

大阪平野における地下温暖化の将来予測

○濱元栄起¹・有本弘孝²・谷口真人³・斎藤哲也⁴・中戸靖子⁵・神谷浩二⁶¹埼玉県環境科学国際センター・²(株) 地域地盤環境研究所・³総合地球環境学研究所・⁴国土交通省近畿地方整備局企画部・⁵大阪府環境農林水産部・⁶岐阜大学工学部

1. はじめに

地下水学や地球科学における研究や地下水資源や地熱資源の開発など様々な目的で、国内外で、地下温度測定（温度検層）が行われてきた¹⁾²⁾³⁾。本論文では、地下温度測定によって見出された地下温暖化現象について、いくつかのシナリオをもとに100年後の地下温度の将来予測することを目的とした。

地下温度検層によって得られる温度は、実際には、孔内の地下水温度を計測している。その地下水は孔内の地下水流動やストレナからの水の出入りがなければ、基本的に周囲の地層と平衡状態になっている。そのため地下水温を地層温度とみなすことができることから、地下水温の鉛直分布を測定すれば、地層の鉛直分布の温度を知ることができる。表層から深さ数百メートルの地下温度分布は、①地下深部を起源とする地殻熱流量、②地表面温度、③地下水流動による熱移流、④周囲からの熱輸送、⑤放射性元素による熱生成、そして⑥地下の熱物性、

などによって決まる。特に、地下水流動の影響がなく、地下からの熱流量と地表面温度が一定であり、地下の物性が一樣な場合には理論的には地下の温度分布は直線的になる。しかし、地下温度検層によって地下温度分布を測定すると、多くの地点で地下数十メートルから地表部に近づくにつれて温度が上昇する傾向が見られ、特に都市域においては、その上昇幅が大きい。地表面に近い深度で地下の温度上昇が見られることから、この温度上昇は地表面付近の温度変動に起因していると考えられる。地表面における温度変動としてよく知られているのは、日周変動や年周変動であるが、前者は地表面から数十 cm、後者は地表面から 10m 程度で、その変動は減衰する⁴⁾。したがって、上述したように多くの地点で見られる地下数十メートル程度の熱的な影響（温度上昇）は、過去数十年から約百年程度の地表面における長期間の温度上昇トレンドを反映していると推察される⁵⁾。地表面における長期的な温度上昇の要因としては、全地球規模での地球温暖化や都市のヒートアイランド、土地利用の変化などが考えられる（図-1）⁶⁾。

なお、本稿は「地下水地盤環境に関する研究協議会」に設置された地中熱研究委員会（委員長：岐阜大学 神谷教授）の研究成果の一部である。

2. 地下への熱輸送

ここでは、地表面温度が時間とともに上昇し、それが熱拡散によって地下へ伝搬することで、地下温暖化が引き起こされるシンプルなモデルを想定し、地下温度分布を計算する方法について述べる。このモデルに基づき本論文では以下の第4章に述べる地下温暖化の将来予測計算を行う。

地下水流動による熱移流の影響や周辺からの熱の伝搬がない場合には、1次元の熱伝導モデルによって地表面の温度変動が地下へ伝搬した場合の温度分布を知ることができる⁷⁾。地下の熱物性が均一であるものとする熱拡散方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

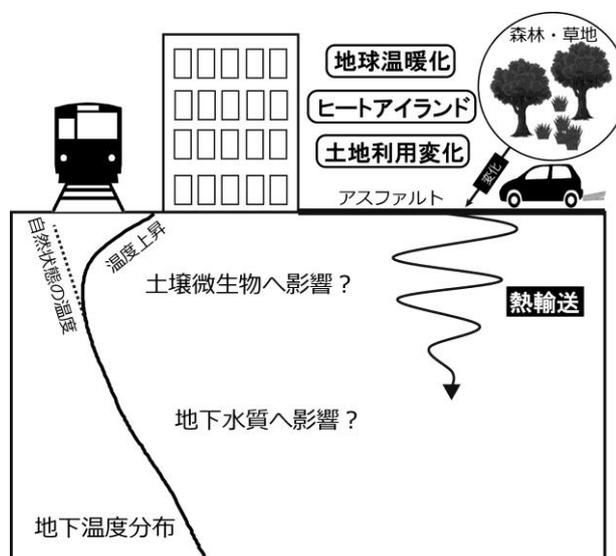


図-1 地下温暖化の概念図

Evaluation of the future prediction of subsurface warming in the Osaka Plain, Hideki Hamamoto¹, Hirotaaka Arimoto², Makoto Taniguchi³, Tetsuya Saito⁴, Yasuko Nakato⁵, Koji Kamiya⁶ (¹Center for Environmental Science in Saitama, ²Geo-Research Institute, ³Research Institute for Humanity and Nature, ⁴Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, ⁵Osaka Prefectural Government, Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries ⁶Gifu University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering)

KEY WORDS: Subsurface temperature, Climate change, Land use change, Heat island, Osaka Plain, Future prediction

で表される。ここで、 κ は熱拡散率、 z は深さ、 T は温度である。さらに、熱拡散率 κ は、熱伝導率 K と密度 ρ 、比熱 c_p を用いて次のように表される。

$$\kappa = \frac{K}{\rho c_p} \quad (2)$$

さらに、地表面における温度変動をステップ関数で近似して

$$T(z=0, t_{i-1} < t \leq t_i) = T_{ref} + \Delta T_i \quad (3)$$

と表し、さらに地下深部からの熱流量を q_b とすると

$$q_b = K_N \frac{\partial T(z=z_b, t)}{\partial z} \quad (4)$$

と表される。このとき地下の温度分布は(3)式と(4)式を境界条件として(1)式を解くことで知ることができる。ここで、 T_{ref} は地表面の基準温度($t=t_0$ における温度)、 ΔT_i は t_{i-1} から t_i の間の地表面温度と基準温度 T_{ref} との差である。

$t=t_M$ (現在)における地下の温度分布は、熱拡散方程式(1)を解くことによって以下の(5)のように表される。

$$T(z, t=t_M) = T_0 + G \cdot z + \sum_{i=1}^M \Delta T_i \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_{i-1})}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_i)}} \right) \right] \quad (5)$$

ここで、 erfc は余誤差関数である。このモデルは、シンプルなため解析解が得られているが、数値計算によっても同様に地下温度分布を計算することが可能である。数値計算を用いることで、多層構造モデルや地下水流動による熱移流を考慮した複雑なモデルへの発展も可能となる。数値計算手法としては、有限差分法、有限体積法、有限要素法などがある。本論文では、Goto and Yamano (2010)⁸⁾による有限体積法の数値計算プログラムを用いた。

3. 大阪平野における地下温度分布の特徴

大阪平野では Taniguchi and Uemura (2005)⁹⁾や有本ほか (2015)¹⁰⁾によって地下観測井を活用し、地下数百メートルの深さまでの地下温度検層がなされ、その特徴が明らかにされている。図-2 および図-3 に有本他 (2015)¹⁰⁾によって2011年5月～6月に測定された31地点の測定位置とその温度分布を示す。多地点における温度分布から大阪平野においても多くの地点で地下50m以浅から地表に近づくにつれて、温度上昇している傾向が明らかである。場所によって温度上昇の幅や温度上昇による影響深度が異なることから、地表面における熱的影響や物性、地下水流動による影響などの地域性を反映していると考えられる。

濱元ほか (2016)¹¹⁾はこれらの地下温度データのうち、地下温度分布の形状から地下水流動による影響が小さいと思われる6地点の地下温度分布(図-2の黒丸とそれに対応する図-3の黒線の温度分布)を精選し、多層構造モデルを用いた逆解析を行い、過去百年間の地表面温度履歴の推定を各地点で行っ

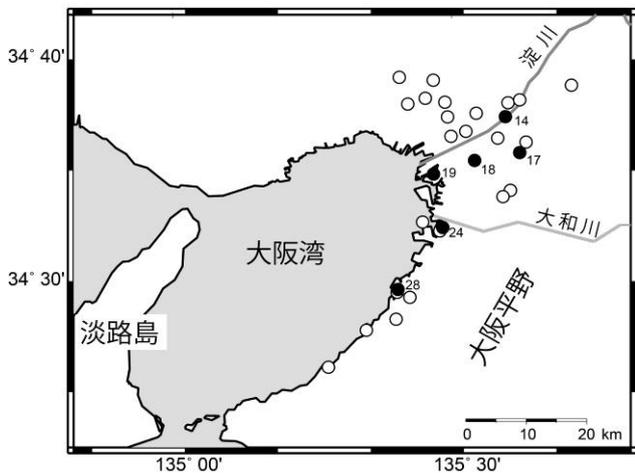


図-2 調査地点

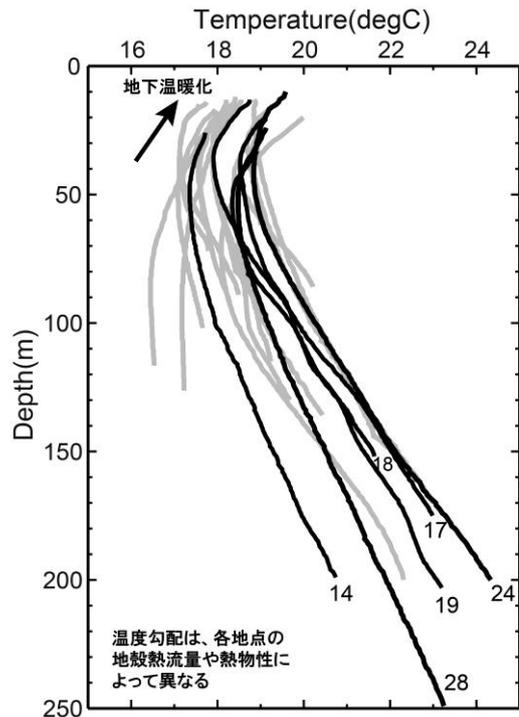


図-3 大阪平野の地下温度分布

た。その結果、都心部が最も地表温度の上昇幅が大きいことを明らかにした。そしてその温度上昇は、1930年以降から上昇率が大きくなることを示した。このような傾向は図-4に示す大阪気象台の気温の長期記録¹²⁾とも整合的である。また、大阪都心においては、有本ほかが浅い観測井を用いた温度検層や温度モニタリングを継続し、都心部における詳細な地下温暖化の現状把握を進めている。これについては、本論文集に最新の成果（大阪都心部における地下温暖化の実態（その3））を掲載している¹³⁾。

4. 地下温暖化の将来予測

4.1 地下温暖化の将来予測の意義

地下温暖化は地下水質や土壌微生物環境などの地下環境に影響を及ぼす要因になる可能性も指摘されている。例えば、地下温度が上昇すると、無機物が溶解する速度が上昇すると推定されており、地下温度上昇による地下水質の変化が懸念される¹⁴⁾。さらに土壌中の微生物の活性度の変化などが生じ、菌叢変化なども懸念される。地下の温暖化は地表における開発や温暖化が進めば将来的にさらに進行する可能性が高く、地下温暖化の将来予測を行い地下環境への影響を評価することが重要である。

4.2 地下温暖化の将来予測解析

本研究では、過去から現在までの地表面温度変動の傾向は大阪気象台の長期気温記録¹²⁾をベースとし、現在から将来の傾向は、5つのシナリオを想定し、それに対応する現在から約100年後（西暦2130年）の地下温度分布を計算した。地表面の温度が一定、または低下するシナリオは、我々が何らかの対策（例えば、アスファルト等の人工被覆の遮熱性舗装への変更や緑化など）を講じた場合を想定した。図-5に本論文で想定した（1）～（5）のシナリオを示す。いずれの場合も1930年～2030年まで地表面温度は年間 $0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ で上昇するものとし、2030年以降は、5つのパターンを想定した（2030年までの温度上昇率 $0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ は、大阪気象台の気温記録の1930年から2000年の温度上昇率を基にした）。

- （1）2030年までの温度上昇の割合（ $0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ）で上昇し、その後100年間も同程度の割合で上昇し続ける場合
- （2）2030年以降、地表面温度が一定になる場合
- （3）2030年以降、低下傾向に転じ $-0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の割合で低下し、2130年には1930年と同程度の地表面温度に回復し、さらに2230年まで同程度の割合で温度低下する場合
- （4）（3）の低下の割合に比べて、より早い $-0.08^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の割合で低下し、2065年に1930年と同程度の地表面温度に回復した後は一定となる場合
- （5）地表面温度は $-0.04^{\circ}\text{C}/\text{年}$ で低下し、2100年に1930年と同程度の温度に回復した後は一定となる場合

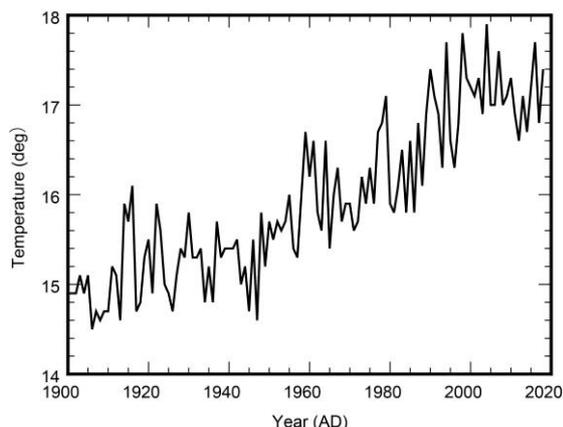


図-4 大阪気象台における気温の長期記録

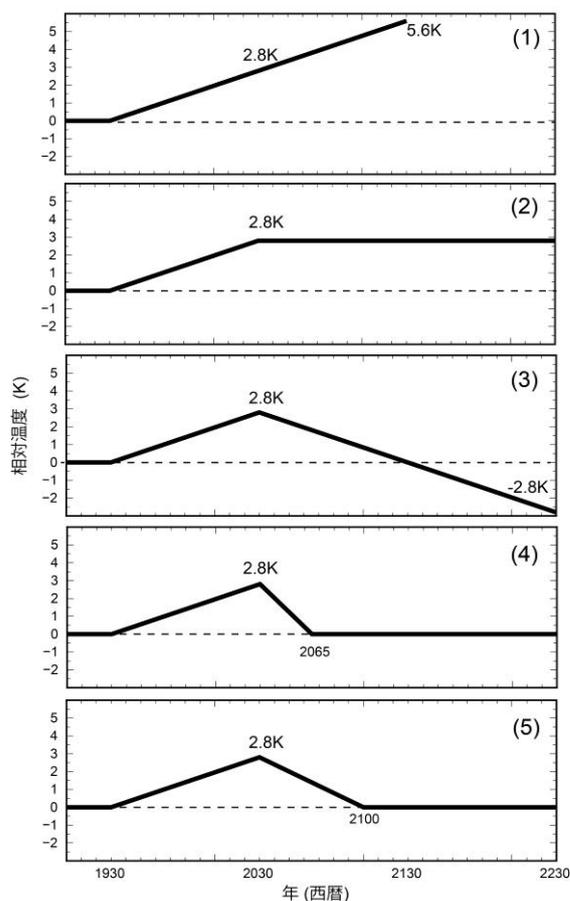


図-5 地表面温度の将来予測シナリオ

図-6 にこれらの各シナリオにおける 2130 年の地下温度分布を計算した。図-7 には蓄熱量の時系列変化の推定結果を示した。その結果、2030 年以降の地表面温度の傾向の違いによって地下温度分布と蓄熱量のいずれもが大きく異なることが分かった。2130 年における結果に着目すると 2030 年以降の温度上昇を一定に保てる場合 (2) には、(1) の上昇し続ける場合に比べて、約 60% の蓄熱量に抑えることができる。さらに地表面温度を低下させる対策をした (3) ~ (5) では蓄熱量は半分以下に抑えられることが分かった。また地表面温度の低下の割合が大きければ大きいほど蓄熱量は小さくなる傾向も確かめられた。(3) ~ (5) のパターンは地表面温度の上昇を抑制することを意図して設定しているが、例えば人工被覆の遮熱性舗装への変更や緑地化、散水などが挙げられる (それぞれの地表面温度の低下させる効果を確認するためには既存文献の精査や数値実験、実証試験をする必要がある)。また、地表面温度を低下させるだけでなく、地中温度そのものを低下させる方法も挙げられる。例えば地中熱利用システムのクローズドループ方式は、冬季の暖房空調時に室内を温めると同時に地中を冷却する働きがある。このような地表面温度の上昇を抑制する技術や地中温度を低下させる方法が確立され、導入が進めば、地下温度を人為的な影響が加わる前の自然な状態に戻すことができる可能性がある。いずれにせよ地下温度を元の自然状態に近づけるためには、数十年程度の短期間では不十分であり、百年スケールの長い時間が必要である。本研究で明らかにしたように地表面温度を、できる限り早い時期に現状維持か低下に転じさせることが有効である。

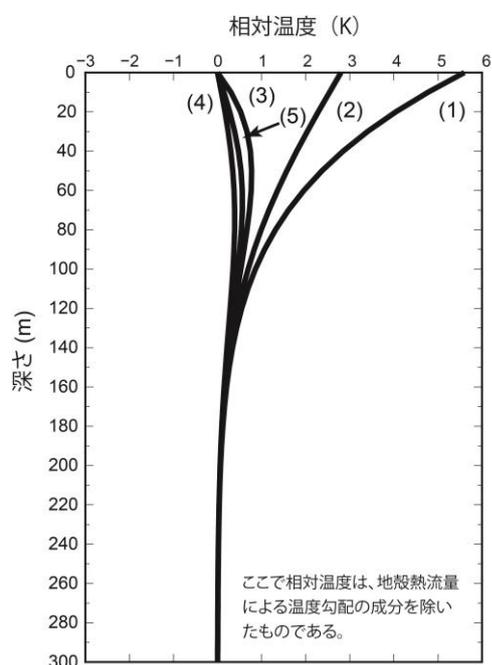


図-6 地下温度分布の約 100 年後の将来予測

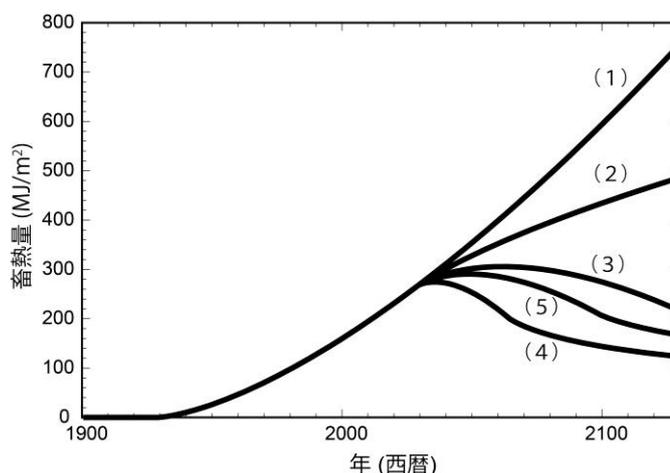


図-7 シナリオごとの蓄熱量の将来予測

5. まとめ

地下温暖化は、大阪平野においても進行しており、将来的な地下環境への影響を評価するうえでも、地下温度の予測計算を行うことが重要である。本論文では、大阪気象台の気温の長期記録をベースに過去から現在までの地表面温度上昇を仮定し、さらには将来の地表面温度変動を 5 つのパターン想定することで、それぞれの場合の将来的な地下温度分布や蓄熱量の変化を計算した。その結果、何らかの対策 (例えば、人工被覆の遮熱舗装への変更や緑地化など) を講じ地表面温度を低下させた場合においては、その 100 年後の地下温度分布は自然状態の温度分布まで回復できることを示した。これらの将来予測は地下環境への影響を評価するうえで、現象の把握に加えて、時間スケールの影響評価を行ううえでも有効である。さらには地下の人工構造物 (例えば、地下鉄や地下駐車場、下水管など) が高密度に発達している場合にはこれらからの排熱による熱的影響も考えられる⁶⁾。今後大阪都心部における地下温暖化研究において、地下の構造物を起源とする排熱の影響についても評価することが必要だと考えている。

謝辞: この研究は、「地下水地盤環境に関する研究協議会」による研究の一環として実施しました。また、解析の一部は、JSPS 科研費「浅層型地中熱システムのための適地評価手法の開発～リモートセンシングの活用～ (19K12436)」による知見も活用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中館愛橘：地下温度調査第一回報告，震災豫防調査會報告，**45**, 17-51, 1903.
- 2) 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林武司：地下温度分布からみた関東平野の地下水流動，日本水文学会誌，**33**, 137-148, 2003.
- 3) 濱元栄起・白石英孝・八戸昭一・石山 高・佐竹健太・宮越昭暢：地中熱利用システムのための地下温度情報の整備とポテンシャルの評価-埼玉県をモデルとして-，物理探査，**67**, No. 2, 107-119, 2014.
- 4) 近藤純正：地表面に近い大気の科学—理解と応用，pp. 324，東京大学出版会，2000.
- 5) Chapman, D. S., Bartlett, M. G., and Harris, R. N. : Comment on "Ground vs. surface temperature trends: Implications for borehole surface temperature reconstructions" by M.E.Mann and G. Schmidt, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07205, doi:07210.01029/02003GL019054, 2004.
- 6) Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K, Rumohr, S., and Blum, P : Subsurface urban heat islands in German cities, *Science of The Total Environment*, Volume 442, 1 January 2013, Pages 123-133, 2013.
- 7) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. : *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London, 510pp., 1959
- 8) Goto, S., and Yamano M. : Reconstruction of the 500-year ground surface temperature history of northern Awaji Island, southwest Japan, using a layered thermal property model, *Phys. Earth Planet. Inter.* **183**, 435–446, 2010.
- 9) Taniguchi, M., and Uemura T. : Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 305-313, 2005.
- 10) 有本弘孝・谷口真人・濱元栄起・岸本安弘・水間健二・小林 晃：大阪平野における地下温暖化の実態：Kansai Geo-Symposium 2015 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集，地盤工学会関西支部，pp.71-76, 2015.
- 11) 濱元栄起・有本弘孝・谷口真人・岸本安弘・中戸靖子・小林晃：大阪平野における地下温暖化履歴の推定，Kansai Geo-Symposium 2016 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集，地盤工学会関西支部，pp. 153-158, 2016.
- 12) 気象庁:ウェブページ，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>, 2019-08-01.
- 13) 有本弘孝・濱元栄起・谷口真人・斎藤哲也・中戸靖子・神谷浩二：大阪都心部における地下温暖化の実態（その3），Kansai Geo-Symposium2019 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム 論文集，地盤工学会関西支部，2019.
- 14) Matthijs Bonte, *Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality*, pp. 135, Iwa Pub, 2015.