

北海道幌延町をフィールドとした 地中熱利用に関する研究

Research on underground thermal energy system in Horonobe

新田 昭*, 三橋 順**, 石島 洋二***

Akira NITTA, Jun MITSUHASHI, Yoji ISHIJIMA

At the H-RISE (Horonobe Research Institute for the Subsurface Environment), research on the underground thermal energy system in northern Hokkaido is done as Project Research. The Aims of research is proposing the concept of the underground thermal energy use which suited the natural condition and social condition of Horonobe by in-situ observation, a thermal conductivity experiment, and feasibility study. This paper describes the result of a thermal conductivity experiment and in-situ observation. The thermal conductivity experiment showed that thermal conductivity was dependent on geology and saturation. However, the dependence on temperature wasn't clear from 5°C to 50°C. Heat transfer in the ground was clarified by in-situ observation.

Key Words: underground thermal energy, thermal conductivity experiment, in-situ observation, heat transfer, Horonobe

1. はじめに

地温エネルギーは、陸地があればどこでも利用が可能な自然エネルギーである。近年、地球温暖化ガスの排出量抑制や都市部におけるヒートアイランド現象緩和などの環境的側面からその有用性が高まっており、すでに国内外を問わず様々な手法に関する研究・開発・実用化がなされている。しかし、地温エネルギーは低品位のエネルギーであるため、導入地点の自然条件、社会条件を慎重に分析し、そこから導かれる熱の需要と供給が調和したシステムを構築することが、導入にあたっての重要な要件となる。

当研究所のプロジェクト研究グループでは、北海道北部の自然条件・社会条件に適合した地温利用を「北方型の地温利用」と位置付け、ビジネスモデルとして成立可能なコンセプト提案を行うことを目的とした研究を実施している。

本稿では、この研究のうち H15 年度から今年度にかけて実施している原位置実験、室内試験の結果、課題および原稿執筆時点での状況について述べる。

2. H15 年度原位置実験

(1) 実験の目的

*正会員 幌延地圏環境研究所 プロジェクト研究グループ

** 幌延地圏環境研究所 プロジェクト研究グループ

*** 北海道大学大学院 工学研究科

地温の利用にあたっては、地盤中から安定して採取可能な熱量をあらかじめ把握しておく必要がある。このとき、採熱量は地盤の熱拡散率や透水係数、地下水流速などの要因に支配されていると考えられる。一般的にこれらの要因は、地盤中の地層境界を境に異なる性質を示すことから、地盤中からの採熱量を評価する場合に各地層を区分して表現することが考えられる。

ここでは、地層ごとに設置した温度センサーの観測値を比較することによって、各地層の熱輸送にどの程度の差が現れるかを把握し、地層ごとに採熱量を計算する必要があるかどうかを検討することとした。

(2)地点の概要

原位置実験は、幌延町内にある町営施設「北星園」敷地内において行った。観測地点の位置図を図-1に示す。

実験地点に設置した H-1～3 孔 (H-3 孔は H16 年度に掘削) の 3 孔の地質柱状図を図-2 に示す。観測地点の地質は、GL-1m 付近の有機物混じりシルト層 (①層)、GL-2m 付近の粗粒砂層 (②層)、GL-3m～-8.5m の有機物混じり砂質シルト・腐植土層 (③層)、GL-8.5～-14.5m の粗粒砂・細粒砂・シルト層 (④層)、GL-14.5m 以深の砂岩・シルト岩層 (⑤層) に大別できる。これらの地層は少なくとも基盤岩以上の堆積層において、水平に堆積する水平多層構造をなしているものと考えられる。

(3)観測システムの概要

図-3 に観測システムの概要図を示す。H-1,2 孔の孔間距離は 1m である。H-2 孔内には、①層～③層の地下水温変化を計測するための温度センサー a,b,c をそれぞれ設置した。H-1 孔内に設置したヒートパイプの全長は 15m で、下部 10m を採熱部として孔内に挿入し、放熱部となる上部 5m は積雪中に埋設している。また、ヒートパイプの採熱部および放熱部にはそれぞれ温度センサー d,e を設置している。さらに、観測地点の気温変化を観測するために大気中に温度センサー f を設置している。

(4)観測結果

各センサーにおける観測温度の経時変化を図-4 に示す。図には 3 分おきに取得したデータの 3 時間平均値をプロットしている。なお、ヒートパイプは 2/20 より作動を開始している。

ヒートパイプが作動する 2/20 以前の観測値より、(この時点における) 自然状態での地中温度は、GL-1.8m で 7.0～7.3℃であり、少なくとも GL-7m 以深になると約 8.3℃で安定していることがわかる。また、ヒートパイプ作動開始後は、ヒートパイプ放熱部 (センサー e) の温度が上昇するとともに、採熱部 (センサー d) の温度は 7.0℃まで低下している。採熱部の温度はその後もしばらく低下し続け、3/26 の時点では 4.2℃に達している。

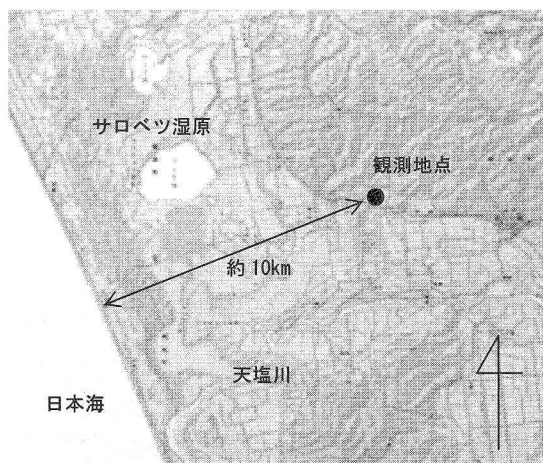


図-1 観測地点位置図

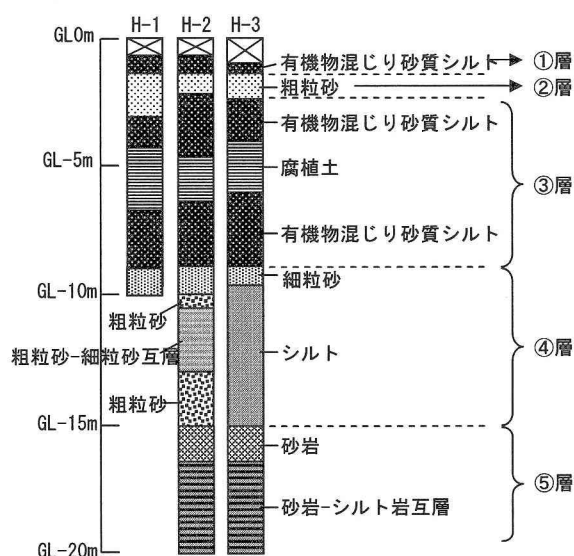


図-2 ボーリング柱状図

H-2 孔内の深度方向の温度分布の経時変化を図-5 に示す。センサーa は設置深度が GL-13m とヒートパイプ設置深度よりも深いために、ほとんど温度変化が生じていない。一方センサーc (②層に対応) の温度は、顕著に低下傾向を示しており、ヒートパイプ作動から 35 日後の温度低下量は約 1.1℃となっている。センサーb (③層に対応) は、センサーc ほど顕著ではないが、若干の温度低下傾向を示しており、ヒートパイプ作動後 35 日間での温度低下量は約 0.3℃となっている。

(5) 考察と課題

観測の結果、地盤中の温度変化の様子は各地層で異なり、その熱供給能力は地層ごとに区分されるべき可能性が示唆された。特にセンサーc は温度変化が大きく、このことから②層における地下水流動が比較的活発で、この地層の熱供給能力が他の地層に比べて大きいと予想された。

ただし、今回の観測の対象とした②③④層は一般に恒温層が存在すると言われる地下 10m 以深よりも浅い範囲の地盤を含んでいることから、その温度変化には年間の気温変動の影響(鉛直方向の熱移動の影響)が含まれている可能性がある。また、仮に②層中の地下水流動が活発であった場合には、②層から孔内に流入した地下水によって孔内鉛直方向の水流が生じている可能性もある。これに対して H15 年度の観測では、上記のような鉛直方向の熱輸送を捉えるには温度観測点数が不足しており、必ずしも観測された温度変化がヒートパイプ採熱部から供給された冷熱(水平方向の熱移動)に起因するものであると特定することはできなかった。

3. H16 年度原位置実験

(1) 目的

今年度の原位置実験は、H15 年度実験の結果・課題を踏まえて以下のように設定している。

- ・深度ごとに熱供給能力に差があるという H15 年度の仮説の妥当性を調べる
- ・各深度の安定して採取可能な熱量を明らかにする

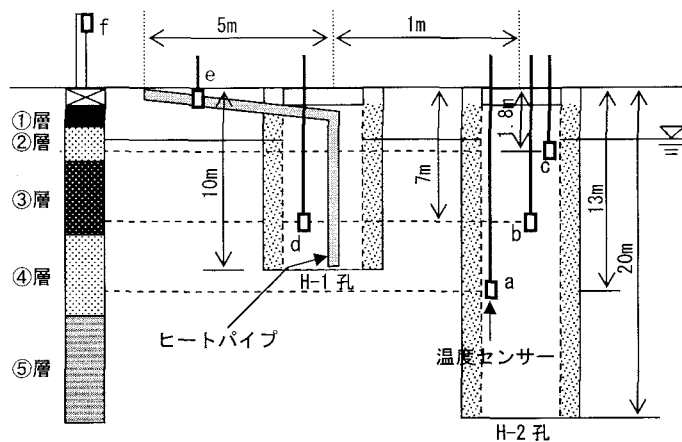


図-3 観測設備の概要

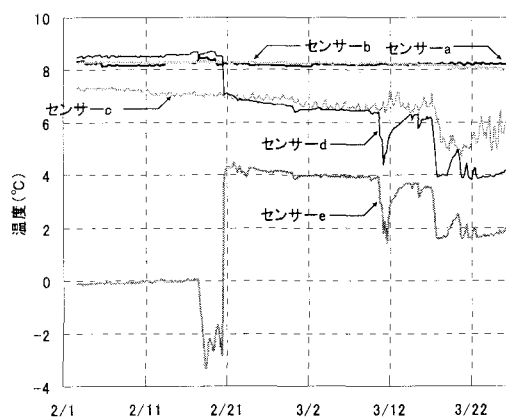


図-4 原位置観測結果

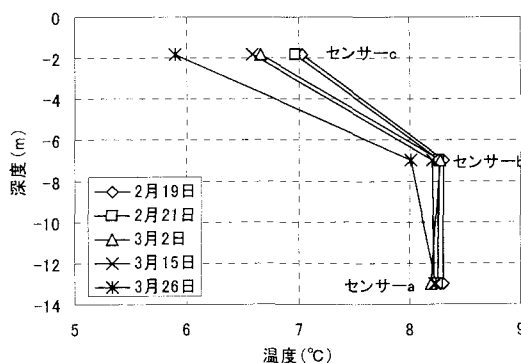


図-5 原位置観測結果 (H-2 孔)

・孔内流動による温度変化への影響を調べる

(2)観測システムの概要

図-6 に H16 年度観測システムの概要図を示す。今年度は新たに H-3 孔 (孔長 20m)、H-a～d 孔 (孔長 2m) を掘削した。H-1～3 孔には 1m 間隔で温度センサーを設置し、孔内流動等による温度変化の様子をより捉えやすくしている。H-a～d 孔には②層の深度に対応する GL-1.8m に温度センサーを設置している。ここで使用する温度センサーは、複数の IC 温度センサーを単線で接続し、制御、通信および電源供給を行うことが可能となっている。この温度センサーは、デジタル信号によってデータ送信が行われるため、観測値はケーブル長などの影響を受けず、各センサーの配線を共用できるという特徴がある。これにより、孔径の小さい井戸における安価な多点温度観測システムを構築する際に有効である。H-1,2,a～d 孔は全層スクリーン仕上げであるが、H-3 孔については GL0m～-8m (①②③層) を遮水区間としている。これにより、H-3 孔中では①②③層から供給される地下水の影響を排除できるため、H15 年度実験で懸念された②層から孔内に流れ込んだ地下水による孔内流動の影響を調べることが可能である。

H-2 孔には GL-1m～-20m の区間にマイクロヒーター (出力 170W, $\phi 4.8\text{mm}$) を挿入している。また H-1～3 孔は、GL-0.5m～-19.5m まで 1m 間隔で温度を測定できる温度センサーを設置している。この温度センサーは複数のセンサーを単線で接続して、制御、通信及び電源供給を行えることから、孔径の小さい井戸内における安価な多点温度観測システムに有効である。H-a～d 孔には GL-1.8m の深度に温度センサーを一点設置している。

積雪のない期間 (～11 月) には H-2 孔内のマイクロヒーターを作動させて観測を実施し、積雪が生じる期間 (12 月～3 月) にはヒーターを撤去し、H-1 孔にヒートパイプを設置して昨年度と同様の観測を行う。前者の観測では H15 年度に熱源を設置できなかった GL-20m までの地層中の熱の挙動を捉えることが可能である。

(3)観測結果

マイクロヒーターを使用した実験の原稿執筆時点での観測結果について以下に示す。なお、この実験は 9/28 にヒーターに通電を行い、実験を開始している。

ヒーターが作動する前の地中温度は、GL-3.5～4.5m 以深が約 8.5℃で一定であった。それ以浅の温度は概ね 15℃以下であった。ヒーターを設置した H-2 孔は、ヒーター作動後の温度が 12℃～18℃に上昇している。

図-7 に H-1,3 孔の温度変化量 (ヒーター作動前である 9/27 の観測温度との差) の深度分布を示す。両孔とも地表面付近の温度は大気温に影響を受けて 2～3℃程度の温度低下を示している。熱源 (H-2 孔) に最も近い H-1 孔では、GL-1.5m 以深において徐々に温度が上昇している。温度上昇幅が極大値をとる GL-2.5m,

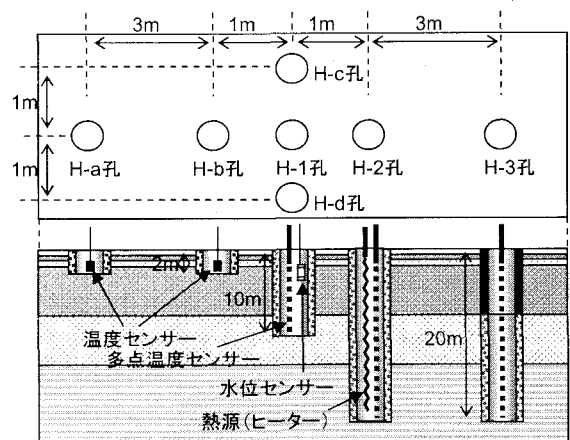


図-6 H16 年度原位観測システム

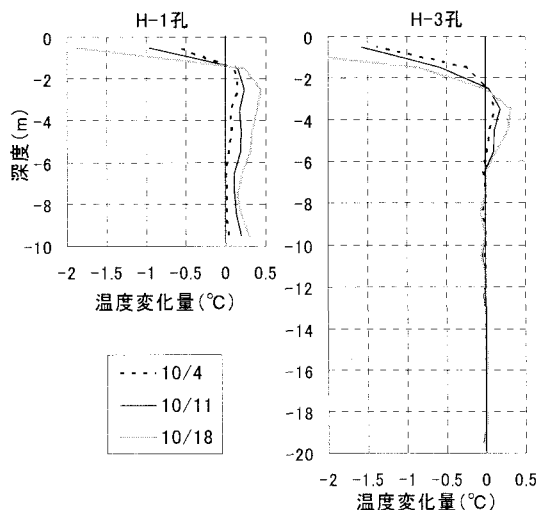


図-7 H-1,3 孔の温度変化

-9.5m は、それぞれ砂層である②④層の深度と対応している。H-3 孔では、GL-3.5m～-5.5m の区間で温度上昇が生じているものの、この時点で GL-6.5m 以深ではほとんど温度変化はなかった。

4. H15 年度熱伝導率試験

(1) 試験方法

熱伝導率の土質、飽和度、温度への依存性を明らかにするために、原位置観測地点における土質サンプルを利用した室内試験を実施した。ただし、半固結状態である⑤層（砂岩・シルト岩）については、サンプリング時の試料かく乱によって本来の熱伝導性が変化していると考え、試験は実施しなかった。①～④層については、かく乱された試料の間隙率、飽和度を調整した上で試験を実施した。熱伝導率測定は、φ50 の塩ビ管内の試料中にプローブ（長さ 200mm、φ3.2mm）を挿入し、プローブからの加熱に伴う温度変化をもとに算定する方法を採った。

測定ケースは、それぞれ①～④層について、飽和度 100% の試料の測定温度を 5℃～45℃ の範囲で変化させたケース、および測定温度を 20℃ に固定して飽和度を 30%、70% に調整したケースで行った。

(2) 試験結果

a) 土質との関係

表-1 に各層の常温、飽和度 100% での熱伝導率測定結果を、別途測定した含水比と共に示す。水の熱伝導率は土粒子の熱伝導率に比べて小さいため、含水比の大きい①層と③層で熱伝導率が小さくなっている。

b) 飽和度との関係

図-8 に常温における飽和度と熱伝導率の関係を示す。

飽和度 70% から 30% にかけての熱伝導率の低下幅が 0.31

～0.63 (W/m・℃) であるのに対して、100% から 70% にかけての熱伝導率の低下は 0.02～0.12 (W/m・℃) と比較的小さい傾向が得られた。

c) 観測温度との関係

図-9 に試験開始時の試料の温度と熱伝導率の関係を示す。全データの回帰直線の傾きを計算したところ、ほとんど 0 に近い値 (0.0006(W/m・℃)/℃) であったことから、5℃～45℃ の範囲内では熱伝導率の温度依存性は明確ではなかった。

(3) 考察と課題

未固結地盤を対象に熱伝導率を測定した結果、試料中の水分量（含水比、飽和度）に対する依存性は高いことが明らかとなったが、地中熱利用で対象となる温度域付近での温度依存性は不明確であった。

表-1 熱伝導率測定結果

	熱伝導率 (W/m・℃)	含水比 (%)
①層 (有機物混じり砂質 シルト層)	1.08	44.07
②層 (粗粒砂層)	1.31	31.94
③層 (有機物混じり砂質 シルト・腐植土層)	1.03	49.72
④層 (細粒砂・粗粒砂層)	1.31	29.11

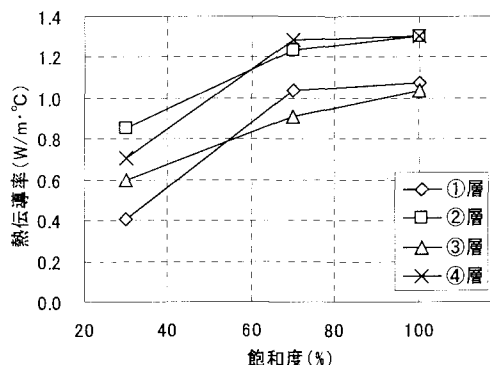


図-8 飽和度と熱伝導率の関係

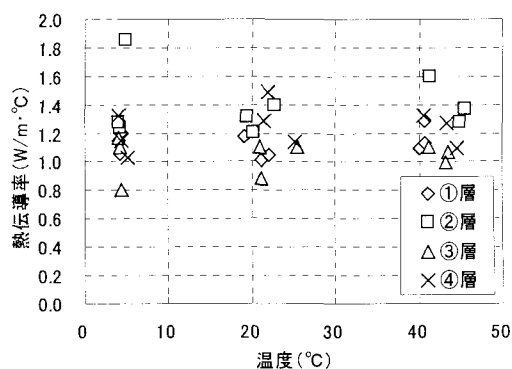


図-9 温度と熱伝導率の関係

一方、H15 年度試験では半固結地盤である⑤層の熱伝導率を得ることができなかった。そこで、今年度新たに掘削した H-3 孔では、⑤層の不かく乱状態の試料を採取して①～④層と同様の方法で熱伝導率を測定する予定である。なお、⑤層の熱伝導率測定結果については、口頭発表にて報告する予定である。

5. まとめ

本稿では、北方型の地温利用コンセプトの提案を目的として行った熱伝導率試験および原位置観測の結果について報告した。

H15 年度に実施した原位置実験では、深度ごとに熱輸送の様子が異なり、採熱量を評価する上ではそれらを区分すべき可能性が示されたものの、孔内流動の影響が不明であるなどの課題が抽出された。今年度原位置実験では、それらの課題を克服すべく観測システムに変更を加えて観測を実施しており、現時点で深度ごとに温度変化量に差が生じる結果が得られてきている。

熱伝導率については、土質・飽和度への依存性が確認されたが、温度依存性については $5^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ の範囲では明確ではなかった。飽和度依存性については、70%以上の範囲での飽和度低下による熱伝導率への影響は小さいことがわかった。また、H15 年度試験において熱伝導率を測定することができなかった⑤層については、不かく乱試料を用いて未固結地盤と同じ手法で測定を行う予定である。

6. 謝辞

研究の実施にあたり、(株)ニュージェック伊藤成輝氏からご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。