

GSJ 地球をよく知り、地球と共生する 地質ニュース

2019

6

Vol.8 No.6



特集 ▶ 地中熱チーム研究成果報告



6月号

- 141 **特集 地中熱チーム研究成果報告** 内田 洋平
- 143 **地中熱利用促進に向けた反射法地震探査** 伊藤 忍
- 146 **地質情報に基づく地中熱ポテンシャルの簡易評価**
石原 武志
- 151 **地質・地形構造が地中熱ポテンシャルに与える影響**
金子 翔平
- 156 **NEDO プロジェクトにおける研究成果 その1**
ー東北地域の地中熱ポテンシャル評価ー
シュレスタ・ガウラブ
- 159 **NEDO プロジェクトにおける研究成果 その2**
ーオープンループの地中熱ポテンシャル評価方法ー
吉岡 真弓
- 162 **地下水熱を空調に利用するための樹脂製細管熱交換器内蔵タンク式地中熱交換器の有効性の検証結果について**
舘野 正之・高杉 真司・内田 洋平
- 166 **地中熱を利用した電子機器類の排気冷却システム**
田中 雅人・内田 洋平・駒澤 昭彦・進堂 晃央
- 170 **シーズ支援プログラムの取り組み**
「準浅層における低コスト熱応答試験」について 藤沼 伸幸

特集 地中熱チーム研究成果報告

内田 洋平¹⁾

1. はじめに

2018年1月25日(金)福島県ハイテクプラザにおいて、産総研・地中熱チームの研究成果報告会を開催した。この報告会は、「平成30年度第2回ふくしま地中熱利用情報交換フォーラム」の一環として開催された。産総研・地中熱チームの研究成果をはじめ、産総研シーズ支援プログラムの中で実施された地中熱関連企業との共同研究の成果を報告し、これらの研究成果が事業に結びついていることを紹介した。会場のハイテクプラザ多目的ホールには90名の参加者に加えて、地元の新聞社からも取材があった。

報告会のプログラムは、フォーラム共同代表である赤井仁志氏(福島大学 特任教授)と内田(再生可能エネルギー研究センター 地中熱研究チーム長)の挨拶からはじまった。第1部「地質研究における地中熱ポテンシャル」では、地質情報研究部門の伊藤忍氏、地中熱チームの石原武志氏と金子翔平氏による会津盆地と仙台平野における地質学的な側面から見た地中熱ポテンシャル研究の発表が行われた。第2部「東北地域における地中熱ポテンシャル評価」では、地中熱チームのシュレスタ氏と吉岡氏が、NEDO委託事業で実施中のクローズドループとオープンループシステム両者のポテンシャル評価技術について発表を行った。第3部「産総研・シーズ支援プログラム」では、被災地三県にある地中熱関連企業との共同研究成果について、ジオシステム株式会社、ミサワ環境技術株式会社、新協地水株式会社の3社より発表が行われた。各社のシーズは商品化され、着実に事業化につながっているとの報告であった。

本特集「地中熱チーム研究成果報告」では、それぞれの発表内容について、分かりやすく解説する。

2. 地中熱チームの研究目標

年間を通じて安定した地中の温度をヒートポンプの熱源とする地中熱ヒートポンプシステムは、冷暖房のみならず、給湯や融雪など幅広く活用することが可能である。地中熱ヒートポンプシステムの省エネ効果については、すでに多くの論文や報告書に掲載されており、その有効性は認

識されていると言えよう。その一方で、本システムは地中の熱を利用するため、熱交換器の埋設・設置が必要となり、その初期コストが通常の冷暖房システムと比較して高いことがシステム導入に際しての障害となっている。

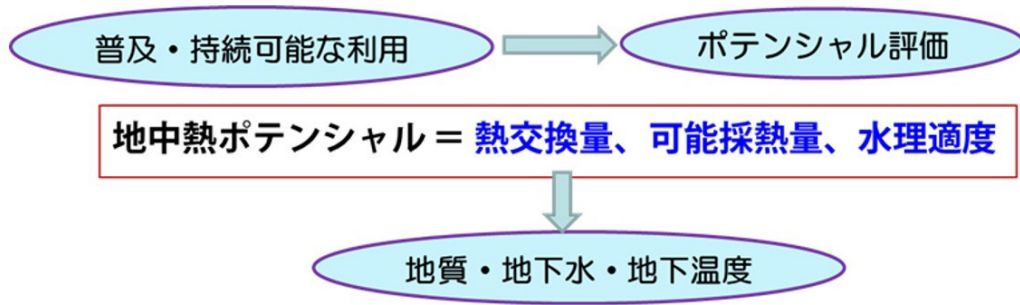
また、本システムのエネルギー源となる地下地質についても、地中熱が普及している欧米諸国と日本とは大きな違いがある。欧米諸国の地質構造は、主に岩盤であり、その熱伝導率は花崗岩の場合3.0 W/(m・K)程度である。一方、日本の地質構造は欧米諸国よりも複雑であり、多くの人が住んでいる平野部や盆地部において、地中熱の熱交換で利用する地質は砂・礫・泥などで構成されている軟弱な堆積層である。この堆積層の平均的な熱伝導率は1.2 W/(m・K)程度と岩盤より小さく、熱伝導率から見ると地中熱システムには不利な地質条件と言える。ところが、堆積層は地下水を豊富に有する地域が多く、地下水の流れが活発であれば、熱の移流効果により見かけの熱伝導率が高くなり、地中熱利用に適してくる。つまり、日本で地中熱システムの普及を考える場合、地域の地下水流動を考慮することにより、効率の良いシステム設計が可能となる。

当チームでは、以上の背景のもと、地域の地質や地下水を考慮した地中熱の研究開発を実施しており、「地中熱ポテンシャル評価」と「地域の地下水環境を有効活用した熱交換器の開発」を二つの大きな研究テーマに設定している。「地中熱ポテンシャル評価」では、現地地質調査・地下水調査を実施し、地下水流動・熱交換量予測シミュレーションに基づく地中熱ポテンシャルマップを作成・提供することを目的としている(第1図)。これまでに、福島県を中心とした東北主要地域における地中熱ポテンシャル評価を実施した。

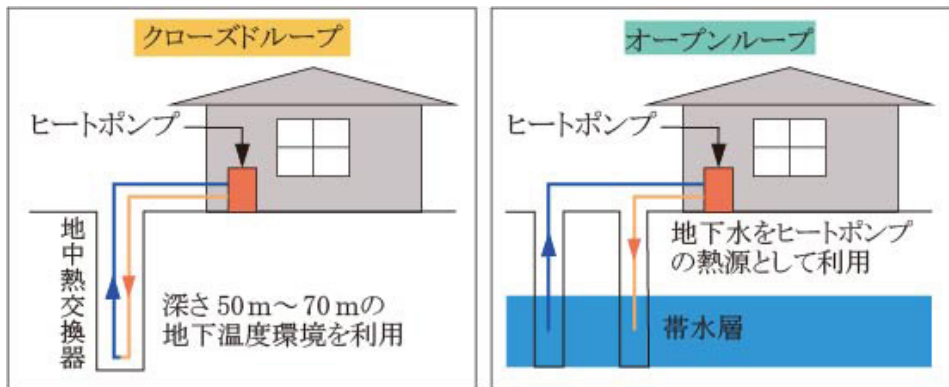
「地域の地下水環境を有効活用した熱交換器の開発」では、地元企業と連携して、地域の水文地質的特性に合った地中熱システムの最適化、総合的な地中熱システム技術の開発を実施している。地中熱システムの最適化とは、熱交換器の種類、埋設深度、運転パターンなどを最適な状態に調整することを意味する。現在、地中熱利用システムの熱交換方式は、地中から熱を取り出すために流体(水/不凍液)を循環させるクローズドループシステムと、揚水し

1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：地中熱チーム、成果報告、地中熱ポテンシャル評価、企業との共同研究



第1図 地中熱ポテンシャル評価の概念



第2図 2つの熱交換方式。地中から熱を取り出すために流体(水/不凍液)を循環させる方式と、揚水した地下水から熱を取り出す方法があり、それぞれクローズドループ(左図)、オープンループ(右図)と呼ばれている。

た地下水から直接熱を取り出すオープンループシステムの2種類に大別される(第2図)。さらに、最近では地下水を直接利用するオープンループシステムに加えて、新しいタイプの熱交換方法による地中熱利用システムが開発されており、その実証・評価が求められ始めた。これらの研究開発は、主に産総研シーズ事業プログラム内で実施しており、共同研究先の各社の技術シーズが着実に事業につながっている。

3. 今後の展開

地中熱チームが発足してからの5年間、地中熱ポテンシャル評価および熱交換器の開発については、暖房需要が

主体である東北地域を対象に研究を実施してきた。今後は、冷房需要の多い関東から関西方面、冷房運転のみの南西諸島など、様々な地中熱利用形態を網羅できる地中熱ポテンシャル評価手法と熱交換技術を開発する予定である。このことにより、日本全国への地中熱利用システムの導入・普及が促進されると思われる。また、将来的にはハウスメーカーや掘削関連企業と連携し、国内のみならず東南アジアへの事業展開を図りたい。

UCHIDA Youhei (2019) Accomplishment report on Shallow Geothermal and Hydrogeology Team, FREA.

(受付：2019年3月6日)

地中熱利用促進に向けた反射法地震探査

伊藤 忍^{1) 2)}

1. はじめに

私たちの研究グループでは反射法地震探査を用いて地下構造を明らかにすることに取り組んでいます。反射法地震探査は地下の地層境界のように密度比の大きい境界面を可視化することに効果的です。地中熱チームでは、平成 26 年度から平成 28 年度まで、地中熱利用促進に向けたプロジェクト「東北地域における第四紀地質構造解析および水理構造解析」に取り組んできました。反射法地震探査がどのような形で地中熱利用促進のためのプロジェクトに貢献できるのでしょうか。

2. 反射法地震探査とボーリング調査

反射法地震探査とは、地面に与えた振動が地下に伝わり、地層境界で反射して戻ってきた振動を、地表に並べた地震計(受振器)で電気信号に変換し、データとして収録するものです。このデータ収録のための装置は、かつては広く探鉱機と呼ばれていました。英語では“seismic recording system”と呼び、直訳すると「地震動記録装置」となりますが、最近では一般に地震探査システムと呼ばれることが多いようです。地震探査システムが探鉱機と呼ばれてきたのは、反射法地震探査が資源探査とともに発展してきたという経緯によるものと考えられます。エネルギー資源の確保は我が国の重要な課題であり、特に石油資源の開発を目的とした反射法地震探査はさかんに実施されてきました。

ところで、同じエネルギーと言っても地中熱については温度に関する物理量が重要で、ボーリングによってコアを採取して各種物理量を測定したり、孔内で直接物理量を測定するといった方法が有効です。一本のボーリングで、異なる深さでの物理量を測定することも可能です。しかしながら、水平方向の変化を把握するのは容易ではありません。群列ボーリングといって、直線上に複数の地点でボーリング調査を実施することもあります。ボーリング本数が増えるほど費用がかさみます。

一方、反射法地震探査は、様々な物理量を直接測定することはできません。しかしながら、地層境界の水平方向の

広がりを捉えることには有効です。つまり、一地点のボーリングで得られた情報を、水平方向に拡張するための情報を提供することが反射法地震探査には期待できます。私たちのグループでは、地中熱利用促進のためのプロジェクトが始まって以来、ボーリング調査の補完・拡張のために反射法地震探査を実施してきました。本稿ではその一部を紹介します。

3. 会津盆地東縁断層の調査

会津盆地は、東西にある断層で挟まれています。会津盆地の西側にある会津盆地西縁断層帯は慶長会津地震で動いたと言われています。会津盆地の西側にある山地の一部には比較的新しい堆積層から成る部分もあり、反射法地震探査が有効であると考えられます。福島県(2000)などによる調査がなされており、断層運動に伴う変形がはっきりと捉えられています。私たちのグループでも喜多方市と会津美里町で小規模な調査を実施し、浅部の構造を捉えました(第1図)。

一方、会津盆地の東側には猫魔火山があり、山麓は岩屑なだれ堆積物で覆われています。一般に火山性の堆積物は空隙率が大きく、弾性波が伝わりにくいとされています。そのため、会津盆地東縁ではこれまでに反射法地震探査は実施されてきませんでした。会津盆地東縁断層帯とは、主として地形から判読されたもので、その詳細はほとんど明らかになっていません。

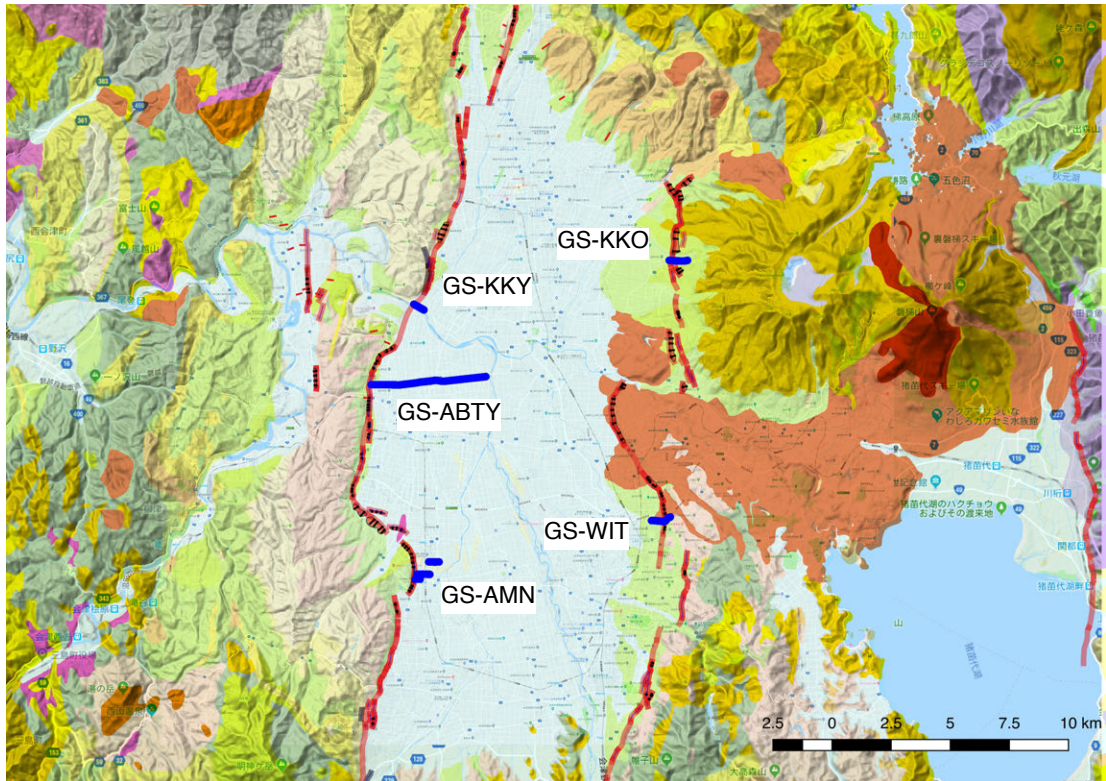
火山性の堆積物は弾性波が伝わりにくいとは言っても、まったく伝わらないわけではありません。そこで、私たちのグループでは、会津盆地東縁断層帯で反射法地震探査を実施してみることにしました。

2014年に喜多方市熊倉町^{おぐに}雄国で、2015年に会津若松市一箕町^{いっきまち}鶴賀で調査を実施しました(第2図)。いずれも地形判読から会津盆地東縁断層の存在が示唆される場所でしたが、いずれの地域においても断層に起因する変形構造を明瞭にイメージすることができました。第3図に会津若松市で得られた反射断面を示します。この測線の東側は翁島^{おきなじま}岩屑なだれ堆積物で、西側は沖積層で覆われてお

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

2) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

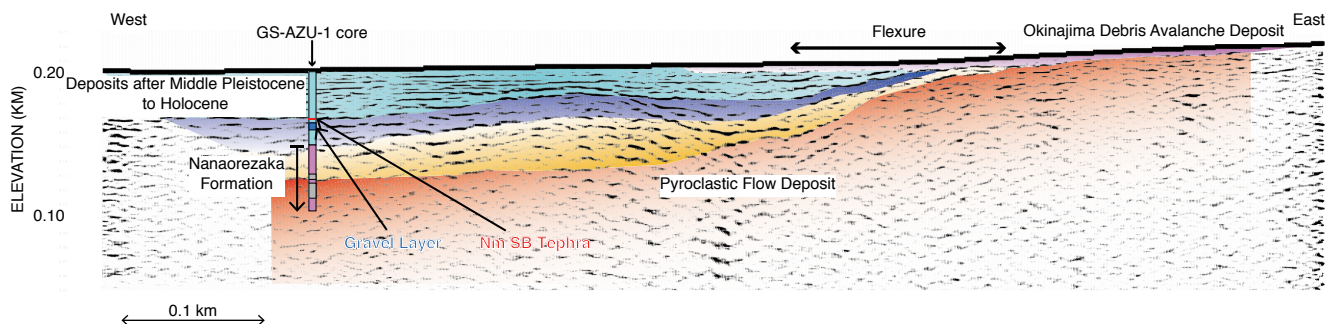
キーワード：地中熱、反射法地震探査、物理探査、会津盆地



第1図 会津盆地における地中熱利用促進に向けて実施された反射法地震探査の測線。青線が測線で、測線名を併記した。基図に日本シームレス地質図V2(産総研地質調査総合センター, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> 2017年10月20日確認)を利用した。また、活断層の地表トレースは、活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)を利用した。



第2図 会津若松市一箕町鶴賀における測線(GS-WIT)のCMP(Common Middle Point; 共通反射点)。基図に国土地理院の提供する地理院タイル「全国最新写真(シームレス)」(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> 2019年6月14日確認)。青線(点の集合)はCMPの位置, 数字はCMP番号である。GS-AZU-1は石原ほか(2017)によるボーリングの位置を示す。赤帯は会津盆地東縁断層による撓曲の位置を表し、活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)によるものである。



第3図 会津若松市一箕町鶴賀における反射法地震探査の深度断面の解釈図(第1図のGS-WIT)。右が東、左が西、縦横比は1:1である。GS-AZU-1(石原ほか, 2017)のコアの解釈を挿入している。青色の層は濃青色、淡青色をあわせて中期更新世以降の堆積物であるが、沖積層との境界ははっきりしない。濃青色、淡青色の境界は、厚さ約5mの礫層(コア中の青色)の上端からの反射面と考えられる。コアの左側に示した矢印は、コアの解釈による七折坂層を示しており、オレンジ色および茶色の層はあわせて七折坂層に対応する。茶色の層は、コアの解釈から七折坂層内の火砕流堆積物の上端であると考えられる。

り、反射断面だけから解釈することは困難です。そこで、この測線から500m程度離れた場所で行われたボーリング(GS-AZU-1)の結果(石原ほか, 2017)を参考にすることにより、七折坂層と沖積層、その他の境界を解釈することができました。

4. 地中熱利用促進への貢献のあり方

平成30年度第2回ふくしま地中熱利用情報交換フォーラムに参加して、筆者は反射法地震探査の地中熱利用促進への関わり方について考えさせられました。反射法地震探査で得られた結果は、地表地質調査やボーリング調査の結果などと併せて解釈され、3次元的な地下地質構造を把握することに用いられます。この地下地質構造は、地中熱ポテンシャルを評価する際に、基礎的なデータとして参照されます。このように反射法地震探査は地中熱利用のために役に立っています。一方、今回のフォーラムで、地中熱利用の施工者の方々の発表がありました。いずれも熱交換システムの改良に関する発表で、門外漢の私にとっても大変興味深いものでした。施工者から見れば熱交換器の設置位置や設置深度等はコストや効率に直結するので、地中熱利用ポテンシャルマップ等の成果は大変有益なものだと思います。しかしながら、端的に言ってしまえば地中熱利用ポテンシャルマップは結果であって、それを制作する過程はコストに直結しません。ポテンシャルマップの作成に反射法地震探査の結果が利用されていることを知ってもらうことはできたと思いますが、それ以上の何かを意識してもらえたようには感じられませんでした。石油掘削の際には、施工者は反射法地震探査の結果を相当程度意識します。つまり、反射法地震探査と石油掘削の施工者との関係の近さ

に比べて、反射法地震探査と地中熱利用の施工者との関係が遠いように感じられました。

地中熱ポテンシャルマップは大変有効なものですが、より一層の高分解能化が求められていると思います。しかし、高分解能化は簡単にできるものではありません。反射法地震探査は目的に応じて様々な規模で実施することが可能です。地中熱利用の施工最終段階で、現在の地中熱ポテンシャルマップには反映されていない局所的な擾乱を把握するのに、小規模な反射法地震探査が貢献できるのではないかと筆者は感じています。今回のフォーラムに参加してみても、反射法地震探査に携わる者から地中熱利用の施工者にこのような提案をするような発表でも良かったのではないかと感じました。

文献

- 福島県(2000)平成11年度地震関係基礎調査交付金 会津盆地西縁断層帯に関する調査 成果報告書. 164p.
- 石原武志・鈴木毅彦・本郷美佐緒・内田洋平(2017)オールコアの解析に基づく会津盆地の浅部地下地質構造の検討. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, HQR05-P05.
- 中田高・今泉俊文(2002)活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 東京. 60p.

ITO Shinobu (2019) Seismic reflection survey to harness shallow geothermal heat.

(受付: 2019年3月6日)

地質情報に基づく地中熱ポテンシャルの簡易評価

石原 武志¹⁾

1. はじめに

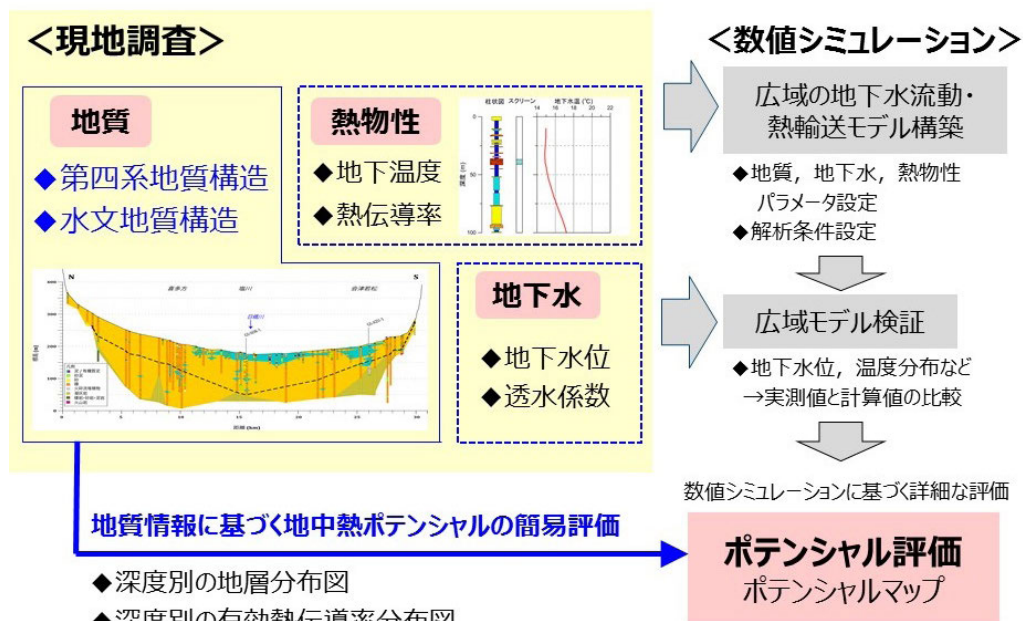
再生可能エネルギー研究センター地中熱チームの大きな研究テーマのひとつに「地中熱ポテンシャル評価」があげられる。現在は東北地方の平野・盆地を中心に、現地の地質・地下水調査で得られたデータに基づき広域の三次元地下水流動・熱輸送モデルを構築し、熱交換量予測シミュレーションを行って地中熱ポテンシャルマップを作成している(第1図)。地下水・地下温度のデータだけでなく、地質調査によって現地の第四系の地下地質構造及び水文地質構造を推定しモデルに反映させている点が、地中熱チームのポテンシャルマップの大きな特色の一つである。筆者は福島県の会津盆地と郡山盆地において地質調査を重点的に進め、両盆地の第四系地下地質層序と水文地質区分を行った(内田, 2019)。

このような基礎研究と並行して、地質情報を用いた地中熱ポテンシャルの簡易的評価を試みている。平野・盆地の帯水層分布や地盤の有効熱伝導率(地層と間隙水または空気の熱伝導率の合成値)は地質構造に支配されていること

から、地下地質情報を基に帯水層や有効熱伝導率の分布を図示することで地中熱利用の適地を簡易的に評価することができる。このような背景から、筆者は会津盆地と仙台平野を対象に、平均有効熱伝導率分布図や礫層・砂層(帯水層)の割合分布図を作成した。ここでは、それらの図について紹介する。なお、本研究の地中熱ポテンシャル評価は、クローズドループ型の地中熱システムを想定している。会津盆地については、Ishihara *et al.* (2018)の内容を一部抜粋したものとなっている。

2. 有効熱伝導率の計算と分布図作成

会津盆地では、まず盆地内の3地点で掘削した深度100～130mのオールコアと既存のオールコア(約100m; 鈴木ほか, 2016)の計4本のコアの対比に基づき、第四系の地下地質層序を推定した(石原ほか, 2017, 2018)。次に、コアと既存のボーリング柱状図資料約297本を対象に、深度100mまでに出現する地層を7つの層相(礫、砂、泥、腐植土・泥炭、火砕流堆積物・凝灰岩、



第1図 地中熱ポテンシャル評価研究の流れと本研究の位置づけ

1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：地中熱, 有効熱伝導率, 第四系, 地下地質情報, 会津盆地

第1表 会津盆地の層相区分と物性値 (Ishihara *et al.*, 2018)
地層は金子・中川 (1969), 金子ほか (2016) に
基づき G.L.-5 m 以深を飽和と仮定。

層相	有効熱伝導率 W/(m・K)	
	飽和	不飽和
盛土・埋土	1.25	1.12
泥 (シルト)	1.10	0.85
砂	1.20	0.98
礫	1.36	1.21
腐植土・泥炭	0.68	0.36
凝灰岩 (火砕流堆積物)	0.93	0.80
基盤岩	2.22	-

第2表 仙台平野の層相区分と物性値
盛土・表土以外の有効熱伝導率は地中熱利用促進協
会 (2014), 盛土・表土の有効熱伝導率は Shrestha *et al.*
et al. (2017) より。地層は全て飽和と仮定。

層相	有効熱伝導率 W/(m・K)	備考
盛土・埋土	1.25	Shrestha <i>et al.</i> (2017)
泥 (粘土)	1.27	
砂	1.53	
礫	2.0	
腐植土・泥炭	1.22	
ローム	1.00	
基盤 (新第三系)	1.4	岩 (軽量)

仙台平野の層相区分と物性値

伝導率は盛土・表土を除き地中熱利用促進協会 (2014) より。

基盤岩, 盛土・埋土; 第1表) に区分し, 深度 100 m までの合計層厚をそれぞれ読み取った。

各地層の有効熱伝導率を第1表に示す。柱状図資料ごとの平均有効熱伝導率(λ_{ave})は, 地層ごとの有効熱伝導率(λ_{gk})と地層の層厚(L_k)の加重平均によって求めた。

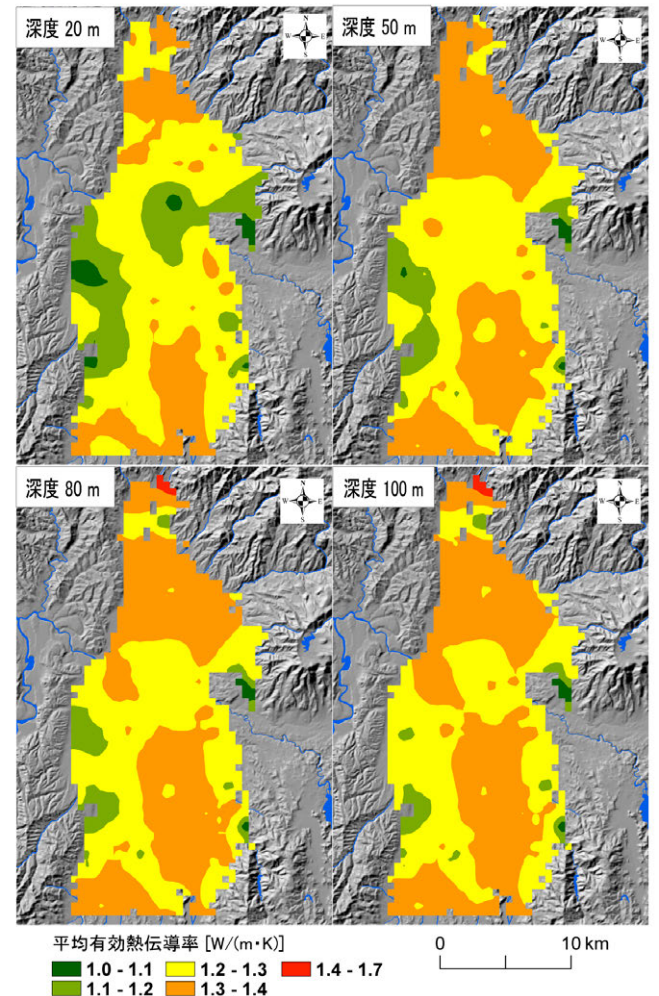
$$\lambda_{ave} = \frac{\sum(\lambda_{gk} \times L_k)}{\sum L_k} \quad \text{式 (1)}$$

計算に当たり, 会津盆地の地下水位(飽和・不飽和境界面)については金子ほか(1969), 金子ほか(2016)を参考に G.L.-5 m と設定した。平均有効熱伝導率の計算後, 逆距離加重(IDW)法を用いて平均有効熱伝導率分布図を作成した。分布図は, 深度 0-10 m, 0-20 m, ..., 0-100 m の 10 通りを作成した。

仙台平野の地下地質層序については松本(1981, 1994), 田村ほか(2006), 宮城県(2002)などを参考に柱状図資料 156 本を解釈し, 地層を 7 つの層相(礫, 砂, 泥, 腐植土・泥炭, ローム, 新第三系, 盛土・埋土; 第2表)に区分した。仙台平野では深度 100 m に達する柱状図資料が少ないことから, 読み取り深度を 50 m までとした。各地層の有効熱伝導率に関しては地中熱利用促進協会(2014)の値を使用し, 各柱状図地点の平均値を計算した(第2表)。仙台平野では, 深度別の平均有効熱伝導率分布図に加え, 礫層と砂層の深度別の割合分布図も作成した(それぞれ 5 通り)。

3. 会津盆地と仙台平野における有効熱伝導率の分布と地中熱利用の適地

第2図に会津盆地における平均有効熱伝導率の分布(深



第2図 会津盆地の平均有効熱伝導率分布(深度別) Ishihara *et al.* (2018) を簡略化。

度 20, 50, 80, 100 m) を示す。盆地の北部および南部では相対的に高い値を示し, 深度 40 m 以深は 1.3 ~ 1.4 W/(m・K) の値で安定している。一方, 中央部の値は相対的に低いものの, 深度方向に有効熱伝導率が 1.0 W/(m・K)

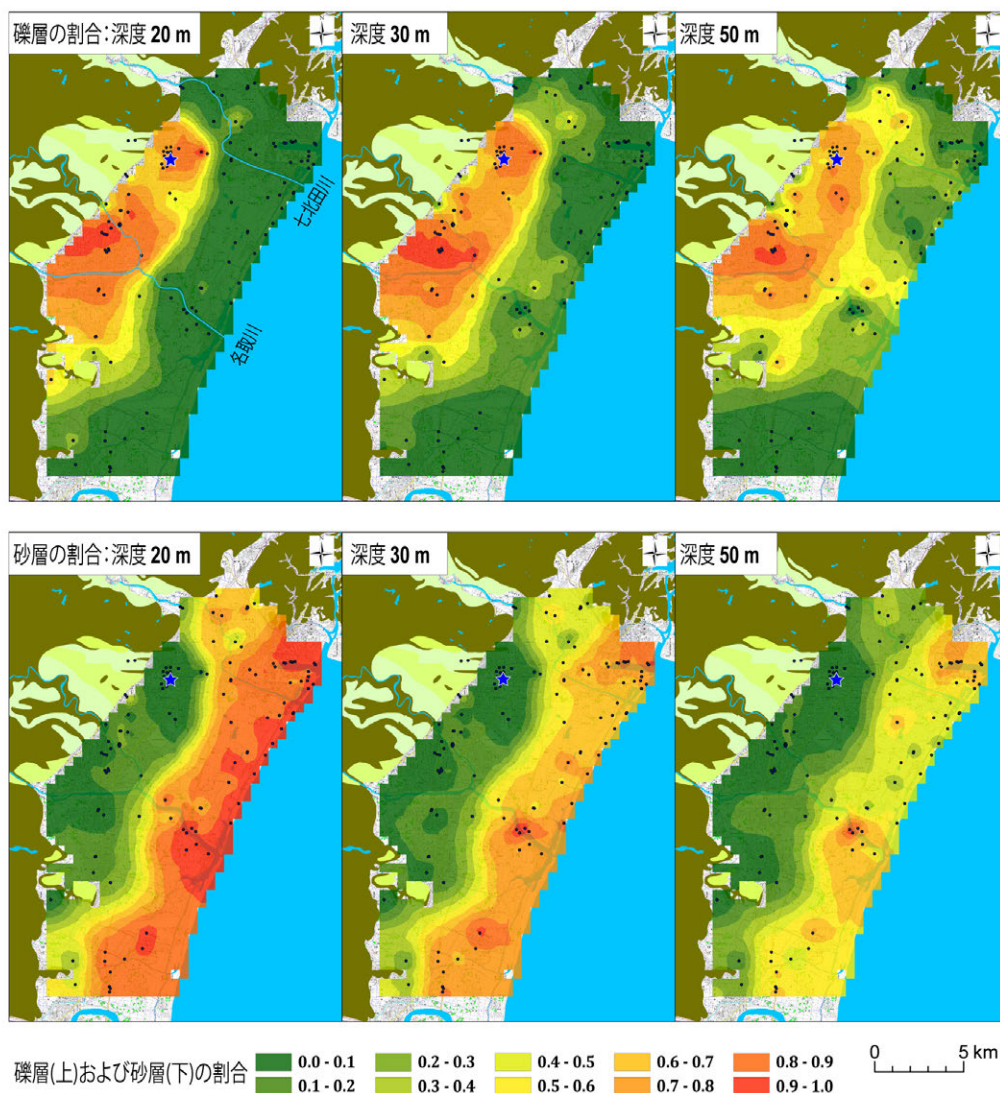
から 1.2 W/(m・K) まで増加する傾向がみられる。北部と南部は扇状地の発達する地域に相当し、深度 100 m まで概ね礫層で構成されているため、有効熱伝導率が安定して高い。一方、中央部には蛇行原(氾濫原)が発達しており、深度 40 m 程度までは泥層が優勢である。この浅層部の泥層が、盆地中央部の有効熱伝導率を低下させたといえる。深度方向に有効熱伝導率の値が上昇しているのは、約 40 m 以深から礫層の割合が増加する影響による。以上の地質条件からみると、会津盆地における地中熱利用(クローズドループ型)は北部・南部でより適しているといえる。

第 3 図に仙台平野における礫層と砂層の深度別割合分布、第 4 図に深度別有効熱伝導率分布を示す。礫層の分布は仙台・名取市街地の立地する内陸部の小扇状地帯で優勢である。沿岸部においては、深度 30 m まで礫層がほとんど分布せず、30 m 以深では七北田川や名取川沿いに細長く分布する様子が認められる。砂層の分布は浜堤の発達す

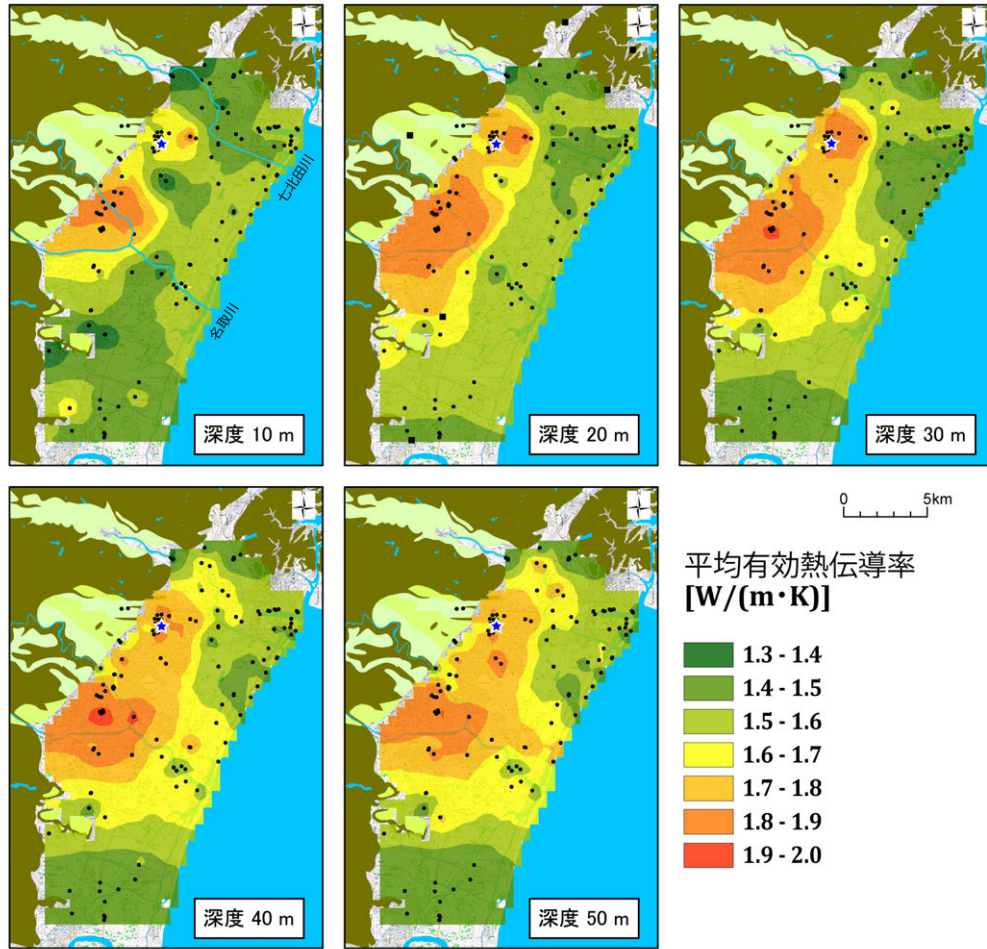
る沿岸部の深度約 0-20 m に集中している。有効熱伝導率はこれらの礫層・砂層の優勢する地域で概ね高い値を示し、地中熱利用により適した地域と考えられる。

上述の礫層は、松本(1994)の埋積下部層(沖積層基底礫層とそれ以前の更新統礫層)に概ね相当する。また、沿岸部浅層の砂層は松本(1994)の埋積上部層(沖積層)にあたり、外浜、前浜・後浜および砂丘堆積物よりなる(田村ほか, 2006)。沿岸平野では、地中熱利用の対象深度の地質が主に沖積層で構成されることから、沖積層の層序や地質構造を理解することが帯水層の分布や有効熱伝導率の高い地域を推定する上で重要と言える。

なお、本研究では地下水流動の影響を考慮していない。地下水流速の大きな帯水層が存在する地点では、熱移流効果によって有効熱伝導率がさらに増加することがある(熱移流効果を含めた有効熱伝導率は見かけ熱伝導率と呼ばれる)。したがって、より詳細な地中熱ポテンシャルを評価



第 3 図 仙台平野の礫層(上)と砂層(下)の割合分布(深度別)



第4図 仙台平野の平均有効熱伝導率分布（深度別）

するためには熱応答試験や地下水流動・熱輸送解析を行う必要がある。そのような数値解析を行う際には、有効熱伝導率のデータをリファレンスデータとして活用できる。

4. おわりに

本稿では、平成30年度第2回ふくしま地中熱利用情報交換フォーラムで発表した内容の一部を紹介した。今後は、地中熱チームの研究者と協力して、深度別の熱交換器モデル（同一地点における100 m熱交換器1本と50 m2本の比較など）の構築・熱交換量予測シミュレーションと本研究の結果の関係性についての検討を予定している。

文献

地中熱利用促進協会（2014）地中熱ヒートポンプシステム 施工管理マニュアル。オーム社，東京，173p。
 石原武志・鈴木毅彦・本郷美佐緒・内田洋平（2017）オールコアの解析に基づく会津盆地の浅部地下地質

構造の検討。日本地球惑星科学連合2017年大会，HQR05-P05。

石原武志・鈴木毅彦・本郷美佐緒・内田洋平（2018）テフラ及び花粉分析に基づく会津盆地西部のオールコア（GS-NT-1）の層序。日本地球惑星科学連合2018年大会，HQR04-P12。

Ishihara, T., Shrestha, G., Kaneko, S. and Uchida, Y. (2018) Analysis of shallow subsurface geological structures and ground effective thermal conductivity for the evaluation of ground-source heat pump system installation in the Aizu Basin, Northeast Japan. *Energies*, 11, 2098.

金子良・中川昭一郎（1969）会津盆地の水収支。農業土木試験場報告，7，33-52。

金子翔平・柴崎直明・庄司美由・内田洋平（2016）長期連続観測にもとづく会津盆地における地下水位及び地下水温度変動の特徴。地質調査研究報告，67，183-208。

松本秀明（1981）仙台平野の沖積層と後氷期における海

- 岸線の変化. 地理学評論, 52, 72-85.
- 松本秀明 (1994) 仙台平野の成り立ち. 仙台市史編さん委員会編, 仙台市史 特別編 1 自然, 仙台市, 仙台, 264-277.
- 宮城県 (2002) 平成 16 年度仙台平野南部地域地下構造調査に関する調査成果報告書, <https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Miyagi9frm.htm> (2019 年 2 月 20 日確認)
- Shrestha, G., Uchida, Y., Kuronuma, S., Yamaya, M., Katsuragi, M., Kaneko, S., Shibasaki, N. and Yoshioka, M. (2017) Performance evaluation of a ground-source heat pump system utilizing a flowing well and estimation of suitable areas for its installation in Aizu Basin, Japan. *Hydrogeol. J.*, 25, 1437-1450.
- 鈴木毅彦・斎藤はるか・笠原天夫・栗山悦宏・今泉俊文 (2016) 福島県, 会津盆地中西部地下における第四紀後期テフラの層序. 第四紀研究, 55, 1-16.
- 田村 亨・斎藤文紀・増田富士雄 (2006) 浜堤平野における沖積層の層序と堆積学的解釈: 仙台平野と九十九里浜平野の例. 地質学論集, 59, 83-92.
- 内田洋平 (2019) 平成 30 年度産総研福祉の再生可能エネルギー研究所研究成果報告会 地中熱チーム. GSJ 地質ニュース, 8, 16-19.
-
- ISHIHARA Takeshi (2019) Simple evaluation of ground source heat pump system installation using geological information in Japan.
-

(受付: 2019 年 3 月 6 日)

地質・地形構造が地中熱ポテンシャルに与える影響

金子 翔平¹⁾

1. はじめに

地下水環境が、熱交換量や地中熱利用システムの効率を左右するという研究例が知られている(例えば, Fujii *et al.*, 2005; Diersch *et al.*, 2011). 日本の都市部は、地下水の流れが活発な第四系で構成される平野や盆地に位置しているため、地下水流動を考慮することは地中熱利用システムの効率的な利用にとって重要である。地中熱利用システムの普及や認知度向上のため、日本のいくつかの地域で地中熱ポテンシャル評価が行われている(例えば、筑紫平野; Fujii *et al.*, 2007, 山形盆地; Yoshioka *et al.*, 2012 など)。しかしながら、盆地と平野という地形の違いやそれぞれの水文地質環境の違いが熱交換量に与える影響を検討した事例がない。本研究では、宮城県仙台平野において地中熱ポテンシャル評価を実施した。また、この結果を Shrestha *et al.* (2018) が実施した福島県会津盆地の地中熱ポテンシャル評価と比較し、熱交換量に影響を与える要因について検討を行った。なお、この研究は、Kaneko *et al.* (2018) の内容を一部抜粋したものである。

2. 研究地域概要

仙台平野は、南北約 40 km、仙台付近で東西約 10 km の広さを持つ海岸平野である。平野を取り巻くのは、南から相双丘陵・槻木丘陵、仙台段丘群、富谷-塩竈丘陵であり、各丘陵間を阿武隈川、名取川、七北田川が東に向かって流れる。仙台平野の地下には、現河川に対応するそれぞれの第四紀の埋没谷(七北田埋没谷・名取川埋没谷・阿武隈川埋没谷)が発達している。これら 3 つの埋没谷を埋積する地質は、いずれも A) 上部砂・粘土層, B) 上部砂層, C) 中部粘土層, D) 下部砂礫層に区分される(東北農政局計画部, 1980)。七北田埋没谷, 名取川埋没谷および阿武隈川埋没谷の深度は、それぞれ -60 m 以浅, -70 m 以浅および -85 m 以上と報告されている(東北農政局計画部, 1980)。内陸部には小規模な扇状地が分布し、沿岸部には海岸線に平行な数列の浜堤が分布している。

会津盆地は、南北約 30 km、東西約 12 km の構造性の

内陸盆地である(山元ほか, 2006)。盆地の周辺には、北西に飯豊山地、東に磐梯山や猫魔火山などがそびえる。盆地の西側には活断層である会津盆地西縁断層系が存在し(山元ほか, 2006)、盆地の東側には会津盆地東縁断層の存在が報告されている(池田ほか, 2002)。盆地内には、塔寺層の上位に未区分の上部更新統が堆積すると推定されている(山元ほか, 2006)。盆地の中央部が最も第四系の層厚が大きいと推測されており(建設省, 1975)、掘削資料によると、盆地北部の喜多方市街地では、深度 250 m まで掘削しても第四系の基底に到達しない(金子ほか, 2016)。

3. 3次元地下水流動・熱輸送モデル(広域モデル)

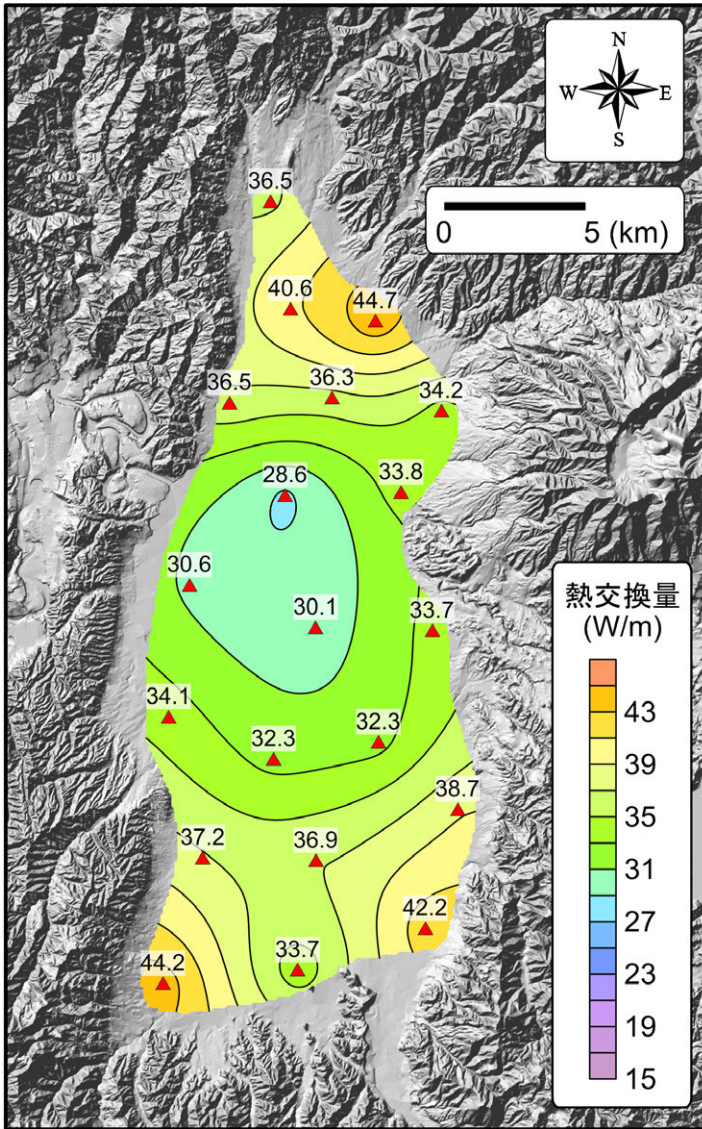
仙台平野の地下水環境を把握するために、DHI 社製の 3次元地下水流動・熱輸送シミュレータ FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW and transport simulation system) を用いて 3次元地下水流動・熱輸送モデルを構築した。モデル化範囲は、平野の分水界を考慮し約 3,600 km² とした。解析対象領域は第四系(Layer1-2)、新第三系(Layer3-9) および古第三系(Layer10-17) とし、17層に分割した。構築したモデルの検証データとして、地下水位、地下温度および熱応答試験(TRT)の結果を用いた。検証の結果、地下水位については、実測水位よりやや高い値となったが、全体的には調和的であった。地下温度については、多くの地点で計算値と実測値はよく一致し、温度プロファイルのパターンを再現することができた。TRTについては、計算された出口温度は実測値とほぼ一致した。以上から、構築したモデルは妥当であると判断された。

4. 熱交換井モデル

一般的なクローズドループ型の地中熱利用システムを想定し、20 m × 20 m × 120 m の仮想の熱交換井モデル(GHE モデル)を作成し、平野内の 33 地点について熱交換量の計算を行った。GHE モデルは FEFLOW を用いて作成した。GHE モデルに入力したパラメータは、構築し

1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：地中熱ポテンシャル, 地下水流速, 地下温度, 仙台平野, 会津盆地



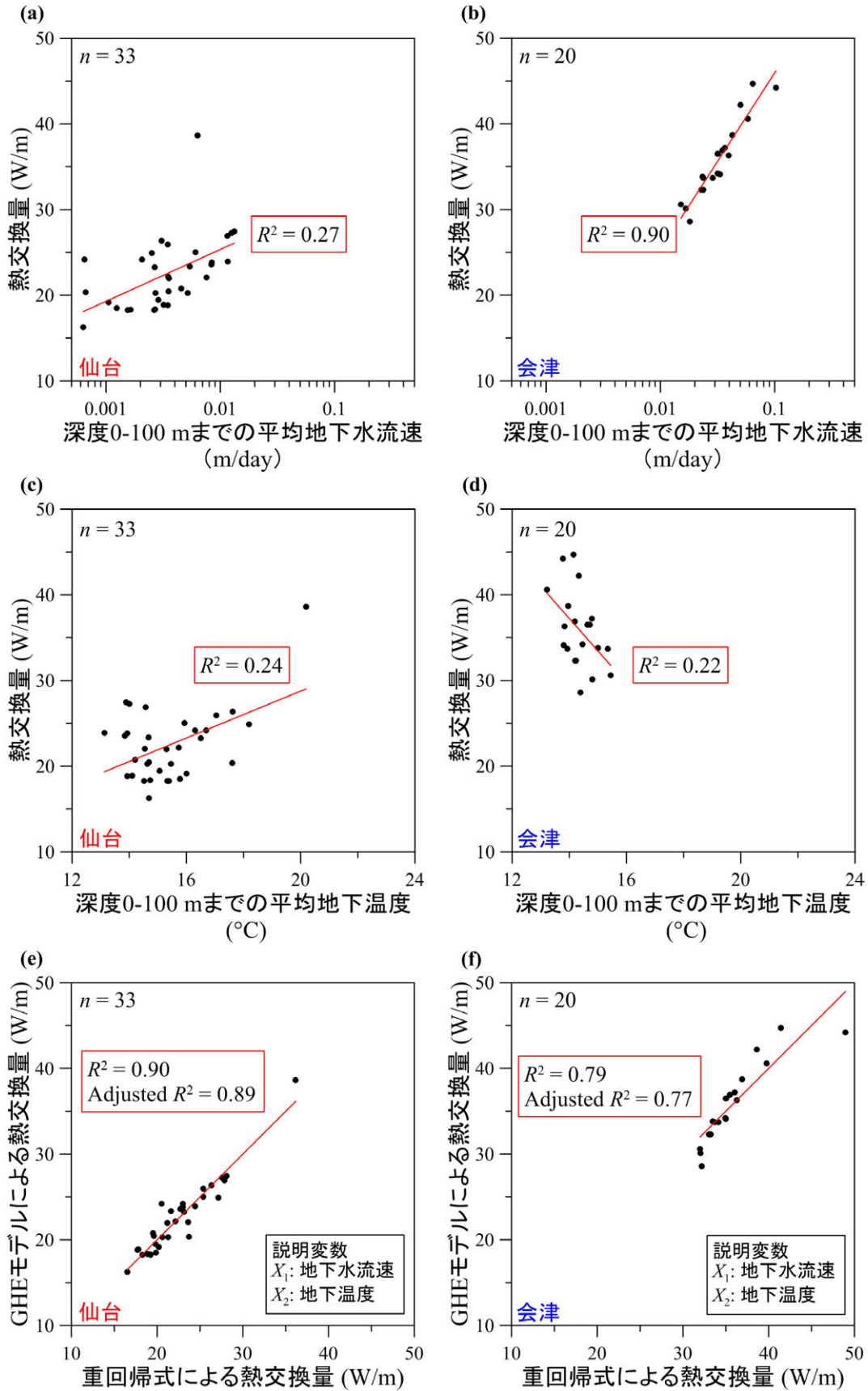
第2図 会津盆地における熱交換量マップ
Shrestha et al. (2018) の結果をもとに修正。

地における，地下水流速と熱交換量の決定係数は，それぞれ0.24と0.22であった(第3図(c)～(d))．次に式(1)を用いて重回帰分析を行った：

$$Y = a \times X_1 + b \times X_2 + c \quad \text{式(1)}$$

ここでYは熱交換量(目的変数)， X_1 と X_2 はそれぞれ表層から深度100 mまで平均地下水流速と平均地下温度(説明変数)，a，bおよびcは係数である．重回帰分析の結果を第1表に示す．仙台平野および会津盆地の補正決定係数は，それぞれ0.89および0.77である(第3図(e)～(f))．仙台平野では， t 検定は X_1 および X_2 ともに2より大きく， p 値は X_1 および X_2 ともに0.05よりも小さい．一方で，会津盆地では， X_1 については， t 検定は2よりも大きく， p 値は0.05よりも小さいが， X_2 については， t 検定は2よりも小さく， p 値は0.05よりも大きい値を

示した．これらの結果から，仙台平野では，熱交換量は平均地下水流速と平均地下温度と相関があるが，会津盆地では，交換量は平均地下水流速とのみ相関があることが示された．両者の大きな違いは，会津盆地の地下水流速は仙台平野よりも1オーダー大きいことである．これは，地形勾配や第四系の層厚の違いによるものと考えられる．会津盆地の平均地形勾配は，阿賀川付近を除いては10/1000～20/1000を示すのに対し(Ishihara et al. 2018)，仙台平野の平均地形勾配は，扇状地では6/1000，平野部では0.4/1000である(松本，1981)．また，モデルで解析された地下水面は地形面と調和的であることも確認された．第四系の層厚は，会津盆地は250 m以上であると報告されているが(福島県地質・地下水編集委員会，2013)，仙台平野では最大で90 m程度である(東北農政局，1980)．そのため，会津盆地の地下水流速は仙台平野よりも大きくなったものと推察される．仙台平野では，地下水流動によ



第3図 回帰分析結果
 仙台平野 (a) と会津盆地 (b) における平均地下水流速と熱交換量との相関。仙台平野 (c) と会津盆地 (d) における平均地下温度と熱交換量との相関。仙台平野 (e) と会津盆地 (f) における重回帰分析結果。

第1表 重回帰分析の結果
 X_1 および X_2 は、それぞれ平均地下水流速および平均地下温度を示す。
 Kaneko *et al.* (2018) の結果をもとに修正。

項目	仙台平野			会津盆地		
	係数	<i>t</i> 値	<i>p</i> 値	係数	<i>t</i> 値	<i>p</i> 値
切片	-20.33	-6.85	<0.001	22.63	1.39	0.18
X_1	1069.81	14.04	<0.001	201.61	6.81	<0.001
X_2	2.46	13.57	<0.001	0.41	0.38	0.71

る熱移流の影響が会津盆地よりも小さいため、移流だけでなく熱伝導の影響も受けたものと考えられる。一方、会津盆地では、地下水流動による熱移流の影響が大きいため、熱伝導の影響が移流の影響よりも相対的に小さくなった。そのため、仙台平野では、熱交換量は平均地下水流速と平均地下温度の影響を受け、会津盆地では、熱交換量は平均地下水流速の影響を受けたものと考えられる。以上より、地形・地質の違いが地下水環境に影響を与えること、地域によって熱交換量に影響を与える要因およびその影響度が異なることが確認された。

文 献

Diersch, H.J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Ruhaak, W. and Schatzl, P. (2011) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 2. Numerical simulation. *Comput. Geosci.* **37**, 1136–1147.

Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J. and Uchida, Y. (2005) Optimizing the design of largescale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling. *Geothermics*, **34**, 347–364.

Fujii, H., Inatomi, T., Itoi, R. and Uchida, Y. (2007) Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models. *Geothermics*, **36**, 459–472.

福島県地質・地下水分布図編集委員会 (2013) 福島県地質・地下水分布図. 全国さく井協会, 東京, 91p.

池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志 (2002) 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 東京, 254p.

Ishihara, T., Shrestha, G., Kaneko, S. and Uchida, Y. (2018) Analysis of shallow subsurface geological structures and ground effective thermal conductivity for the evaluation of ground-source heat pump system installation in the Aizu Basin, Northeast Japan.

Energies, **11**, 2098.

金子翔平・柴崎直明・庄司美由・内田洋平 (2016) 長期連続観測にもとづく会津盆地における地下水位及び地下水温度変動の特徴. 地質調査研究報告, **67**, 183–208.

Kaneko, S., Uchida, Y., Shrestha, G., Ishihara, T. and Yoshioka, M. (2018) Factors affecting the installation potential of ground source heat pump systems: a comparative study for the Sendai Plain and Aizu Basin, Japan. *Energies*, **11**, 1178.

建設省 (1975) 表層地質喜多方. 国土交通省 HP, <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/5-1/0704.html> (参照日: 2019年4月3日).

松本秀明 (1981) 仙台平野の沖積層と後凍期における海岸線の変化. 地理学評論, **52**, 72–85.

Shrestha, G., Uchida, Y., Ishihara, T., Kaneko, S. and Kuronuma, S (2018) Assessment of the installation potential of a ground source heat pump system based on the groundwater condition in the Aizu Basin, Japan. *Energies*, **11**, 1178.

東北農政局計画部 (1980) 宮城県及び岩手県水文地質図集 農業用地下水調査 宮城・岩手地区調査報告書. 東北農政局計画部, 仙台, 69p.

山元孝広・吉岡敏和・牧野雅彦・住田達哉 (2006) 喜多方地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 63p.

Yoshioka, M., Uchida, Y., Fujii, H., Yamaya, M. (2012) Groundwater flow and heat transfer modeling to estimate the area suitable for ATEs. *Proc. FEFLOW User Conference 2012* (CR-ROM).

KANEKO Shohei (2019) Effect of geological and geomorphic structure on the installation potential of ground source heat pump system.

(受付: 2019年3月6日)

NEDO プロジェクトにおける研究成果 その1

—東北地域の地中熱ポテンシャル評価—

シュレスタ・ガウラブ¹⁾

1. はじめに

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「再生可能エネルギー熱利用技術開発」の一環で実施された。本稿では、クローズドループ地中熱ポテンシャル評価・ポテンシャルマップの作成について報告する。地中熱利用システムの普及と持続可能な利用のためには対象となる地域のポテンシャル評価が必要である。日本の場合、地下水の存在が地中熱ポテンシャルに大きく影響するので、対象地域の水文地質・地下水・地下温度の考慮が重要となっている。なぜなら、地下水の流れがあると熱の移流効果で、見かけの熱伝導率が増加し、熱交換率の向上が期待されるからである。そこで本研究の目的は、水文地質・地下温度を考慮した、地中熱利用の適地選定のためのポテンシャル評価を行い、ポテンシャルマップを作成することである。

本事業では、東北の5つの地域、津軽平野・秋田平野・山形盆地・仙台平野・郡山盆地におけるクローズドループシステムのポテンシャルマップを作成することにした。ポテンシャルマップを標準化するために、ポテンシャル・適度を熱交換器の必要な長さで表現することができれば、一般の方でも理解しやすくなると考えられる。そこで本研究では、戸建住宅におけるクローズドループシステムの導入を想定し、各対象地域の気象条件に応じた冷暖房負荷を推定し、その熱負荷量に対応できる熱交換器の必要な長さを計算し、ポテンシャルマップを作成した。本稿では、1つの事例として仙台平野の解析結果を示す。

2. 戸建住宅における冷暖房熱負荷

戸建住宅における冷暖房熱負荷の計算には、経済産業省・国土交通省が示す平成25年省エネルギー基準に基づいた建物の負荷条件の標準化案を用いた。省エネルギー基準の地域区分に応じた住宅建物の外皮平均熱還流率 U [$W/m^2/K$]、平均日射熱取得率 η [$W/(W/m^2)$] の基準値をもとに床

面積当たりの時刻別冷暖房負荷 Q [W/m^2] を求めた。計算式を以下に示す。

$$\text{暖房負荷, } Q_h = \frac{U \times A_e (T_i - T_o)}{A_f} - \frac{I \times \eta}{A_f} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{冷房負荷, } Q_c = \frac{U \times A_e (T_o - T_i)}{A_f} + \frac{I \times \eta}{A_f} \quad \text{式(2)}$$

Q_h, Q_c : 暖房および冷房熱負荷 [W/m^2]

A_e : 外皮面積 [m^2]

T_i : 室内設定温度 [$^{\circ}C$]

T_o : 外気温度 [$^{\circ}C$]

A_f : 延床面積 [m^2]

I : 日射量 [W/m^2]

日射量と外気温度は時刻毎に与える。そのために、研究対象地域の10年間の年平均気温データより、最も平均的な年の時刻別外気温度のデータを取得し、1年分の冷暖房負荷を求めることにした。

2.1 省エネルギー基準における地域区分の細分化

平成25年省エネルギー基準では、全国の地域を8区分に細分化している(建築環境・省エネルギー機構, 2016)。第1表に各区分における外皮平均熱還流率 U [$W/m^2/K$]、平均日射熱取得率 η [$W/(W/m^2)$] の基準値を示す。寒冷地である1から4の地域においては建物の断熱性能の基準を満たすことで夏季における一定の日射遮蔽性能を満たすため冷房期の平均日射熱取得率 η の基準が設けられておらず、蒸暑地である8の地域では、建物の日射遮蔽

第1表 平成25年省エネルギー基準における外皮平均熱還流率 U および平均日射熱取得率 η の基準値

地域区分	1	2	3	4	5	6	7	8
外皮平均熱還流率 U [$W/m^2/K$]	0.46	0.46	0.56	0.75	0.87	0.87	0.87	-
平均日射熱取得率 η [$W/(W/m^2)$]	-	-	-	-	3.0	2.8	2.7	3.2

1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

キーワード: NEDO, 地中熱ポテンシャル, 東北地域, 地下水, 地下温度

性能の基準を満たすためには屋根面等での断熱は必要不可欠である。よって一定の断熱性能を担保することができるため外皮平均熱還流率 U の基準が設けられていない。

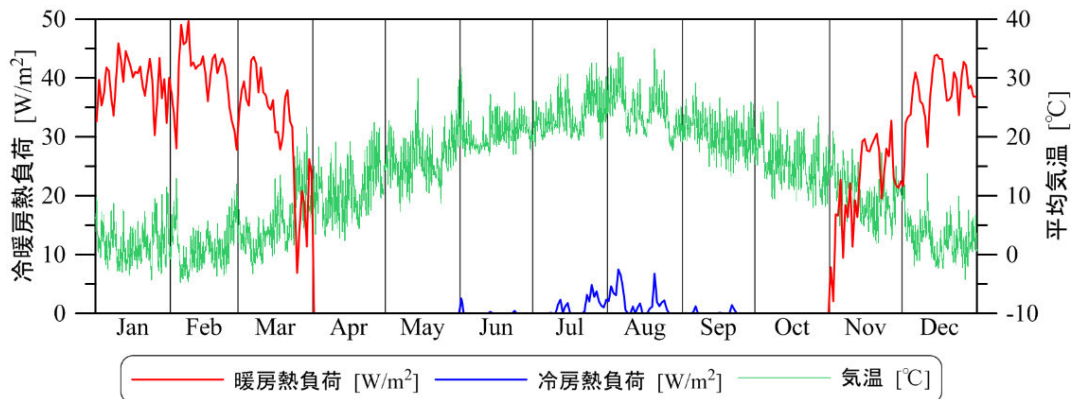
冷暖房負荷計算に用いる住宅のモデルケースは特定の家ではなく、国土交通省が省エネルギー基準改定の計算に用いた一般的な住宅と同様のものを採用し、外皮面積 A_e を 312.80 m^2 、延床面積 A_f を 120.08 m^2 とし、1年間の冷暖房熱負荷を計算した(第1図)。

地中熱利用システムの運転開始条件については、暖房運転では外気温度が 14°C 下回った時刻、冷房運転では 26°C を上回った時刻にそれぞれ運転を開始するとした。また、室内設定温度 (T_o) を暖房運転時に 22°C 、冷房運転時に 26°C とした。そして、計算された冷暖房負荷に空調面積 120 m^2 を乗じることで1軒あたりの空調負荷を求める。さらに、使用する地中熱ヒートポンプの成績係数 (COP) を暖房時は 3.5、冷房時は 5.5 と想定し、必要熱交換量をそれぞれ求めた(第2図)。

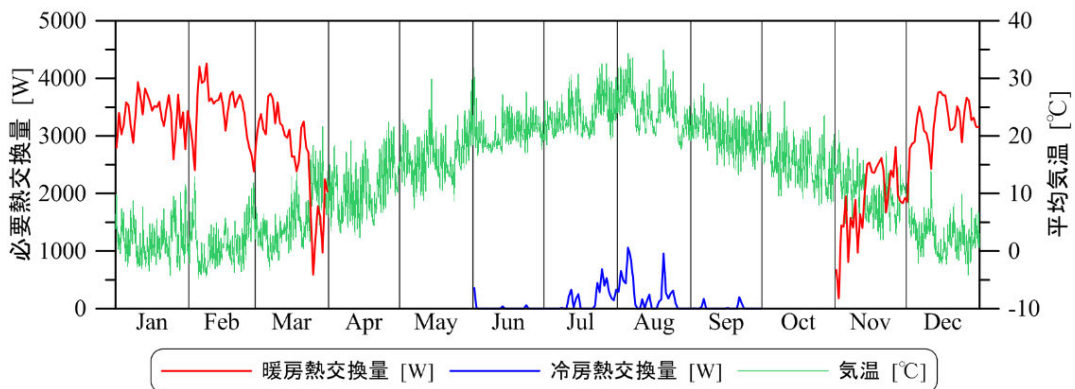
3. クローズドループポテンシャルマップを作成

仙台平野のポテンシャル評価およびポテンシャルマップの作成には Kaneko *et al.* (2018) の3次元地下水流動・熱輸送モデル(広域モデル)を用いた。本研究では必要熱交換器の長さを地中熱ポテンシャルとした。必要熱交換器の長さを計算するため、平野内33地点でクローズドループシステムを想定した同一の熱交換器 (Ground Heat Exchanger, 以下, GHE) モデル(第3図)を構築した。各地点における地層の厚さ、熱および水物性は広域モデルと一致するように設定した。各層の初期・境界条件は、広域モデルから得られた各地点での地下水流速、地下水位、地下温度の結果が再現できるように設定した。GHEモデルの中心に外径 34 mm のダブルUチューブを設置し、充填剤は珪砂と想定した。

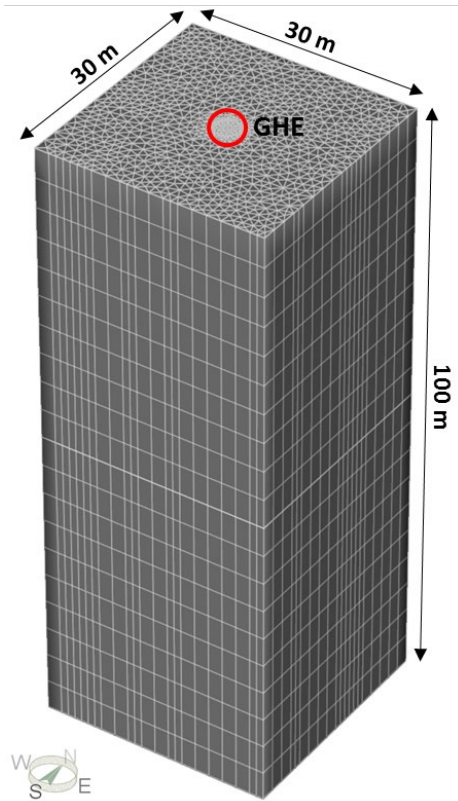
運転シナリオは、暖房運転は11月～3月、冷房運転は6月～9月とし、熱媒体の循環流量は $35 \text{ m}^3/\text{day}$ とし、各地点で3年間の熱交換シミュレーションを行った。仙



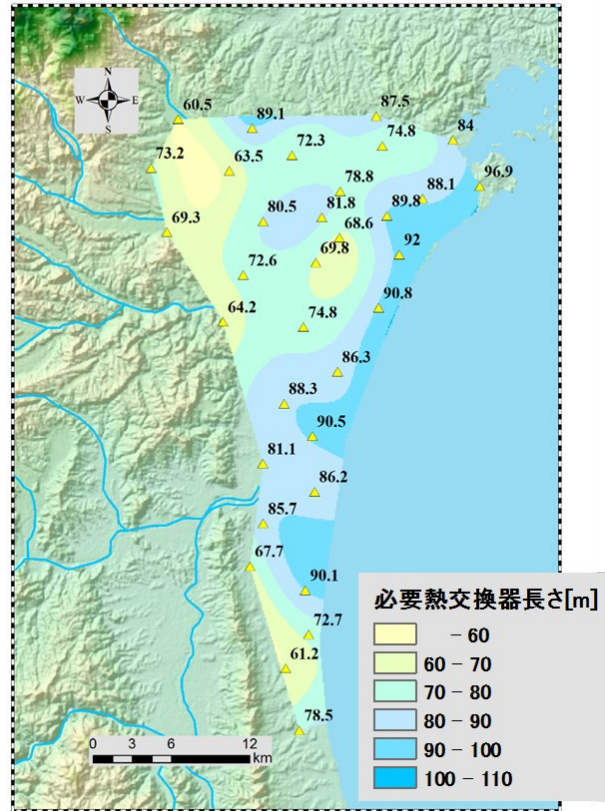
第1図 仙台平野における1日毎の冷暖房熱負荷



第2図 仙台平野における1日毎の必要熱交換量



第3図 熱交換器モデル



第4図 仙台平野における地中熱ポテンシャルマップ(クローズドループ). 背景地図は国土地理院数値地図 50 mメッシュ(標高)を使用.

台平野を含めて東北地域では、暖房負荷が大きいので、冬季に入口・出口温度の平均値が -2°C を下回らない最短の熱交換器の長さを求めて、ポテンシャルマップとしてその分布図を作成した(第4図)。

必要熱交換器の長さの分布は、涵養域である山側(北西)で比較的短く、沿岸域(東)では長い傾向を示した。山側では地下水流速が沿岸域と比べて早いため、地下水流れによる熱移流の効果が熱交換に影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、戸建住宅におけるクローズドループシステムの導入を想定し、各対象地域の気象条件に応じた冷暖房負荷を推定し、その熱負荷量に対応できる熱交換器の必要な長さを計算し、ポテンシャルマップを作成することにした。戸建住宅における冷暖房熱負荷の計算には、経済産業省・国土交通省が示す平成25年省エネルギー基準に基づいた建物の負荷条件の標準化案を用いた。

必要熱交換器の長さを計算するため、仙台平野内33地点でクローズドループシステムを想定した同一の熱交換器モデルを構築し、各地点で3年間の熱交換シミュレーション

を行った。そして、熱交換器の入口・出口温度の平均値が -2°C を下回らない最短の熱交換器の長さを計算し、クローズドループポテンシャルマップを作成した。本事業では、仙台平野と同様に津軽平野、秋田平野、山形盆地、郡山盆地の地中熱ポテンシャル評価方法を構築し、ポテンシャルマップを作成した。

文献

Kaneko, S., Uchida, Y., Shrestha, G., Ishihara, T. and Yoshioka, M. (2018) Factors affecting the installation potential of ground source heat pump systems: a comparative study for the Sendai Plain and Aizu Basin, Japan. *Energies*, 11, 1178.

建築環境・省エネルギー機構 (2016) 住宅の省エネルギー基準, http://www.ibec.or.jp/ee_standard/build_standard.html (参照日: 2017年2月22日).

SHRESTHA Gaurav (2019) Research results of NEDO project part 1 - Assessment of installation potential of ground-source heat pump system in Tohoku region -.

(受付: 2019年3月6日)

NEDO プロジェクトにおける研究成果 その2 ーオープンループの地中熱ポテンシャル評価方法ー

吉岡真弓¹⁾

1. はじめに

地中熱利用システムの普及促進に向けて、「地中熱ポテンシャルマップ」の作成が求められている。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では、平成26年度から「再生可能エネルギー熱利用技術開発」事業として、地中熱利用システムについてシステムトータルの導入及び運用コストをそれぞれ20%低減させるための技術開発と共に、効率的なシステム導入の促進に資するポテンシャル評価技術開発を進めている。産総研再生可能エネルギー研究センター地中熱チームでは、日本地下水開発株式会社および秋田大学と共に本プロジェクトに参画し、東北地域を中心としたクローズドループシステムの地中熱ポテンシャル評価およびオープンループ/帯水層蓄熱冷暖房(Aquifer Thermal Energy Storage, 以下、ATES と記載)システムの適地評価技術開発を進めてきた。クローズドループシステムは、水文地質環境に依らず導入・利用が可能であることから、その「利用可能性=ポテンシャル」を評価することが求められている。一方、オープンループシステム(ATESシステムもオープンループシステムの種類)は地下水を直接利用するシステムであるため、水文地質環境によっては利用できない地域も存在する。そのため、オープンループシステムに関しては、「適地」を評価することが重要である。本稿では、本事業において構築したオープンループ/ATESシステムの適地評価手法について、その概要を述べる。

2. オープンループ/ATESシステムの適地評価手法

当チームでは、地域の地質・地下水環境の視点からオープンループ/ATESシステムの適地評価を行った。また、対象とするオープンループは揚水した地下水を再び地下に戻す地下水還元型のシステムとする。その前提において、オープンループシステムの導入では、①システムに必要な地下水が揚水可能であること、②採排熱後の地下水が

同一帯水層へ還元可能であること、が適地の選定条件となると考えられる。さらに、帯水層を季節間蓄熱槽として利用するATESシステムにおいては、③冬季/夏季に蓄熱した冷水/温水塊が稼働停止期間中(主に春と秋)に移流拡散により消失せず、季節間で揚水井と還元井を入れ替えることによりエネルギーメリットを得られる地下水環境であることも重要である。これらの①、②、③を満たす地域はATESシステム最適地と考えられ、①、②のみを満たす地域では、帯水層を蓄熱槽としない通常型のオープンループシステムが最適であると考えられる。対象地域に対し、これらの①②③の条件を選定するため、当チームでは、平野や盆地を対象とした3次元地下水流動熱輸送モデルを構築し、地下水流向・流速や地下温度分布を推定することで、オープンループ/ATESシステムの適地を評価した。それぞれの条件の詳細について以下に述べる。

まず、①システムに必要な地下水が揚水可能である条件については、ここでは、対象帯水層を第四紀堆積物(以下、第四系)とし、第四系内における帯水層厚さが20m以上ある範囲を、条件を満たす地域として抽出した。次に、②の採排熱後の地下水の還元に関する条件については、広域の地下水流動シミュレーション結果より、鉛直方向上向きの地下水流速が大きい地域、あるいは地下水流向が下向きの地域を抽出した。これは、鉛直方向上向きの流れが卓越する地域(例えば自噴井がある地域など)では、採排熱した地下水を帯水層に還元することが難しいと考えられるためである。最後に、③の冷暖房期の蓄(冷)熱塊が稼働停止中に移流拡散により消失しにくい地下環境については、最も支配的であると考えられる水平方向の地下水流速分布から、適地を抽出することとした。その際、水平方向の地下水流速について基準を設ける必要がある。そこで、本事業では、単純な帯水層を数値シミュレーション上で構築し、一定条件(揚水/還元井の距離、帯水層の厚さ、必要熱負荷など)において、地下水流速のみを変えた場合の季節間蓄熱効果について検討を行った。その結果、本事業では、ATESに適する水平方向の地下水流速を年間約15

1) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：NEDO、地中熱利用、地下水、オープンループ、帯水層蓄熱、適地、地下水流動、熱輸送

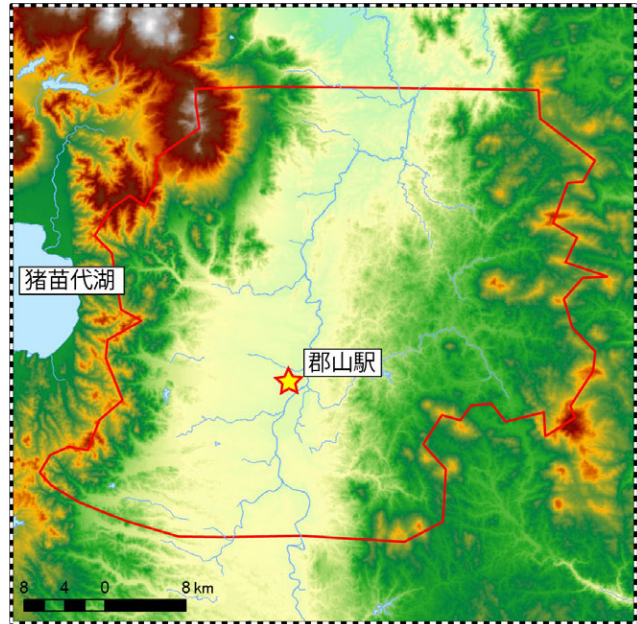
m以下とし、この条件を満たす地域を、広域の地下水流動熱輸送シミュレーション結果より抽出した。以上の条件を満たす地域を重ね合わせることで、オープンループ/ATESの最適地分布を求めた。

3. 郡山盆地のオープンループ/ATESシステムの最適地分布

本NEDO事業では、東北5地域について適地評価を行っているが、本稿では福島県の郡山盆地の例について述べる。第1図は本事業で実施した広域地下水熱輸送解析の計算範囲である。計算には、有限要素法による3次元地下水流動熱輸送シミュレーションソフトウェアであるFEFLOW(DHI製)を使用した。計算に用いた地質情報については、越谷・丸井(2012)によるデータを使用した。入力した熱・水理物性を第1表に示す。透水係数等の水理物性値については文献(例えば、柴崎・佐東, 2011; 萩原ほか, 2004など)を参考に試行錯誤的に決定した。熱物性値については、郡山市内で採取されたボーリングコアの熱物性計測結果を与えた。地下水流動に関する境界条件としては、側面を水頭固定境界とし、上面は地下水面固定境界、下面は非流動境界とした。熱輸送解析に関する境界条件として、側面は断熱境界とし、上面および下面は温度固定境界とした。上面と下面の温度については、郡山市内で実測された地下温度プロファイル(地表面~深度100m

程度)の地温勾配を元に決定した。計算結果については、郡山市内で定期観測されている地下水・地下温度観測井(4地点)の測定結果と比較検証し、計算結果は実測値とよい一致を示していることを確認した。

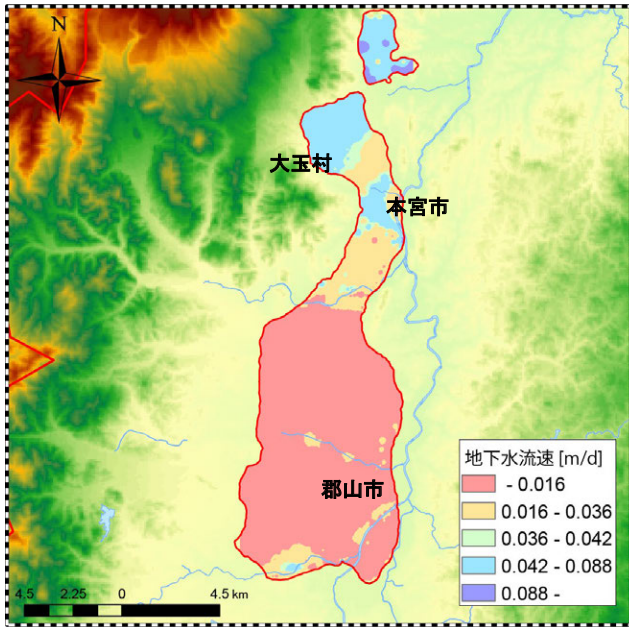
第2図として、郡山盆地における対象帯水層(ここでは第四系)の厚さが20m以上を有する範囲における水平方向の地下水流速の分布を示す。図より、郡山市街地の大部



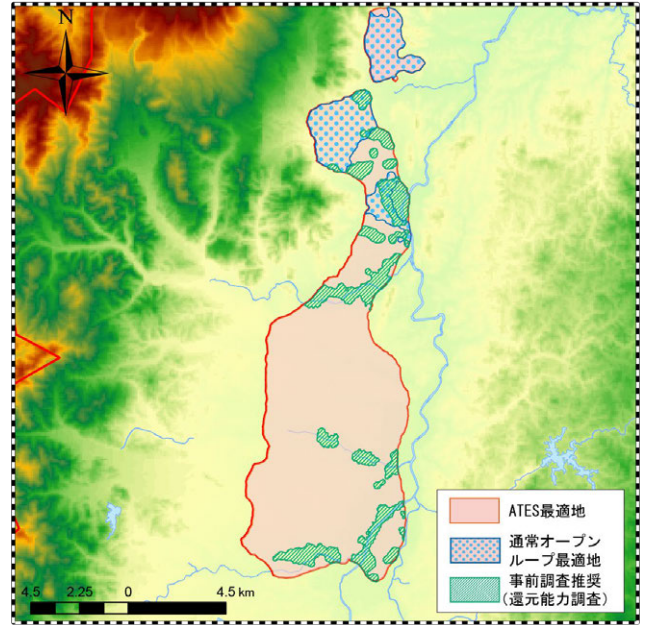
第1図 解析対象範囲(赤線)。背景地図は国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)を利用。

第1表 計算に用いた熱・水理物性値

Layer	地層	透水係数 [m/s]	間隙率 [-]	熱伝導率 [W/(m·K)]	熱容量 [MJ/(m³K)]	縦/横分散長 [m]
1	沖積層	2.7x10 ⁻⁵	0.2	1.40	2.9	
2	上部更新統	2.7x10 ⁻⁵	0.2	1.40	2.9	
3-5	同上 郡山層	2.7x10 ⁻⁵	0.2	1.40	2.9	
6-8	火山噴出物	2.7x10 ⁻⁵	0.2	1.56	2.9	
9	中部更新統	2.7x10 ⁻⁵	0.2	2.1	2.9	300 / 30
10-12	下部更新統	7.8x10 ⁻⁶	0.2	2.1	2.9	
13-15	新第三系鮮新統	7.8x10 ⁻⁶	0.2	2.1	2.9	
16-22	新第三系中新統	7.8x10 ⁻⁸	0.1	2.1	2.9	
23-25	仮格子	1.0x10 ⁻⁸	0.1	2.1	2.9	
流体(水)	-	-	-	0.6	4.2	-



第2図 計算によって求められた地下水流速分布(水平方向)。赤線は、対象帯水層厚さが20 m以上の範囲を示す。背景地図は国土地理院の数値地図50 mメッシュ(標高)を利用。



第3図 郡山盆地のオープンループおよびATEsシステムの適地分布。背景地図は国土地理院の数値地図50 mメッシュ(標高)を利用。

分では、比較的遅い地下水流速が推定されたが、本宮市や大玉村付近では、年間約15 mを超える地下水流速(第2図中の0.042 m/d以上に相当)が見込まれた。広域地下水流動熱輸送解析結果より推定された郡山盆地のオープンループおよびATEsの最適地分布を第3図に示す。図中、ピンク色で塗り分けられた範囲はATEsシステムに適していると考えられる地域であり、青色のドットで塗られているのは通常のオープンループが適していると考えられる地域である。通常オープンループが適していると考えられる地域では、水平方向の地下水流速が速く、揚水井と還元井を季節間で入れ替えないシステムの方が効率がよいと考えられる。緑色の斜線で示した地域は、上向きの地下水流向が生じている範囲であり、主に河川近傍に集中している。このような地域では、採排熱した地下水の還元が難しい可能性があり、帯水層の地下水還元能力について事前に十分な調査が必要であると考えられる。

4. おわりに

本稿では、NEDO事業において実施した、オープンループ/ATEsシステムの適地評価手法および同手法を郡山盆地に適用した際の適地マップを紹介した。今後、オープンループおよびATEsシステムの普及と共に、マップの精度向上が求められるであろう。今回、紙面の都合上、詳細な

記述が叶わなかったが、評価手法や他の地域の適地分布については、NEDO事業の成果として今後、公表していく予定である。

文 献

- 萩原 茂・坂本義昭・武部慎一・中山真一(2004) わが国における浅地中埋設処分深度に分布する透水係数に関するデータ。JAERI-Data/Code, 2004-003, 159p.
- 越谷 賢・丸井敦尚(2012) 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(第一版)。地質調査総合センター研究資料集, no.564, 産総研地質調査総合センター。
- 柴崎直明・佐藤真一(2011) 阿武隈川流域の地下水盆とくに福島地下水盆の実態と今後の地下水盆管理について。阿武隈川流域の環境学, 201-228, 福島民報社。

YOSHIOKA Mayumi (2019) Research results of NEDO project part 2 - Evaluation of suitable area for open-loop groundwater heat pump system -.

(受付：2019年3月6日)

地下水熱を空調に利用するための 樹脂製細管熱交換器内蔵タンク式地中熱交換器の 有効性の検証結果について

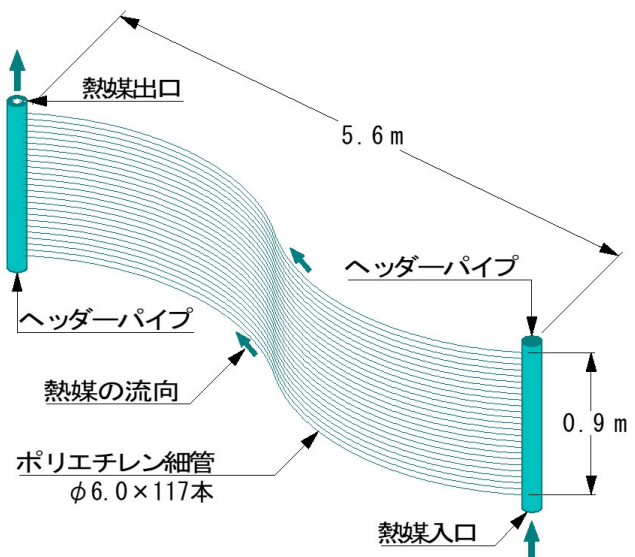
舘野 正之¹⁾・高杉 真司¹⁾・内田 洋平²⁾

1. はじめに

地盤温度の恒常性を利用する地中熱ヒートポンプ(以下、地中熱 HP)は、従来の空気を熱源とするエアコンに比べて省エネ性が高いため、地球温暖化抑制に資するシステムとして普及が進みつつあります。地盤から熱を得る方法の違いで、大きくは“クローズドループ”と“オープンループ”システムに分けられます。前者は地盤に熱交換器を埋め込む方式で、設置地盤条件の制約が小さいものの、井戸の施工費用が高いために、その普及速度は鈍い状況にあります。これに対して、後者は、汲み上げた地下水を熱源として利用する方式で、透水性の良い帯水層がある地域では設置コストが安価であるため、導入しやすいシステムです。ただし、地下水が酸性や塩素イオンが高いなどの化学性状の場合は熱交換器の腐食が生じ、溶存成分が多い場合は鉄やカルシウムスケールが発生し、熱交換器のメンテナンス費用が増大します。また、揚水ポンプの電力がクローズドループよりも大きくなるなどの課題もあります。そこで、産総研「被災地企業のシーズ支援プログラム」の一環として、これらの課題に対応するために高効率で設置費を安くできる地中熱 HP システムとして樹脂製細管熱交換器の一つである G-カーペットを内蔵したタンク式熱交換器を開発し、その性能向上を検討してきました。本稿ではその結果の概要を報告します。なお、本事業では、福島県川内村の協力を得て、いわなの郷宿泊用コテージに実験システムを設置し、熱交換器性能の確認や制御方法の最適化などを実施しました。なお、検討の過程で、村内に広く分布する花崗岩内には十分な地下水が流れている亀裂があり、クローズド、オープンいずれの方式にも適した地域であることがわかりました。

2. G-カーペットを内蔵したタンク式地中熱交換器を使用した HP システム

G-カーペットは外径 6 mm の高密度ポリエチレン管 117 本をヘッダー管に融着接続した柔軟性のあるシート状の樹脂製細管熱交換器です(第 1 図)。この G-カーペットをタンク内に渦巻状に丸めてタンク式熱交換器として利用します。約 10℃の地下水をタンク内下部に注水し、オーバーフローする間に、G-カーペット内を循環する不凍液と熱交換します。地下水の供給量は循環させている不凍液の HP 入口温度を指標としてバルブで自動制御しています。また、熱交換を促進するために送風機を使ってタンク底付近の水に加圧空気を吹き込むエアージェクションを行い、水を攪拌しています(第 2 図)。このタンク式熱交換器は地中に埋設し、冬季の停止時の凍結防止をしています(写真 1)。

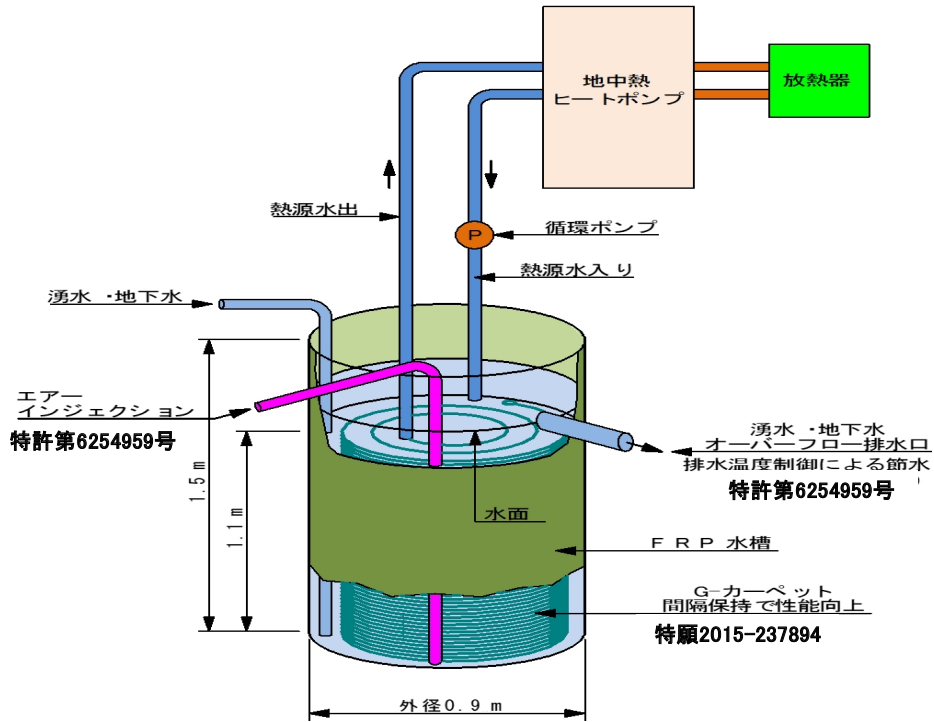


第 1 図 樹脂製細管熱交換器 (G-カーペット)

1) ジオシステム株式会社

2) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：地下水熱、タンク式地中熱交換器、制御最適化、ヒートポンプ



第2図 G-カーペットを内蔵したタンク式地中熱交換器

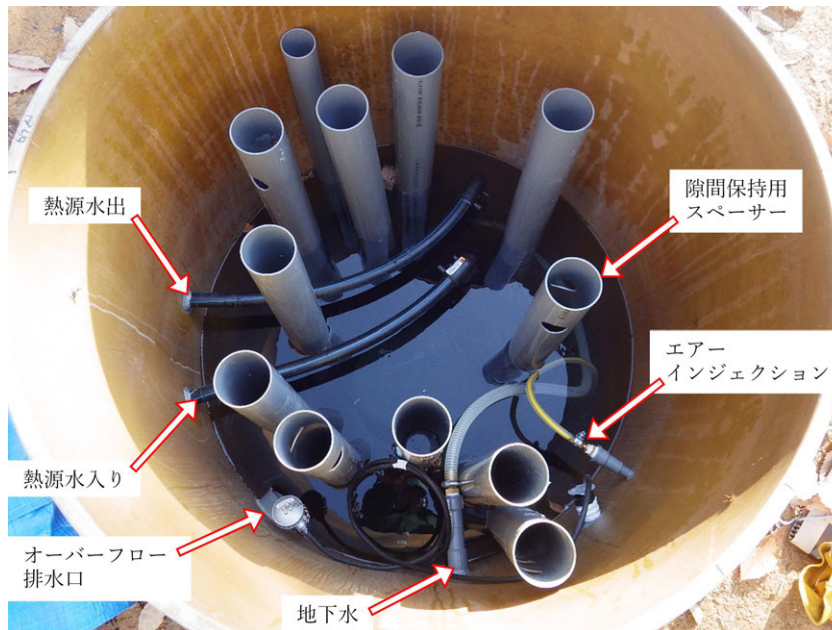


写真1 地中に埋設したタンク式熱交換器 (水面はGL-0.7 m)

地中熱 HP には、コロナ地中熱ハイブリッド冷温水システムの地中熱ユニット (加温能力 6 kW, 冷却 3 kW) を使用し、室内には、壁掛けファンコイルユニット (FCU) と床置き FCU をそれぞれ 1 台取り付けています (写真 2)。また、平成 29 年度には、空気熱源 HP も使用し、ハイブリッドシステムとしての検証も行いました。

3. タンク式熱交換器とプレート式熱交換器を用いた比較

一般に、流体間の熱交換には、プレート式熱交換器が利用されています。プレート式は、積層させた金属板を挟んで隣り合った隙間に一次側と二次側流体を交互に流動させて熱交換を行います。プレート式とタンク式の特徴を第 1 表に示します。地下水熱を利用する場合の熱交換特性など

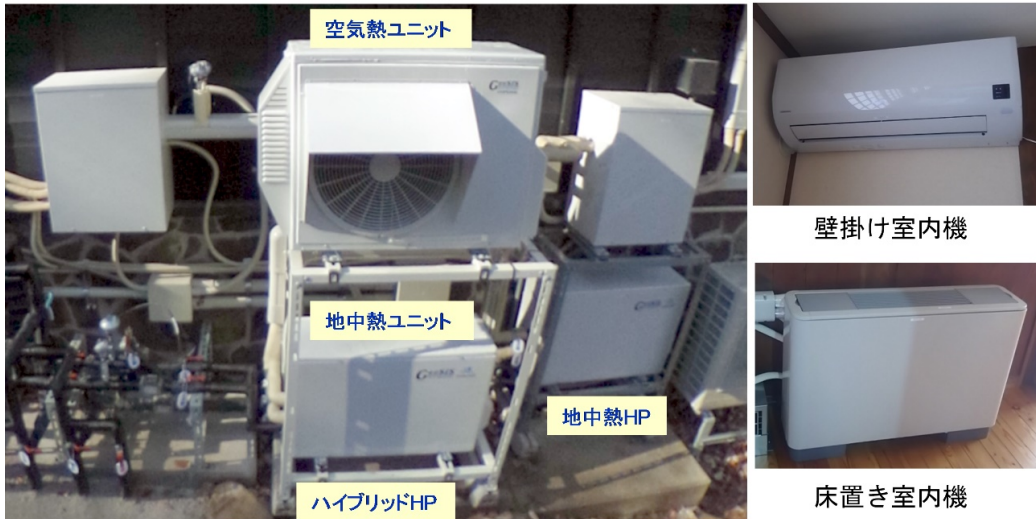


写真2 使用した HP と室内機

第1表 タンク式熱交換器とプレート式熱交換器の特徴比較

種類	材質	一般的な特徴
プレート式熱交換器	SUS, チタン等	<ul style="list-style-type: none"> ・薄肉金属板を積層し、一次側と二次側流体を交互に流動させて熱交換する。 ・コンパクトで熱交換性能が高い。 ・100°C以上の耐熱性がある。 ・ゴミ、スケールなどにより目詰まりし易いので、前段にフィルターが必須。 ・分解清掃、交換用ガスケットなどが高価。
タンク式熱交換器 (G-カーペット内蔵)	ポリエチレン樹脂	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的大きい。 ・耐熱 60°C。 ・ゴミ、スケールなどへの耐性がある。 ・清掃は比較的簡単。

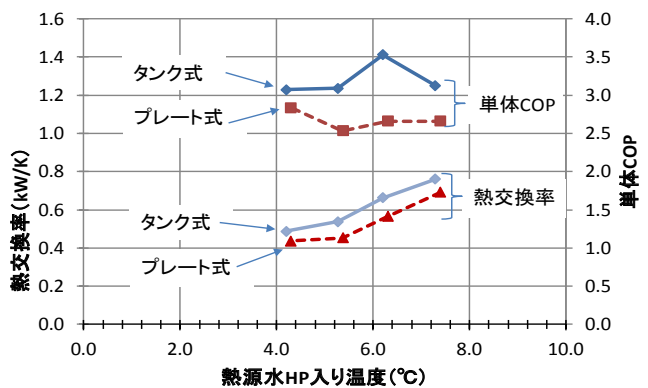
を比較するために、暖房期間中に HP に入る熱源水温度の設定値を変化させるとともに、熱源水温度を一定にするための地下水供給の制御方法などを変化させて、その応答を測定しました。なお、地下水供給制御方法としては、熱交換により変化する熱源水温度と設定値の差および変化率を指標としてバルブ開度を変化させて地下水供給流量を連続的に増減させる PID 制御を基本として、タンク式のみ、地下水供給をバルブの開閉により制御する ON/OFF 制御の二種類について比較しました。比較実験の結果は以下の通りです。

①タンク式とプレート式の性能比較

熱交換率はタンク式が約 15% 高いとともに、HP の単体 COP (Coefficient Of Performance) が約 20% 高い結果となりました(第3図)。なお、COP とは、冷暖房に必要な熱量とそれを HP で作り出すために使用する電力の比のことで、成績係数とも呼ばれます。一般に COP は 2.5 以上で省エネになります。

②地下水制御方法 (PID または ON/OFF) の検討

プレート式はシステムの保有水量が少なく熱容量が小さ

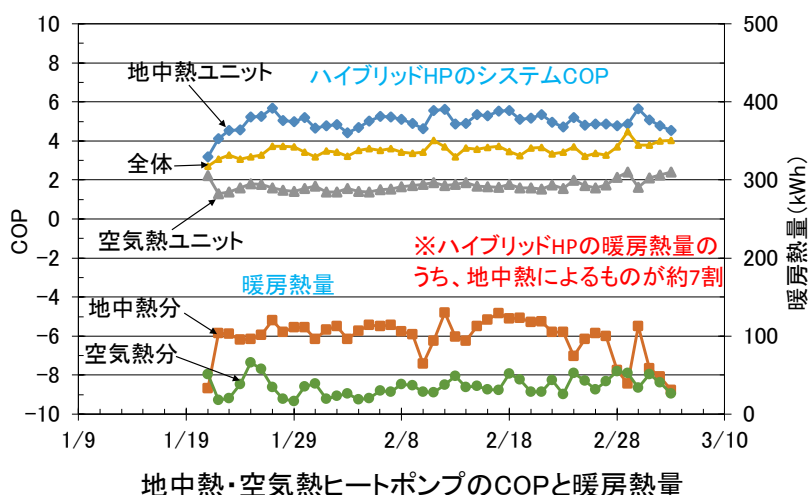


第3図 タンク式とプレート式の熱交換特性比較結果

いために安定した制御ができず、ON/OFF 制御は採用できませんでした。一方、タンク式では保有水量が多く、温度変化が緩やかなため ON/OFF 制御でも安定した制御ができることが確認されました。

③凍結耐用性の確認

プレート式では電気ヒーターにより凍結防止が必要であるが、タンク式はタンク内水面が地下 70 cm になるよう



第4図 ハイブリッド HP の COP の実測データ

埋設することによりヒーターを使わずに凍結防止ができました。

④タンク式のエアレーションによる攪拌の効果

エアレーションの実施により、熱交換能力が40%程度向上することを確認しました。

今回の比較の結果では、一般に高性能と言われるプレート式よりもタンク式の方が高い熱交換率となりました。また、使用したプレート式の仕様での熱交換率は2 kW/Kでしたが、実験で得られた値は0.7 kW/K以下で仕様を下回る値でした。また、設定温度が低いほど熱交換率も低くなる傾向にありました。この原因としては、プレート式に流れる地下水流量が仕様の20 L/minよりも少ないことが考えられます。設定温度に応じて地下水流量を増減させる制御をしていますが、実験期間中の暖房負荷は定格よりも低かったために、プレート式の地下水流量は10 L/min以下がほとんどでした。これにより熱交換率が低くなったと考えられます。地下水を無駄にしないために地下水流量を制御したことで、熱交換器の性能を低下させることになったと考えられます。一方、タンク式については、ON/OFF制御では、暖房負荷が大きいときには地下水供給が最大流量で行われやすく、さらに低負荷時にも空気での水の攪拌により熱交換率を比較的高くできたと考えられます。以上の通り、両熱交換器の使用について、それぞれの特性に応じた流量設定、制御方法を採用することが重要ということを明らかにしました。

4. タンク式とボアホール式ハイブリッド HP の比較

地下水を利用した地中熱 HP システムは、クローズドループシステムと比較して設置コストを低く抑えられるも

の、地域によっては揚水制限以上の水量が必要になってしまうことがあります。そこで、負荷が大きくなる場合には空気熱源 HP を使用するハイブリッドシステム(地中熱6 kW + 空気熱5 kW = 11 kW)について実験を行い、最適な利用方法について検討しました。この結果、第4図に示すように、ハイブリッドシステムは、雪が降るような低温環境下では、空気熱源ユニットのCOPが低くなるものの、地中熱ユニットの高いCOPと組み合わせれば、十分省エネとなることを確認できました。最終的に、タンク式熱交換器を使用した地中熱と空気熱源 HP の組み合わせが、最も効率的なシステムになると考えられました。

5. おわりに

本事業では、G-カーペット内蔵タンク式熱交換器の特性を確認し、それを利用した地下水利用 HP システムの特性を評価して、ハイブリッド HP での利用により高度化が図れることを確認できました。特に、一般的には高効率であるプレート式でも利用条件では、仕様通りの性能を発揮できないことがありタンク式の方が高い性能を示すことを確認できました。なお、地下水熱交換器としての課題である耐食性やスケールや汚れに対するメンテナンスについては、実験地の地下水がきれいであったために検討できませんでしたので、他のプロジェクトにおいて検討を続けていますので、今後、まとめ次第報告したいと考えています。

TATENO Masayuki, TAKASUGI Shinji and UCHIDA Yohei (2019) Verification result of effectiveness of tank type heat exchanger with plastic capillary tube heat exchanger for using groundwater heat for air conditioning.

(受付：2019年3月6日)

地中熱を利用した電子機器類の排気冷却システム

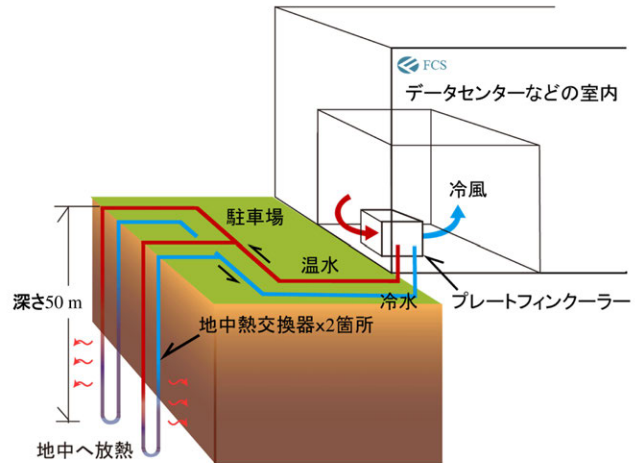
田中 雅人¹⁾・内田 洋平²⁾・駒澤 昭彦¹⁾・進堂 晃央¹⁾

1. はじめに

データセンターの空調システムで消費される電力は、データセンター全体の消費電力の約3割を占めるとも言われており、省電力化が求められている。筆者らは地中熱を冷熱源として利用するプレートフィンクーラー（以下、PFC）により、データセンター等に設置された電子機器の排気熱を冷却するシステムを開発した（写真1）。既存技術は空冷ヒートポンプなどにより室内の冷房を行っているが、本システムはヒートポンプを使用せずPFCと循環ポンプの動力のみで冷房できるため、既存技術に比べて大幅な省エネが期待できる。

また、災害時にも非常用電源に対する負荷が小さく、地中熱交換器の材料として使用されるポリエチレン製チューブは地震により変位が生じても損傷し難いため、冷却能力を維持できる。

本システムの冷却能力や省エネ効果を確認するため、2016年度から2年間にわたって福島再生可能エネルギー研究所「被災地企業のシーズ支援プログラム」による実証試験を実施した。本稿では、2016年および2017年に設置した試験設備の概要を紹介し、2017年に行った試験運転の結果を報告する（田中ほか、2017；2018）。



第1図 システム模式図

第1表 実証試験システム仕様

地中熱交換器	： 深度 50 m × 2 ヶ所(従来型)
	(30A ダブル U チューブ)
	深度 50 m × 2 ヶ所(移流型)
	(30A ダブル U チューブ)
P F C	： 冷却能力 8.2 kW, 消費電力 50 W
循環ポンプ	： 30 L/min, 150 W

2. 試験設備

実証試験設備の模式図を第1図に、機器の仕様を第1表に示す。地中熱交換器で冷却した冷却水をPFCへ循環し、室内の冷房を行うシステムである。室内(約18.5 m²)に設置された既設エアコン(暖房能力4.5 kW)の暖房運転により電子機器類の排気熱を模擬し、試験設備による冷房を行った。試験設備は室温が23℃以上で運転、21℃で停止として自動運転を行った。

地中熱交換器は、従来型のダブルUチューブ方式に加えて、地下水の移流効果を活用した「地下水移流効果カップリング型熱交換器」(以下、移流型)を設置し、従来型との比較を行った。移流型熱交換器は、第2図に示すよ

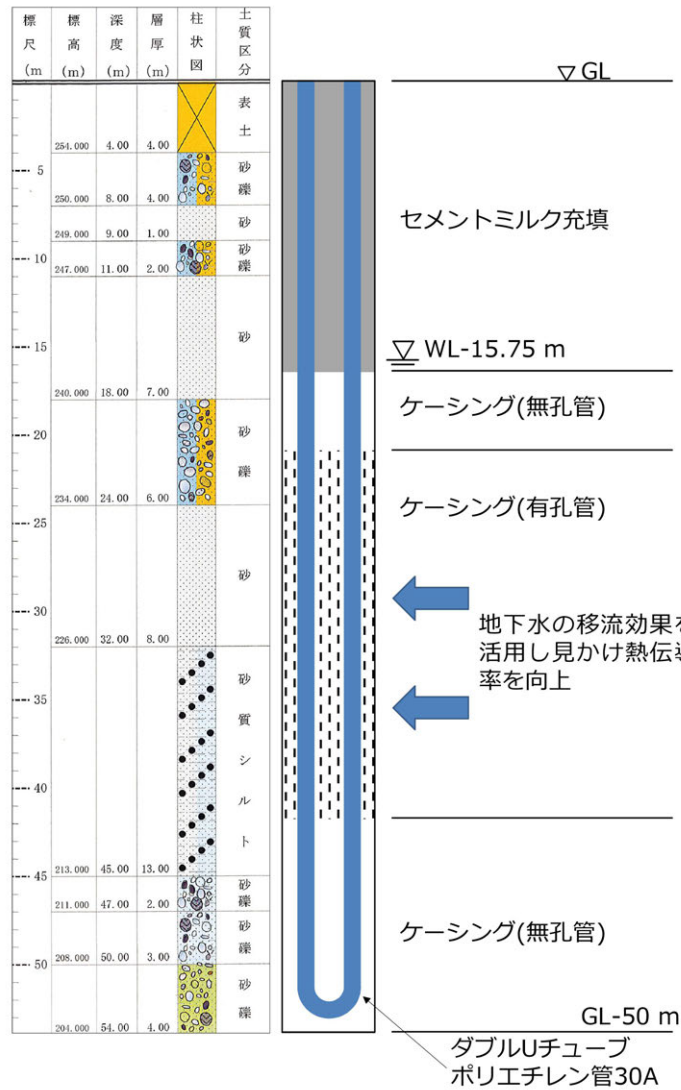


写真1 プレートフィンクーラー

1) ミサワ環境技術株式会社 (福島県会津若松市新横町1-37)

2) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：福島再生可能エネルギー研究所、被災地企業のシーズ支援プログラム、研究成果報告会、地中熱



第2図 移流型地中熱交換器

うに地下水位より下部にスリット加工したケーシングが設置され、ケーシングと地中熱交換器の間の空隙は地下水で充填される。地下水の移流効果により高効率な熱交換が可能となる。移流型熱交換器は、過去の「被災地企業のシーズ支援プログラム」(2013年度成果「地下水移流効果を有効利用した高効率地中熱交換器の評価」、2015年度成果「地下水移流効果を有効活用した杭熱交換器【深井戸ボアホール】の構築方法の開発」)により評価を受けたシステムである。過去のボーリング結果より実証試験の現地は地下水位が高いことが確認されており、現地では移流型熱交換器が有効と考えられた。

3. 冷却能力および省エネ効果

試験設備を約2週間にわたり連続運転した際の水温、

空気温度、地中温度、冷却熱量およびシステム COP の変化を第3図に示す。この運転は移流型熱交換器を熱源として実施した。なお、COPは次式で計算されるシステムの成績係数である。

$$COP = \frac{q}{W}$$

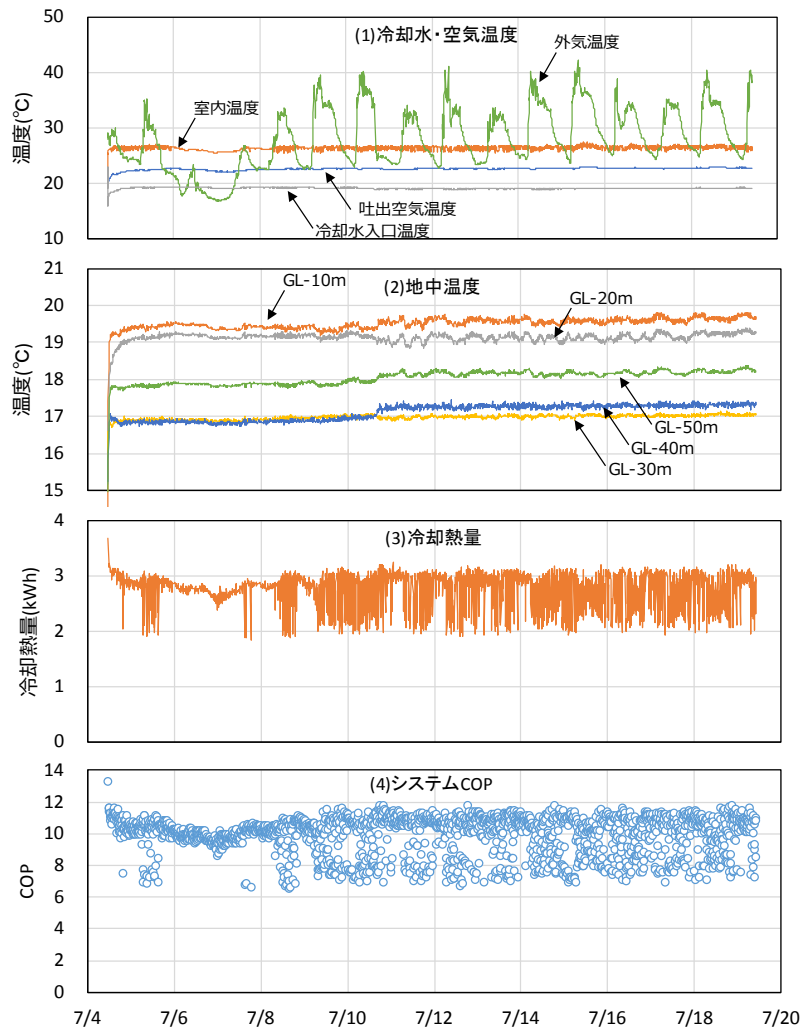
ここで COP : システム成績係数 (-)

q : 冷却熱量 (kWh)

W : 消費電力量 (kWh)

地中熱交換器から装置へ供給される冷却水温度は19℃前後で安定している。その結果、装置から室内へ供給される冷風の吹出温度は22～23℃、室内温度は26～27℃程度に維持されており、十分な冷房効果が認められる。

COPは一般的なエアコンでは2.5程度との報告もあるが、本システムでは平均で10.0と効率の良いシステムで



第3図 連続運転時の測定結果

あることが確認された。負荷が大きい条件では COP はほぼ 12 に達する時間帯もあり、負荷の増大に伴って COP はさらに向上する余地があると考えられる。システム運転に伴う CO_2 排出量や運転費を通常の空冷ヒートポンプ ($COP=2.5$) と比較した結果を第 4 図に示す。本システムによる削減率は CO_2 排出量が約 75%，運転費が約 73% となり、大幅な省エネ効果が確認された。

4. 移流型地中熱交換器の効果

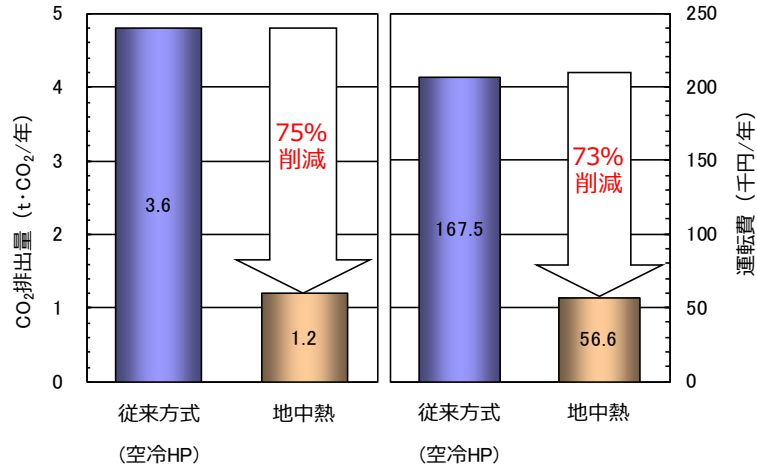
従来型と移流型の地中熱交換器を熱源として、個別に 2 週間程度の連続運転を実施した際の PFC 冷却水入口温度、吹出温度および室内温度を第 5 図に示す。室内温度は双方とも 26～27℃程度に維持されており、十分な冷房効果が認められる。PFC 冷却水入口温度と吹出温度は、従来型では運転開始から 10 日間程度にわたり温度が上昇し、それ以降は温度が安定している。移流型では連続運転を实

施しても温度の上昇が認められず、冷房能力に十分な余力があることがうかがえる。前述の通り、冷房負荷の増大により COP はさらに向上すると考えられるため、冷房負荷、地中熱交換器能力および機器仕様を最適化することにより、さらに省エネ化を図ることが可能となる。

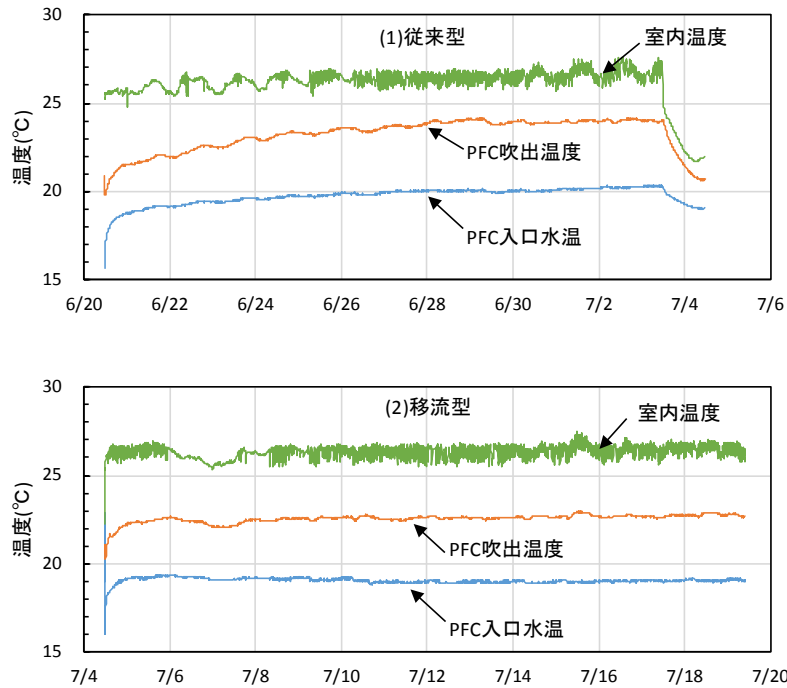
5. おわりに

地中熱を冷熱源として利用するプレートフィンクーラーにより、データセンター等に設置された電子機器の排気熱を冷却するシステムの実証試験を実施した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 室内温度は 26～27℃程度に維持されており、十分な冷房効果が認められた。
- 本システムにより CO_2 排出量が約 75%，運転費が約 73%削減され、大幅な省エネ効果が確認された。
- 地下水の移流効果を活用した「地下水移流効果カップ



第4図 CO₂ 排出量および運転費の削減効果



第5図 従来型と移流型の比較

リング型熱交換器」は、従来型の地中熱交換器に比べて温度変化が小さく、大きな冷房能力を持つことが確認された。

今後は、設計の最適化により省エネ性向上の可能性が認められるため、システム設計方法の検討を進める必要がある。

文献

田中雅人・内田洋平・駒澤昭彦・進堂晃央 (2017) 地中熱を利用した電子機器類の排気冷却システム, 日本地熱

学会平成 29 年学術講演会講演要旨集, P13.

田中雅人・内田洋平・駒澤昭彦・進堂晃央 (2018) 地中熱を利用した電子機器類の排気冷却システムの高度化, 日本地熱学会平成 30 年学術講演会講演要旨集, P31, 151.

TANAKA Masato, UCHIDA Youhei, KOMAZAWA Akihiko and SHINDOU Akio (2019) Cooling system of electronic device exhaust using geothermal energy.

(受付：2019 年 3 月 6 日)

シーズ支援プログラムの取り組み 「準浅層における低コスト熱応答試験」について

藤沼 伸幸¹⁾

1. はじめに

再生可能エネルギー利用分野のひとつとして、エネルギー交換の効率が良く節電や省エネによるCO₂排出量抑制効果とヒートアイランド現象の緩和効果が期待される地中熱利用の導入促進が期待されています。

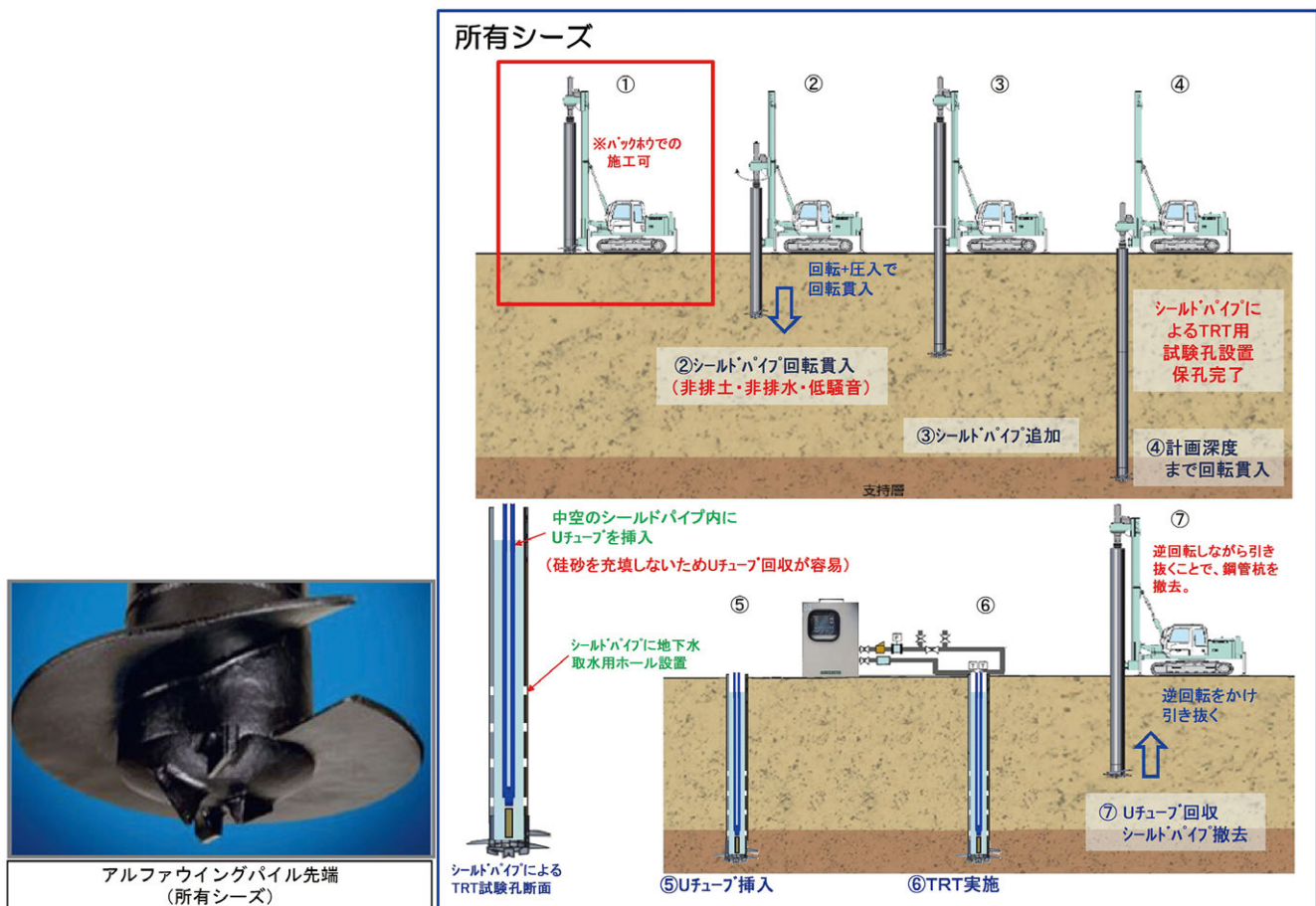
地中熱利用設備の設計・検討のためには見かけの熱伝導率を求める必要がありますが、そのための熱応答試験(Thermal Response Test: TRT)では掘削機械によるポアホール型地中熱交換器の設置が必要であり、このコストが初期コストの増加の要因のひとつとなっています。

私たちは既存工種の一つである回転埋設鋼管杭を技術シーズとし、平成28年度・29年度の産総研シーズ支援事業の採択を受けました。

今回は私たちが挑戦した非排水・非排土で熱応答試験に必要な採熱管を埋設し、低コストで地下水流動の影響も併せて把握できる「準浅層における低コスト熱応答試験」を実施する技術開発について紹介いたします。

2. 非排水非排土工法による熱応答試験

低コスト熱応答試験に用いる非排水非排土工法は、弊社



第1図 所有シーズを利用した熱応答試験の実施

1) 新協地水株式会社 (〒963-0204 福島県郡山市土瓜一丁目13-6)

キーワード：産総研シーズ支援プログラム、地中熱利用技術、熱応答試験(TRT)、熱の移流効果

の所有シーズである建築基礎鋼管杭「アルファウイングパイル工法」を応用しています。「アルファウイングパイル工法」は翼が付いた形状の杭先端部を鋳鉄で作成し、地盤に杭体を回転貫入させる鋼管杭の工法です。非排水非排土工法による熱応答試験では先端部を接続したシールドパイプ(鋼管)を地中に回転貫入させ、その中に採熱管(Uチューブ)を挿入して熱応答試験を実施します(第1図)。本工法の利点は、①回転貫入のため排水・排泥がほとんど発生せず低騒音での施工が可能。②シールドパイプ内に珪砂を充填しないためUチューブの引抜きが可能。③試験終了後はシールドパイプを抜管することができるため現況復旧が容易かつ地中残置物がないことです。

本工法が対象とする深度は概ね GL-30.0 m ~ -40.0 m の深度で、準浅層と呼称しています。地中熱利用は GL-10.0 m より深部では温度の季節変化が無くその場所の年平均気温とほぼ等しくなることを利用し、効率良く熱エネルギーを利用する技術です。この地中熱利用の対象となる地盤の構成は、花崗岩などの硬質岩盤や凝灰岩や砂岩などの半固結～固結状の岩盤の上部に泥・砂・礫等の未固結堆積物が分布するのが一般的です。準浅層の未固結堆積部のうち透水性が高く、地下水の流速・流動が大きい地層では、熱が地下水と共に移動する熱の移流効果が期待できます。このため高い見かけの熱伝導率を得ることができ、効率良く地

中熱を利用できる可能性があります(第2図)。

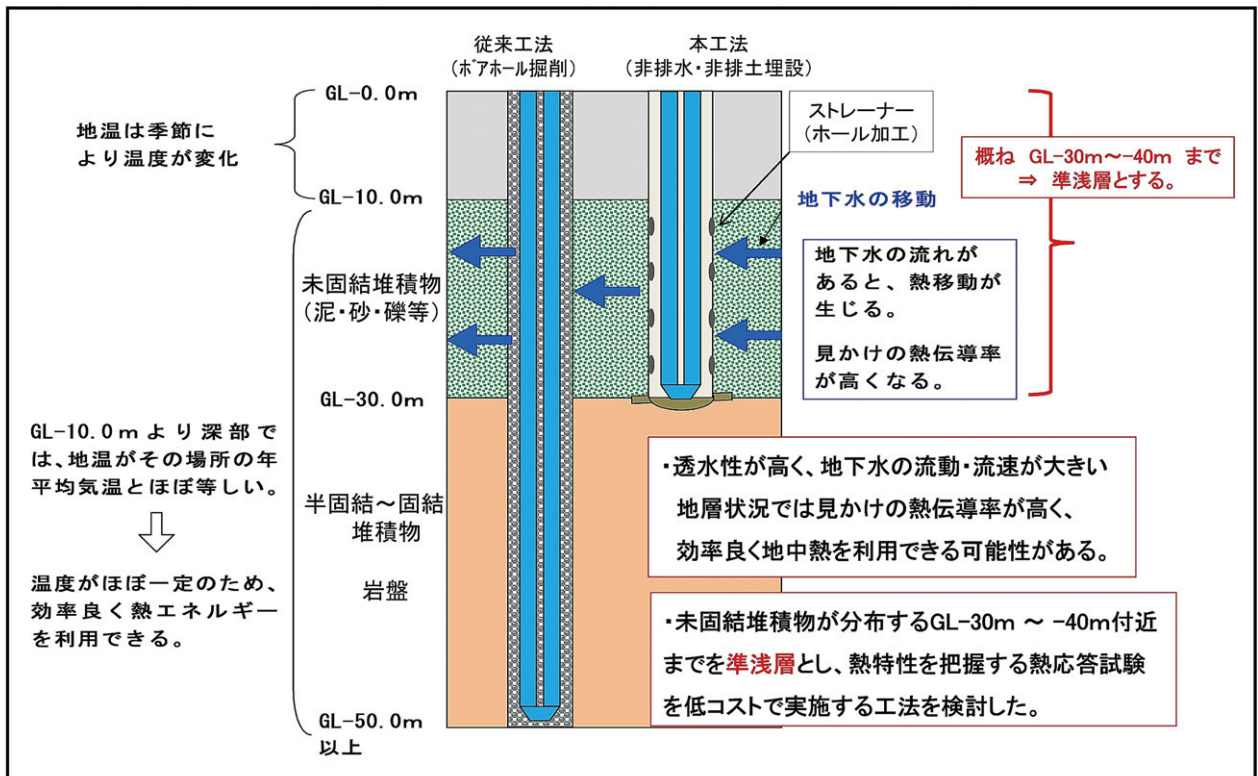
私達は地下水流動による熱の移流効果を期待できる準浅層を対象とし、非排水非排土工法による低コスト熱応答試験の実証試験と、地下水流動をシールドパイプ内に取り込む有孔管のホール加工部における土砂の流入防止機構の開発に取り組みました。

3. シーズ支援プログラムにおける成果について

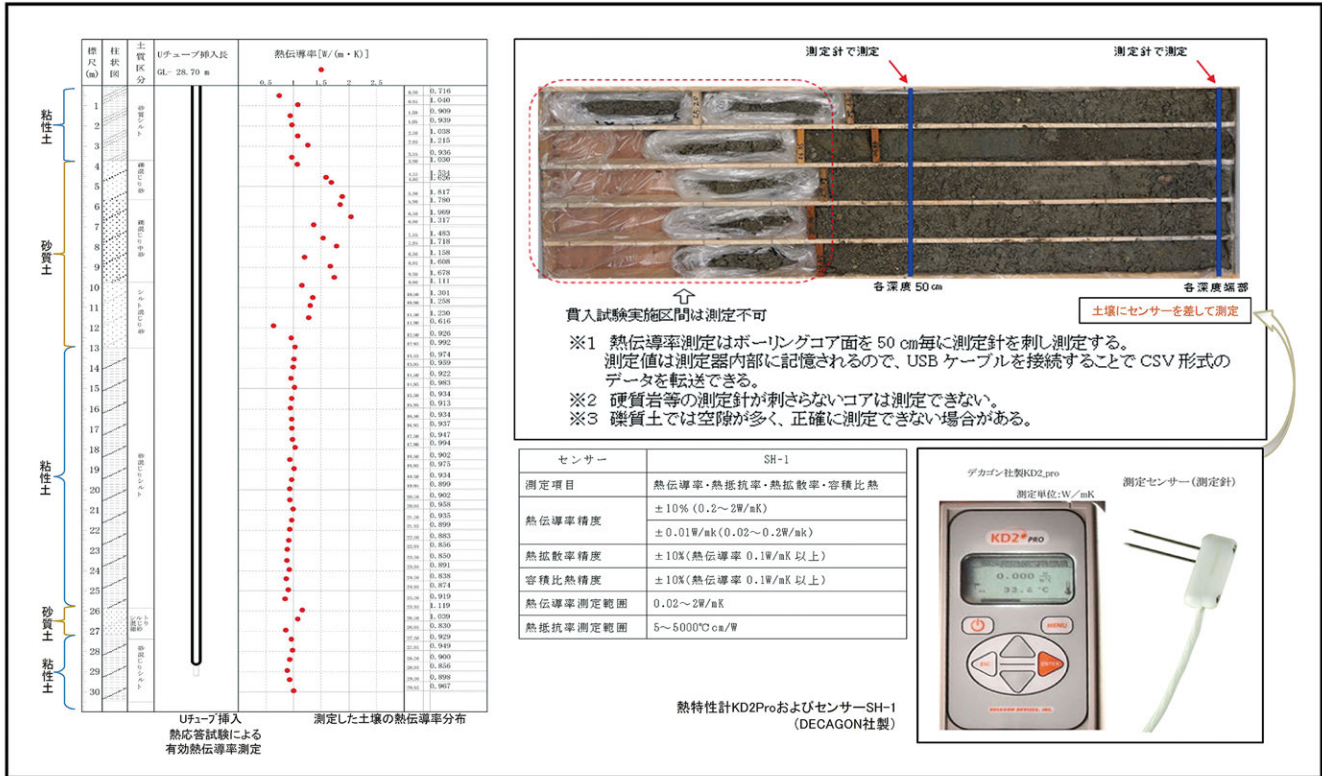
低コスト熱応答試験の評価にあたり、はじめに産総研から技術シーズ支援により各試験地で採取したボーリングコア試料(GL-30.0 m)の有効熱伝導率を50 cm毎に測定し、土質区分ごとの加重平均値から地盤構成による有効熱伝導率を決定しました(第3図)。

次に、非排水非排土工法によるUチューブ設置後に熱応答試験を実施し、その結果を地盤構成による有効熱伝導率と比較しました。結果として非排水非排土工法を用いて測定した熱応答試験の見かけの熱伝導率が地盤構成による有効熱伝導率に比べ20%～50%高い数値を示すことを確認しました(第4図)。これは地下水流動による熱の移流効果が反映された結果であると考えられます。

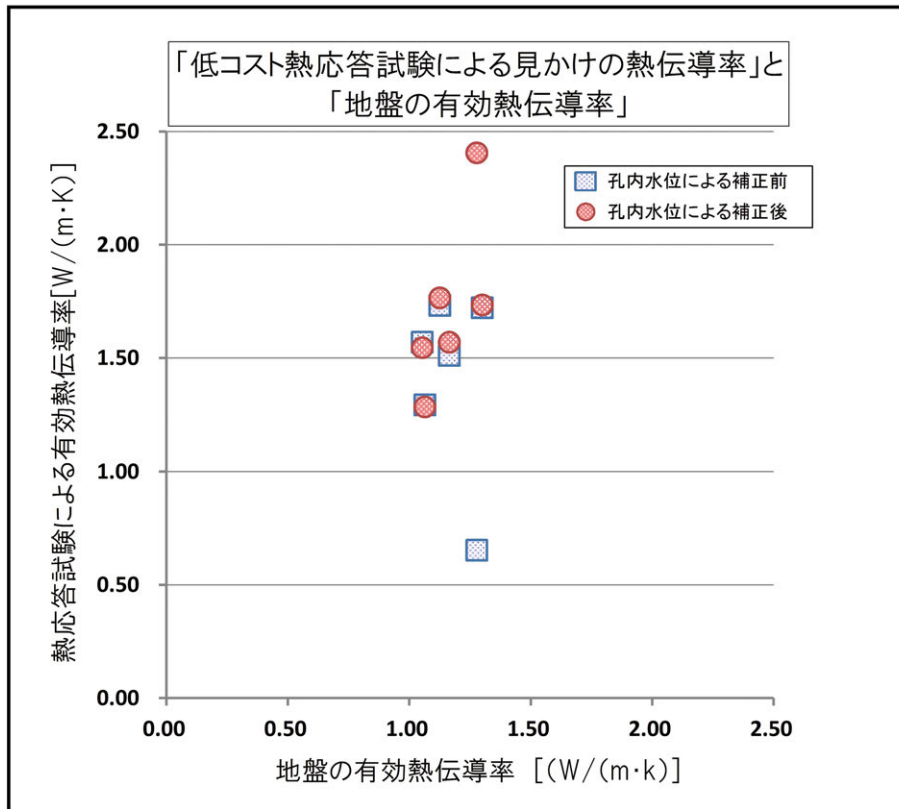
また、地下水流動を孔内に取り込み熱の移流効果を発揮させるためにシールドパイプの一部をホール加工の有孔管



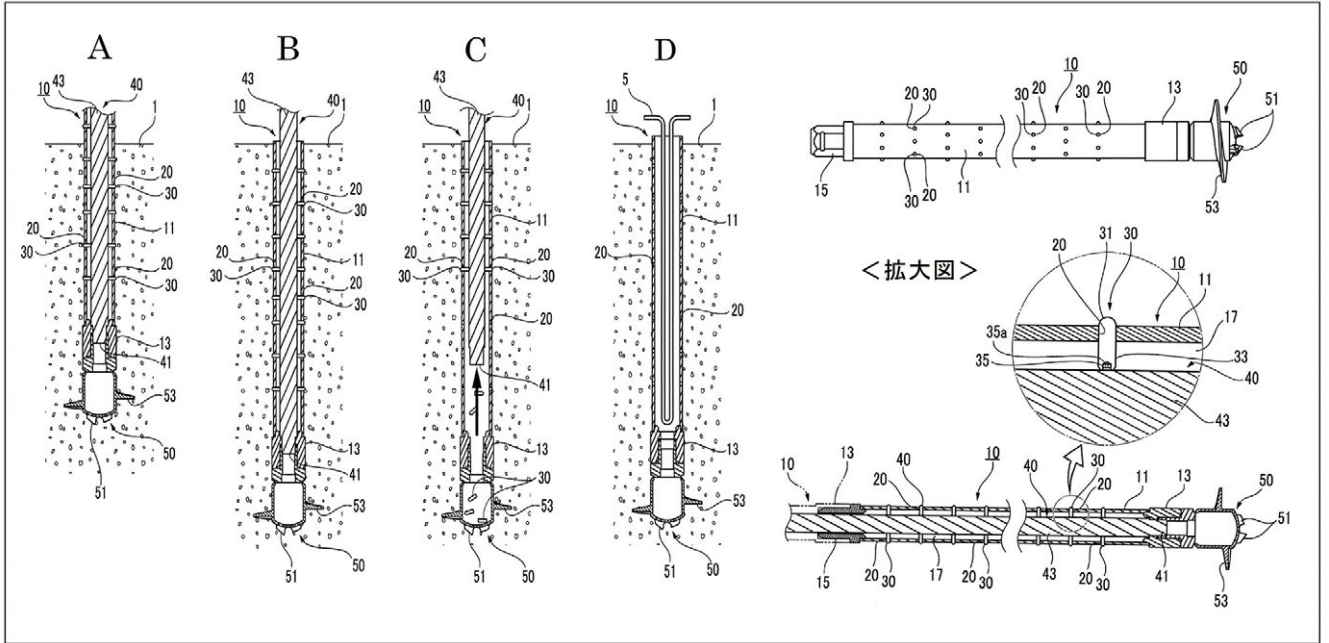
第2図 準浅層の考え方について



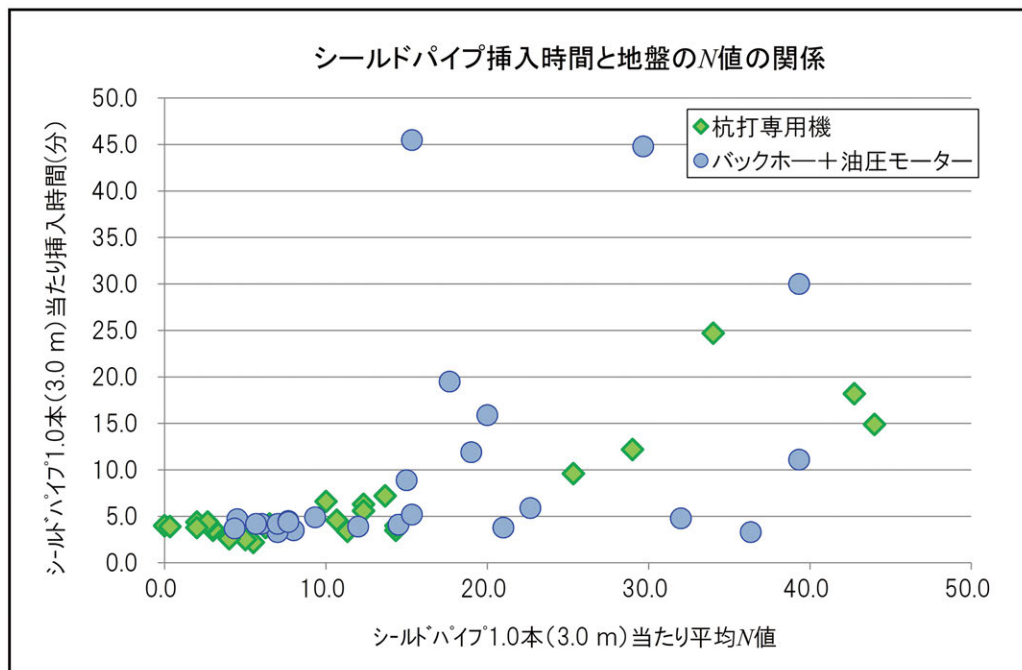
第3図 地盤の有効熱伝導率測定



第4図 地盤の有効熱伝導率と熱応答試験による見かけの熱伝導率



第5図 土砂流入防止機構を備えた地中埋設用パイプ（特許第 6482628 号）



第6図 シールドパイプ挿入時間と地盤のN値の関係

にして同様の試験を実施しましたが、回転埋設時に土砂による目詰まりが生じて孔内に地下水が流入しない状態となりました。このため、埋設時の目詰まりや土砂流入を防止する機構を開発して再度実証試験を行いました。

土砂流入防止機構はホール部に設置したピンを予め挿入したインナーロッドに磁力で吸着させておき（第5図のA、Bおよび拡大図）、回転埋設貫入後にインナーロッドを

引き抜くことでピンを落とし込む機構として開発しました（第5図のC）。

この機構を開発したことで、回転埋設後のシールドパイプ孔内に地下水を呼び込み、地下水の流動を取り込むことが可能となりました。

なお、今回の試験ではシールドパイプの孔内水位が有孔管を設置した深度の地層が持つ地下水頭の深度で安定して

しまい、Uチューブ周辺の空間部の増加により熱応答試験による試験区間全体の平均見かけの熱伝導率が低下する場合があります。この場合、孔内水位より下部のUチューブの長さを有効長として有効長に対する見かけの熱伝導率を求めると、地表面付近まで孔内に水を入れた無孔管の熱応答試験結果と比べ高い値を示しました。この結果は孔内に取り込んだ地下水流動による熱の移流効果を反映していると考えています。

非排水非排土工法では N 値30以下の大部分の地層を、シールドパイプ1本3.0 mを15分未満で挿入および引抜が可能であることを確認しました(第6図)。準浅層を対象とした場合では熱応答試験に必要な30 mのUチューブを0.5日～1.0日で設置可能であり、ボーリング掘削を必要とするボアホール型熱交換器の設置と比較し、高い施工性と汚泥処理を不要とする経済性から熱応答試験で使用する熱交換器の設置コストを1/2程度に低減することが可能であると考えています。

4. まとめ

今回のシーズ支援プログラムにより、GL-30.0 m～-40.0 mの深度を対象とした「準浅層における低コスト熱

応答試験」を実施する技術を開発しました。この技術では回転埋設鋼管杭の「アルファウイングパイル工法」を技術シーズとして、高い施工性と汚泥処理を不要とする経済性から従来の熱応答試験よりも熱交換器の設置コストを低減することを可能としています。

今後、非排水非排土埋設工法による準浅層における低コスト熱応答試験を地下水流動による熱の移流効果を考慮した地下熱物性データを従来よりも早く、安く計測可能な工法として確立することを目指します。さらに、福島県内でも整備が進むことが期待される地中熱ポテンシャルマップに供するデータの蓄積と精度の向上に寄与できる技術として完成させたいと考えています。

また、現在は非排水非排土埋設工法自体を発展させ、熱交換器埋設完了後、シールドパイプ本体のみを引き抜くことで、水井戸やボアホール型と同等の地中熱交換器の設置を可能とする、アルファウイングパイル先端部の切り離し機構を備えたシールドパイプの開発にも取り組んでおります。

FUJINUMA Nobuyuki (2019) Low cost Thermal Response Test in semi-shallow layer.

(受付：2019年3月6日)

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 宮地良典
副委員長 名和一成
委員 井川怜欧
児玉信介
竹田幹郎
落唯史
小松原純子
伏島祐一郎
森尻理恵

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
地質情報基盤センター 出版室
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ 地質ニュース 第8巻 第6号
令和元年6月15日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

印刷所

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor : Yoshinori Miyachi
Deputy Chief Editor : Kazunari Nawa
Editors : Reo Ikawa
Shinsuke Kodama
Mikio Takeda
Tadafumi Ochi
Junko Komatsubara
Yuichiro Fusejima
Rie Morijiri

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geoinformation Service Center Publication Office
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ Chishitsu News Vol. 8 No. 6
June 15, 2019

Geological Survey of Japan, AIST

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305-8567, Japan



いぶすき ちりんがしま
指宿市の知林ヶ島は鹿児島湾の湾口に浮かぶ湾内最大の島である。この島は約 10.5 万年前に形成された阿多火砕流堆積物からなり、その上面をシラスが載っている。春から秋にかけての干潮時には、島と九州本土を結ぶ陸繋砂州が海面上に出現する。この砂州は台風襲来時の暴浪によりしばしば流出するが、その後沿岸漂砂によって再構築されることが知られている。この砂州が“絆”を想起させることから、地元では縁結びの島としても知られている。

(写真・文：産総研地質調査総合センター地質情報研究部門 七山 太)

Chiringashima Island and tombolo taken from an airplane, Ibusuki, southern Kyushu. Photo and Caption by Futoshi NANAYAMA