

08. 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）

○富樫聡（八千代エンジニアリング株式会社），吉田広人（同），岩本淳（同），高橋努（同）
小間憲彦（ジオシステム株式会社），舘野正之（同），高杉真司（同）

1. はじめに

筆者らは，地中熱利用システムの主要な普及阻害要因と言われている「井戸掘削やシステム最適設計のための事前調査に要するコスト」を縮減することを目的として，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」（以降，NEDO流水熱プロジェクトと呼ぶ）において，浅層地下水等の未利用の流水熱利用に着目した熱交換器とその導入適地評価手法を開発中である。本報では，前報¹⁾に引き続き，開発する熱交換器に特化した流水環境の基礎調査とポテンシャル評価手法と提案するとともに，作成した導入適地マップを報告するものである。

2. 地中熱・流水熱利用型クローズドシステム技術開発

2.1 研究の目的

NEDO流水熱プロジェクトでは，①流水熱利用型熱交換器の開発およびモデル化，②ヒートポンプシステムの運用最適化手法の開発，③流水熱利用型熱交換器の導入適地マッピング技術の3つの開発をおこなっている。これらより，地中熱・流水熱利用システムの導入コスト・運用コストの縮減と，社会実装のための標準システムや導入適地マップ確立を実現して，再生可能エネルギー熱利用の普及拡大を目指している。熱源には，浅層地下水，湧水，農業用水を想定しており，これら熱源別にモデル地域を設定して地域特性を反映したポテンシャル評価手法の開発と導入適地マップの作成を目指す。熱源別のモデル地域を図1に示す。また，図2には本研究で提案する導入適地マップの検討フローを示す。このうち本報では，浅層地下水に着目して，モデル地域の流水環境およびポテンシャル（熱交換量）推計式の考え方を整理する。

2.2 地下浅層部の熱利用技術

NEDO流水熱プロジェクトにおいて，地下浅層部の熱利用のため，図3に示す熱交換ユニットを開発した。地中熱利用技術の中で最も導入事例の多いボアホール型の鉛直熱交換器（Uチューブ）の設置する場合には熱交換井のさく井費が嵩むことになるが，開発した熱交換ユニットは重機による地下数メートル程度の掘削で設置が可能であり，大幅な導入コストの縮減が期待できる。図4には，開発した地下浅層部用熱交換ユニットの基幹部となるシート型の熱交換器の模式図を示す。開発した熱交換ユニットは，透水性のあるフレコンバッグにシート型熱交換器を円筒状に挿入し，間隙を珪砂で充填して作成した。なお，シート型熱交換器は奥島ほか²⁾によれば，流水中において1枚当たり6 kW

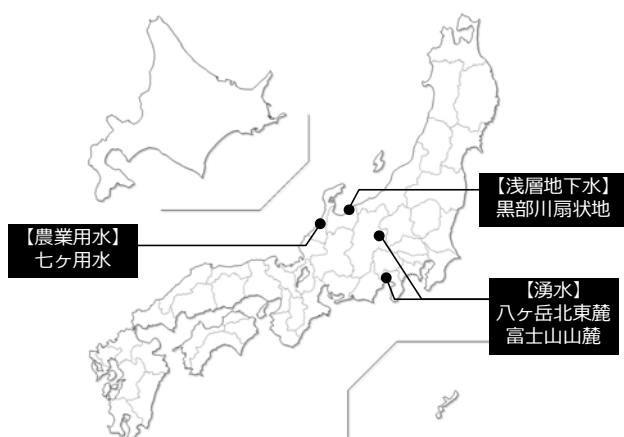


図1 熱源別のモデル地域位置図

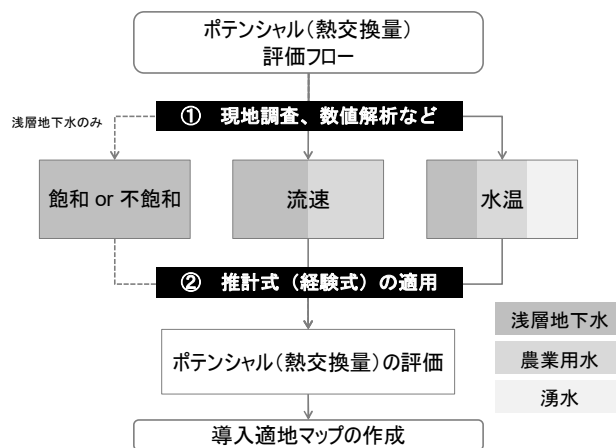


図2 導入適地マップの検討フロー

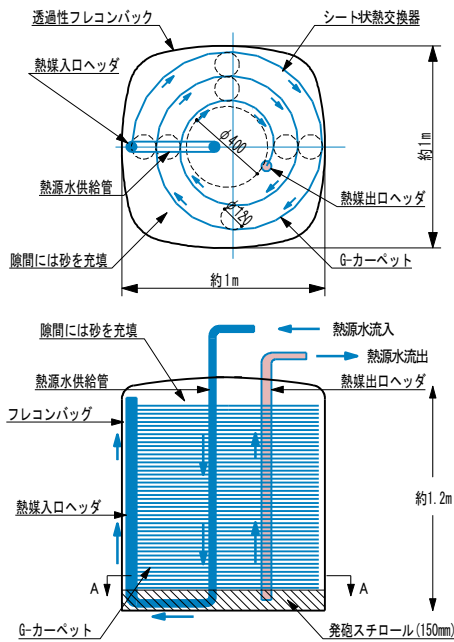


図3 開発した地下浅層部用熱交換ユニット

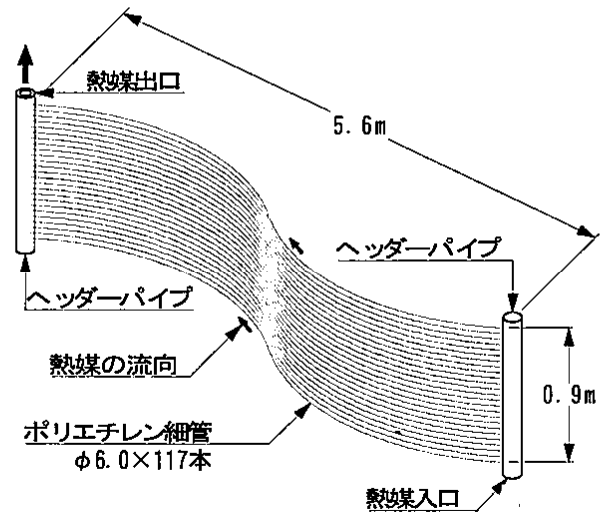


図4 シート型熱交換器

とボアホール型熱交換器100m相当の熱交換能力が期待できると報告されている。ただし、導入コストの縮減が実現できたとしても、熱需要を満足する採熱量が得られなければ事業として成り立たない。したがって、地下浅層部に地下水が存在し、且つ流水環境による移流効果が見込める地域を事前調査により明らかにすることが、本システムの性能保証をする上で特に重要となる。

2.3 ポテンシャル評価の考え方

ポテンシャルは、熱交換能力を指標として評価することとした。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。本報では、個別施設の熱利用施設条件に関する熱負荷条件は別途設定するとし、地下浅層部用熱交換ユニットが完全に飽和する地域への設置を前提とすることで、地下水の流速と水温に着目した検討をすすめている。

地下水の流速と水温は、地下水環境の地域特性を示す指標と考えることができ、地域性の高い情報であるため、ここではこれらを地域パラメータと呼ぶこととする。地域パラメータの地域分布は、現地調査や数値シミュレーション等により把握することが一般的である。また、対象地域が広範にわたる場合には、例えば対象地域を同一メッシュで分割した場合を想定すると、メッシュごとの地域パラメータの組合せは無数に存在することとなる。そこで本研究では、このように多数存在する地域パラメータの組合せごとの熱交換量の推計を試みた。具体的には、予め作成した代理モデルに対して応答曲面法を用いた最適化を適用して、これにより熱交換量推計式を作成した。さらに、作成した熱交換量推計式を地域パラメータの面分布が把握できている対象地域に適用することで、当該地域における熱交換量の面情報が作成できる。なお、地下水環境の地域パラメータを変数とする応答曲面近似法 (RSM : Response Surface Methodology) を適用した熱交換量推計に関しては、富樫ほか^{3), 4)} において良好な再現性が報告されている。

2.4 代理モデルとRSMを用いる熱交換量推計式の作成⁵⁾

熱交換量 Q は、ダルシー流速から求めるペクレ数 P_e と水温 T を変数とする関数で表現できると考え、これら2変数からなる熱交換量 Q の近似に応答曲面法を採用する。ここで、回帰係数を β とし、応答関数として二次多項式を用いた場合、応答曲面は(1)式で与えられる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

熱交換井単位長さ当りの熱交換量 Q を、2変数 P_e 、 T から近似する場合、(1)式は(2)式に示す双二次多項式で表すことができる。

$$Q \cong \beta_0 + \beta_1 P_e + \beta_2 T + \beta_3 P_e^2 + \beta_4 T^2 + \beta_5 P_e T \quad (2)$$

ここに、 $\beta_0 \sim \beta_5$ はパラメータであり、最小二乗法等により最適値を決定する。本研究では(2)式による近似式作成のため、まずは代理モデルとして複数パターンの P_e と T のパラメータデータセットを作成する。これら条件のもとで実物大の地下浅層部用熱交換ユニットを用いた室内土槽模型実験をおこない、地域パラメータの組合せごとに熱交換量 Q を得る。

3. 黒部川扇状地の地下水環境

本研究のモデル地域は富山県東部に位置する黒部川扇状地とした(図5)。黒部川扇状地は宇奈月町愛本を扇頂とし、扇頂角約 60° 、地形勾配 $10 \sim 11 \%$ 、半径約 13.5km を有し、扇端は日本海に面する臨海扇状地である。東縁部および南縁部には旧扇状地面が段丘化して分布している。東～南縁の山麓部は黒菱山断層を初めとする活断層が北東-南西方向に連続し、扇状地面と山地が明瞭に区分される。

ポテンシャルを評価するにあたり、まずは黒部川扇状地の地下水環境を調査した。対象地域の地下水位調査結果より整備した地下水面コンターマップと高精度な数値標高データを用いて、不飽和層厚を図化したものが図6である。開発した地下浅層部用熱交換ユニットは、図3に示すとおり高さが 1.2m 程度である。また、実証実験の結果、パワーショベル等の重機による限界掘削深度は 3m 程度と確認されたことから、掘削深度 $\text{G.L.}-3.0\text{m}$ 、地下浅層部用熱交換ユニット設置高さ $\text{G.L.}-1.8\text{m}$ とした場合を想定すると、図6の不飽和層の厚さが $0.0\text{m} \sim 2.0\text{m}$ の地域を導入候補地域として考えた。

次に、対象地域の地下水流速を把握するため、3次元地下水流動シミュレーションをおこなった。図7は、図8に示す黒部川扇状地の地質モデルを用いて構築した3次元地下水流動シミュレーションモデルである。地下水流動シミュレーションにはDtransu-3D・ELを採用し、構築したモデルの節点数、要素数はそれぞれ $497,385$ 、 $952,272$ である。地下水流動シミュレーションの結果(地下水の流動経路:流線)を図9に示す。図9は定常時の地下水の流動経路を可視化したものであり、解析結果の3次元情報を平面に投影した図面である。計算の結果、扇状地の扇頂付近の黒部川から浸透した水が地下水として扇状地を流下する様子が見てとれる。数値シミュレーション結果から、地表から 3m 前後までの地下水流速を整理して、さらに図6で示した導入適地候補に限定して地下水流速を図化したものが図10である。流速の解析結果は、当該地域で実施された流向流速試験の結果と比較して妥当性を確認している。また、流向流速試験の結果の信頼性の観点より、熱応答試験で得られた見かけの熱伝導率の値から推計した地下水流速なども解析結果の妥当性の検証に用いた。その結果、図10に示すとおり、導入候補地域の大部分でダルシー流速が 5m/日 以上と評価された。実際に、ごく浅層部の地下水は流速が早いことが現地でも確認されているが、今後、本解析結果の確からしさの確認が重要である。



図5 黒部川流域と黒部川扇状地

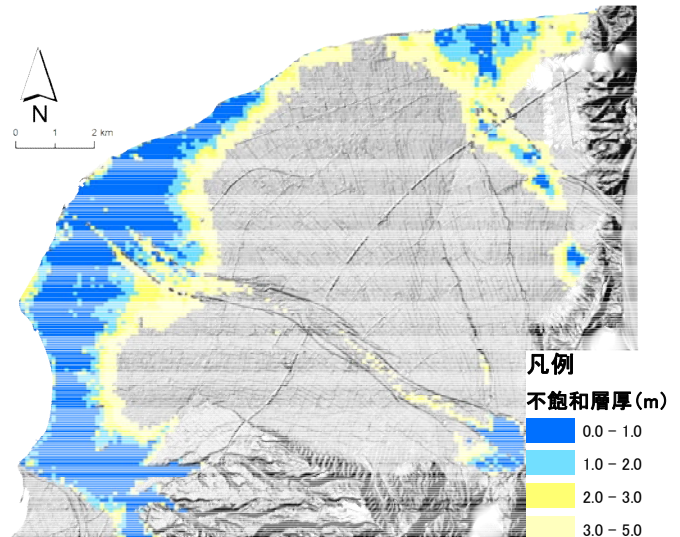


図6 導入候補地域(不飽和層マップ)

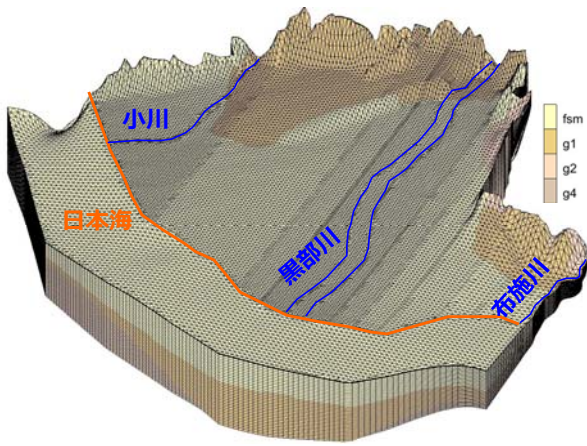


図7 黒部川扇状地3次元解析モデル

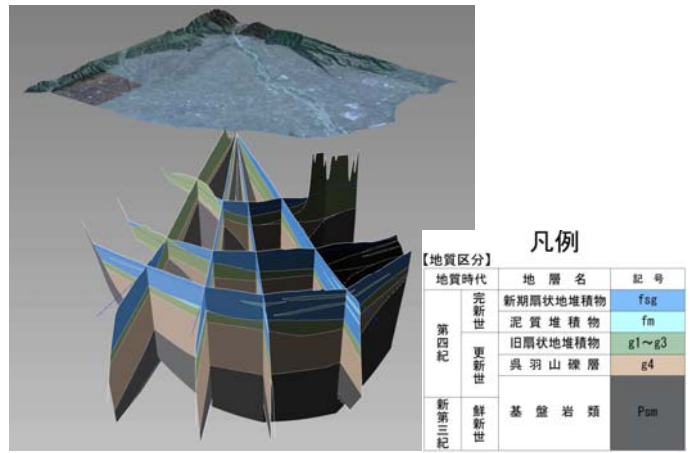


図8 黒部川扇状地地質モデル

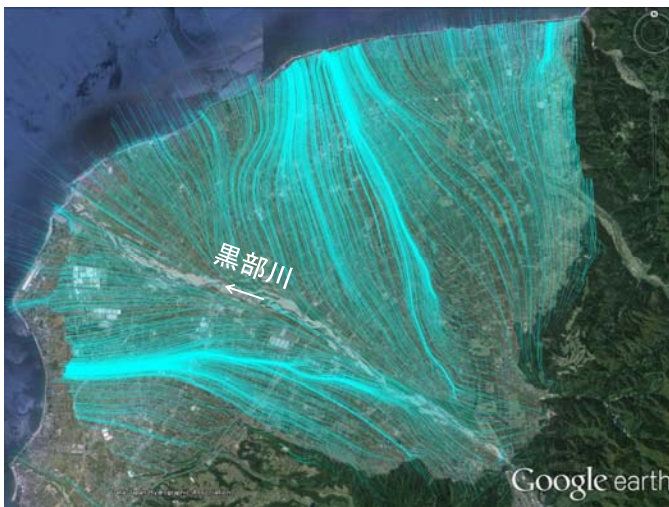


図9 数値解析結果：地下水流動経路流線

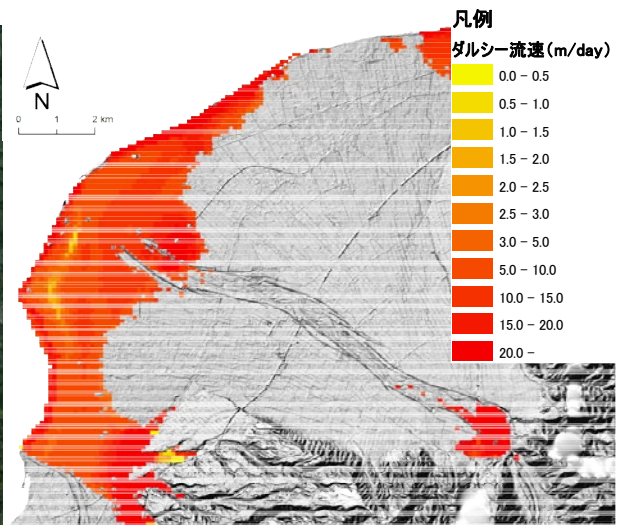


図10 流速マップ

4. 今後の予定

地中熱・流水熱利用型クローズドシステム技術開発事業における浅層地下水を対象とした導入適地マッピング技術の開発に先立ち、黒部川扇状地の地下水環境調査をおこなった。調査の結果、開発した地下浅層部用熱交換ユニットの導入対象地域を確定するとともに、数値解析から地域パラメータのひとつである地下水流速のマップを作成した。今後は、数値解析結果の精度を向上するとともに地下水温データを整備して、これらから対象地域の導入適地マップを作成する予定である。

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。共同研究機関である農研機構（農村工学研究部門）の皆様、東北大学の皆様、また本研究にあたり研究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

- 1) 吉田広人, 富樫聡, 岩本淳, 高橋努, 館野正之, 高杉真司 (2015) : 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1), 日本地下水学会 2015 年春季講演会講演要旨集, pp.28-31.
- 2) 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, pp.137-138.
- 3) 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, pp.104-109.
- 4) 富樫聡, 多田一晴, 高橋努, 笹山大介, 樫尾政行 (2013) : システム運用シミュレーションを援用した地域特有の地下水・地質環境に基づく地中熱潜在量の評価, 日本応用地質学会平成 28 年度研究発表会講演論文集.
- 5) たとえば, 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 (産業応用部門誌), Vol.123, No. 4, pp.371-378.