

# 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<sup>1)</sup>

## 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 km<sup>2</sup> 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

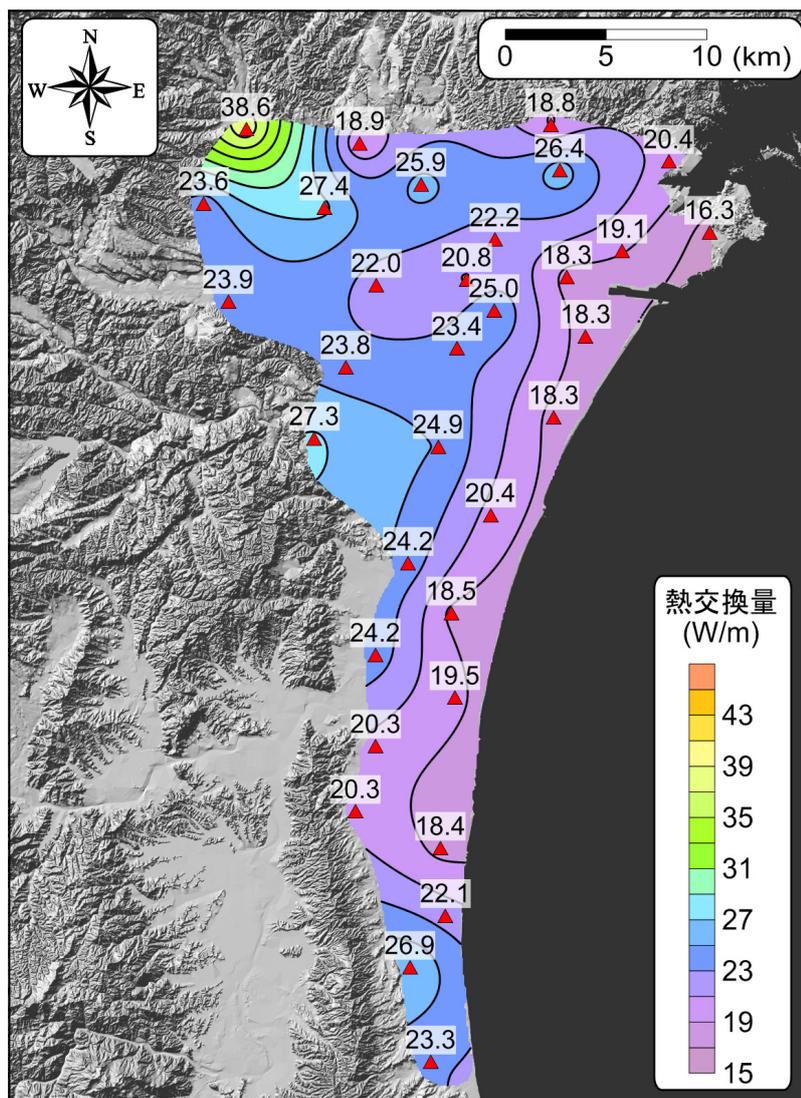
た広域モデルと同じ値とし、各 GHE モデルについて、広域モデルにおける GHE モデルの位置と同じ地質学的・水文地質学的・熱的なパラメータを入力した。同様に、各 GHE モデルの初期条件や境界条件は、広域モデルから計算された地下水流速、地下水位、地下温度が再現されるように設定した。GHE モデルの中央の接点に、深度 100 m の GHE を設定した。ダブル U チューブの直径は 34 mm で、シリカサンドのグラウトを想定した。各 GHE モデルにおいて、暖房のための熱交換シミュレーションを行った。システムの運転シナリオは、毎年 12 月～3 月の 120 日間、24 時間の暖房を行うと設定した。GHE の入口温度と循環流量はそれぞれ、5℃、20 L/min とし、水を循環流体と設定した。このシミュレーションから、各 GHE の熱交換量を計算した。その結果を第 1 図に示す。熱交換量の最大値・最小値・平均値は、それぞれ 38.6、16.3、22.5

W/m であった。熱交換量は、平野の上流側（内陸部）で高く、下流側（沿岸部）で低い傾向がみられた。

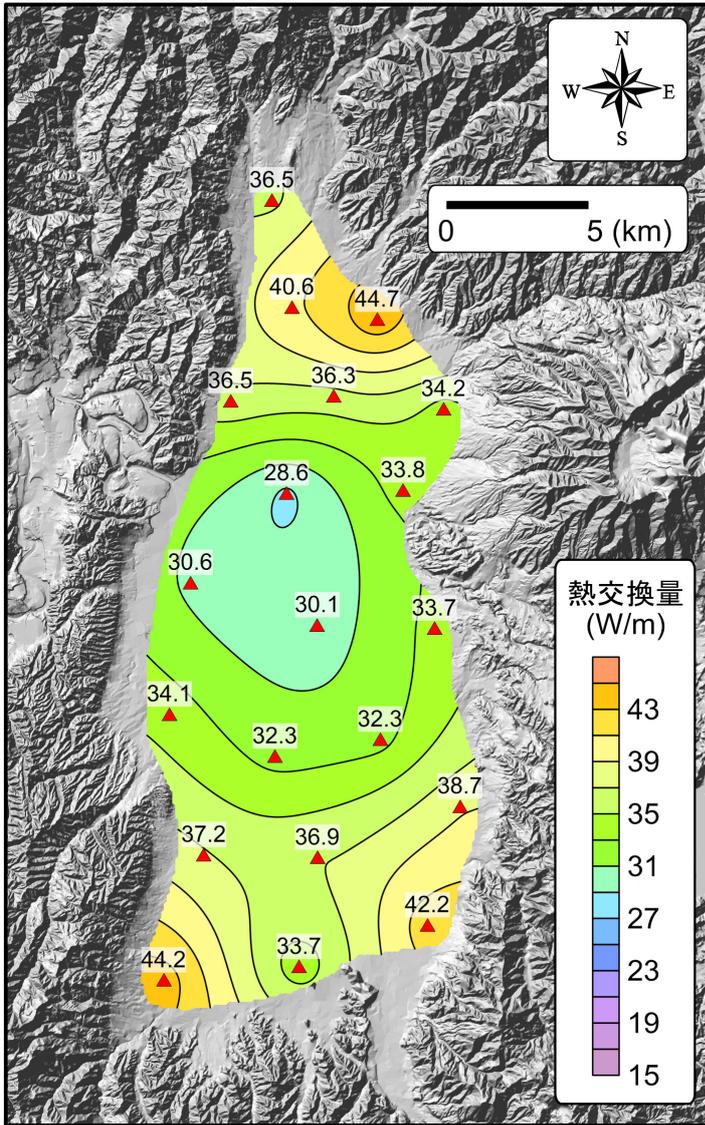
## 5. 仙台平野と会津盆地の熱交換量の比較

会津盆地の熱交換量分布を第 2 図に示す。熱交換量の最大値・最小値・平均値は、それぞれ 44.7、28.6、35.6 W/m であった。仙台平野と同様に、上流側（盆地周辺部）で高く、下流側（盆地中央部）で低い傾向がみられた。

熱交換量に与える地下水環境に関する要因を検討するために、回帰分析を行った（第 3 図）。熱交換量を目的変数とし、表層から深度 100 m までの平均地下水流速と平均地下温度を説明変数とした。仙台平野と会津盆地における、地下水流速と熱交換量の決定係数は、それぞれ 0.27 と 0.90 であった（第 3 図 (a) ~ (b)）。また、仙台平野と会津盆



第 1 図 仙台平野における熱交換量マップ。Kaneko et al. (2018) の結果をもとに修正



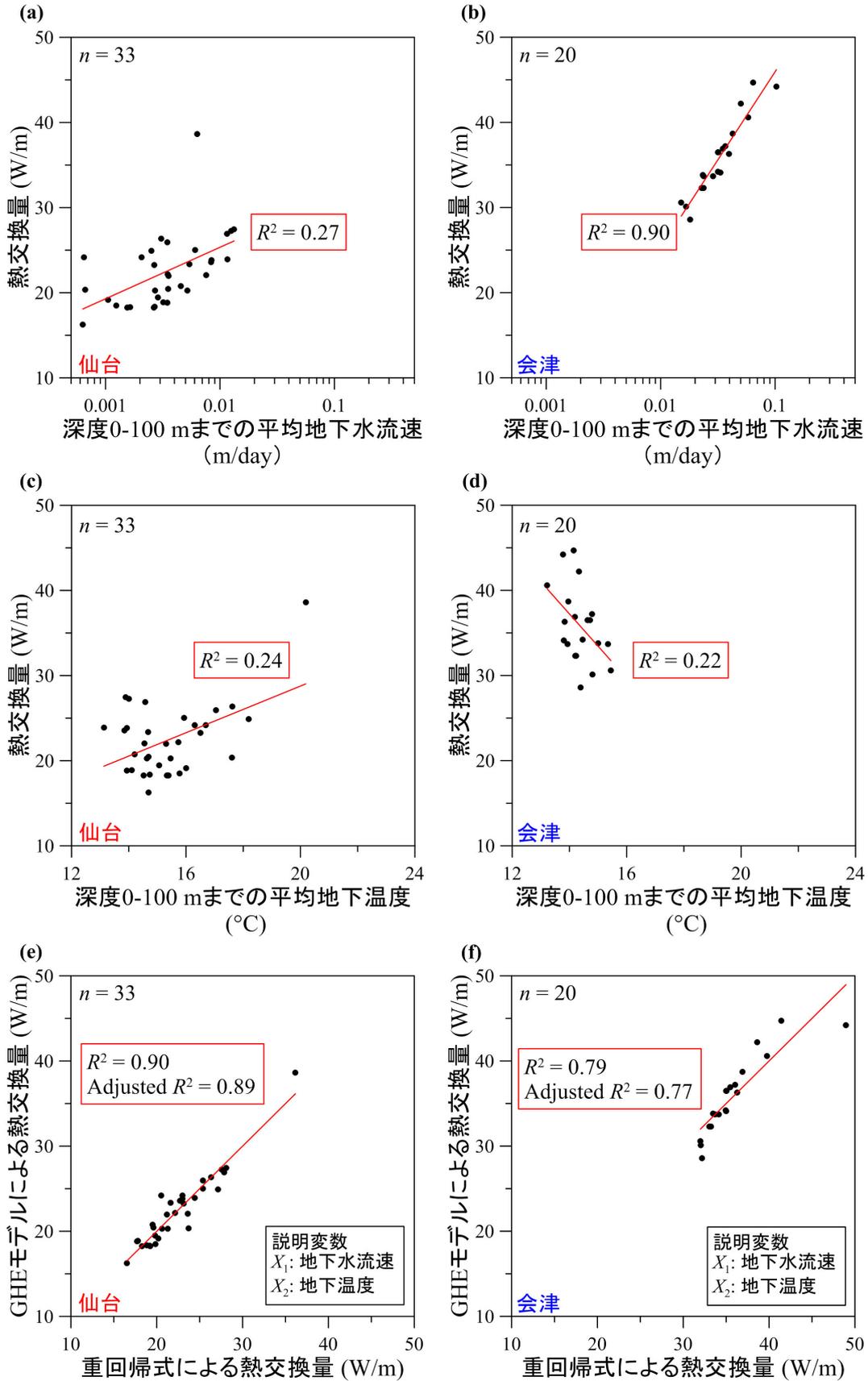
第2図 会津盆地における熱交換量マップ  
Shrestha et al. (2018) の結果をもとに修正。

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)