

## 大阪都心部における地下温暖化の実態（その3）

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

## 1. はじめに

都市域における都市化の進行やヒートアイランド現象は、地表面温度を上昇させ、地中では主に熱拡散によって表層から深さ方向に地下温度を徐々に上昇させている。すなわち、“地下の温暖化 (Subsurface Warming)”が生じている。地下温度が上昇すると地層から化学成分の溶出や汚染物質の離脱が促進され、土壌水や地下水の水質だけでなく地下の微生物活動にも影響が生じる可能性がある。これら地下温暖化に伴う地下環境への影響は、隠れた熱汚染問題であり、近年、地中熱利用時の地下環境への影響<sup>1)2)</sup>と併せて研究が進められている。そのため、地下温暖化の将来にわたる変化を予測し、その対策を講じるために、さらに地下の熱環境の変化がもたらす地中構造物等への影響を調査研究する前段階として、地下温度の正確な客観的事実データを得ておくことは重要な課題であるといえる。

一方で地下の温暖化には、地下温度上昇分の地中熱が蓄積されているため、その蓄熱分を活用できるという利点がある。地中熱の活用の際には、地下温度と外気温の温度差が採熱および放熱効率に影響を及ぼすことから、地中熱活用前の地下温度 (初期温度) の状況 (例えば、年平均外気温との温度差や地下温暖化の進行深さ) を認識して検討する必要がある。

大阪平野における地下温暖化の調査研究は、1998年、2003年、2011年に谷口ほか<sup>3)4)5)</sup>により主に大阪湾沿岸部と郊外を対象に一斉調査が実施された。その一方で2009年から、都市化が古くから始まった大阪都心部における中之島周辺を対象とした調査研究が、筆者らが所属した「地下水地盤環境に関する研究協議会」の前地下水水質研究委員会 (2013年まで活動) によって実施され、その成果の一部が北岡ほか<sup>6)7)</sup>、有本ほか<sup>8)9)10)</sup>、濱元ほか<sup>11)</sup>により報告済みである。前地下水水質研究委員会の成果は現在、同協議会に設置された地中熱研究委員会 (2013年10月発足、現委員長: 岐阜大学 神谷教授) に引き継がれ、有本ほか<sup>12)</sup>、濱元ほか<sup>13)</sup>により報告済みである。なお、本研究において、大阪都心部とはJR大阪環状線内 (ただし西側は新なにわ筋まで) のエリアとする。

本稿は、地中熱研究委員会の研究成果の一部として、*Kansai Geo-Symposium 2016* で筆者が発表した“大阪都心部における地下温暖化の実態 (その2)”<sup>12)</sup>の継続版である。大阪都心部の中之島周辺における地下温暖化の定点観測 (6井戸) は、2011年から年1回の頻度で継続しているが、2016年の発表以降3年間の観測結果から地下温度の上昇速度を、また、地下温度の定点連続計測結果の解析から、水の流れない一次元熱伝導だけでは説明できない現象について報告するものである。

## 2. 大阪管区気象台における気温の経年変化

始めに、地下の熱環境への主要な負荷となる気温の変化について整理する。図-1は大阪管区気象台の現在の気象観測所と大阪都心部の地温観測井の位置を示し、図-2は大阪管区気象台観測所における年平均気温 (気象庁HP公開データ、1883~2018年) の経年変化を示す。なお、図-2の横軸上の▲は観測所の移転時を示している。図-2に示した気温の経年変化を長期的な目線で見ると、現在の観測所[4]における気温は約0.030℃/年の速度で上昇しているものの、直近20年間 (1999年~2018年) の気温ではほぼ一定を示していることが読み取れる。

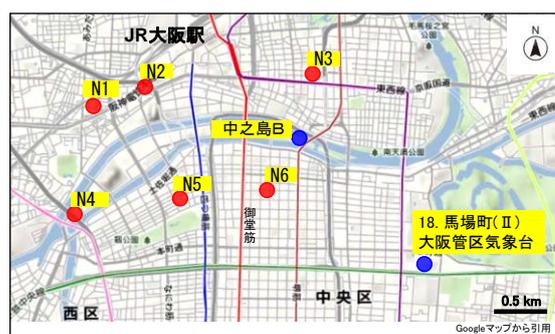


図-1 大阪管区気象台の気象観測所と地温観測井の位置図

## 3. 大阪都心部における地温観測結果

大阪都心部の中之島周辺において、年1回の頻度で地温観測している井戸 (図-1のN1~N6) は、地下水協議会が所有・管理する中之島周辺の地下水位観測井6本である。2009年の観測開始から今日までの地温観測日の一覧表を表-1に示す。観測は、温度と圧力を同時に計測できる測定器 (メモリー機能内蔵) を手動の巻き上げ機を用いて井戸管内を約2 cm/secの速度 (記録間隔1 sec) で降下させることによって行った。測定器はJFEアドバンテック社製のCompact-TD計で、温度の

Actual states of subsurface warming in the central area of Osaka City, Japan (Part 3)

Hiroataka Arimoto<sup>1</sup>, Hideki Hamamoto<sup>2</sup>, Makoto Taniguchi<sup>3</sup>, Tetsuya Saitou<sup>4</sup>, Yasuko Nakato<sup>5</sup>, Kohji Kamiya<sup>6</sup> ( <sup>1</sup>Geo-Research Institute, <sup>2</sup>Center for Environmental Science in Saitama, <sup>3</sup>Research Institute for Humanity and Nature, <sup>4</sup>Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, <sup>5</sup>Osaka Prefectural Government, Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, <sup>6</sup>Department of Civil Engineering, Gifu University )

**KEY WORDS:** Urbanization, Heat island, Osaka City, Observation well, Subsurface temperature

測定精度は  $\pm 0.05$  °C、分解能は 0.001 °C である。

観測井 N1~N6 で観測された地温鉛直分布、年平均気温(大阪管区气象台)、ならびに土質柱状図、井戸スクリーン位置を図-3 に示す。同図には帯水層深度を含む地温鉛直分布の拡大図も示し、直近 3 年分の観測値を色分け (2019 年を赤線、2017 年を青線と緑線) して示している。拡大図を見ると、観測井全てで 2019 年地温 > 2017 年地温であり、帯水層(下部沖積砂層 As(L)、第 1 洪積砂礫(天満砂礫)層 Tg1)深度を中心とした温度上昇が見られる。

#### 4. 大阪都心部における地下温暖化の進行状況

地下温暖化の進行性を評価する際の指標として、①G.L.-40m 地温とその上昇速度、②G.L.-50m 地温とその上昇速度を採用している<sup>12)</sup>。それらの図を図-4 に示す。図中、直近から寄与率  $R^2 > 0.95$  となる近似直線を示し、その勾配が地温上昇速度である。G.L.-40m 地温において、観測井 N3 は 2017 年以降、急激な温度上昇が見られ、観測井 N2 では 2013 年以降、温度上昇がほとんど生じていない。その他の観測井では大阪管区气象台の気温上昇速度約 0.030°C/年に近い上昇速度となっている。

一方、G.L.-50m 地温においては、2013 年以降の地温が前年の地温より低下した観測井はなく、全ての観測井で地温は上昇し続けている。中でも地温が最も高い観測井 N6 の地温上昇速度は 0.026 °C/年で、気温の上昇速度に匹敵する位の大きさである。帯水層での地温の乱れを受けにくい G.L.-50m 地温が上昇し続けていることから、大阪都心部において、地下温暖化は現在も着実に進行しているといえる。

#### 5. 一次元熱伝導モデルによる地下温度の解析

##### 5.1 地温の年周変動

各観測井における G.L.-20m 以浅の地温の年周(季節)変動が、一次元熱伝導モデルの変動とどの程度近似しているかの検討は既に報告済み<sup>9)</sup> である。その結果の一部を図-5 に再掲する。図の横軸は深度毎の年平均地温からの偏差を示している。

図によると、観測井 N3 以外では一次元熱伝導モデルとよく似た変動を示し、概ね計算での再現性が可能であるのに対して、観測井 N3 の地温分布は深度方向に間延びした性状を示しているのが分かっている。本章では、観測井 N3 のこの特異性が何に起因しているのかについて検討する。

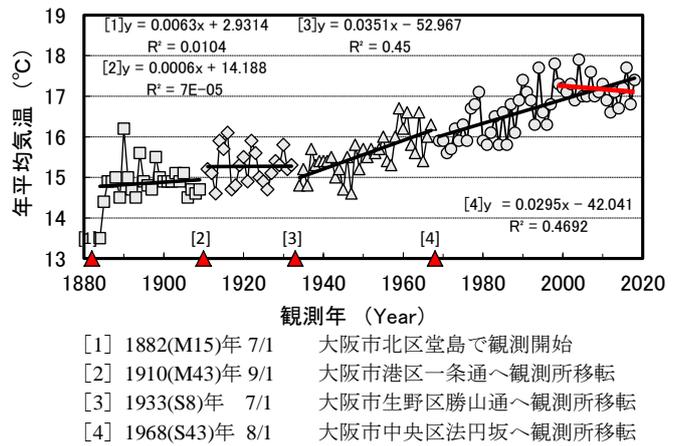


図-2 大阪管区气象台における気温の経年変化<sup>文献 12)</sup> の図-2 に加筆修正

表-1 地温観測日

観測井No. (名称)	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2019
N1 (福高公園)						10/16	12/20	
N2 (西梅田公園)		12/15	2/4				1/11	12/19
N3 (西天満公園)	4/28		5/19			10/21		12/20
N4 (中之島西公園)			8/11	8/3	8/20			
N5 (西船場公園)		12/14	9/29			10/16	1/10	12/19
N6 (市道道修町線)	-	12/15					1/11	12/20

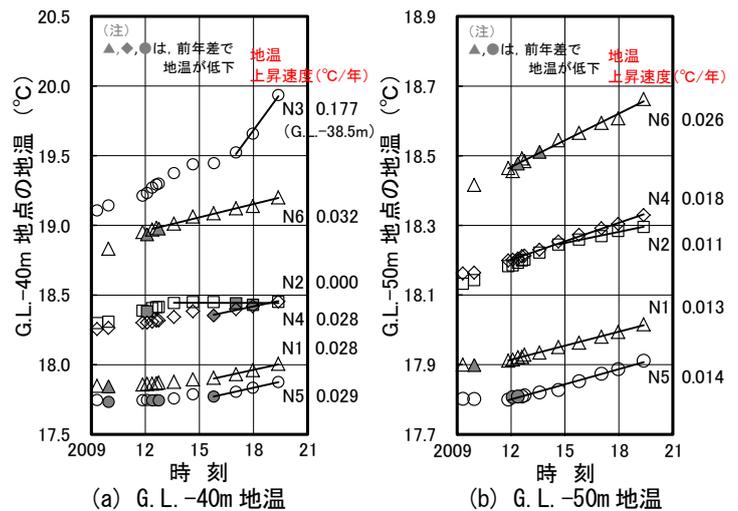


図-4 G.L.-40m および -50m 地温の経時変化

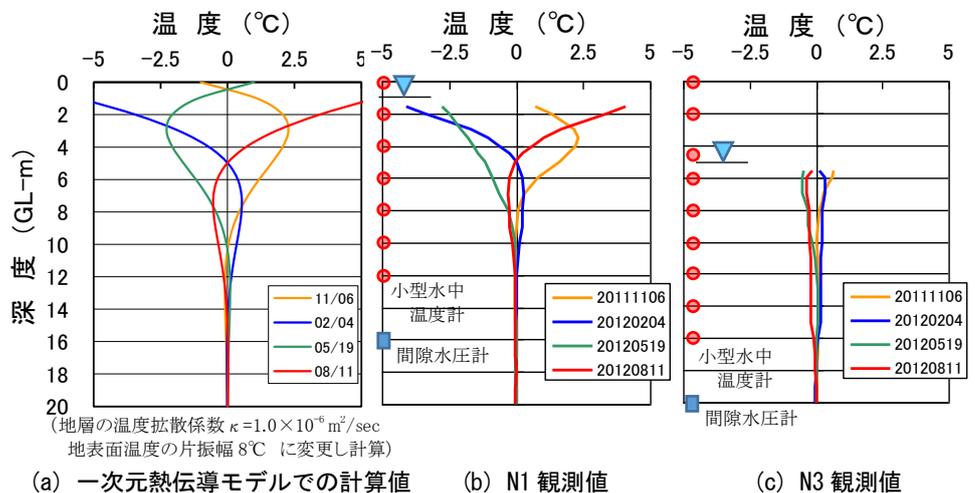


図-5 深度毎の年平均地温からの偏差<sup>文献 9)</sup> の図-5 に加筆

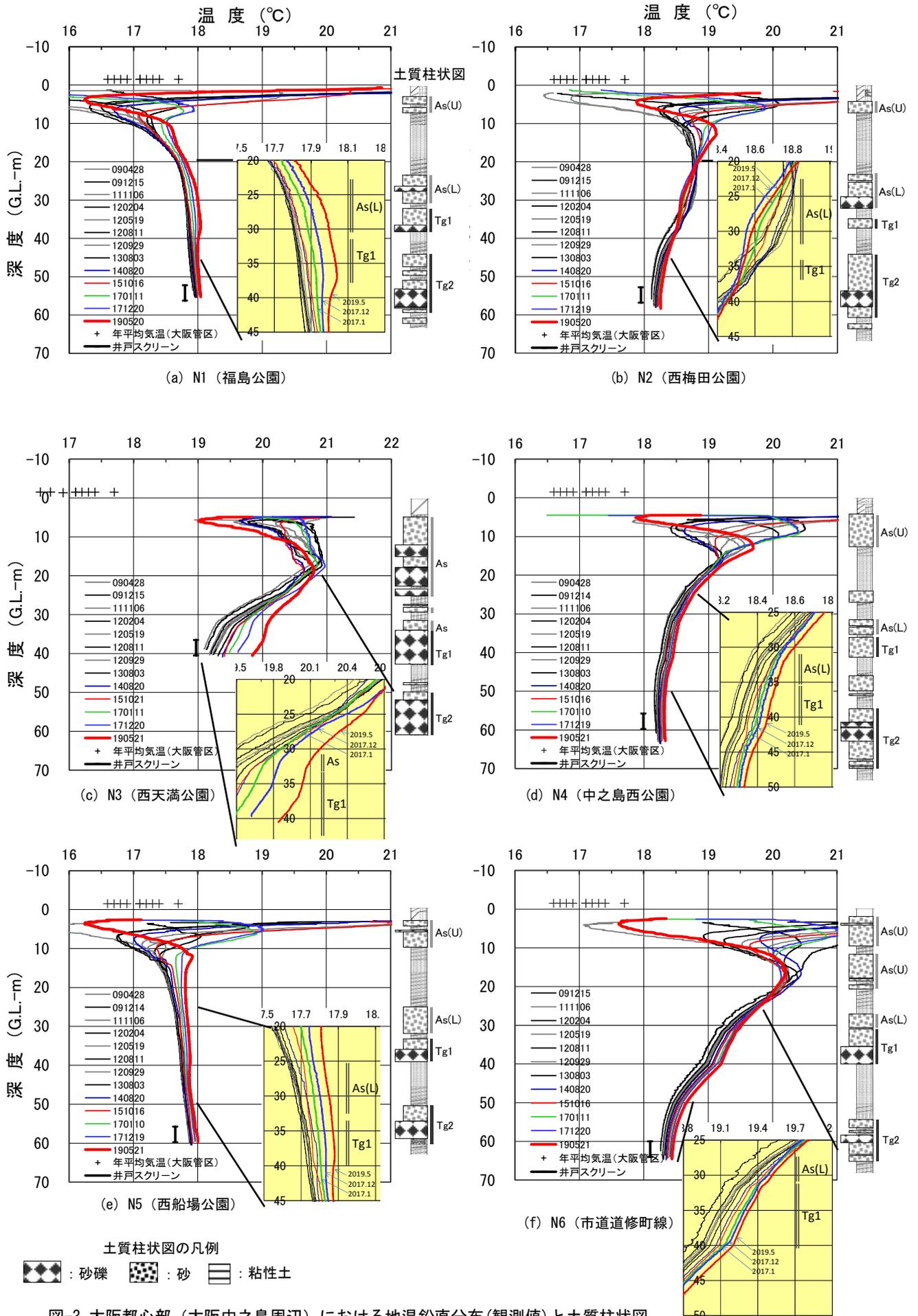


図-3 大阪都心部（大阪中之島周辺）における地温鉛直分布（観測値）と土質柱状図

## 5.2 観測井周辺の地層構成

国道1号2号沿いの地層断面図<sup>14)</sup>を図-6に示す。観測井N1~N3の位置はいずれも、国道から約60m離れと国道に近いことから、国道1号2号沿いの断面図を採用した。観測井N1およびN2周辺では、上部沖積砂層As(U)と下部沖積砂層As(L)+第1洪積砂礫層Tg1が、沖積粘土層Acによって分離され、それら帯水層はほぼ水平に堆積している。

一方、N3周辺では、その東側に上町断層が存在し、Ac層が途切れてAs(U)層とAs(L)層が合わさり、一部でAs(L)層とTg1層の繋がりも見られる。さらに、Ma12層も途切れている。この周辺のAs層とTg1層の地下水位は、As層の方が約0.8m高く、Tg1層水位が上昇傾向で両者の水位差は減少傾向にあること(後出する図-8参照)から、この周辺では、地下水位の高いAs層から深部へ向かっての地下水流動(地下水涵養)が生じている可能性が考えられる。

## 5.3 地温の多深度・定点連続計測結果

図-5(c)で示した観測井N3の地温分布の間延びは、地表面温度の年周変動からの影響なのか、あるいは上述した地下水流動による影響なのかを検討するために、観測井N3と比較対象の観測井N1に対して、2015年5月23日から2019年1月8日まで、地温の多深度・定点連続計測を行った。計測間隔は正時の1時間間隔である。

使用した小型水中温度計を写真-1に示す。小型水中温度計は米国Onset社のテイドビットv2(データロガー機能付き)で、温度の測定精度は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、分解能は $0.02^{\circ}\text{C}$ である。その設置深度は、前掲図-5(b),(c)に示すとおりで、地表面から基本的に2m間隔で、地下水位計測のための間隙水圧計測ケーブルに取り付けた。また、G.L.-5cmの土壤温度を地表面温度と定義し、G.L.+2m地点の気温とマンホール内空気温度も計測した。観測井N1およびN3における計測結果、降水量(大阪管区气象台)および地下水位<sup>15)</sup>の経時変化を図-7と図-8に示す。

図-7と図-8から、観測井N1,N3とも、全体として年周変動が卓越し、深度が深くなるにつれて年周変動の振幅が減少し、位相が遅れているのが分かる。

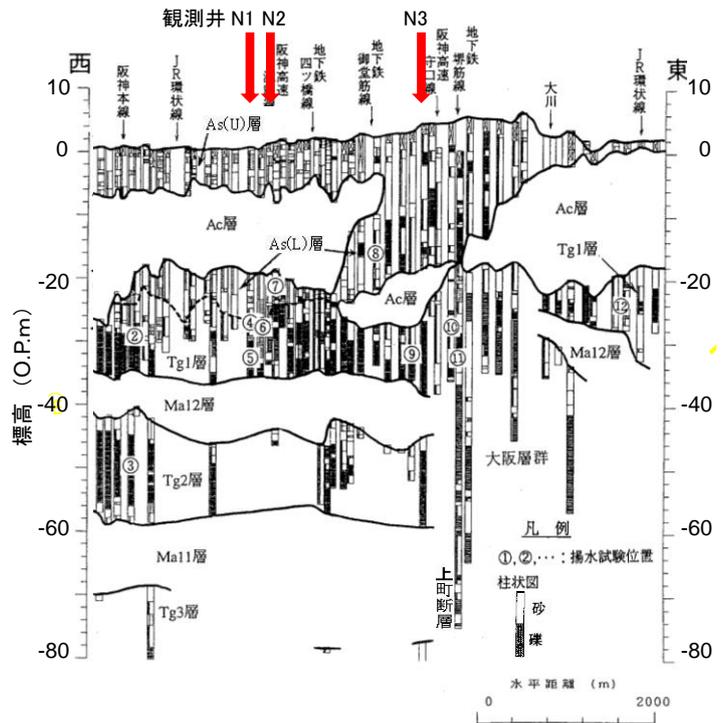


図-6 国道1号2号ルート沿いの地層断面図<sup>14)</sup>

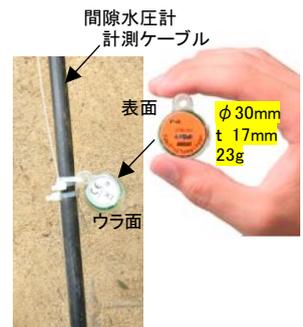


写真-1 小型水中温度計

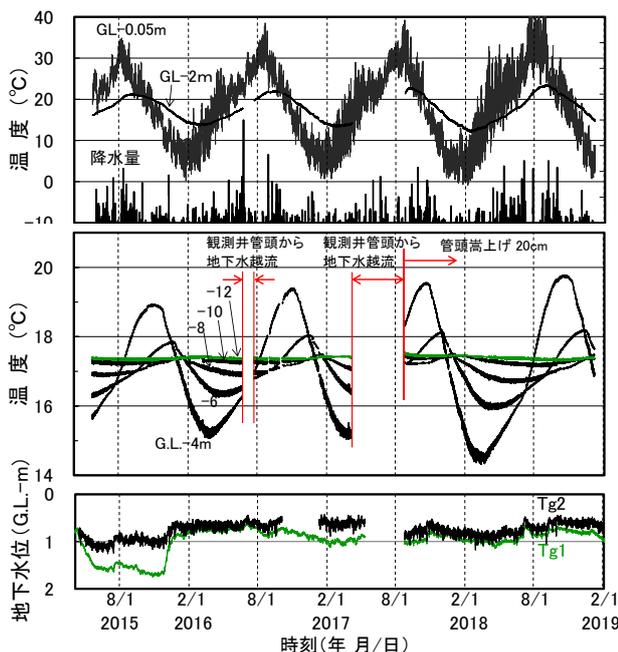


図-7 N1 地温, 降水量, 地下水位<sup>15)</sup>の経時変化

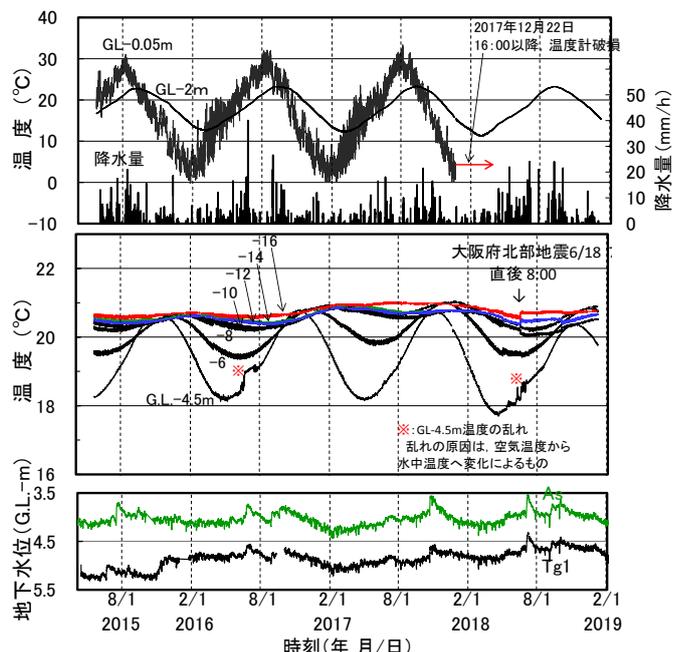


図-8 N3 地温, 降水量, 地下水位<sup>15)</sup>の経時変化

### 5.4 一次元熱伝導モデルを用いた解析結果と考察

観測井 N3 の地温分布の特異性（間延び）を考察する。熱的性質が一般的な半無限の媒質(地層)で、水の流れない一次元熱伝導方程式を考える。

一次元熱伝導方程式  $\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta(z,t)}{\partial z^2}$  に、地表面の境界温度として

正弦関数  $\theta(0,t) = A_0 \sin(\omega t)$  が過去から無限に繰り返し与えた時の深さ  $z$  方向の媒質温度分布  $\theta(z,t)$  は次式(1)で与えられる<sup>9)</sup>。

$$\theta(z,t) = A_0 \cdot \exp(-z/\sqrt{2\kappa/\omega}) \cdot \sin(\omega t - z/\sqrt{2\kappa/\omega}) \quad (1)$$

ここに、 $\theta$  : 温度 (°C),  $z$  : 深さ (m)

$t$  : 時間,  $A_0$  : 境界温度の片振幅 (°C)

$\omega$  :  $2\pi/T$ ,  $T$  : 境界温度の変動周期 (day)

$\kappa$  : 媒質の温度拡散係数 (m<sup>2</sup>/sec)

一次元熱伝導方程式の解析解である式(1)を用いた計算例を図-9に示す。計算は日単位である。温度は、深さ  $z$  に伴う“振幅の減衰”と“位相の遅れ”を伴うこととなるが、図-10に示すように、深度と振幅比の対数、深度と位相遅れの間には直線的な関係にあり、両者は一致する。それは式(1)から以下のようにして導かれる。

深さ  $z$  の位置での温度片振幅を  $A$  とすると式(1)は、

$$A = A_0 \cdot \exp(-z/\sqrt{2\kappa/\omega}) \cdot 1 \quad (2)$$

となり、両辺を変形して対数をとると、式(3)となる。

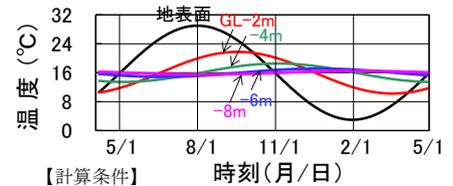
$$-\ln(A/A_0) = z/\sqrt{2\kappa/\omega} (= \delta) \quad (3)$$

なお、図-9での計算条件において、図-10に示す位相遅れ  $\delta$  の増分 1.0 は約 2 ヶ月弱に相当する。また、深度と位相遅れの関係が直線近似可能であれば、その近似線と式(3)から媒質の温度拡散係数  $\kappa$  を逆算することができる。

図-11は、図-8で示した観測井 N3 での計測温度を日平均値に直し、地表面(G.L.-0.05m)の温度計算値が  $\theta_s = A_0 \cdot \sin(\omega t + \varepsilon)$  で表され、地下の温度計算値が  $\theta = A \cdot \sin(\omega t - \delta + \varepsilon)$  で表されるものとして、計測温度と温度計算値の偏差の二乗和が最小となるよう  $A_0$ ,  $A$ ,  $\delta$  を求めたフィッティング結果である。フィッティング期間は、計測開始翌日の 2015 年 5 月 24 日から 2016 年 8 月 1 日までの約 1 年 2 ヶ月間とした。図中、黒線が計測温度、赤線が温度計算値である。同様な解析は観測井 N1 の計測温度に対しても実施しているが、紙面の都合上省略する。

図-11を見て、G.L.-6m 以深において、計測開始から 2016 年 10 月頃までのフィッティングは良好であるが、その後の約 1 年間では計測温度の方が温度計算値よりも 0.2~0.5°C 高く、フィッティングにずれが生じている。このフィッティング期間外の考察は後述するとして、フィッティング期間内で得られた深度と振幅比の対数、深度と位相遅れの関係を図-12に示す。図から以下のことが分かる。

- ① 観測井 N1, N3 とも、振幅比の対数と位相遅れが一致しないことから、土中の水の流れ(水平・鉛直・斜め方向)の影響など、熱伝導が一次元ではない。
- ② 観測井 N1, N3 とも、振幅比の対数や位相遅れは深度の増加とともに直線的に大きくなるが、観測井 N3 では G.L.-8m よりも深くなると、その増加傾向は小さくなる。すなわち、深度増加に伴う温度振幅の減少は解析解ほど小さくなく、かつ位相遅れが揃う現象が生じている。
- ③ 深度・位相遅れの近似線と式(3)の連立から、参考値として温度拡散係数  $\kappa$  (m<sup>2</sup>/sec) を逆算すると、観測井 N1 の As(U)層で  $8.8 \times 10^{-7}$ 、Ac 層で  $8.4 \times 10^{-7}$ 、観測井 N3 の As 層で  $6.4 \times 10^{-7}$  が得られ、逆算  $\kappa$  は“湿潤砂”の  $7.4 \times 10^{-7}$  ならびに“湿潤粘土”の  $5.1 \times 10^{-7}$ <sup>16)</sup> と近い値である。



【計算条件】  
 ①地表面温度  
 平均温度：16 °C, 片振幅  $A_0$  : 13 °C  
 最大値の発生日：8月1日  
 変動の1周期：365日  
 ②地層：1層, 温度拡散係数  $\kappa$  :  $6.0 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/sec

図-9 地表面温度および地温の経時変化 (一次元熱伝導モデルでの計算例)

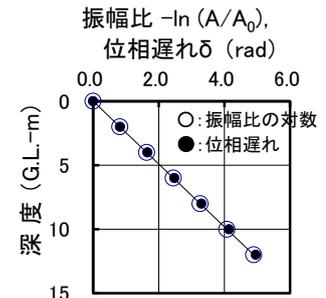


図-10 深度と振幅比の対数、位相遅れの関係 (図-9の計算例)

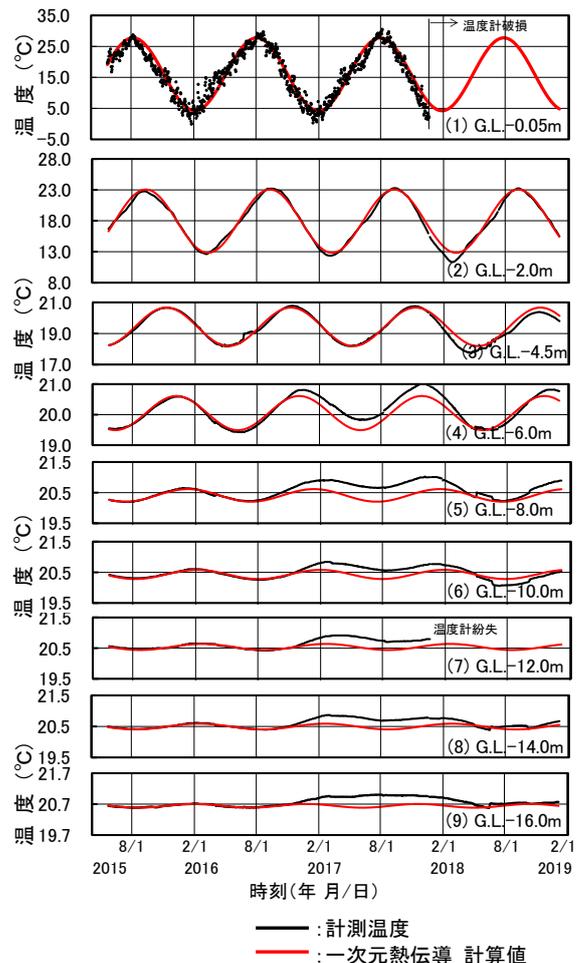


図-11 観測井 N3 深度毎地温のフィッティング結果

②の現象について考察する。当該地層 As 層は As(U)層と As(L)層が合わさり、透水性が非常に良い礫質土優勢の土が地表面から G.L.-25m まで厚く堆積する。地下水位は GL-4.3m~-4.0m 付近に位置する。このような帯水層において、観測井周辺の外側から温度の高い地下水が継続して浸透することで、深度増加に伴う温度振幅の減衰や位相遅れが生じにくく、結果的に温度の年周変動の上限がある温度（この場合、約 20.5℃、図-8 参照）で揃うような現象、すなわち As 層において、地下水流動（地下水涵養）の影響を受けている可能性が考えられる。

次に、フィッティング期間外の 2017 年ではフィッティングにずれが生じていることについて考察する。図-13 に 2015 年と 2017 年に観測した地温鉛直分布を示す。図より、As 層の地温は 2017 年の方が 2015 年よりも全体的に約 0.4℃高いことが分かる。このことから、G.L.-6m 以深の As 層の 2017 年地温は、2015 年よりも温度の高い地下水が As 層内を継続的に流動した影響を受けたものと推察される。

## 6. まとめ

大阪都心部において、2016 年～2019 年までの地温観測結果からでも、地上の温暖化と同様、地下でも温暖化が着実に進行している。地下温暖化の進行性を評価する指標として、G.L.-50 m 地温とその上昇速度で見ると、G.L.-50 m 地温が最も高い観測井 N6 では 0.026 °C/年の上昇速度を示しており、気温の上昇速度 0.030 °C/年に匹敵する位の大きさである。

また、上町断層に近い観測井 N3 の地温形成は、土中に水の流れがなく一次元熱伝導だけでは説明できなく、帯水層 As 層における地下水流動（地下水涵養）の影響を受けている可能性が考えられる。

## 参考文献

- 1) Saito, T., Hamamoto, S., Ueki, T., Ohkubo, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. : Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling. *Water Research*, 94, pp.120-127, 2016.
- 2) 斎藤健志, 小松登志子: 地中熱ヒートポンプが地下環境に与える影響 持続的利用に向けて, *地下水学会誌*, 56, pp.15-25, 2014.
- 3) Taniguchi, M., and Uemura, T. : Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan, *Physics Earth Planetary Inter.*, 152, pp.305-313, 2005.
- 4) Taniguchi, M., Uemura, T., and Jago-on, K. : Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities. *Vadose Zone Jour.* 6(3), 591-596, 2007.
- 5) 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.
- 6) 北岡豪一, 吉岡龍馬, 有本弘孝: 地下温度の鉛直分布に記録されている気候温暖化履歴の解析, *地下水地盤環境に関するシンポジウム 2006 発表論文集*, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.115-124, 2006.
- 7) 北岡豪一, 有本弘孝, 吉岡龍馬: 温暖化に伴う大阪平野の地温モニタリング, *地下水地盤環境に関するシンポジウム 2010 発表論文集*, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.69-80, 2010.
- 8) 有本弘孝, 北岡豪一, 谷口真人, 吉岡龍馬, 上村剛史: 大阪地盤における地下温度鉛直分布の地域性, *地下水地盤環境に関するシンポジウム 2007 発表論文集*, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.51-60, 2007.
- 9) 有本弘孝, 北岡豪一, 谷口真人, 濱元栄起: 大阪中之島周辺における地下温度鉛直分布の特徴, *地下水地盤環境に関するシンポジウム 2012 発表論文集*, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.27-38, 2012.
- 10) 有本弘孝, 北岡豪一, 谷口真人, 濱元栄起: 大阪都心部における地下温暖化の実態, *Kansai Geo-Symposium 2013 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.53-58, 2013.
- 11) 濱元栄起, 有本弘孝, 北岡豪一, 谷口真人: 大阪都心部における地下温暖化履歴の推定, *Kansai Geo-Symposium 2013 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.59-64, 2013.
- 12) 有本弘孝, 谷口真人, 濱元栄起, 岸本安弘, 中戸靖子, 小林晃: 大阪都心部における地下温暖化の実態 (その 2), *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.147-152, 2016.
- 13) 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.
- 14) 岸尾俊茂: 掘削工事における地下水位低下工法と土留め設計に関する研究, *京都大学博士論文*, p.40, 2007.
- 15) 地下水地盤環境に関する研究協議会: 平成 27 年度～30 年度 地下水情報に関する報告書, *地下水地盤環境に関する研究協議会*, 2015～2018.
- 16) 萩野谷成徳: 1 次元線熱源を備えた温度測定装置を用いた土壌の熱伝導率観測, *天気*, 49 巻 9 号, 日本気象学会, pp.21-30, 2002.

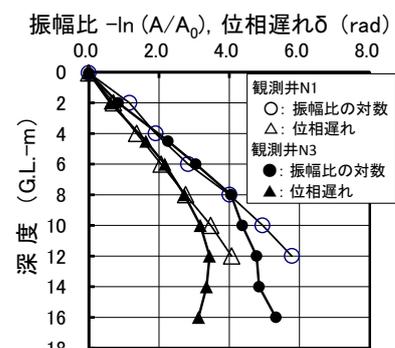


図-12 深度と振幅比の対数、位相遅れの関係

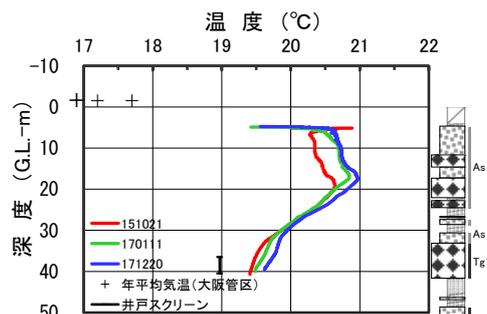


図-13 観測井 N3 2015 年と 2017 年の地温鉛直分布 (観測値)