

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K20954

研究課題名(和文) 地中熱利用の持続的な発展を実現する地下環境影響評価

研究課題名(英文) Environmental impact assessment of ground source heat pump system for the sustainable usage

研究代表者

齋藤 健志 (Saito, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30735668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、通常の冷暖房運転を含む、いくつかの条件下で地中熱ヒートポンプを運転し、特に不飽和帯における二酸化炭素ガスの動態と複数の帯水層における地下水質に対して、本システムの利用が及ぼす影響を評価することを目的とした。短期的な冷暖房運転では、周辺地下の大きな温度変化は認められず、本研究で明らかにした温度変化と二酸化炭素の地表面放出量および水質成分濃度変化量の関係性を考慮しても、周辺の地下環境には影響を及ぼさないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地中熱ヒートポンプによる冷暖房運転における周辺地下の温度変化は、研究例に極めて乏しく、その詳細は明らかにされていない。本研究では、その温度変化に関する知見の集積と、温度変化が不飽和帯における二酸化炭素ガスの動態や複数の帯水層における地下水質に及ぼす影響についても明らかにしており、研究成果の学術的意義は高い。また、地中熱ヒートポンプの利用時における環境影響評価を行い、短期的には地下環境への影響はないという知見が得られたことから、システムの今後の持続的な利用と発展に向けて、社会的にも十分に意義のある研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to evaluate effect of ground source heat pump (GSHP) system operation on carbon dioxide behavior in vadose zone and groundwater quality in several aquifers. There was no significant change in subsurface temperature by short-term operation of GSHP system. Therefore, considering the relationship between subsurface temperature change and surface emission of carbon dioxide and groundwater quality revealed in this study, it was suggested that GSHP system operation dose not significantly affect subsurface environment.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：地中熱利用 環境影響評価 地下温度 二酸化炭素 地表面放出 ホウ素 ヒ素

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、新たな冷暖房システムとして、地下浅層の低温熱エネルギーである地中熱を利用した地中熱ヒートポンプ(以後、GSHPとする)システムが、世界的に普及し始めている。地中熱は、太陽光や風力など他の再生可能エネルギーと比較しても、天候や地域などに左右されない安定的なエネルギーである。本システムは、省エネルギー効果やCO<sub>2</sub>排出量の削減効果など多数のメリットも有し、近年、再生可能エネルギーの注目度が高いこともあり、その更なる導入と持続的な利用が世界的にも強く望まれている。

一方、システムの稼働において、冷房運転時には、地下に排熱を放出する特性から、少なからず地下の温度に影響を与える。しかし、地下温度の観測事例は乏しく、周辺地下への熱的影響は、十分に解明されていない。また、地下の温度上昇は、地下の物理的・化学的・生物学的プロセスに影響を及ぼす。例えば、地下水質に注目すると、化学物質の溶解度や吸着脱離特性、生物化学的反応、そして、それらの速度などまで変化が生じる可能性があり、地下水質への悪影響が想定される。別の例としては、不飽和帯に着目した場合、二酸化炭素ガスの動態やその地表面からの放出など、温度上昇による悪影響も考えられる。しかしながら、GSHPシステムの稼働に伴う、これら地下環境への影響は、研究事例に極めて乏しく、その詳細は解明されていないのが現状である。

なお、GSHPシステムに関わる既往研究は、その大部分が省エネルギー効果やCO<sub>2</sub>排出量の削減効果、省コスト性に関わる検討など、効率的な稼働・運用を実現するためのものである。今後は、システムの持続的な利用と発展に向けて、特に地下環境影響に関する研究は無視できず、法的規制やガイドラインなどへの科学的な根拠にもなり得るため、その早急な知見の集積が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、特に不飽和帯における二酸化炭素ガスの動態と複数の帯水層における地下水質に着目し、いくつかの条件下でGSHPシステムの運転を行い、それら二酸化炭素ガスの動態と地下水質に、本システムの利用が及ぼす影響を評価することを目的とした。

### 3. 研究の方法

ここでは、不飽和帯における二酸化炭素ガスの動態と複数の帯水層における地下水質に着目するが、まずは特に温度上昇時におけるそれらの変化を把握するため、かなり強い冷房運転を模擬した現場試験を実施した。

試験サイトは、埼玉大学(埼玉県さいたま市)構内に設置し、深度50mまで高密度ポリエチレン製の地中熱交換器(熱源となる)を埋設した。この地中熱交換器から水平距離で1mおよび10m(以後、それぞれ、W1、W10とする)の場所に、二酸化炭素ガスの動態観測に用いる機材を設置した。具体的には、二酸化炭素ガスの地表面放出量を観測するためのチャンパーベース、そして、深度10cm、25cm、40cm、65cm、90cmに、温度センサーと水分センサー、また、土壌ガス採取用のPTFE製ボールフィルターを埋設した。一方で、地下水観測用の井戸は、地中熱交換器から水平距離で1m、2m、5m、10m(以後、それぞれ、W1、W2、W5、W10とする)の場所に設置し、各井戸には、深度5m程度のインターバルで、温度センサーが取り付けられている。観測対象とした帯水層は、不圧帯水層(非海成層・粘土~シルト層:深度2m付近)、被圧帯水層(海成層・シルト~砂層:深度17m付近)、被圧帯水層(非海成層・砂礫層:深度39m付近)である(以後、それぞれ、不圧帯水層、被圧帯水層(海成層)、被圧帯水層(非海成層)とする)。

不飽和帯の二酸化炭素ガスについて、地表面からの放出量は、クローズドチャンパー法に基づいて測定をした。また、土壌内のガス移動は、実験室で測定した土壌ガス拡散係数と現場での各深度から得られた土壌ガス中の二酸化炭素濃度などから、Fickの法則に基づき推定をした。地下水質については、井戸容量の数倍をパーシした後、各帯水層から採水をし、ただちに、pH、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素)、ORP(酸化還元電位)を測定した。その後、実験室でろ過をし、イオンクロマトグラフ、TOC(全有機炭素)分析計、ICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析計)を用いて、各種の水質成分(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>:カリウムイオン、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>:カルシウムイオン、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、DIC:溶存無機炭素、DOC:溶存有機炭素、Li:リチウム、B:ホウ素、Al、Si:ケイ素、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As:ヒ素、Se、Sr:ストロンチウム、Cd、Sb、Pb)を定量した。これら現場でのモニタリング作業は、月に数回程度の頻度で行ってきた。

以上の作業を通して、特に地下の温度上昇が、二酸化炭素ガスの土壌内から地表面にかけての移動量、そして、3つの異なる帯水層の地下水質に及ぼす影響をそれぞれ定量的に評価した後、通常の冷暖房運転に近い条件下でGSHPシステムを稼働した。このとき、地下の温度を連続的にモニタリングすることで周辺への温度影響を確認し、地下の温度と不飽和帯における二酸化炭素ガスの動態および複数帯水層の地下水質に関する定量的評価の結果を活用することで、周辺の地下環境への影響を評価した。

### 4. 研究成果

不飽和帯の二酸化炭素ガスについて、地表面からの放出量は、深度10cmの温度上昇に伴い、

上昇する傾向が認められた。ここでは、それほど明瞭な相関関係が得られたわけではないが、その結果を図 1 に示す。また、土壌内におけるガス移動量の評価には、現場での各深度から得られた土壌ガス中の二酸化炭素濃度などを用いており、この二酸化炭素濃度と地下温度の関係性に対しては、基本的に相関傾向が認められた。図 2 には、その相関性が最も高かった深度 40 cm のデータを示した。ただし、土壌内におけるガス移動量の推定には、二深度間の距離と二酸化炭素ガスの濃度差などを用いているが、このガス移動量には、明瞭な温度影響が確認されなかった。

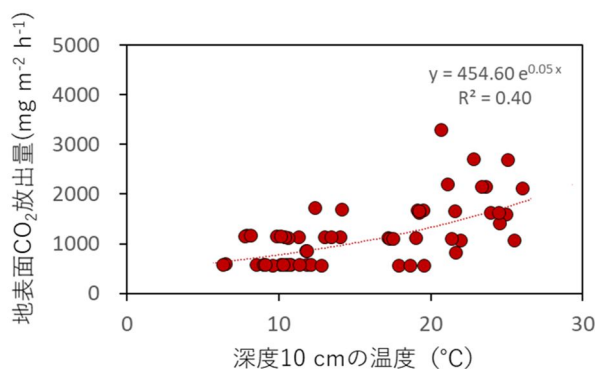


図 1 地表面 CO<sub>2</sub> 放出量 (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) と深度 10 cm における温度 ( ) との関係性 (斎藤ほか (投稿中) から引用・改変)

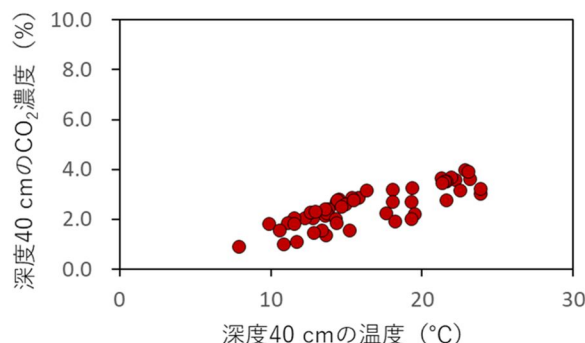


図 2 深度 40 cm の CO<sub>2</sub> 濃度 (%) と温度 ( ) の関係性 (斎藤ほか (投稿中) から引用・改変)

3つの異なる帯水層の地下水質については、特に環境基準に規定される水質成分に着目すると、不圧帯水層では B と As、被圧帯水層 (海成層) では B、被圧帯水層 (非海成層) では As に対して、それぞれ温度上昇に伴う濃度の上昇傾向が認められた。その結果の一例としては、被圧帯水層 (海成層) の B、被圧帯水層 (非海成層) の As について、それぞれを図 3 に示す。その他、3つの異なる帯水層において、共通して変化が認められた水質成分は、Li、Si、Sr、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>であった。なお、Sr と Ca<sup>2+</sup>のみは、温度上昇により濃度が減少する傾向を示した。

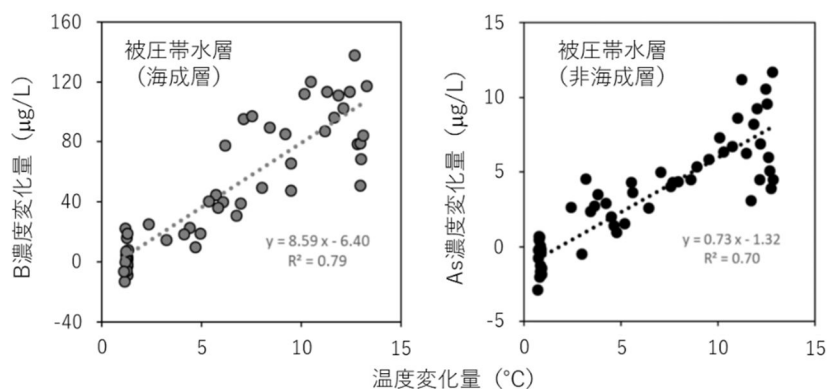


図 3 被圧帯水層 (海成層) の B と被圧帯水層 (非海成層) の As に対する濃度変化量 (μg/L) と温度変化量 ( ) の関係性 (斎藤ほか (2019) より引用・改変)

通常の冷暖房運転に近い条件下での GSHP システム稼働について、まずは暖房運転を模擬して、毎日朝 8 時 30 分 ~ 夕方 17 時 30 分まで、13 程度もしくは 7 程度 (いずれも、ピーク時

の温度)の冷水をそれぞれ2~3ヶ月間、地中熱交換器に循環する試験を行った。その後、冷房運転として、室内エアコンを28℃に設定し、システムを2ヶ月間程度運転してきた。その間の地下温度は、連続的にモニタリングしている。その結果として、暖房運転を模擬した運転、そして、冷房運転において、例えば、W1では、その地下温度に大きな変化は、認められなかった。図4には、一例として、この期間中の被圧帯水層(海成層)におけるW1ならびにW10の温度変化を載せる。W10では、かなり強い冷房運転を模擬した試験の影響を受けておらず、ほぼ自然条件下での温度変化を示していた。一般には、深度10m程度以深では、地下温度の季節変化は認められない。W1においては、暖房運転を模擬した試験では、ごく僅かに、温度低下が早まるような傾向が確認された。その一方で、冷房運転でも同様に、僅かに温度が上昇する傾向が認められている。ただし、いずれも大きな温度変化ではないため、図3を参照しても、地下水質には、影響はないものと考えられる。現在、継続して冷房運転を行っており、今後は、より長期的な周辺地下への温度影響をモニタリングすることが重要である。この冷房運転後は、室内エアコンを20℃に設定し、暖房運転を継続する予定である。

なお、二酸化炭素ガスの動態を検討した不飽和帯では、深部の帯水層とは異なり、大気との温度変動に応じて、類似した温度変化が年間で観測された。言い換えると、自然の温度変化が認められるが、上記の各種GSHPシステム稼働試験では、その自然の変動範囲を超えるような温度変化は確認されなかった。したがって、二酸化炭素の地表面放出量にも、システム稼働の影響はないものと考えられる。

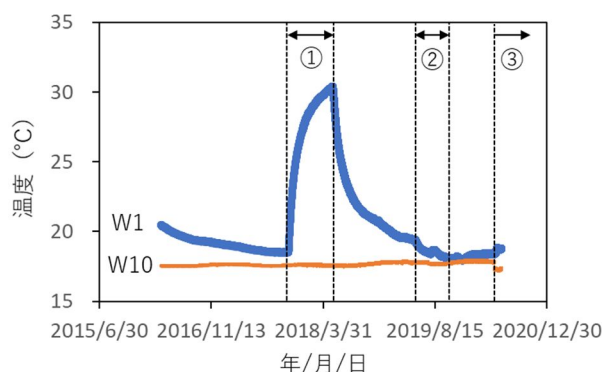


図4 被圧帯水層(海成層)のW1およびW10における温度(°C)の時系列変化(①:かなり強い冷房運転を模擬した試験の期間、②:暖房運転を模擬した試験の期間、③:設定28℃の冷房運転を行った期間)

<引用文献>

斎藤 健志、川本 健、小松 登志子、荒川低地における不飽和帯の温度変化と二酸化炭素の生成と消失、投稿中  
 斎藤 健志、濱本 昌一郎、竹村 貴人、小松 登志子、地下熱環境攪乱が地下水質に及ぼす影響評価に向けた原位置長期熱負荷試験、第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、2019、29~32

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohkubo Satoshi, Saito Takeshi, Abul Kalam Azad Muhammad, Kawai Hiromitsu, Suda Wataru, Kore-eda Shin, Hamamoto Shoichiro, Saito Hirotaka, Takemura Takato, Komatsu Toshiko, Ohnishi Jun-ichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Microbial Community Structures in Terrestrial Subsurface Sediments from the Southern Kanto Plain, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geomicrobiology Journal	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01490451.2020.1743390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Saito Takeshi, Spadini Lorenzo, Saito Hirotaka, Martins Jean M.F., Oxarango Laurent, Takemura Takato, Hamamoto Shoichiro, Moldrup Per, Kawamoto Ken, Komatsu Toshiko	4. 巻 722
2. 論文標題 Characterization and comparison of groundwater quality and redox conditions in the Arakawa Lowland and Musashino Upland, southern Kanto Plain of the Tokyo Metropolitan area, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 137783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.137783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ueshima Masato, Takemura Takato, Saito Takeshi, Ito Yoshiharu, Hamamoto Shoichiro, Saito Hirotaka, Komatsu Toshiko	4. 巻 76
2. 論文標題 Relationship between trace elements and depositional environments in shallow sediments: a case study from Southern Kanto Plain, Central Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Environmental Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12665-017-6968-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Brunetti Giuseppe, Saito Hirotaka, Saito Takeshi, Simunek Jiri	4. 巻 208
2. 論文標題 A computationally efficient pseudo-3D model for the numerical analysis of borehole heat exchangers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 1113~1127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apenergy.2017.09.042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 斎藤健志、濱本昌一郎、竹村貴人、上島雅人、川本健、小松登志子	4. 巻 74
2. 論文標題 温度変化が堆積物からのホウ素およびヒ素の溶出量とその存在形態に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集G	6. 最初と最後の頁 8~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.74.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saito Takeshi, Hamamoto Shoichiro, Ueki Takashi, Ohkubo Satoshi, Moldrup Per, Kawamoto Ken, Komatsu Toshiko	4. 巻 94
2. 論文標題 Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 120~127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2016.01.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計13件(うち招待講演 1件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 斎藤健志・濱本昌一郎・竹村貴人・小松登志子
2. 発表標題 地下熱環境攪乱が地下水質に及ぼす影響評価に向けた原位置長期熱負荷試験
3. 学会等名 第13回環境地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saito, T.
2. 発表標題 Overview of chemical contaminant behaviours in groundwater and subsurface thermal pollution as a new contamination issue
3. 学会等名 7th International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saito, T., Takemura, T., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T.
2. 発表標題 Long-term monitoring of groundwater quality during in-situ artificial heating and natural cooling in the Arakawa Lowland near the Tokyo Metropolis, Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saito, T., Sugie, R., Takemura, T., Ohkubo, S., Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T.
2. 発表標題 Temperature effect on groundwater quality during in-situ, long-term subsurface heating and cooling in two confined aquifers in Kanto Area, Japan
3. 学会等名 44th Annual Congress of the International Association of Hydrogeologists (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Saito, T., Saito, H., Takemura, T., Spadini, L., Oxarango, L., Martins, J., Hamamoto, S., Ohkubo, S., Kawamoto, K., and Komatsu, T.
2. 発表標題 Long-term monitoring of groundwater quality in Arakawa Lowland and Musashino Upland, Southern Kanto Plain, Central Japan
3. 学会等名 6th International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saito, T., Ueshima, M., Kawamoto, K., Moldrup, P., and Komatsu, T.
2. 発表標題 Ground source heat pump systems and the environmental risks
3. 学会等名 16th Science Council of Asia Conference (国際学会)
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----