

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871190

研究課題名(和文) 東京地域における都市地下温暖化の形成過程解明と将来予測に関する研究

研究課題名(英文) Formation process and prediction of urban subsurface warming beneath the Tokyo metropolitan area

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・活断層・火山研究部門・主任研究員

研究者番号：30392666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：東京地域における地下温暖化の形成過程を明らかにするため、都市域地下温度の高精度モニタリングを実施して、地下温度の微細な変動を観測した。この結果、多くの地点で地下温度の継続的な上昇が確認され、当該地域では地下温暖化が進行していることが明らかとなった。推定された地下温度上昇率は都心で高く郊外で低い傾向がある。地下温暖化の形成には、地表面付近の温度上昇だけでなく、地下構造物からの排熱や人為的な地下水流動の変化が影響を与えていると考えられた。

研究成果の概要(英文)：Subsurface temperature monitoring was conducted by use of high-precision thermometers to evaluate the formation process of urban subsurface warming in the Tokyo metropolitan area. Continuous subsurface warming was observed, and it was made clear that subsurface warming become advanced. The warming ratios of subsurface temperature in the city center were higher than the warming ratios in the rural area. The formation of subsurface warming was considered to be affected by not only the surface warming but also waste heat from subsurface structures and groundwater flow changes.

研究分野：水文地質学

キーワード：都市地下熱環境 地下温暖化 都市排熱 地下開発 地下水流動 人間活動 都市化 東京首都圏

1. 研究開始当初の背景

地下温度は深部からの熱流量に支配されるだけでなく、地表面温度変化の影響を受ける。日変化や季節変化の影響は地下数メートルで減衰するが、数十年を超えるような長期の地表面温度上昇の影響が、地下に浸透して地下温暖化を引き起こしている。1980年以降、地下温度を用いた解析によって過去の地表面温度変化を推定する試みが盛んに行われるようになり、欧州や北米の研究者を中心に、長期の地表面温度上昇が地下温度に与える影響の評価に関する研究が進んだ。例えばカナダの事例 (Jessop, 1990) では、観測孔で測定した地下温度の鉛直分布 (地下温度プロファイル) について、過去 80 年の地表面温度上昇の影響が深度 200m 以浅の地下温度を上昇させていることが示された。また、北半球各地で測定された地下温度プロファイルには広く地表面温度上昇の影響が認められ、地球温暖化の影響が地下熱環境に及んでいることが指摘された (Huang, et al., 2000)。

一方、地下温暖化の要因となる地表面温度上昇を引き起こすのは、地球温暖化だけではない。地球温暖化としては、北半球では年平均気温の推移から 0.71 /100 年の上昇率が報告されている。東京において 3.2 /100 年の上昇率が報告されており (気象庁, 2011), 都市においては、地球温暖化と都市化の複合効果によって地表面温度は大きく上昇していることを示唆している。実際に、ジャカルタや台北、バンコク (Yamano et al., 2009) や東京 (宮越ほか, 2006) のアジア大都市を対象とした研究事例では、観測された地下温度プロファイルに地下温暖化が認められることが報告されている。また、観測地点によって、温度上昇の大きさや深度が異なることが報告されており、地下温度に都市化の影響が強く反映されていることが示唆される。

このような地表面温度上昇に加えて、地下構造物の廃熱も地下温暖化の要因となっていることが予想される。従来から地下空間は、インフラや交通、商業空間として利用されている。特に都市域においては、地下空間の利用は高度に進んでおり、これら地下構造物の廃熱が直接地下を温めている可能性がある。さらに、近年、再生可能エネルギーの一つである地中熱利用について社会的関心が高まり普及が進む。これらは地下熱環境に何らかの影響を与える可能性があることが予想されるが、都市を対象とした地下熱環境に関する研究は地点毎の局所な事例が多く、都心 - 郊外を含む都市域を対象とした研究事例は極めて少ない。また、地下熱環境の変化が地下・地上の生物や環境に与える影響は未だ評価されていない。地下環境を持続的に利用するためには、地下熱環境をモニタリングして変化を捉え、その安定性を評価することが必要である。

2. 研究の目的

東京地域において地下温度モニタリング

を実施し、地下温暖化の実態の解明を目指す。観測データの解析により都心と郊外の変動パターンの差異を明らかにすると共に、都市地下温暖化の形成過程を検討する。また、将来予測に資するため、都心と郊外の地下温度の上昇率の差異を明らかにし、都市域の地下温暖化を定量的に評価する。

3. 研究の方法

東京都内 7 地点および埼玉県内 3 地点において、地下温度高精度モニタリングを実施した (図 1)。これら地点の選定においては、土地利用と変遷に関する情報を収集し、都市化の影響を評価できるように配置を工夫した (図 2)。

地下温度モニタリングについては、各地点 2 深度に高精度水温ロガー (RBR 製, solo-T 型, 分解能 0.001 ) を井戸孔内に設置した。各地点の深度および実施期間を表 1 に示す。測定間隔は 1 時間、実施期間は季節変動の影響を評価できるように概ね 2 年間とし、気温の日、季節変動の影響を除外するため、設置深度は深度 30m よりも深部とした。水温ロガ



図 1. モニタリング地点位置図

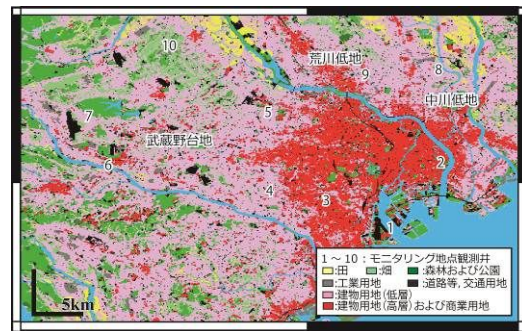


図 2. 土地利用状況 (国土交通省 (2014) より作成)

地点	モニタリング深度 (m)	モニタリング期間
No.1	30	2013年09月 ~ 2015年09月
No.2	30	2013年12月 ~ 2015年11月
No.3	30	2013年09月 ~ 2015年12月
No.4	30	2013年09月 ~ 2015年12月
No.5	40	2013年12月 ~ 2015年12月
No.6	30	2013年09月 ~ 2015年12月
No.7	40	2013年09月 ~ 2015年12月
No.8	30	2013年10月 ~ 2015年12月
No.9	30	2013年10月 ~ 2015年12月
No.10	45	2013年10月 ~ 2015年12月

表 1. モニタリング深度および実施期間

ーは設置前とデータ回収後に実験室において、クオーツ温度計(東京電波製 DMT622 型, RTR 型センサープローブ, 分解能 0.001 )を用いて器差を把握し, 測定値を補正した。

また, モニタリングの設置とデータ回収時に, 地下温度プロファイルの測定を実施した。地下温度プロファイルの測定にはサーミスタ温度計(立山科学工業株式会社製 D614 型温度計, PXW-46 型センサープローブ, 分解能 0.01 )のセンサープローブを井戸孔内に降下させ 1m の深度間隔で温度値を測定して井戸孔内の水温分布を把握した。さらに, モニタリングデータと比較することで両者の整合性を確認した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 地下温暖化の形成過程

本研究において測定した地下温度プロファイルを図3に示す。なお, 地下水面からモニタリング深度付近までの温度変化を明らかにするため, 図3では地下水面から深度60mまでの測定値を表示した。観測した地下温度プロファイルには, 全ての地点において極小温度が観測された。一般に, 地下温度は深度が増すと高くなるが, 地表面付近の温度上昇の影響により, 地下浅部の温度が上昇し, 地下温度プロファイル中に極小温度が形成されることが知られている。この極小温度の出現深度は, 地表面付近における温度上昇の影響到達深度の目安となる(宮越ほか, 2006)。各地点の極小温度出現深度を表2に示す。中川低地および荒川低地に位置する No. 2, 8, 9 においては深度50mよりも浅いが, 台地に位置する No. 3~7, 10 においては深度70mよりも深い。特に武蔵野台地西部に位置する No. 6, 7 においては深度90m程度, No. 10 においては120mを超えている。これらの地点においては, 台地に位置しており地下水涵養域に相当する。また, 飲用水源等として地下水が利用されていることや土地利用状況(図2)から揚水により誘発されて地下水涵養が生じ易い地域といえる。このような下向き成分を有する人為的な地下水の流動によって, 地表面付近で生じた温度上昇の影響が地下深部にまで及んでいる可能性がある。また, 東京港埋立地に位置する No. 1 においては, 井戸孔底である深度60mまで地下温度が深度と共に低下している。井戸深度による制約から極小温度出現深度は特定できないが, 少なくとも深度60mよりも深く, 東京港埋立地においては内陸側の低地部よりも地下浅部の温暖化が深部に及んでいる可能性がある。当該埋立地はごみ埋め立てではないため, 埋め立て地盤の発熱の影響は考えられない。地下温暖化が低地よりも深部にまで認められることは, 埋立地の地下水環境や地下構造物の発熱が地下環境に影響を与えていることを示唆している。

##### (2) 地下温度上昇率

モニタリング結果から求めた地下温度上昇率を図4に示す。各地点の上昇率は, 観測期

間中(表1)のモニタリング値について, 最小二乗法により近似した一次関数の傾きとして求め, 決定係数  $R^2$  値が 0.70 以上の値について図4に表示した。

No.1 の深度40mにおいては, 観測期間中の2015年春季に数週間で0.2程度急激な温度上昇が認められた。この要因を特定するためには更なる調査が必要であるが, この深度の地下温度には数週間から数か月単位の変動が認められており, 人為的な要因が影響を及ぼしていると考えられる。この期間については, 上述した温度上昇率の算出から除外した。また, No.4 の深度30および40m, No.7 の深度40m, No.8 の深度30mにおいては, データのばらつきが大きく  $R^2$  値が 0.70 を下回

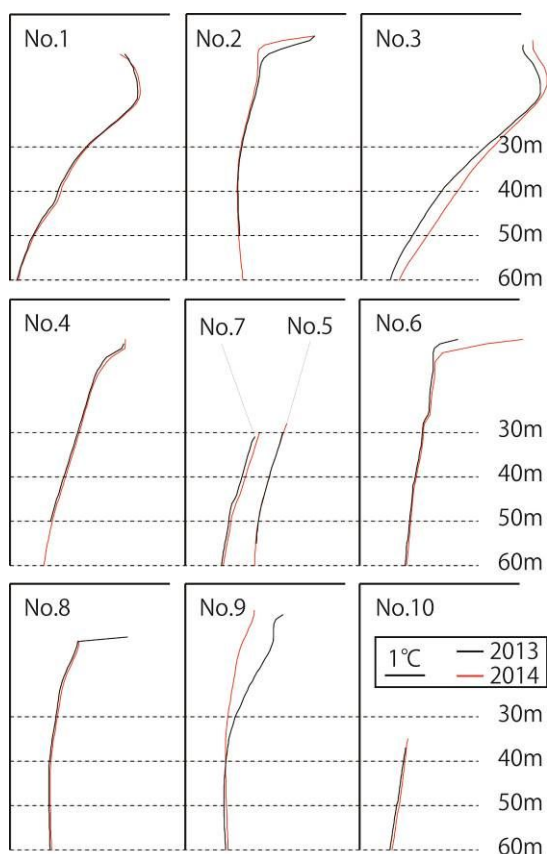


図3. 地下温度プロファイル(各グラフの縦軸: 深度(m), 横軸: 温度(°C))

地点	極小温度出現深度
No.1	-
No.2	39m
No.3	72m
No.4	81m
No.5	81m
No.6	94m
No.7	88m
No.8	46m
No.9	49m
No.10	124m

表2. 地下温度プロファイル中の極小温度出現深度

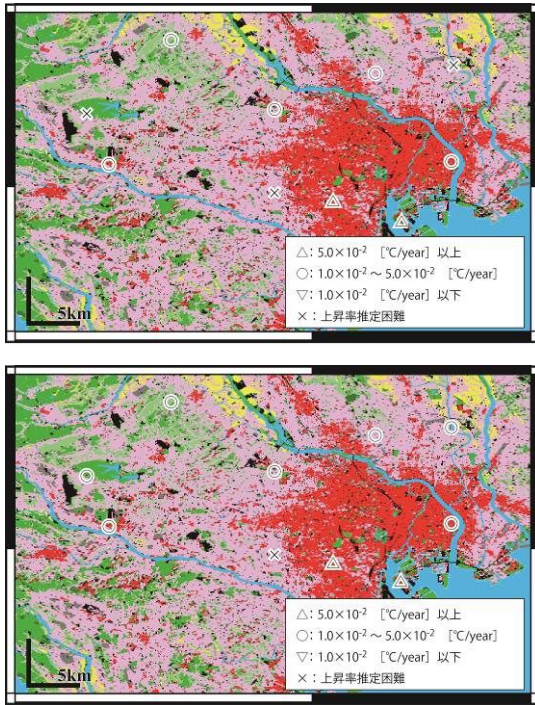


図4. 地下温度上昇率の推定値. 上: 深度30m (No.5 および 7: 深度40m, No.10: 深度45m), 下: 深度40m (No.5 および 7: 深度50m, No.10: 深度65m)

わる場合や、計測機器のトラブルから欠測期間があったため、図4から除外した。

モニタリング結果から、前述した除外地点を除いて、地下温暖化は継続して生じていることが明らかとなった。温度上昇率は、同一地点では深部よりも浅部の方が大きい傾向があり、都心で温度上昇率が大きい傾向が認められた。このことは、ヒートアイランド現象にみられるような都市特有の熱環境の影響を受けた地表面付近の温度上昇が、地下温暖化の主たる形成要因であることを示唆している。一方、都心に位置するNo.3においては、深度30mよりも深度40mの方が2倍程度大きい。また、温度上昇率は一樣ではなく、数週間から数か月単位の変動が確認され、地下空間が高度に開発されている都市中心部では、地表面付近の温度上昇だけでなく、地下構造物からの排熱が地下温暖化の形成要因となっていると考えられる。さらに、本研究により求められた地下温暖化の上昇率は、多くの地点で100年あたり1以上を示している。今後も東京地域の地下熱環境が大きく変化していくと考えられ、持続的な地下環境の利活用のためには継続したモニタリングが重要であることが示された。

#### <引用文献>

Huang et al. (2000) Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures Nature 403, 756-758.

Jessop, A.M. (1989) : Hydrological

distribution of heat flow in sedimentary basin. Tectonophysics, 164, 211-218.

Yamano, M., S.Goto, A.Miyakoshi, H.Hamamoto, R.F.Lubis, V.Monyrath and M.Taniguchi (2009): Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution. Science of the total environment, 47, 3120-3128.  
国土交通省 (2015): 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2015年5月閲覧)

宮越昭暢・林武司・丸井敦尚・佐倉保夫・川島眞一・川合将文 (2006): 地下温度からみた東京低地における地下水環境変化の評価. 応用地質, 47, 5, 269-279.

#### 5. 主な発表論文等

(学会発表)(計4件)

Miyakoshi, A., T.Hayashi, H.Hamamoto, S.Hachinohe, M.Kawai and S.Kawashima (2014) Combined evaluation of regional groundwater flow and groundwater temperature suggests subsurface warming in the Tokyo metropolitan area. Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, Jul/2014, ロイトン札幌 (札幌市).

Miyakoshi, A., T.Hayashi, H.Hamamoto, S.Hachinohe, M.Kawai and S.Kawashima (2014) Impacts of urbanization and global warming on groundwater flow and subsurface temperature in the Tokyo metropolitan area, Japan. International Association of Hydrogeologists 41th International Congress, Sep/2014, Marrakech, (Morocco).

宮越昭暢, 林武司, 川合将文, 川島眞一, 國分邦紀, 濱元栄起, 八戸昭一 (2015): 首都圏における地下温度の経年的な変動とその要因. 地球惑星科学連合2016年連合大会, 2015/5, 幕張メッセ (千葉市)

Miyakoshi, A., T.Hayashi, M.Kawai, S.Kawashima, K.Kokubun, H.Hamamoto and S.Hachinohe (2015): Evaluation of subsurface warming due to urbanization for sustainable management of urban groundwater resource in the Tokyo metropolitan area, Japan. International Association of Hydrogeologists 42th International Congress, Sep/2015, Rome (Italy).

#### 6. 研究組織

##### (1) 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・活断層・火山研究部門・主任研究員  
研究者番号: 30392666