

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12364

研究課題名（和文）都市域地下熱環境の持続性評価に向けた地下温暖化の実態解明と定量評価

研究課題名（英文）Evaluation of subsurface warming for improving sustainability assessment of subsurface thermal environment in urban areas

研究代表者

宮越 昭暢（Miyakoshi, Akinobu）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・企画主幹

研究者番号：30392666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：国内三都市域（東京・大阪・熊本地域）の地下温暖化の実態について、地下水観測井の地下温度データ解析により定量的に明らかにした。既往および新規取得データに基づく地下温度上昇率は都市部で高い傾向が認められたが、郊外部では上昇率は低い。浅部だけでなく深部にも温度変化を検出された地点が認められた。地下温暖化の形成機構には都市化の程度と地下水流動変化の影響が大きく寄与していると考えられた。さらに地下温度上昇率には、年単位以下の短期的な変動だけでなく長期的な変化傾向も認められ、地下温暖化傾向が加速している地点も確認された。過去20年程度において地下温暖化が複雑に変化しつつ長期に進行していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、既往研究において国内外都市域の地下温暖化が報告されているが、一般に地下環境の直接的な観測は難しいため、観測データに基づいて、中心-郊外を含む都市域を広く対象とした研究例は少ない。本研究は地下水観測井の活用によって観測の困難さを克服し、新規データを含む高品質なデータを取得した。これらデータに基づく解析により微細な温度変化の検出が可能となり、観測データに基づいて地下温暖化の実態を明らかにすることができた。本研究の学術的な意義は、地下温度上昇率等の三都市域における地下温暖化指標の分布と変化を報告できたことであり、見えない地下環境の変化について観測データに基づいて顕在化した社会的意義もある。

研究成果の概要（英文）：This study has reported on subsurface warming down to approximately 100 m below the surface in three urban areas, that is, Tokyo, Osaka, and the Kumamoto area, based on analysis of subsurface temperature datasets from groundwater monitoring wells. Regional differences in the warming ratio and influence from depth between urban and suburban area were found. Furthermore, it was suggested that the results reflected differences in the effects of urbanization and groundwater flow. The warming ratio in the subsurface temperature was found to vary with time at some sites. This indicated that the subsurface temperatures were rising over the long-term alongside complex changes.

研究分野：水文地質学

キーワード：地下環境 地下温暖化 都市域 地下水流動 地下水観測井 都市化 人間活動

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

地下環境は温暖化傾向にあり、その要因として地球温暖化や都市化の影響が指摘されている(谷口, 2010 など)。地下温度は深部からの熱流量の影響だけでなく、地上で生じた環境変化の影響が地表面を通して地下に伝播して地下熱環境の変化を引き起こす。一般に、地下温度に日変化や季節変化が認められるのは深くとも地下 20m 程度であり、従来は恒温層以深の温度は変化に乏しいと考えられていた。しかし、長期に生じている地表面温度の上昇傾向は、大深度かつ広域に地下温度を上昇させている。例えば、20 世紀半ば以降の急激な地球温暖化が地下温度に与える影響が 1970 年代以降明らかになっており、地下温度データから逆解析して求めた過去数世紀の古気候復元結果が全球規模で報告されている(Huang et al., 2000 など)。

一方、地球規模の気候変動だけでなく、都市化も地下熱環境に影響を与えており地下温暖化の要因となる。世界の年平均気温偏差から地球温暖化として報告される気温上昇率は過去 100 年あたり約+0.74 であるが(気象庁, 2022)、ニューヨークや東京等、世界各地の都市域の気温上昇率は世界平均よりも格段に大きく都市化の影響が報告される。国内では多くの気象観測所で +1.0 /100 年を超える気温上昇率が確認されており、地方都市を含めて都市化の影響が広く及んでいることが伺える。都市域では、ヒートアイランド現象のような都市特有の熱環境が地表面を通じて地下熱環境に影響を与えている。また、都市中心部では地下空間がインフラや交通、商業空間として高度に利用されており、地下構造物からの廃熱の影響を示唆する地下温度変化の観測結果が報告されている(宮越ほか, 2019 など)。さらに地下環境においては、地下水流動に伴う熱移流の影響も地下温度分布に反映されることが知られている。都市域では地下水開発や規制により地下水流動が複雑に変化しており、地下熱環境は複雑に変化していることが予想される。国内では、東京や大阪周辺の地下温度分布に関する研究が報告されているが事例は少なく、他の都市域を含めて地下熱環境の評価が大きく進んでいるとは言い難い。

環境省による「地中熱利用にあたってのガイドライン」の策定(2015 年)と改定により、国内でも地中熱利用の普及が促進されつつある。地中熱利用が進む欧州各国の事例では、地中熱利用に伴う地下温度の上昇も報告される一方で、上昇した地下温度の有効利用も検討されており、都市域の地下熱環境評価には資源的観点も求められる。また、地下熱環境の持続性評価には都市毎の特性を考慮した将来予測が必要であるが、その初期条件となる地下温暖化の実態は未だ明らかとなっていない。都市域における地下熱環境の持続性を評価するためには、地下温暖化の実態である地下温度上昇率の分布とその変化を把握する必要がある。

2 . 研究の目的

本研究は都市域地下熱環境の持続性評価に向けて、選定した国内の都市域を対象に観測データに基づいた解析と評価により地下温暖化の実態解明を目的とする。対象都市域としては、東京・大阪・熊本の各地域を選定した。選定理由は、東京地域は首都圏として都市域の地下環境評価に適しており、熊本地域は地下水利用が盛んな地域として地下水流動の影響評価に適していると考えられたためである。大阪地域はコロナ禍において現地調査の実施が困難となり、両地域の比較事例として選定した。

これら三都市域において、地下水観測井で測定された地下温度データに着目し、既往研究で報告される過去データと本研究で実施する現地調査によって取得する現在データの比較解析によって地下温度上昇率を把握し、これらの分布に基づいて地下 100m 程度までの地下温暖化の実態を明らかにする。また、観測地点周辺の土地利用を踏まえた都市部 - 郊外部の違いや地下水流動の変化に基づいて地下温度上昇率の分布特徴や経時変化を把握し、地下温暖化の形成要因を考察する。

3 . 研究の方法

【研究】三都市域における地下温度既存データの収集と再評価、立地特性の把握：東京地域にて 10 地点、大阪地域にて 2 地点、熊本地域にて 9 地点の過去データを収集した。各データについて観測井の構造、観測状況や精度等のメタデータを追加して整理した。また、観測井周辺情報の収集：評価結果を都市部 - 郊外部に区分するため、観測井周辺の土地利用分類情報を収集した。特に観測井から 1km 範囲の土地利用に着目して、土地利用細分メッシュ(1/10 細分メッシュ)に基づき観測井の立地条件を区分した。

【研究】最新データの追加と地下温度モニタリングによる変動把握：現地調査を実施し過去データを収集した観測井と同じ地点において最新データを取得した。ただし、コロナ禍の影響により現地調査の実施に制約が生じたため、熊本地域は過去 2 時期のデータ、大阪地域は過去 1 時期のデータを適用した。東京地域では現地調査を実施し最新データを取得したとともに、都市部 - 郊外部の 5 地点において各 1~3 深度の地下温度モニタリングを実施してデータを取得した。

【研究】地下温度上昇率の分布特徴と変化の把握、形成要因の検討：研究 の成果に基づいて、三都市域の観測井において地下温度上昇率を明らかにした。特にモニタリングを実施した観測井においては、地下温度上昇率の微細な変動も把握した。これら地下温度上昇率について、都市部 - 郊外部における分布と経時変化の特徴を把握し、地下温暖化の形成要因と地下熱環境持続性について考察した

4. 研究成果

(1) 三都市域における地下温度既存データの収集と再評価，立地特性の把握【研究】

各地域の観測井の既存データを収集した(図1, Taniguchi et al. (2003), Miyakoshi et al. (2020); 宮越ほか(2019; 2021; 2022; 2023) また, 各観測井について, 国土数値情報土地利用細分メッシュ(国土交通省)を用いて, 都市化の程度を把握した。観測井から周辺1kmの範囲について, 建物用地, 交通用地の占める面積が概ね7割以上である地点を「都市部」, 概ね4~7割程度である地点を「中間部」, 概ね4割以下である地点を「郊外部」として立地特性を把握した(図1)。

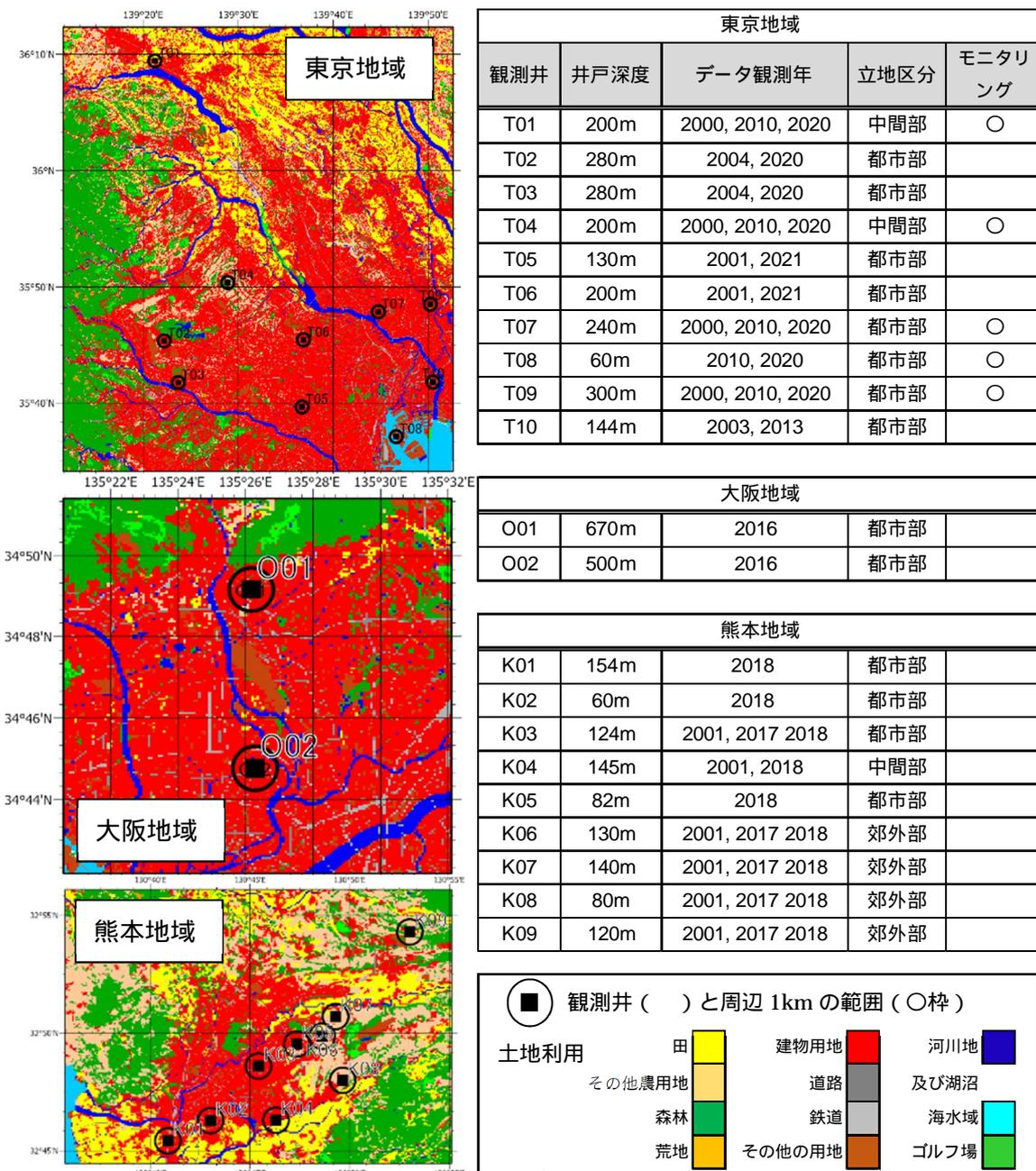


図1 対象三都市域(東京地域, 大阪地域, 熊本地域)のデータ収集状況・観測地点一覧
土地利用図: 国土数値情報土地利用細分メッシュ(国土交通省) <https://nlftp.mlit.go.jp/> を加工して作成, 熊本地域: Taniguchi et al. (2003), Miyakoshi et al. (2020), 東京地域: 宮越ほか, (2019), (2020)

(2) 最新データの追加と地下温度モニタリングによる変動把握【研究】

東京地域の10地点において現地調査を実施し, 最新データ(2019~2021年)を取得した(図1)。また, 東京地点の5地点において地下温度モニタリングを実施し, 地下温度の微細な変動と地下温度上昇率を把握した(図2)。モニタリングデータ(期間: 2019~2022年)において, 最小二乗法による近似直線の傾きから温度上昇率として深度30m: $1.5 \sim 5.7 \times 10^{-2}$ /年 ($R^2: 0.8 \sim 0.9$; T07, T08, T09), 深度40m: $1.5 \sim 2.4 \times 10^{-2}$ /年 ($R^2: 0.8 \sim 0.9$; T01, T07, T08) を求め, これらの分布や経時変化の特徴を報告した(宮越ほか, 2019; 2021; 2022; 2023)。

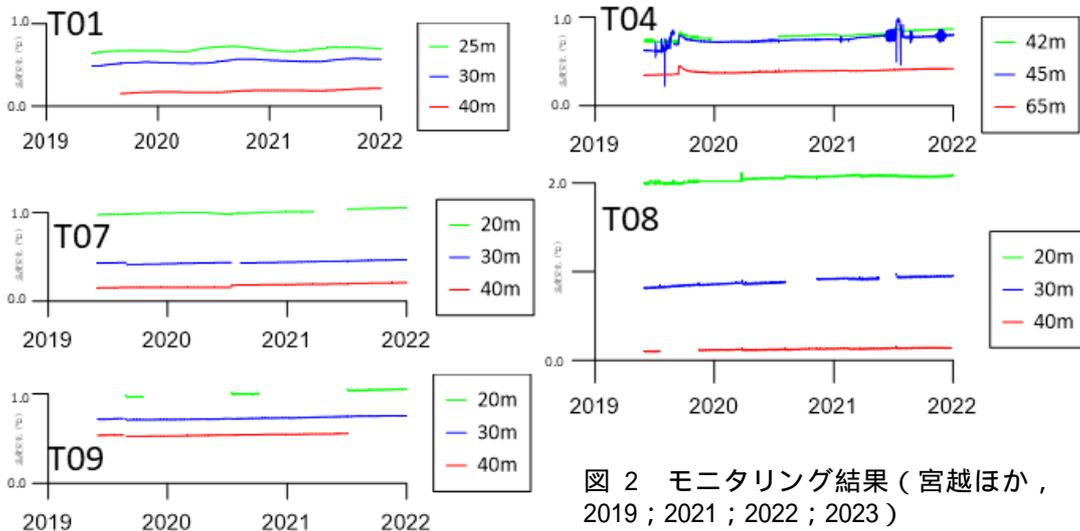


図 2 モニタリング結果（宮越ほか，2019；2021；2022；2023）

(3) 地下温度上昇率の分布特徴と変化の把握，形成要因の検討【研究】

熊本地域における地下水流動の影響評価

熊本地域において地下水流動が地下温度分布に与える影響を検討して報告した（Miyakoshi, et al., 2020）。当該地域においては 2016 年熊本地震に一部地域の観測井で地震後に一時的な地下水位の低下が報告されている。地下水位低下が報告された K03 において，地震後 2017 年に一時的な地下温度の低下が確認されたことが知られていたが，過去データを再評価して地下温度プロファイルを解析することで鉛直下向きの地下水流動成分に伴う熱移流の影響が検出した。地震に伴う一時的な地下水流動の変化が地下温度の変化の要因であると考えられた。長期的な地下温暖化の検討においては，このような一時的な地下温度変化を除外する必要がある。収集した既往データ（図 1）より 2017 年のデータを除外して，2001 年と 2018 年データから深度 40m における地下温度上昇率：約 0.9×10^{-2} /年 が推定された。

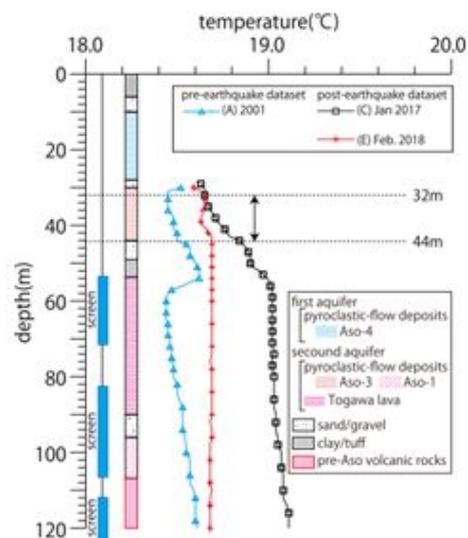


図 3 地下温度プロファイルの変化（K03）

大阪地域の地下温度プロファイルと地下温度上昇の推定

観測井 001 と 002 の二地点において既往データ（2016 年）から地下温度上昇を推定した。地球温暖化や都市化に伴う地表面温度上昇の影響により浅部地下温度が上昇し，地下温度プロファイルには逆転部が形成される。地表面温度の日変化や季節変化の影響を除いて，地下温度は一般に深度が増すと増温するが，逆転部においては地表面に近い浅部の方が高温となる。001 の地下温度プロファイル（図 4）では逆転部が認められないが，地下温度が複雑に変化していることから揚水等の人為的な地下水流動変化の影響を反映している可能性がある。002 では，深度 10～40m まで逆転部が確認され，地下温暖化が確認された。地表面温度上昇の影響が相対的に小さいと期待できる深度 80～130m のデータに基づいて最小二乗法による近似直線の傾きから，地表面温度上昇の影響が及んでいない深度 30m の地下温度を推定した。この推定値と観測値との差分により 1.1 程度の温度上昇が推定された。

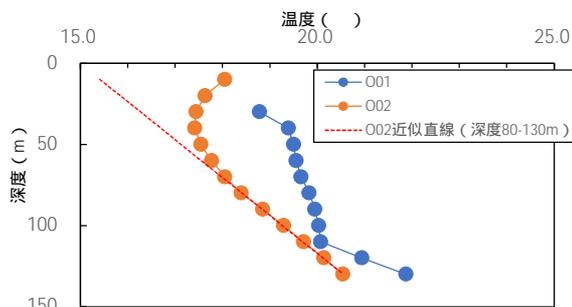


図 4 地下温度プロファイル（001，002）

地下温度上昇率の分布特徴と変化の把握，形成要因の検討（宮越ほか，2019；2021；2022；2023）

過去データと最新データの比較から熊本地域および東京地域の地下温度上昇率を推定した。熊本地域においては，上記による地下水流動の影響の検討結果を踏まえ，2017 年のデータを除外した。地下温度上昇率について，熊本地域の都市部： $0.4 \sim 0.9 \times 10^{-2}$ /年（K03，深度 30～

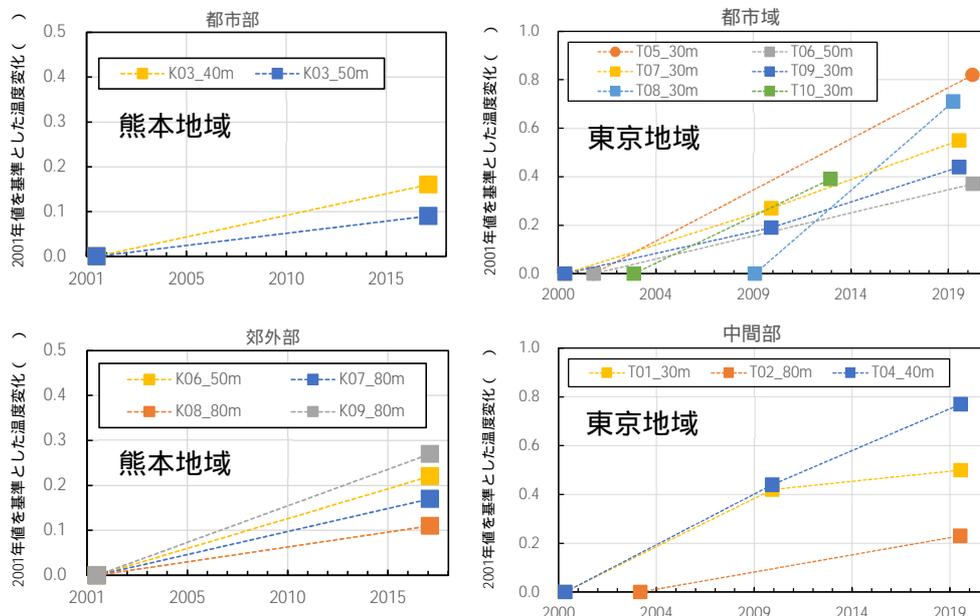


図5 実測データから推定した長期地下温度上昇率

40m), 同郊外部: $0.6 \sim 1.6 \times 10^{-2}$ /年 (K06~09, 深度 50~80m) が推定された。東京地域の都市部: $0.9 \sim 6.9 \times 10^{-2}$ /年 (T05~10, 深度 30~50m), 同中間部: $1.4 \sim 3.9 \times 10^{-2}$ /年 (T01, T02, T04, 深度 30~80m) 推定された。東京地域において熊本地域よりも温度上昇率が高いことから, 地下温暖化は都市化の影響が強く反映することを示唆している。両地域共に, 郊外部では地下温度上昇率は都市部よりも低い, 地下温度上昇は深部でも確認されることから, 郊外部の地点によっては, 地下水流動の影響が強く反映することも示唆している。

一方, 東京地域では地下温度プロファイルの過去データと最新データに基づく長期的な地下温度上昇率と, 地下温度モニタリングに基づく近年の上昇率には差があり, 時間変化が認められることから, 地下温暖化は複雑に変化しながら長期に進行していることが明らかとなった(宮越ほか, 2021)。

また, T08 地下温度プロファイルの過去データ (2010 年) と最新データ (2020 年) の差分から地下温度上昇を把握した。深度 30m における温度変化に基づき, 単位体積当たりの地下蓄熱量を推定した。粘土層 (体積比熱: $2.0 \sim 2.8 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$) を仮定すると, 年当たりの蓄熱量として $0.13 \sim 0.19 \text{ MJ/年}$ が推定された (宮越ほか, 2022)。

新たな知見と展望

本研究の対象都市域においては地下温暖化が広く確認されることが明らかとなった。地下水観測井を活用することで高精度のデータを収集できるため, 温度上昇の大きさや到達深度の他, 地下温度分布に認められる地下水流動の影響にも地域差が認められることが明らかとなった。東京地域ではモニタリングを組み合わせることで短期~長期の温度変化を精度良く把握できることも示され, 微細な地下環境変化の把握において, 本研究方法の有効性を確認することができた。さらに成果の社会実装に向けて, モデル地域を設定して本研究の成果を体系化することで, 地下熱環境評価の手法確立が期待される。

<引用文献>

- 谷口 (2010) 地下水学会誌, 52, 371-379
- Huang et al. (2000) Nature, 403, 756-758
- 気象庁 (2022) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html
- Taniguchi et al. (2003) Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 28, 477-486
- Miyakoshi et al. (2020) Journal of Hydrology, 582, 124530
- 宮越ほか (2019) 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, AHW25-P02
- 宮越ほか (2021) 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, AHW24-P02
- 宮越ほか (2022) 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, AHW27-P05
- 宮越ほか (2023) 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, AHW24-P01

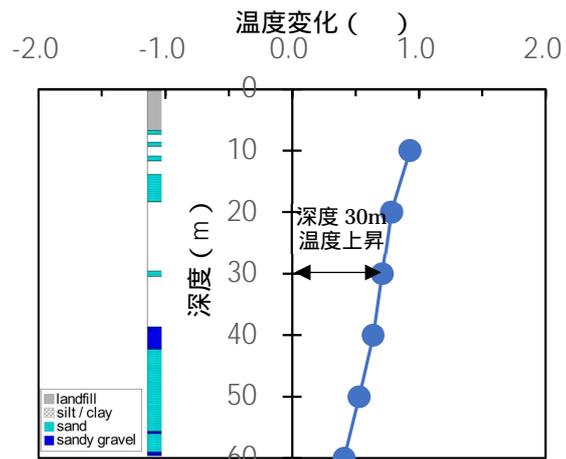


図6 地下温度変化 (T08, 2010~2020 年)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Miyakoshi Akinobu, Taniguchi Makoto, Ide Kiyoshi, Kagabu Makoto, Hosono Takahiro, Shimada Jun | 4. 巻 582 |
| 2. 論文標題 Identification of changes in subsurface temperature and groundwater flow after the 2016 Kumamoto earthquake using long-term well temperature?depth profiles | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Hydrology | 6. 最初と最後の頁 124530 ~ 124530 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124530 | 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 宮越昭暢, 林武司 | 4. 巻 114 |
| 2. 論文標題 首都圏における地下水・地下熱環境 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 水循環 | 6. 最初と最後の頁 14-18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司 |
| 2. 発表標題 都市域臨海部における地下温度の長期変化 - 東京港埋立地お台場地区で観測された地下温暖化 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 濱元栄起, 白石英孝, 相澤和哉, 山崎身枝 |
| 2. 発表標題 埼玉県における地中熱源ヒートポンプシステム実証試験 2021年夏の冷房運転結果 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年連合大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 濱元栄起 |
| 2. 発表標題 埼玉県における地中熱源ヒートポンプ実証試験 |
| 3. 学会等名 日本地熱学会令和4年度学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司, 濱元栄起, 八戸昭一 |
| 2. 発表標題 首都圏の地下温度長期観測に認められた地下温暖化 地下水開発地域における地下熱環境変化の支配要因 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司, 濱元栄起, 八戸昭一 |
| 2. 発表標題 首都圏の地下温度長期観測に認められた地下温暖化 観測井を活用した地下水・地下温度モニタリングと地下環境評価への適用 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 濱元栄起, 白石英孝, 中山雅樹, 内山真悟, 石黒修平, 竹島淳也 |
| 2. 発表標題 埼玉県における地中熱源ヒートポンプ実証試験と地下温度変化 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司 |
| 2. 発表標題 首都圏における地下温度の経年的な上昇とその要因 - 横浜市・川崎市および周辺地域の地下温暖化の特徴 |
| 3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Miyakoshi, A., Hayashi, T., Hachinohe, S., Hamamoto, H. |
| 2. 発表標題 Evaluation of groundwater environment changes due to urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan: Application of subsurface temperature observation integrated of long-term monitoring and repeated measurement of temperature-depth profiles |
| 3. 学会等名 46th IAH Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Taniguchi, M., Miyakoshi, A., Hamamoto, H. |
| 2. 発表標題 Subsurface warming revealed from repeated measurements of temperature-depth profiles in the world |
| 3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司, 平野智章 |
| 2. 発表標題 地下水観測井を活用した地下水・地下熱環境評価 - 1庄川扇状地における地下温度変化の特徴と要因 |
| 3. 学会等名 令和元年度日本応用地質学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 濱元栄起, 八戸昭一, 宮越昭暢, 林武司, 小泉謙 |
| 2. 発表標題 地下水観測井を活用した地下水・地下熱環境評価 - 2 関東平野中央部における地下熱環境の把握と地中熱利用 - |
| 3. 学会等名 令和元年度日本応用地質学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司, 八戸昭一, 濱元栄起 |
| 2. 発表標題 流域水資源管理に求められる地下水モニタリング - 首都圏既設観測井網を活用した地下水開発の影響評価 - |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計3件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 濱元栄起, 八戸昭一, 石山高, 柿本貴志, 宮越昭暢, 林武司 | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 埼玉県 | 5. 総ページ数 26 |
| 3. 書名 地下温度データ及び地中熱ポテンシャル, 埼玉県地質地盤資料集2022年度版, 第 | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 宮越昭暢・谷口真人 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 成山堂書店 | 5. 総ページ数 4 |
| 3. 書名 地球温暖化が進むと地下水や湧水に影響はありますか? 公益社団法人日本地下水学会編「地下水・湧水の疑問」 | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 宮越昭暢, 谷口真人 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 成文堂 | 5. 総ページ数 17 |
| 3. 書名 巨大地震が地下水環境に与えた影響 (嶋田純・細野高啓編) 第6章地下温度プロファイルの繰り返し測定による熊本地震に伴う地下水流動変動の解明 | |

〔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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 濱元 栄起 (Hamamoto Hideki) (40511978) | 埼玉県環境科学国際センター・土壌・地下水・地盤担当・主任研究員 (82405) | |
| 研究分担者 | 谷口 真人 (Taniguchi Makoto) (80227222) | 総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・教授 (64303) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|