

浅層地下水を利用するための 熱交換ユニットの開発と導入適地の検討*

吉田 広人**・富樫 聡***・高橋 努**・舘野正之****・
小間憲彦****・高杉真司****・後藤眞宏****

Development of a heat exchange unit and a potential map for shallow groundwater thermal energy

Hirohito YOSHIDA**, Akira TOMIGASHI***, Tsutomu TAKAHASHI**,
Masayuki TATENO****, Norihiko KOMA****,
Shinji TAKASUGI**** and Masahiro GOTO****

Abstract

A geothermal exchange unit has been developed to reduce the capital costs of ground source heat pump systems. Its source of heat energy is shallow groundwater. The geothermal exchange unit comprises flexible containers, sheets of heat exchanger and gravel of high permeability. The sheets of heat exchanger run helically through flexible containers in the unit with gravel. Demonstration experiments in the Kurobe alluvial fan proved that the unit can be installed up to GL-3 m by excavating with heavy equipment. The result of demonstration experiments showed that the average and the standard deviation of cooling outputs are 3.1 and 0.8 kW, respectively. Furthermore, this study selected a candidate area for unit installation based on the depth limit of excavation with heavy equipment and the water table. In result, this study proved that the unit can be installed in the fan toe with water table and high Darcy velocity.

Key Words: geothermal energy, shallow groundwater, heat exchanger, candidate area, demonstration experiment

* 日本地下水学会2015年春季講演会（平成27年5月23日）、2016年秋季講演会（平成28年10月20日）にて一部発表
** 八千代エンジニアリング株式会社
Yachiyo Engineering Co., Ltd.
*** 国立研究開発法人産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
**** ジオシステム株式会社
Geo System Co., Ltd.
**** 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
National Agriculture and Food Research Organization

要 旨

地中熱利用システムの導入コスト削減を目指し、浅層地下水を熱源とする地中熱交換ユニットを開発した。開発した地中熱交換ユニットは、透水性のよいフレコンバッグ内にシート型熱交換器をらせん状に配置し、隙間を透水性の高い砂利で充填したシステムである。これらを用いて室内水路実験を行った結果、水路流速および熱媒流量と熱交換量に相関が認められた。また、実機を用いた実証試験にて、重機による掘削により GL-3 m までの深度に設置が可能であるとともに、冷房利用時のユニット1器当りの日平均熱交換量は3.1 kW (標準偏差0.8 kW) が期待できることが把握された。このため、開発した熱交換ユニットを効率よく設置することで、これまで熱交換器設置に要した導入コストの大幅な削減が期待できる可能性がある。さらに、実証試験にて把握した重機による掘削限界と作成した地下水等高線を用いて、当該ユニットの導入可能エリアの抽出を行った。その結果、当該ユニットは地下水面が地下浅部に位置する扇端域にて導入が可能であることが把握された。

キーワード：地中熱、浅層地下水、熱交換器、導入適地、実証試験

1. はじめに

近年、我が国では、増大するエネルギー需要への対応、化石燃料の海外依存率、生態系や生物多様性の維持、気候変動に起因する災害、そして、東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故にともなう国内のエネルギー供給体制の変化等への対応として、エネルギーの効率的利用を行う低炭素社会の構築を目指している。2016年には新しい「エネルギー基本計画」が閣議決定され、徹底した省エネルギー社会の実現、再生可能エネルギー導入の加速、既存エネルギー源の発電効率の向上、蓄電池・燃料電池技術等による分散型エネルギーシステムの普及拡大等、長期的、総合的かつ計画的に講ずるべき施策が示された。

我が国の最終エネルギー消費は、熱利用を中心とした非電力での用途が過半数を占めており、エネルギー利用効率を高めるためには、熱をより効率的に利用することが肝要である。このため、エネルギー基本計画では、地域毎の様々な熱源の賦存状況に合わせた柔軟な熱利用の取り組みが重要とされている。

再生可能エネルギーの一つである地中熱は、空調設備等の熱利用システムの熱源として活用されており、従来方式の空気熱源に比べて省エネが図れるとともに、運用時の CO₂ 排出量が少なく、低環境負荷を実現できるため、近年需要が拡大している。一方で、地中熱そのものの認知度は依然として低く、システム最適設計のための事前調査費や導入時の施工費等のコストおよび地域によって

異なる熱源の賦存量の評価が課題である。

地中熱の採熱方式には、地下水を直接利用する方法（オープンシステム）と、地中に熱交換器を埋設して水や不凍液を循環して間接的に熱利用する方法（クローズドシステム）がある（長野、2012）。日本国内における地中熱の採熱方式は、地下数10～100 m に及ぶ大深度のボアホールを設置し、井戸内に円柱状の鉛直熱交換器（以降、Uチューブと呼ぶ）を設置することで、地下水との熱交換を行うクローズドシステムのボアホール方式が多い。クローズドシステムでも、近年は導入コスト削減を目的として構造物の基礎杭に熱交換器を挿入する基礎杭方式の導入事例も増えている。ただし、基礎杭方式は大規模構造物建設時に利用される方式であり、導入する施設や構造物には相応の規模が必要とされる。また、導入コストが低い方法として、地盤を1～2 m 掘削し熱交換器を水平に埋設する水平型があるが、この手法は気温の影響を受けやすいことから井戸等で熱交換を行う鉛直型に比べて温度メリットが小さいことが指摘されている（安川ほか、2005）。一方で、長野（2012）によれば、水平型は設置面積が広いいため、気温の影響は受けやすいものの、地下浅層に豊富な地下水流れがあるならば導入コストを大幅に削減できるとされる。今後更なる地中熱利用促進のためには、システム導入コストの縮減に繋がる様々な技術開発や開発した技術やシステムに応じた適切な導入箇所の選定技術が必要となるが、地下数 m の浅層地下水を対象とした地中熱利用は例がない。

上記背景から、筆者らは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構事業（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，2018）における「地中熱・流水熱利用型クローズド型システム技術開発」（以降，NEDO 流水熱プロジェクトと呼ぶ）において，浅層地下水をはじめとする未利用の流水熱利用に着目した熱交換器の開発と導入適地評価を検討している。

本報告では，浅層地下水を対象とし，ボアホールなどの従来工法に対して20%以上の設置コスト削減を目指して開発した地中熱交換ユニットの概要と実証実験の成果を紹介するとともに，開発したユニットの普及促進を目的として作成した導入適地マップの開発経過について報告する。

2. 開発した地中熱交換ユニット

本研究では，浅い地下深度数 m 程度の地下水を対象としている。このような浅い地下水（以降，浅層地下水と呼ぶ）は，深い地下水に比べ気温の影響を受けやすいものの，大深度のボアホール方式が大型のボーリングマシンによる掘削が必要なに対し，浅層であれば重機による地盤の開削および熱交換器の設置が可能であり，短期間での施工が可能となることから施工性に優れている。NEDO 流水熱プロジェクトでは，このような施工性に優れる地下浅層部での効率的な熱利用を目的とし，シート型熱交換器「G-カーペット：Magen Eco Energy 社製」を用いた熱交換ユニットを開発した。

シート型熱交換器「G-カーペット」は，直径50 mm の二つのヘッダーパイプの間に，直径6 mm，長さ約5.6 m の細いポリエチレン細管を117本配置したもので，熱交換器全体の大きさは高さ0.9 m×長さ5.6 mである（図1）。熱交換器からヒートポンプへと熱を運搬する熱媒は，一方のヘッダーパイプから熱交換器内に流入し，もう一方のヘッダーパイプに向かってポリエチレン細管中を流れ，外側の地下水と熱交換が行われる仕組みとなっている。奥島ほか（2013）によれば，貯水池に完全に水没した状態でのシート型熱交換器は，シート1枚あたりの熱交換量が6 kW とボアホール型熱交換器100 m 相当の熱交換能力が期待

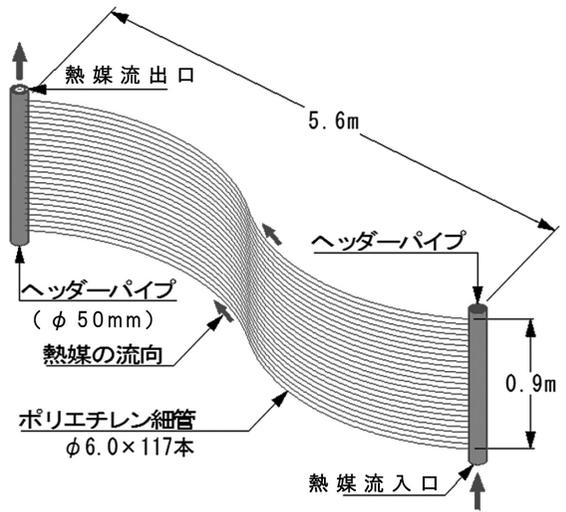


図1 シート型熱交換器
Fig.1 A sheet of heat exchanger.

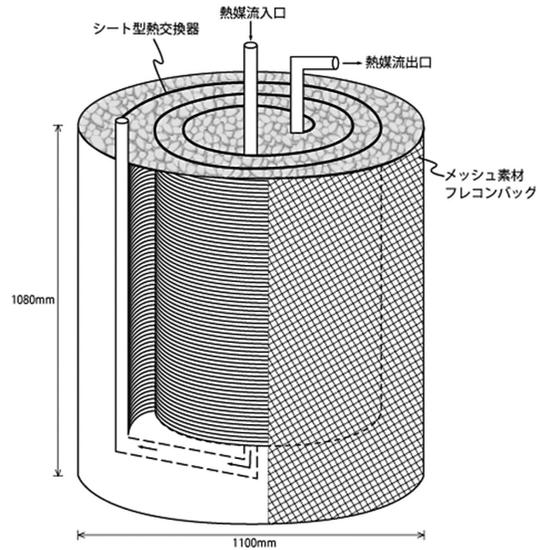


図2 開発した地中熱交換ユニット（実際の導入試験ではシート型熱交換器を2枚設置しているが，煩雑になるためここでは熱交換器が1枚のユニット図を示す。2枚設置の場合は，熱媒流入口が同一であり，ユニット底面でそれぞれの熱交換器に分岐する構造となっている。）

Fig.2 The developed shallow geothermal exchange unit. (Shown in this figure is the geothermal exchange unit of single sheet, while the actual installation experiment adopted the unit of two sheets, to avoid complexity. The unit of two sheets has shared inlet of heat medium and divergence heat exchange unit at the bottom of the unit.)

された。

本研究では、このシート型熱交換器を塩化ビニル樹脂素材からなるφ1100 mm×高さ1080 mmの大型土嚢（以降、フレコンバッグと呼ぶ）にらせん状に配置し、その隙間にφ2.3～4.8 mmの1号珪砂を充填した浅層地下水用の熱交換ユニットを作成した（図2）。なお、シート型熱交換器は、当初ユニット1器あたり1枚を想定していたが、後述の原位置試験および実証試験ではシート型熱交換器をユニット1器あたり2枚設置している。フレコンバッグは、土木用として用いられる既製品を利用し、透水性に優れた3 mm×3 mmの角型メッシュタイプを用いた。また、地中熱ヒートポンプシステムでは、地中熱交換器内の熱媒が0℃以下になることがあるため、熱媒にはエチレングリコールやプロピレングリコール、酢酸カリウムなどの不凍液が用いられる場合がある。近年は不凍液を用いる場合には環境負荷の低い不凍液の利用が推奨されるものの、漏洩した場合の地下水への負荷は少なからず生じることが想定されるため、本研究では熱媒として水を用いた。

開発した浅層地下水用の熱交換ユニットの設置は、パワーショベル等の重機で地盤を掘削後、地下数mに当該ユニットを設置し、発生土にて覆土することを想定した。

3. 室内模型装置を用いた採熱実験

開発した熱交換ユニットの採放熱性能の特性を把握するため、室内模型装置を用いた採熱実験を行った（写真1）。表1に室内模型実験の試験条件と結果を、図3に室内模型装置の模型図を示す。



写真1 室内模型実験状況（農研機構農工部門農業施設研究棟，つくば市）

Photo 1 A demonstration experiment. (The Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba City)

表1 室内模型実験の条件および結果 (V_{in} ；熱媒流量, u ；水路流速, T_{in} ；入口温度, T_{out} ；出口温度, T_w ；水路平均温度, Q ；熱交換量)

Table 1 The condition and the result of demonstration experiments. (V_{in} ；Flow amount of heat medium, u ；Channel velocity, T_{in} ；Inlet temperature, T_{out} ；Outlet temperature, T_w ；Average channel temperature, Q ；Amount of heat exchange)

熱媒流量 V_{in} (L/min)	水路流速 u (m/s)	熱媒平均温度 $(T_{out}+T_{in})/2$ (°C)	水路平均温度 T_w (°C)	熱交換器 出入温度差 $T_{out}-T_{in}$ (°C)	熱交換量 Q (kW)
11.3	2.73×10^{-4}	11.78	15.30	1.93	1.53
11.2	7.97×10^{-5}	8.59	15.77	1.59	1.24
12.0	1.67×10^{-3}	21.44	23.43	2.34	1.92
12.0	1.67×10^{-4}	19.94	24.72	2.15	1.76
12.0	7.83×10^{-5}	8.36	16.75	1.41	1.10
6.0	3.92×10^{-5}	11.08	18.31	1.91	0.81
6.0	7.85×10^{-5}	9.96	17.17	2.45	1.02
6.0	2.73×10^{-4}	9.97	13.10	2.74	1.10
6.0	7.85×10^{-4}	17.73	20.13	3.24	1.40

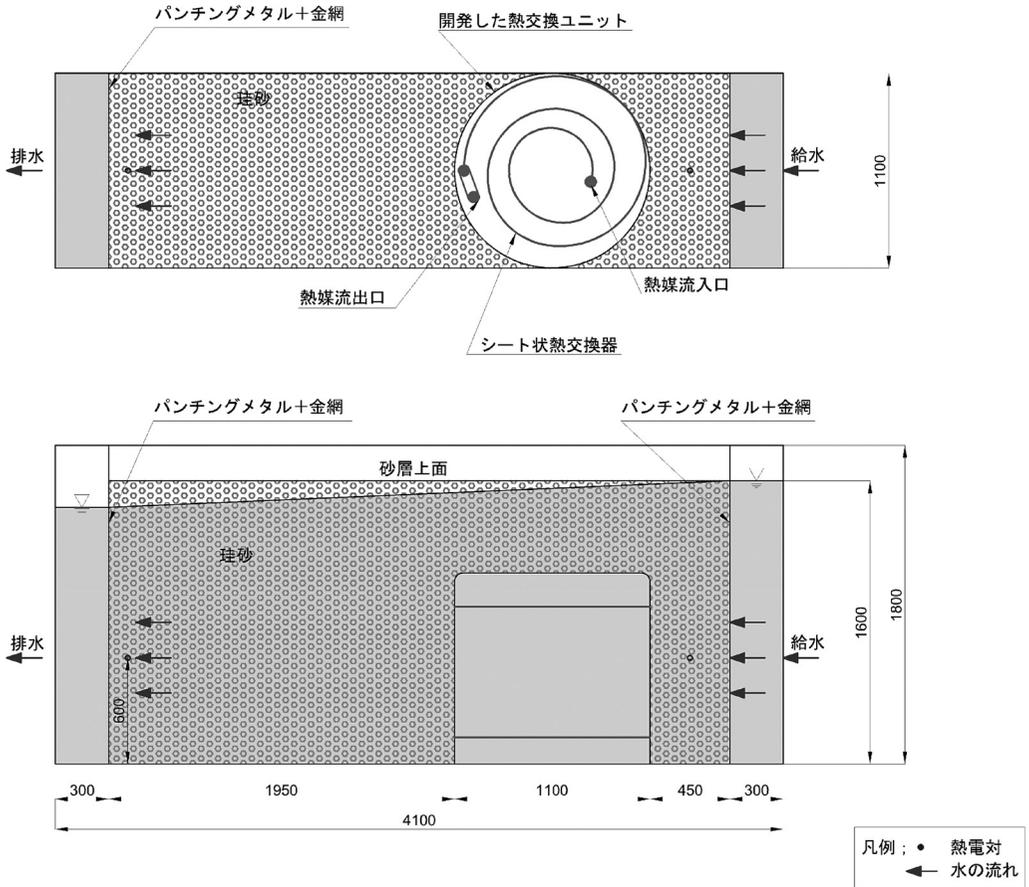


図3 室内模型実験装置
Fig. 3 Model experiment equipment.

実験に用いた模型は延長4.1 m×幅1.1 m×高さ1.8 mで、開発した熱交換ユニットを水路内に設置するとともに模型内をフレコンバッグに充填したものと同様の砂利で充填した。水路内の流速 u は、水路の上下流端にパンチングメタルと金網を用いて0.3 m程度の砂利が充填されていないスペースを設け、上下流の水頭差をつけることで調整した。当該実験では、水路流速を上下流の水頭差からダルシー則を用いて算出し、 $3.92 \times 10^{-5} \sim 1.67 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ で調整した。水路内には熱電対を設置し水路の平均温度を、熱交換器出入口には白金測温抵抗体 (Pt100) を設置し、出入それぞれの熱媒温度を測定した。測定期間は、各ケースに対し、1週間程度とした。なお、熱交換量は次の式にて算出した。

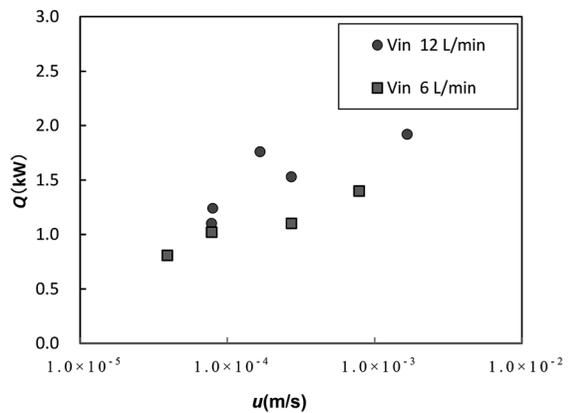


図4 室内模型実験による水路流速と熱交換量の関係
Fig. 4 The relationship between the channel velocity and the amount of exchanged heat in the model experiment.

$$Q = \frac{|T_{out} - T_{in}| \times V_{in} \times 60}{860} \quad (1)$$

ここで、 Q は熱交換量 (kW)、 T_{in} は熱媒入口温度 (°C)、 T_{out} は熱媒出口温度 (°C)、 V_{in} は熱媒流量 (L/min) である。

図4は水路流速 u と熱交換量 Q の関係を示している。これによれば、 u と Q には正の相関が認められ、熱媒流量 V_{in} が12 L/min の場合はややバラツキがあるものの、 V_{in} が6 L/min の場合に明瞭である。さらに、同程度の u においては、 V_{in} が多いほど Q が大きい傾向が認められた。また、実験結果より、開発した熱交換ユニットの運転効率、導入サイトの地下水環境 (地下水温度、ダルシー流速) により変化することがわかった。したがって、システム設計のための性能予測や導入適地評価をおこなうには、開発した熱交換ユニットに特化した性能評価手法の確立が今後の検討課題となる。

ここで、前掲の NEDO プロジェクトでは、開発した熱交換ユニットの熱交換量の定量化を試みている。ただし、複雑な3次元形状を有する熱交換ユニットで生じる物理現象を数値モデルで評価するには、定式化やモデリングに工夫が必要であり、現時点では数値モデルによる熱交換量の定量化手法は確立できていない。そのため筆者らは、本章で述べた室内模型実験から得られる地下水環境と熱交換量の関係性に基づく経験式を構築し、地域の地下水環境を反映した概略的な導入適地評価の検討をすすめている (富樫ほか, 2016)。経験式の構築には、富樫ほか(2013)を参考にして、室内模型実験の条件で設定した様々な地下水温度やダルシー流速の組合せを有する代理モデル (サロゲートモデル) に基づく応答曲面法の適用を考えている。応答曲面法は目的関数に近似手法を用いた最適化手法のひとつであり、機械工学 (廣畑ほか, 2003; 藤島ほか, 2003) や食品工学 (中川・落合, 2017) など、多様な分野の最適化問題に適用実績がある。

4. 実機を用いた実証試験

開発した熱交換ユニットの実用性を把握するた

めには、施工性や実際の浅層地下水による熱交換効率の把握が必要不可欠である。前述の室内模型装置における採熱実験から、ダルシー流速が熱交換効率に大きく寄与することが把握されていることを踏まえ、ダルシー流速が速いと期待される地下水が地表付近に分布する地域を対象に実証試験を行った。

4.1 モデル地域の選定

地下水は、一般的に岩盤の割れ目や地層を構成する土粒子の間隙中に胚胎 (帯水) している。我が国の地下水貯留層は、第四紀の堆積物である更新統や完新統が主体をなし、特に粗粒な堆積物からなる礫層や砂層が主たる地下水流動層として機能している。そのほかに新第三紀層の一部および新第三紀から第四紀にかけて噴出した火山岩類が主要な地下水流動層となっている。地下水が豊富な地域は、地下水を豊富に貯留あるいは流動することができる地形や地質構造を有している地域であり、これらを踏まえて本研究の対象地点の絞り込みを行った。

第四紀の更新統が地表部に分布する地形としては、丘陵や過去に離水した扇状地、段丘等の台地が挙げられ、完新統であれば、扇状地～氾濫原にかけての低地や盆地内の低地などがこれに相当する。このうち、一般に浅い地下水面が期待できるのは、地下水の湧出域にあたる低地である。また、室内模型実験でも把握されたように、効率的な熱交換を行うためには、速いダルシー流速が期待できる必要がある。すなわち、地盤を構成する地質の透水性や地形勾配が重要となるが、低地の氾濫原やデルタといった中下流域には、泥やシルトといった透水性の低い細粒な碎屑物が主として堆積し、地形勾配も極めて緩やかであることから、速いダルシー流速が期待できない。一方、それらの上流に位置する扇状地は、粗粒な砂や礫といった透水性の高い地質が分布し、低地に比べ急勾配な地形を形成することから、速いダルシー流速が期待できると考えた。したがって、本研究では地形および水文地質構造を踏まえ、地下水面が地盤浅層に存在する可能性があり、かつ速いダルシー流速が期待できる扇状地を対象として、実証試験および導入適地マップの作成を行うこととし

た。具体的には、日本を代表する扇状地であり、豊富な湧水の存在が有名な富山県黒部川扇状地をモデル地域として選定し、YKK株式会社黒部事業所内(北緯36°53′38″, 東経138°26′11″)にて実験を行った。

4.2 黒部川扇状地の地下水環境

黒部川扇状地ではこれまでに地下水に関する多くの研究がなされている。古いものでは吉田(1941)があり、扇状地内の井戸にて地下水位観測を行い、地下水面等高線が報告されている。また、黒部川扇状地での地下水研究が本格化したのは、高度経済成長期の地下水利用量が増大してからであり、代表的なものとして、1964～1966年に富山大学による調査がなされたほか、田口ほか(1970)、榎根・山本(1971)、黒部川扇状地地域社会研究所(1986)などによって黒部川扇状地の地下水環境について報告がなされている。また、近年では水谷ほか(2001)による水素酸素同位体分析を用いた地下水起源の検討や、入善町(2014)による黒部川扇状地に分布する井戸のデータを用いた水文地質構造を検討および水循環の現状把握

が行われている。

黒部川扇状地は、富山県東部に位置し、宇奈月町愛本を扇頂とし、扇頂角約60°, 地形勾配10～11%, 半径約13.5 kmを有し、扇端は日本海に面する臨海扇状地である。榎根・山本(1971)によれば、黒部川扇状地には、新旧の扇状地が数多く存在し、更新世中期～後期に形成された古い扇状地は段丘化している。また、現在の扇状地表面には、旧河道を示すと考えられる凹地形が扇頂から扇端に向かって放射状に発達しており、これらの旧河道の間には微高地が分布している。

黒部川扇状地の地質は、下位より先新第三系からなる難透水基盤とそれを覆う更新統の呉羽山礫層、段丘堆積物、旧扇状地堆積物、完新統の新規扇状地堆積物および砂丘堆積物からなる(図5)。更新統の層厚は、扇頂で40 m程度、扇端部で200 m程度と推定されている。また、完新統の層厚は、扇頂部で20 m程度、扇端部で80 m程度とされている(国土庁土地局, 2000)。

本研究の対象となるのは、最も新しい新規扇状地堆積物および砂丘堆積物が分布する現扇状地面である。富山県による表層地質調査(藤井,

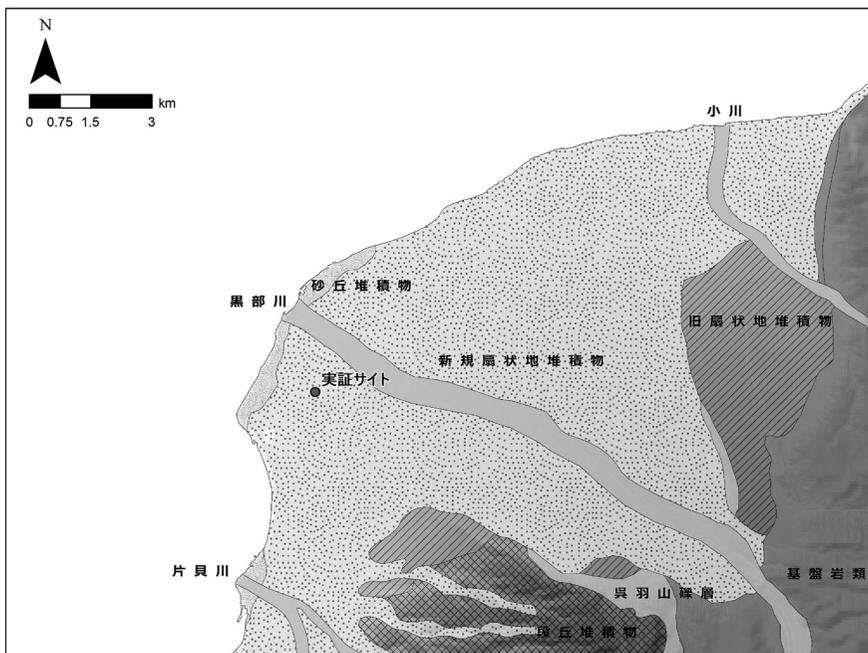


図5 黒部川扇状地周辺の地質図

Fig. 5 Geological map of Kurobe alluvial fan area.

1963)では、深さ1 mに達するまでの堆積物が検土杖を用いて調べられている。これによれば、黒部川扇状地では多くの場所で20～数十 cm以浅が砂や泥からなり、以深は砂礫層で構成される。開発したユニットは、地下数 mに設置することを想定していることから、主に新規扇状地堆積物の砂礫層中に設置することとなる。

4.3 原位置で実施した採熱量調査

モデル地域での実証試験では、短期間かつ省スペースでの施工を目指し、モデル地域内にある試験サイトにて簡易土留め工法による掘削および設置を行い、採熱量調査を行った。なお、原位置での採熱量調査では、シート型熱交換器2枚を設置したユニットを使用した。採熱量調査時には、掘削したスペース内に多量の地下水湧出が確認され、地下水面はGL-1.0 m程度であった(写真2)。確認された地質は、巨礫を主体とする未固結の砂礫層であり、その上位に約0.5 mの砂や粘土からなる土壌が確認された。当該地での重機による掘削限界深度は3.0 m程度であり、地下水面がGL-1.0 mであったことから、実機試験では熱交換ユニットの底面がGL-2.5 mに位置するように設置した。

原位置で行った採熱量調査の概念図を図6に示す。採熱量調査での初期水温は16.9℃であり、加



写真2 実証サイトでの開発ユニット施工状況 (YKK株式会社黒部事業所, 黒部市)

Photo 2 Execution of developed unit's installation at a demonstration site. (YKK Corporation Kurobe, Kurobe City)

熱量は2.77 kW, 加熱時間は8日間(192時間:10月6日14時～14日14時)とした。また、GL-2.0 mのユニット中心部に熱電対を設置した。

図7には採熱量調査中の熱媒入口温度 T_{in} , 熱媒出口温度 T_{out} , 熱交換ユニットの中心に位置するGL-2.0 mの地下水温 T_{unit} , 加熱量 Q_h および気温(魚津) T の変化を示している。これによれば、加熱開始後3～4日後には T_{in} , T_{out} , T_{unit} が安定し、概ね定常状態になったと考えられる。加熱開始直後に認められる T_{unit} の上昇は122.4℃/day程度であるのに対し、定常状態では0.1℃/day程度である。この結果を踏まえ、本研究では採熱量調査実施箇所に隣接する事務所の空調設備に開発した地中熱交換ユニットを導入し、採放熱性能のモニタリングを行った。採用した空調システムは、地下水を熱源として直接室内に熱媒を導き、室内側に設置したヒートポンプで空調利用するシステムである。対象となる事務所の面積は159.8 m²であり、室内温度は冷房利用時に22℃, 暖房利用時に26℃として設定し、7:00～18:00にかけて稼働させた。また、開発した熱交換ユニットを4器設置し、ヒートポンプは15 kW規模とした。モニタリング期間は、2016年の7月～2017年3月とした。

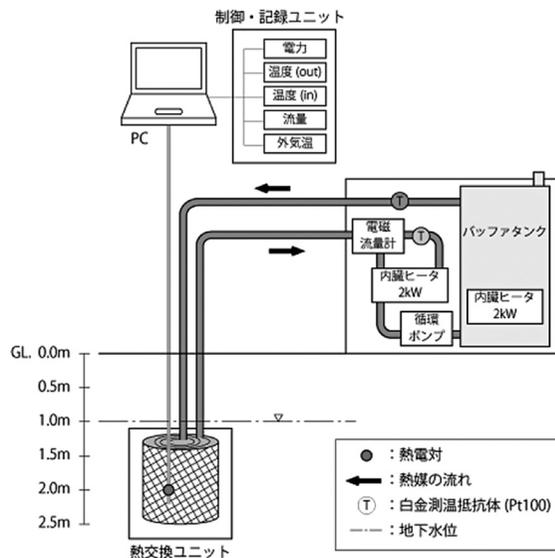


図6 原位置で実施した採熱量調査概念図
Fig. 6 Conceptual figure of exchanged heat extraction test implemented in Kurobe alluvial fan.

図8および図9は、1ユニットあたりの1日の積算熱量をヒートポンプ稼働時間で除した日平均熱交換量 Q (kW) と気温 T (魚津) の相関図である。これによると、 Q は冷房利用において T と正の相関が認められ、 T が高いほど Q が大きい傾向が認められる。一方、暖房利用では、 Q と T に明瞭な相関は認められない。これは、

冷房利用時の外気温が室内設定温度前後であったことから、気温の上昇に応じて空調利用頻度が高まったためと考えられる。これに対し、暖房利用の場合は室内設定温度と外気温の差が大きく、常に空調利用されている状態であり、気温との相関が生じにくかったと考えられる。冷房利用時に確認された Q は0.8～5.0 kW、暖房利用は Q は

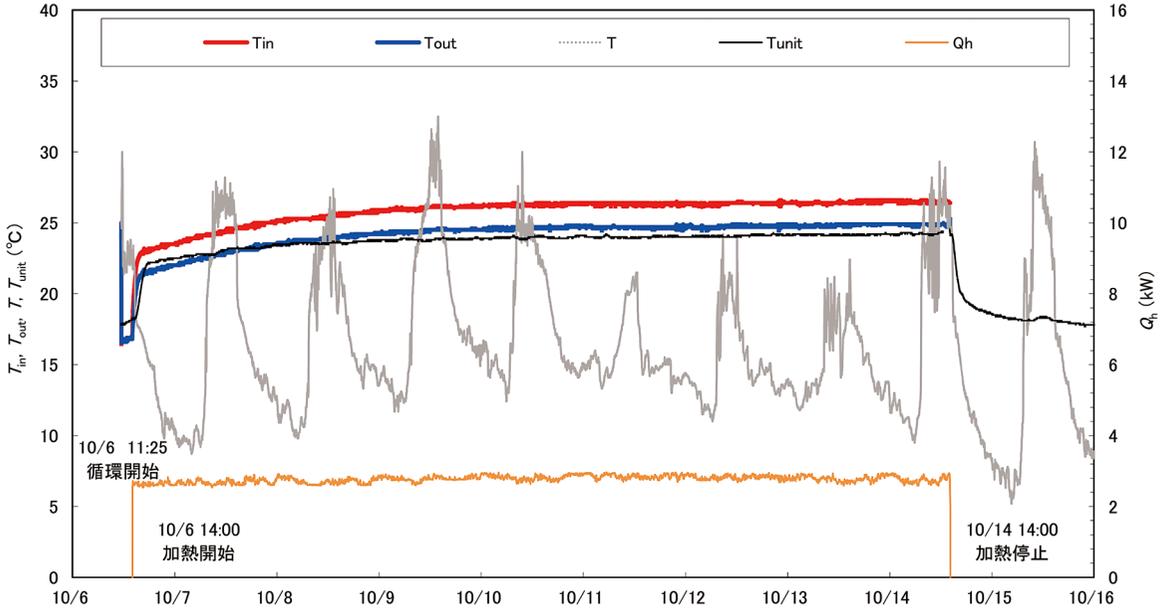


図7 採熱量調査結果 (T_{in} : 熱媒入口温度, T_{out} : 熱媒出口温度, T : 気温, T_{unit} : ユニット中心の地下水温度, Q_h : 加熱量)
 Fig. 7 The result of heat extraction test. (T_{in} : Inlet temperature of heat medium, T_{out} : Outlet temperature of heat medium, T : Temperature, T_{unit} : Groundwater temperature of the center of the unit, Q_h : Amount of heating)

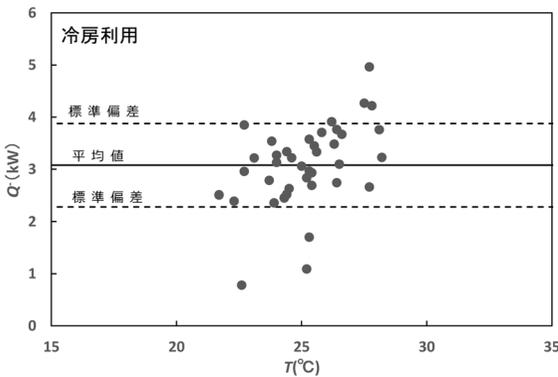


図8 冷房利用時の日平均熱交換量と気温の関係
 Fig. 8 The relationship between average amount of daily heat exchange and temperature upon cooling operation.

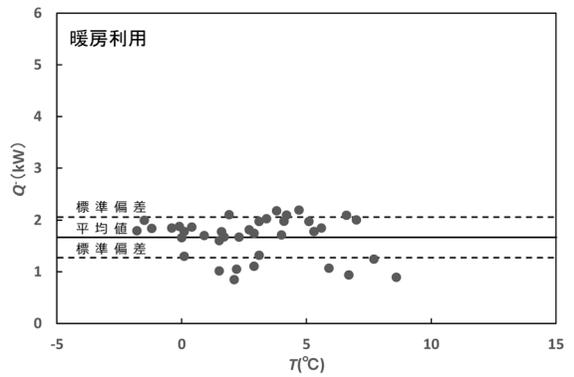


図9 暖房利用時の日平均熱交換量と気温の関係
 Fig. 9 The relationship between average amount of daily heat exchange and temperature upon heating operation.

0.8～2.2 kW が確認されている。ただし、これらの値は稼働時の地下水環境や空調利用環境の影響を受けることからバラツキは大きい。このため、標準偏差を踏まえて期待できる Q を評価した結果、冷房利用においてはユニット1器あたり2.3 (最小)～3.9 (最大) kW であり、平均3.1 kW (標準偏差0.8 kW) であった。暖房利用においては1.3 (最小)～2.1 (最大) kW であり、平均1.7 kW (標準偏差0.4 kW) であった。北海道大学地中熱利用システム工学講座 (2007) によれば、ボアホール型の熱交換量の概算値は30～40 W/m とされている。100 m のボアホール型熱交換器の熱交換量を4 kW (40 W/m) と仮定し、冷房利用時の実績 (平均3.1 kW) と比較した場合、当該ユニットは1.3器で同等の熱交換量が期待できることになる。

なお、導入コストは、普及促進のためにも重要な要素として捉えており、複数の業者に対し価格調査を行ったものの、施工業者によって施工方法が異なり、工事費のばらつきが大きいため、改めて報告することにする。ただし、熱交換器の能力としては、開発した熱交換ユニット1.3器で100 m のボアホール型熱交換器とほぼ同程度の熱交換能力を有することから、導入コストは大きく削減できるものと期待される。

5. 導入可能エリアの検討

本研究では、開発したユニットの普及促進を目指し、当該ユニットに特化した導入適地マップの開発も進めている。浅層地下水熱ポテンシャルを評価することで導入適地を明らかにする予定であるが、ポテンシャルの指標には熱交換能力の採用を検討している。熱交換能力は水温、流速、水深、熱利用施設条件等の様々な要因により決定される。さらに、評価したポテンシャルを地図情報として整理したものが導入適地マップとなる。一方、現時点では高精度な導入適地マップの作成に必要な面的な地下水温やダルシー流速等のデータが十分ではない。このため、導入適地マップは別途報告することとし、本報告では実機を用いた採熱量調査にて確認された掘削限界深度を踏まえ、導入可能エリアの抽出を行った。具体的には、入善町 (2014) によって報告されている地下

水面等高線に原位置試験箇所での地下水位データや黒部川扇状地での現地地下水位観測結果等を踏まえ、地下水面等高線を作成した。次に、基盤地図情報より収集した5 m メッシュの標高データから作成した地盤モデルと地下水面の差分をとることで不飽和帯厚を把握し、ユニットを設置した際に地下水との熱交換が可能となるエリアを求めた。

黒部川扇状地では榎根・山本 (1971) が1969年8月から1971年5月までの間に開放井戸を対象とした計7回の水位観測を行い、地下水面等高線が報告されているほか、榎根 (1991) は水位観測結果から地下水面等高線を作成し、黒部川からの伏没浸透を考察している。また、丸山 (2006) では、2002年に行った調査から作成した地下水面等高線が榎根 (1991) と同様の傾向を示すことが確認されている。本研究で作成した地下水面等高線を図10に示すが、丸山 (2006) にて報告されている2002年8月の地下水面等高線を比較すると、本研究では扇端付近で2～3 m 程度地下水位が低いほか、黒部川河道部の地下水位が左右岸に比べて高い地下水嶺がより顕著に認められる。この要因の一つとして、地下水位の観測時期が挙げられる。本研究は地中熱利用の普及促進を目的とした開発であるため、地下水位が低く、より導入条件が厳しいと想定される冬季に観測を行った。このため、夏季に比べ扇状地の地下水位は低下しているのに対し、黒部川の水面標高は地下水位に比べると大きな変動がないことから、明瞭な地下水嶺が生じたものと考えられる。

本研究で作成した地下水面等高線と地盤標高の差をとって作成した不飽和帯厚マップを図10に示している。不飽和帯厚マップは、100 m メッシュで作成している。開発した地下浅層部用熱交換ユニットは、図2に示すとおり高さが1.2 m 程度である。実証試験の結果、重機による限界掘削深度はGL-3.0 m 程度であったことから、熱交換ユニットの上面がGL-1.8 m とした場合を想定すると、不飽和帯の厚さは1.5 m 未満の地域に限定されることとなり、黒部川の河口部周辺およびその南側の扇端域にあたる。

以上から、本研究にて開発した地中熱交換ユニットは、施工可能深度を考慮すると地下水面が

GL-1.5 m 以浅に位置する地域に設置する必要があり、今回検討した黒部川扇状地では主に地下水位が浅くなる扇端域にて導入の可能性が高いことが示された。日本国内には、黒部川扇状地以外にも多くの扇状地が存在するが、一般に扇状地の扇端では地盤勾配が緩やかであり、また豊富な地下水に恵まれることから都市や集落が形成されやすい。このため、公共施設をはじめ、本研究で開発した地中熱交換ユニットを導入できる可能性は高いことが示唆された。

6. おわりに

地中熱利用システムの導入コスト削減を目指し、シート型熱交換器を利用し、浅層地下水に着目した地中熱交換システムを開発した。開発した地中熱交換システムは、GL-3 m までの深度に設置することが可能であり、本研究で対象とした

地下水位が浅く、ダルシー流速の速い地域で効果的な熱交換が可能であることが把握された。また、開発した熱交換ユニットを黒部川扇状地内に位置する事務所への空調設備に用いた結果、ユニット1器あたりの日平均熱交換量は、冷房利用時で平均3.1 kW (標準偏差0.8 kW) と、100 m のボアホール型の熱交換器とほぼ同程度の熱交換率が期待できることが把握された。さらに、本研究で開発した熱交換ユニットは、シート型熱交換器と既存の土木材料を用いて比較的容易に作成できることから、地中熱利用のさらなる可能性の拡大に寄与できたと考えている。

一方で、開発したユニットは1器ごとに手作りであり、製作方法や使用する材料によって、実際の利用時の性能にバラツキが生じる可能性がある。このため、安定した性能が発揮できるようユニットの制作方法の標準化・規格化を進める必要がある。これによって、ユーザーが当該ユニット

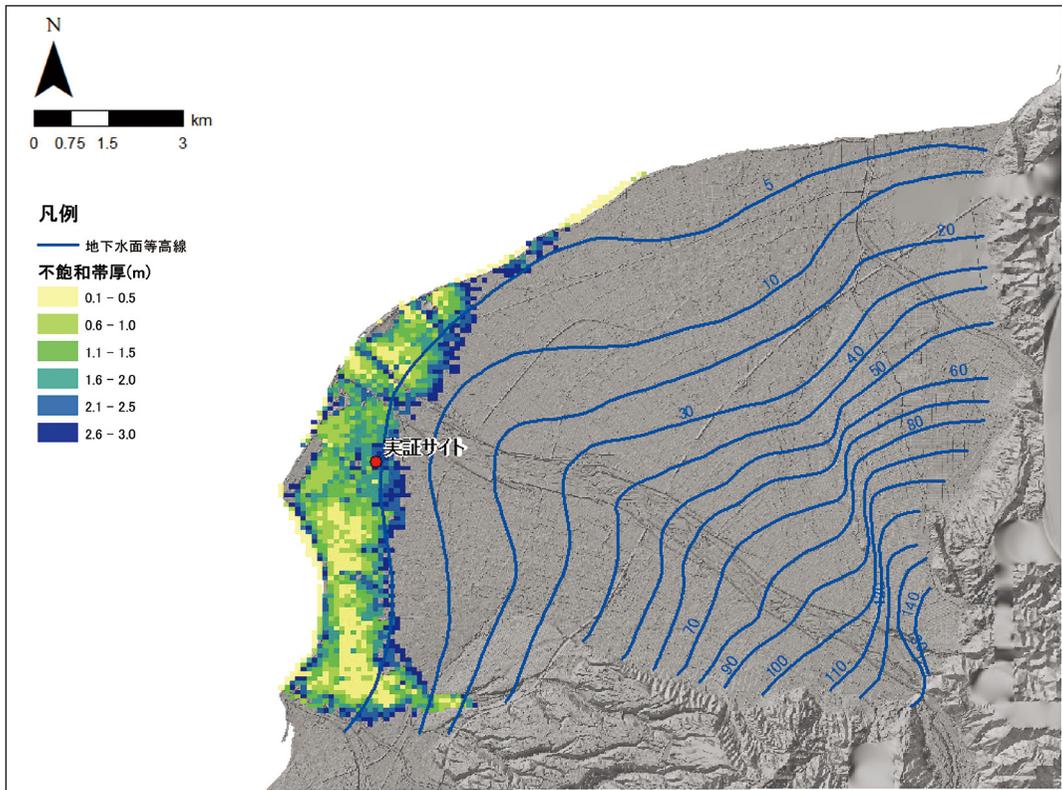


図10 地下水面等高線および不飽和帯厚マップ

Fig. 10 Map of water table contour and unsaturated zone thickness.

を利用した際に期待できる採熱量が把握でき、導入検討が進むものと考えられる。また、本研究では熱交換ユニットを設置し、それらを現地発生土で埋め戻したが、埋め戻し方法や転圧状況などによっては、地下水流動阻害が生じる可能性も考えられる。このため、埋め戻しによる熱交換への影響の把握や、流動阻害をできる限り低減できる設置方法、掘削方法の検討が課題である。

当該ユニットを用いる場合、設置箇所は地下水面がGL-1.5m以浅に位置する地域である必要がある、今回行った地下水面の面的な評価がエリア選定を行う上で有効であったと考えられる。また、このマップを元に高精度な導入適地マップを作成するためには、地下水温やダルシー流速を加味した詳細な評価が必要であり、今後も検討を進めたい。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 事業「地中熱・流水熱利用型クローズドシステム技術開発」において実施されたものです。共同研究機関の皆様、また本研究にあたり実証サイトを提供いただいたYKK株式会社黒部事業所の皆様に対して、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

奥島里美・石井雅久・森山英樹・後藤真之・佐瀬勘紀・館野正之・高杉真司 (2013)：ヒートポンプ熱源としての池の熱効率-実験水槽を利用した測定例-。2013年度農業施設学会大会講演要旨, 137-138。
榎根 勇・山本荘毅 (1971)：扇状地の水循環-環境システム論序説-。古今書院, 151p。
榎根 勇編 (1991)：実例による新しい地下水調査法。山海堂, 171p。
黒部川扇状地地域社会研究所 (1986)：黒部川扇状地研究。古今書院, 185p。
国土庁土地局 (2000)：地下水マップ付属説明書 (富山地域)。164p。
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2018)：地中熱・流水熱利用型クローズ

ド型システム技術開発。http://www.nedo.go.jp/content/100877762.pdf (2018.8.27閲覧)。

田口雄作・田中 正・鈴木祐一・田瀬則雄・島野安雄・田林 明・榎根 勇・山本荘毅 (1970)：黒部川扇状地における水文環境。ハイドロロジー, 2・3, 46-49。

富樫 聡・西山浩平・山本 晃・檀 智之・高橋 努 (2013)：広域を対象とする地中熱ポテンシャル評価手法の提案。日本地下水学会2013年春季講演会講演要旨集, 104-109。

富樫 聡・吉田広人・岩本 淳・高橋 努・小間憲彦・館野正之・高杉真司 (2016)：地下浅層部の熱利用技術開発と導入適地評価に関する研究 (その2)。日本地下水学会2016年秋季講演会講演予稿, 24-27。

中川究也・落合隆晃 (2017)：スープ食品凍結乾燥工程の数学的モデルに基づくデザインスペースの推算。日本食品工学会誌, 18 (2), 115-123。

長野克則 (2012)：地中熱ヒートポンプシステムに関する研究開発最前線。地下水学会誌, 54 (2), 95-105。

入善町 (2014)：黒部川扇状地地下水流量等調査業務報告書。82p。

廣畑賢治・向井 稔・川村法靖・川上 崇・于 強・白鳥正樹 (2003)：カルマンフィルタおよび多重仮説検定を用いた応答曲面近似式の高精度化手法の提案。69 (683), 1057-1065。

藤井昭二 (1963)：表層地質図「黒東」(5万分の1)および同解説書。富山県, 41p。

藤島 寧・若尾真治・松岡孝一・近藤 稔 (2003)：応答曲面近似法による機器最適化計算の高速化。電気学会論文誌 D, 123 (4), 371-378。

北海道大学地中熱利用システム工学講座 (2007)：地中熱ヒートポンプシステム。オーム社, 167p。

丸山 響 (2006)：黒部川扇状地における地下水涵養源としての河川水の役割。日本水文科学会誌, 36 (1), 23-36。

水谷義彦・佐竹 洋・山邊綾子・宮地ひろみ・間瀬暢彦・山村嘉代子 (2001)：扇状地浅層地下水の水素および酸素同位体比。地下水学会誌, 43 (1), 3-11。

安川香澄・天満則夫・内田洋平・大谷具幸 (2005)：地下の新しい活用法：地中熱による冷暖房。地質ニュース, 611, 10-20。

吉田義信 (1941)：富山県の3大扇状地の地下水。地理学評論, 17 (12), 989-1002。

(受付：2018年4月18日, 受理：2018年9月14日)