型の機械で掘削を行い、サーマルプローブを設置できるようにすることが今後の課題といえる。

なお、本方式により推定される地盤の有効熱伝導率を有効に活用できる、浅層地盤を用いた垂直型地中熱交換器(H型PC杭を利用した地中熱交換器)や水平型地中熱交換器(水平ユニット方式地中熱交換器)の開発を行うプロジェクトを2019年度より開始した。このプロジェクトでは地中熱交換器を実際の建物に導入し、性能評価を行っていく予定であるため、本研究成果については地中熱利用の今後の普及に大きく寄与できるものと考えている。

4. 研究発表

- 1) 鎌田泰地、葛隆生、長野克則：真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムの導入による低コストZEH化の検討、空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集(2020-3)
- 2) Hao Yu, Takao Katsura, Yoshitaka Sakata, Katsunori Nagano, Evaluation method of soil thermal property for shallow ground thermal energy utilization, 空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集(2020-3)
- 3) 鎌田泰地、葛隆生、長野克則：真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムの導入による低コストZEH化の検討、空気調和・衛生工学会大会講演会論文集(2020-9発表予定)