

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00646

研究課題名(和文) 会津盆地における地中熱利用のための地下変温層の温度変化に関する研究

研究課題名(英文) Study on temperature change in subsurface variable temperature zone for direct geothermal heat utilization in Aizu Basin

研究代表者

柴崎 直明 (SHIBASAKI, Naoaki)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：70400588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：会津盆地北部の水田地帯において、地下変温層の温度変化と地下水涵養効果の関係を明らかにし、浅層部の地中熱を効率的に利用するための地下温度管理の基礎資料を得ることを目的に本研究を実施した。地下水位と地下変温層中の地下水温および地中温度を測定した結果、地中温度の変動幅やパターンが場所により異なることが判明した。これは砂礫層の不均質性や水田の耕土層の厚さの変化が影響している可能性がある。また、地下水涵養による地下温度への影響は飽和帯ではほとんどなかったが、不飽和帯では大きいことが確認された。扇状地に位置する本研究地は地下水の移流を活用した地中熱利用システムの適地であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島県喜多方市では、「冬水田んぼ」による地下水の人工涵養実験が行われてきた。冬季に低温の水を涵養させると地中温度が低下する可能性が指摘され、それが再生可能エネルギーとしての地中熱利用にとって、利用効率の低下につながる懸念された。本研究の結果、本研究地において、涵養水による温度変化は、飽和帯ではほとんど影響を受けないことが明らかになった。また、扇状地に位置する本研究地は地下水の移流を活用した地中熱利用システムの適地であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The study was conducted at paddy-field areas in northern Aizu Basin to reveal the relationship between changes in ground temperature in variable temperature zone and effect of groundwater recharge, and to obtain basic data for management of ground temperature for efficient use of shallow geothermal heat. Groundwater temperature, ground temperature in variable temperature zone and groundwater level were measured in the study. The fluctuation range and pattern of ground temperature change were different by location, indicating heterogeneity of gravel layer and variable thickness of the cultivated soil layer at the paddy field may influence the temperature. It was also confirmed that the effect of groundwater recharge on the ground temperature was hardly observed in the saturated zone, but significantly observed in the unsaturated zone. The study area, located on an alluvial fan, may be a suitable site for direct geothermal heat utilization system that utilizes advection of groundwater.

研究分野：水文地質学

キーワード：地下水温 地中温度 地下変温層 地下水位 地下水流動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東日本大震災および福島第一原発事故後、福島県では再生可能エネルギーへの転換が急務となった。一方、会津盆地では毎年冬季に消雪用地下水利用が大量に揚水され、地下水位の異常低下による湧水の枯渇や井戸枯れが問題となっていた。喜多方市では地下水を人工的に涵養し地下水を増やす「冬水田んぼ」の実験が震災前から行われてきたが、再生可能エネルギーの一つである地中熱利用にとって、利用効率の低下につながるものが懸念された。そこで、地下浅層部の地下変温層の温度変化を詳細に把握し、地下の温度変化と地下水涵養効果の関係性を明らかにする必要性が出てきた。

2. 研究の目的

会津盆地北部の喜多方市では、冬季に水田から地下水を涵養させる「冬水田んぼ」が実験的に行われてきたが、冬季に低温の水を涵養させると地中温度が低下する可能性がある。一方、再生可能エネルギーとしての地中熱の利用は地下浅層部の地中熱を主な対象としており、地下浅層部の温度が低下すると地中熱利用効率が低下することが懸念される。そこで、本研究では「冬水田んぼ」実験地付近を対象地域として、地下浅層部の地下変温層の温度変化を実測により詳細に把握し、「冬水田んぼ」の影響を評価することで、温度変化と涵養効果の関係性を明らかにし、地中熱を効率的に利用するための地下温度管理の基礎資料を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 地下水観測孔における地下水位・地下水温測定

喜多方市街地北部の水田において、地下水観測孔(口径:50 mm, VP管)5地点(GW-1, GW-2, GW-3, GW-4, PF-5)を掘削した。PF-5は2015年12月に掘削し、それ以外の4地点は、2016年9月に掘削した。観測孔の深度は、GW-1およびGW-4は15 mであり、それ以外は10 mである。地下水位は上流側の方が下流側よりも深くなることが予想されたため、GW-1およびGW-4は、残りの3地点よりも井戸深度を深くした。深度別の地下水温測定(地下温度プロファイル測定)においては、スクリーン付近では、地下水温が乱れてしまう可能性があるため、スクリーン設置深度での温度は、地下温度の形成に関する考察には用いられていない(例えば、宮越ほか(2016)など)。そのため、スクリーンの影響を小さくするために、GW-1およびGW-4では、スクリーン深度を11~15 mとし、残りの3地点では、その深度を8~10 mとした。上記の地下水観測孔には、深度4 m以深から2 m毎に水中投入形測温抵抗体R902(チノー製、分解能:0.1)を設置した。また、観測孔には水圧式自記水位計S&DLmini(応用地質(株)製)を設置した。2016年10月から2020年3月にかけて、30分間隔で地下水位および観測孔内の水温を測定した。

(2) 地中温度計埋設孔における地中温度測定

前節と同地域にて、地中温度計埋設孔(掘削口径:66 mm)3地点(GT-1, GT-2, GT-3)を2016年9月に掘削した。上記の埋設孔の深度は、いずれも10 mである。地中温度計埋設孔GT-1, GT-2およびGT-3は、それぞれ地下水観測孔GW-1, GW-2およびPF-5から50 cm程度離れた所に位置する。地中温度計埋設孔は、深度10 mまで掘削した後、深度2 m以深から2 m毎に温度センサーをボーリング孔の中に入れ、砂礫で埋め戻した。また、2017年11月19日からは表層付近に温度センサーを設置し測定を開始した。設置深度は、温度センサーが完全に土に隠れる深度5 cm付近である。本報告では、表層付近に設置した温度センサーは深度0 mで測定したものとみなした。測定に用いた温度センサーは、土中埋設用測温抵抗体R903(株)チノー製、分解能:0.1)である。測定期間は、地下水観測孔と同様に2016年10月から2020年3月であり、測定間隔は30分である。

(3) スラグ試験および簡易揚水試験による透水係数の評価

地下水観測孔5地点(GW-1, GW-2, GW-3, GW-4, PF-5)において、2018年6月13日にスラグテストおよび約15分間の揚水試験(簡易揚水試験)を実施した。孔底に水圧式自記水位計を設置し、0.5秒間隔で地下水位を測定した。スラグテストでは、長さ1 mの塩ビ管(VP25)に砂礫を充填し、これを昇降させた時の水位変化からBouwer and Rice法を用いて透水係数を求めた。簡易揚水試験では、小型水中モーターポンプを用いて揚水を行った。揚水を開始してから15分後の水位降下量から比湧出量を求め、Logan法で透水量係数を算出し、ストレーナ長で除すことにより透水係数を計算した。

4. 研究成果

(1) 地下水位および地中温度変動

図1にGT-1における地中温度および地下水位変動を示す。測定した1年間の深度別での地中温度の平均値は、14程度を示した。月別の平均地中温度に着目すると、深度2 mでの平均温度は3月に最低値を示しており、深度とともに極値の遅れがみられ(最低値を示す月が深度とともに遅くみられ)、深度10 mでは6月に最低値を示した。一方で、月別の最高値について着目すると、深度2 mでの平均温度は8月に最高値を示し、その後は深度とともに最低値を示す月が遅れて表れた。深度10 mではGT-1, GT-3は12月に最高値を示し、GT-2は11月に最高値を示した。

気象庁（2020）の喜多方観測所でのアメダス気象データによる気温と地中温度とを比較した。気温は地中温度よりも温度変動が大きく、夏季は前者の方が後者よりも高く、冬季は前者の方が後者よりも低い。気温と深度 2 m の地中温度との差は、いずれの地点においても非灌漑期よりも灌漑期（5～9 月）の方が小さい傾向がみられた。灌漑期の不飽和帯での地中温度は降雨に応答した温度の上昇が確認された。一方で、飽和帯での地中温度は降雨に応答した温度上昇はみられなかった。また、非灌漑期の不飽和帯での地中温度変動についても、降雨に応答した温度上昇はみられなかった。

灌漑期の不飽和帯での地中温度変動について、GT-1 と GT-2 とを比較すると、降雨に応答した地中温度の上昇は、GT-1 が GT-2 よりも大きいことが確認された。GT-3 は、GT-1 や GT-2 と変動パターンが異なり、深度 6 m 以深では降雨以外の影響で地中温度が変動していることが確認された。7 月から 8 月の地中温度は、深度 2 m および 4 m では上昇傾向にあり降雨に応答した温度上昇が確認された。一方で、深度 6 m および深度 10 m の地中温度は降雨に拘らず上昇・低下を繰り返した。

地中温度計埋設孔 3 地点での深度別の地中温度を時系列的に並べたものを図 2 に示す。いずれの地点も、地下水位付近を境に温度勾配が変化しており、不飽和帯が飽和帯よりも温度勾配が大きい傾向がみられる。これは、空気が水よりも体積熱容量と熱伝導率が小さいためである。不飽和帯は飽和帯よりも体積熱容量が小さいため、表層の温度の影響を受けやすく、また熱伝導率が小さいため表層で変化した温度が深部まで熱が伝わりにくい。その結果、不飽和帯での温度勾配が大きくなったものと推測される。次に不飽和帯から飽和帯へ熱が移動するプロセスについて考察する。月別の温度変動の傾向に着目すると、GT-1 および GT-2 では深度 2 m での地中温度は 3 月頃に温度が最も小さくなり、5～6 月になると深度 10 m での温度が最小となる傾向を示す。これは、融雪水による表層から浸透した冷たい水が深部に向かって移流・拡散しているものと推察される。また、灌漑期では、深度 2 m での地中温度は 7～8 月頃に温度が最も大きくなり、11～12 月になると深度 10 m の温度が最大となる傾向を示す。これは、水田から浸透した温かい水の影響によるものと推測される。融雪水と灌漑水による熱が深度 2 m から深度 10 m まで到達する速度に着目すると、前者（融雪水）の方が後者（灌漑水）よりも深部に向かう速度が大きい。これは涵養される温度の密度の違いによるものと考えられる。雪解けによる冷塊水は、周辺地下水との密度差に応じて沈降する一方で、灌漑による温塊水は、周辺地下水よりも密度が小さいため、冷塊水よりも深度方向への熱の伝わる速度が小さいものと示唆される。

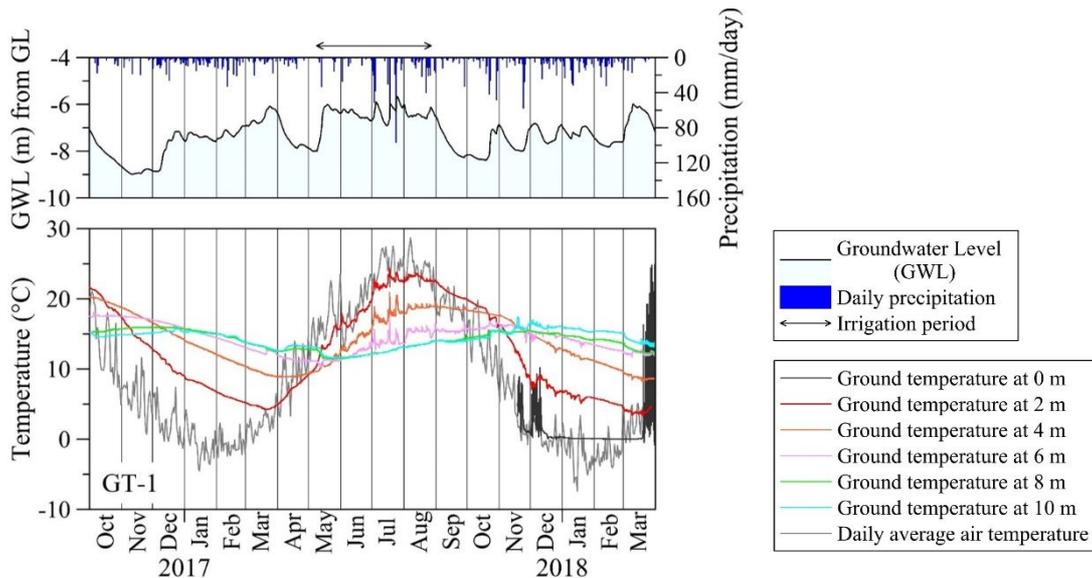


図 1 GT-1 における地下水位と地中温度変動

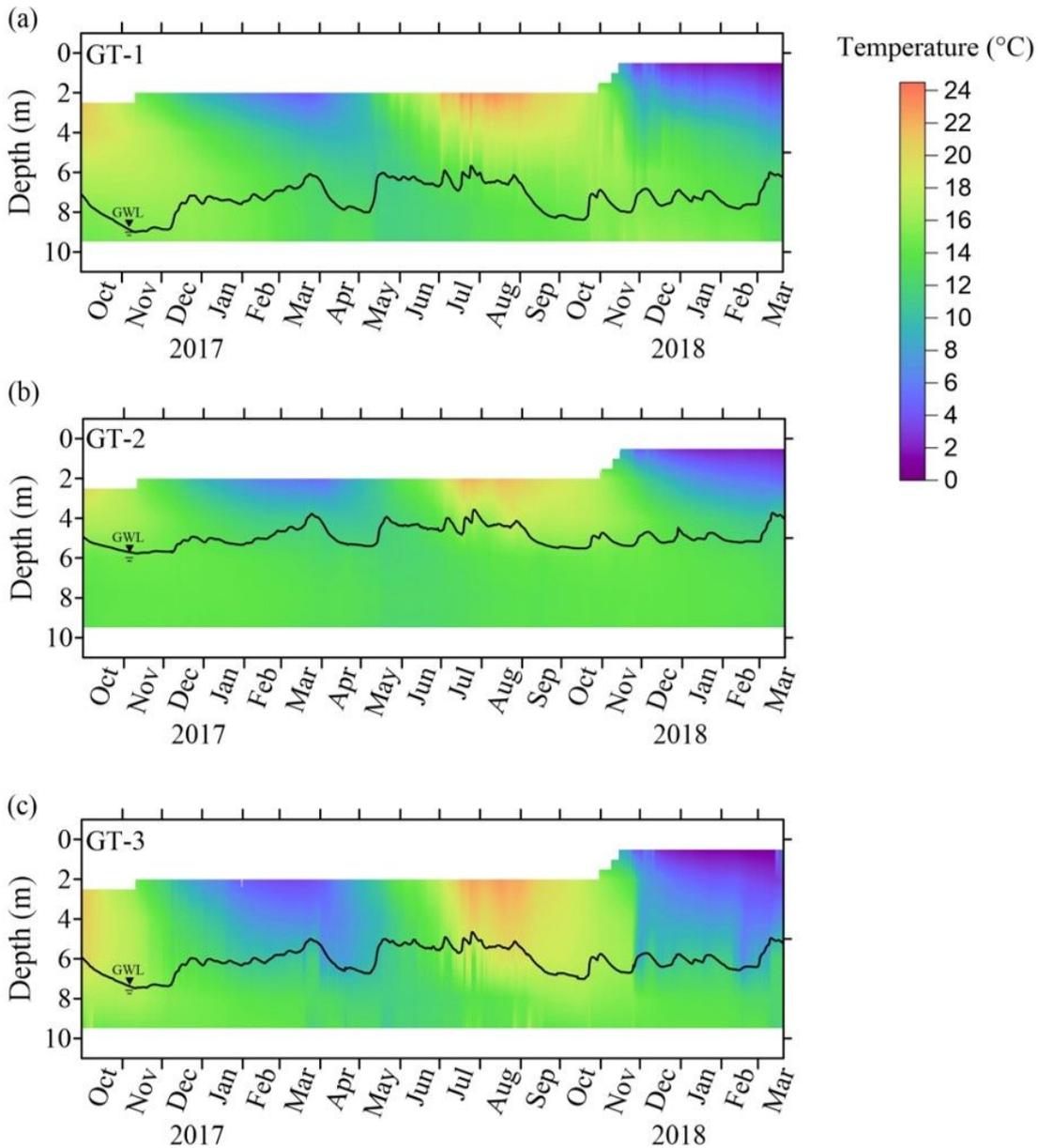


図2 深度別の地中温度の変動と地下水位の変動との関係

(2) 地下水温度測定による地中温度の代表性

GW-1とGT-1およびGW-2とGT-2で温度を比較したところ、スクリーン設置深度付近で温度差が大きくなった。この理由としては、スクリーン付近での地下水の流動による影響と推測される。地下水観測孔内では、地下水位が変動するとき、孔内の水がスクリーンを通過して動く。GW-1の地下水温度は、3月や5月では、深度12m、14mの方が深度8m、10mよりも高い。3月や5月の地下水位上昇時には、スクリーン設置深度(11~15m)付近に存在した温度の高い地下水が観測孔内で上昇したため、8m、10mの地下水温度が増加した。その結果、深度8mおよび10mでの地下水温度と地中温度の差が大きくなったものと推察される。以上より、地下変温層では、スクリーンの影響より、必ずしも地下水温度の測定で地中温度が代表されるわけではないことが見出された。なお、PF-5とGT-3との温度を比較すると、最大で4.9の温度差が生じており、GT-1やGT-2における温度差よりも大きい。温度差が大きい理由はGT-3が降雨以外の影響で地中温度が変動していることに起因するが、この理由については解析中である。

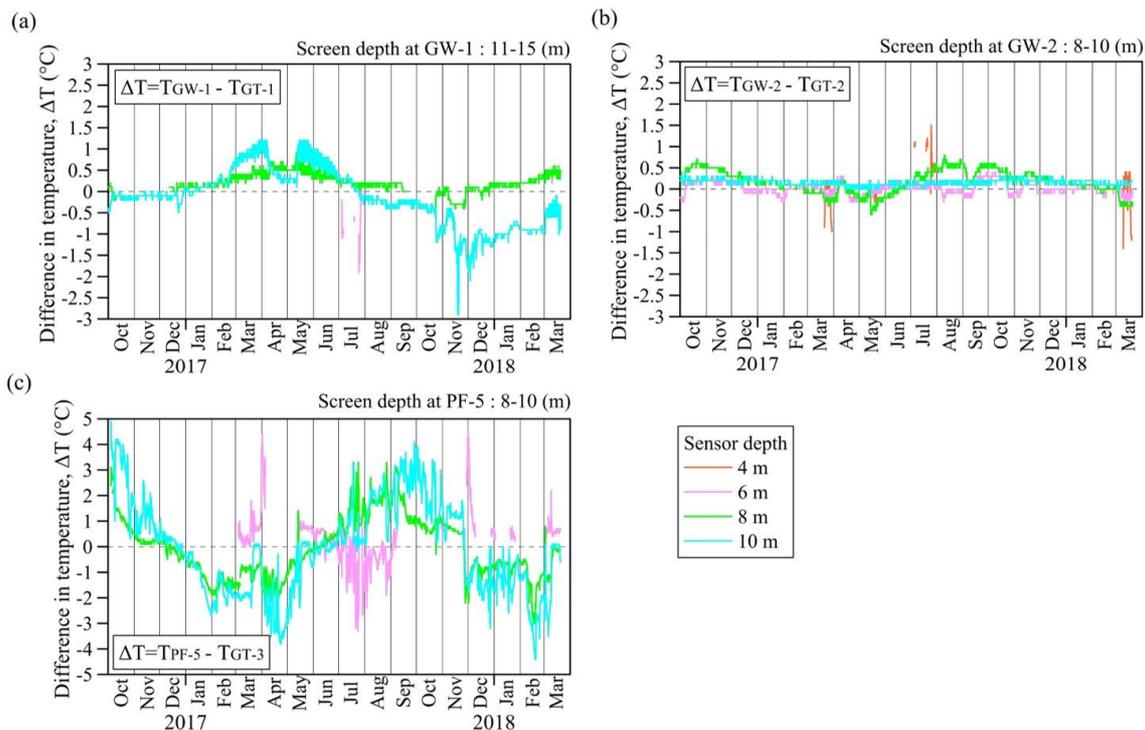


図3 地下水温と地中温度との比較

(a) : GW-1 と GT-1 , (b) : GW-2 と GT-2 , (c) : PF-5 と GT-3

(3) 喜多方市における地中熱利用の可能性

簡易揚水試験で得られた GW-1, GW-2, GW-3, GW-4 および PF-5 の透水係数はそれぞれ 43.6 m/day, 110.9 m/day, 364.3 m/day, 44.7 m/day および 161.9 m/day である。地下水面図から, GW-1, GW-2, GW-3, GW-4 および PF-5 の動水勾配がそれぞれ 0.016, 0.011, 0.010, 0.016 および 0.008 と推定され, 5 地点の地下水の浸透流速は, それぞれ 0.71 m/day, 1.22 m/day, 3.73 m/day, 0.69 m/day および 1.28 m/day と計算された。この流速は地中熱交換量を大きく増加させることができるため, 調査地域は, 地下水移流を活用した地中熱利用システムの適地と考えられる。

また本調査地における涵養水による温度変化は, 飽和帯ではほとんど影響を受けなかった一方で, 不飽和帯では大きく影響を受けることが確認された。深度 1~2 m を対象とした水平埋設型の地中熱利用システムにおいては, 上記の深度における温度変化がシステムの性能に影響を与えることが予想される。

引用文献

気象庁 (2020): 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2020年5月28日参照)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金子翔平・柴崎直明
2. 発表標題 喜多方市北部の水田地帯での不圧帯水層における地下水流動と地中温度との関係
3. 学会等名 地学団体研究会第72回総会（市原）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金子翔平・柴崎直明
2. 発表標題 喜多方市北部の水田地帯における地下変温層での地中温度プロファイルの特徴
3. 学会等名 地学団体研究会第71回総会（旭川）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金子翔平・柴崎直明
2. 発表標題 2016年冬季に測定した福島県喜多方市の季節変温層での地下水温と地中温度の特徴
3. 学会等名 日本地下水学会2017年春季講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----