

## 大阪都心部における地下温暖化の実態（その2）

○有本弘孝<sup>1</sup>・谷口真人<sup>2</sup>・濱元栄起<sup>3</sup>・岸本安弘<sup>4</sup>・中戸靖子<sup>5</sup>・小林 晃<sup>6</sup>

<sup>1</sup>(株)地域地盤環境研究所・<sup>2</sup>総合地球環境学研究所・<sup>3</sup>埼玉県環境科学国際センター

<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>関西大学環境都市工学部

### 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)”である。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。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、その蓄熱分も活用できるという利点もある。地下温暖化の将来にわたる変化を予測し、その対策や活用を講じるためにも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。

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、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)8)</sup>、有本ほか<sup>7)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（委員長：関西大学 小林晃教授、2013年10月発足）に引き継がれている。今後、地下温暖化による地下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、また、大阪平野における地中熱利用ポテンシャルの調査研究を行うためにも、大阪都心部および大阪平野における地下温暖化の実態を正確で詳細に調査研究することは極めて有意義であると考えられる。なお、本報告において、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 2013*において筆者が発表した“大阪都心部における地下温暖化の実態”<sup>10)</sup>の継続版である。大阪都心部（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、2013年の発表以降3年間の観測結果を中心に、一部の観測井のある深度の地下温度が低下した（地下温度鉛直分布が乱れた）こと、地下温度の上昇速度等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

地下温暖化の議論に当たり、大阪の地表気温の観測値を改めて吟味する。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図-1に示す。大阪管区気象台の気象観測所（観測フィールド）は、以下に示す3回の移転履歴<sup>12)</sup>がある。

- |                |        |              |
|----------------|--------|--------------|
| 1882(M15)年 7/1 | 観測所[1] | 大阪市北区堂島で観測開始 |
| 1910(M43)年 9/1 | 観測所[2] | 大阪市港区一条通へ移転  |
| 1933(S8)年 7/1  | 観測所[3] | 大阪市生野区勝山通へ移転 |
| 1968(S43)年 8/1 | 観測所[4] | 大阪市中央区法円坂へ移転 |

観測開始以降、4つの観測所で気温が観測されているが、それら観測所における年平均気温(気象庁 HP 公開データ)の経年変化とその直線近似を図-2(a)に示す。図中、横軸上の▲は観測所の移転を示す。気温の経年変化を長期的な目線で見ると、気温の明らかな上昇時期は0.0351°C/年を示している観測所[3]への移転後である。図-2(b)は参考文献<sup>13)</sup>から引用した、観測所移転に伴う気温のデータ補正が施され長期間連続した経年変化図(HP 公開データとは値が異なる)である。図には、細い折れ線で日最高気温・年平均気温・日最低気温の値、太い折れ線で5年移動平均値、直線で直線近似が示されている。この図によれば、年平均気温は長期平均的に2.0°C/100年の速度で上昇し、気温の上昇速度は日最高よりも日最低気温の方が大きい<sup>13)</sup>。また5年移動平均値から、今日の長期的な気温上昇が始まった時期を推定すると、終戦後の1947(S22)年となり、2.8°C/100年の速度で上昇していることが読み取れる。

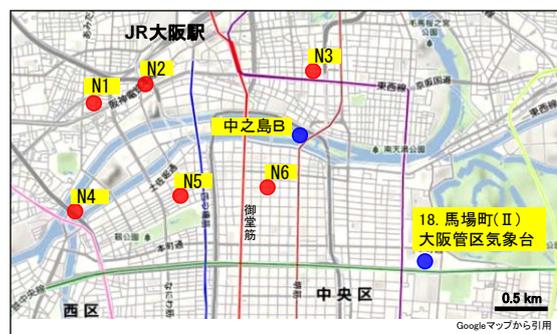


図-1 大阪管区気象台の気象観測所と地温観測井の位置図

Actual states of subsurface warming in the central area of Osaka City, Japan (Part 2)

Hiroataka Arimoto<sup>1</sup>, Makoto Taniguchi<sup>2</sup>, Hideki Hamamoto<sup>3</sup>, Yasuhiro Kishimoto<sup>4</sup>, Yasuko Nakato<sup>5</sup>, Akira Kobayashi<sup>6</sup> ( <sup>1</sup>Geo-Research Institute, <sup>2</sup>Research Institute for Humanity and Nature, <sup>3</sup>Center for Environmental Science in Saitama, <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>Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University )

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

### 3. 地下温暖化を示す地温鉛直分布

地下温度は、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の移流、④周辺からの熱の伝搬、そして⑤地下の熱物性、などによって決まる。このうち、地表面温度の上昇が地下温暖化の主要な負荷と考え、地表面温度上昇に伴う地下温度の形成を単純化するために、③と④がないものと仮定すると、地下温暖化は深さ方向の一次元の熱伝導問題として考えることができる。

#### 3.1 地表面温度上昇に伴う地温形成の計算例

地表面温度の上昇に伴う地温鉛直分布の形成は、熱的性質が様な半無限媒体(1層モデル)で、地表面温度がステップ状あるいは直線状に上昇したとして、媒質内温度分布の変化を一次元の熱伝導理論を用いて計算すると理解しやすい。

地表面温度 15.0 °C、地温勾配 0.030 °C/m の直線温度分布を地下温暖化の開始前の定常的な地温分布として、図-3(a)は地表面温度がステップ状に 2.8 °C 上昇した時の地温鉛直分布の変化を、図-3(b)は、今回新たに計算した地表面温度が直線状に 2.8 °C/100 年の速さで上昇した時の 200 年間の地温鉛直分布の変化を示したものである。なお、計算条件の 15.0 °C、2.8 °C は図-2(b)からの値、0.030 °C/m は大阪平野における一般的な値である。

計算から得られる地下温暖化を示す地温鉛直分布の特徴は、ステップ状のケース(図-3(a))では、時間が大きく経過しない範囲では、ある深さで極小となる地温分布ができ、その極小となる深さは時間とともに深くなりつつ全体的に温度が上昇することである。地表面温度が一旦上昇してしまえば、その後の地表面温度の上昇が無くても、地温は地層の熱伝導により上昇し続ける。一方、直線状のケース(図-3(b))では、ある深さで極小となる地温分布の形成は時間経過が大きくなってからである。両ケースとも、地下温暖化の開始前の地温分布からの温度上昇部分(増分)が地下温暖化であり、蓄積されつつある地中熱(蓄熱)である。

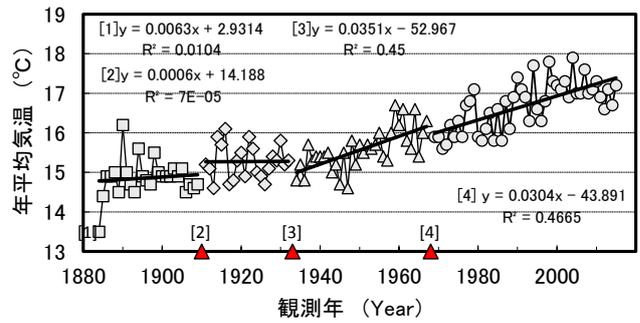
#### 3.2 都市域における地温鉛直分布と地下温暖化

都市域における地温鉛直分布の一般的な特徴は図-4 で、地下温暖化の模式図は図-5 で表される。地表面温度の変動のうち、年周(季節)変動に起因する地温変動は、観測結果からでもせいぜい G.L.-10~20 m<sup>9)</sup> までであるが、年周変動よりも変動の時間スケールの長い長周期的変動はより地下深部へ伝導していき、地温勾配 G の異常(地温の逆転現象)をもたらす。この地温鉛直分布の攪乱域が地下温暖化の深さである。地下温暖化は、地表面温度の長周期的変動が長期的な低下に転じない限り、あるいは蓄熱分を長期的に利用して減少させない限り、進行し続ける。地下温暖化の深さは都市毎に異なり、大阪で約 80~100 m<sup>4)5)</sup>、東京で約 150 m<sup>4)</sup> という解析結果が報告されている。

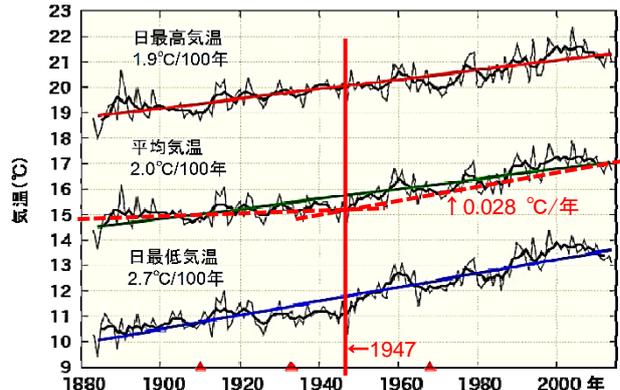
#### 3.3 地下温暖化の進行性を評価する指標

地下温暖化の進行性を評価する指標について考える。図-3 で示した地温鉛直分布の変化を考慮すると、以下の3つの指標<sup>10)</sup>が考えられる。

- ①地温鉛直分布の極小値の深さとその地温

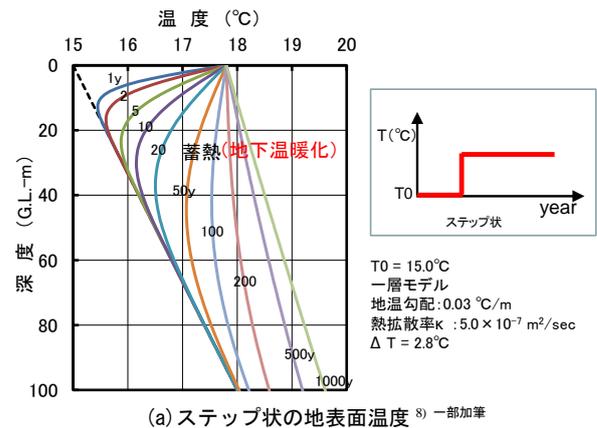


(a) 観測所毎の経年変化(1883~2015年)

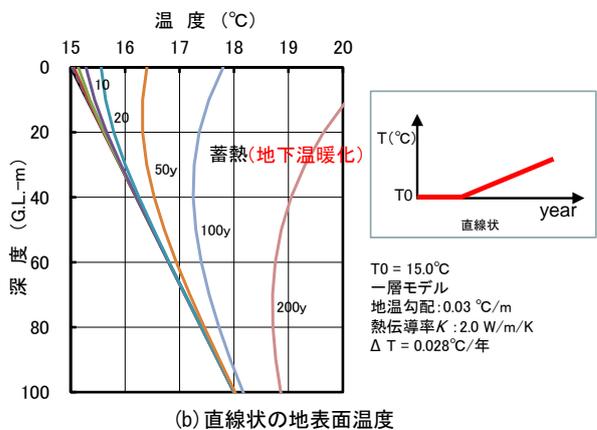


(b) 連続した経年変化(1883~2015年)<sup>13)</sup>に加筆

図-2 大阪管区气象台における気温の経年変化



(a) ステップ状の地表面温度<sup>8)</sup>一部加筆



(b) 直線状の地表面温度

図-3 地表面温度上昇に伴う地温鉛直分布の変化

- ②地下が温暖化する前の定常地温分布からの乖離開始深さ（地下温暖化の深さ）
- ③地下温暖化が生じている特定深度における地温とその上昇速度

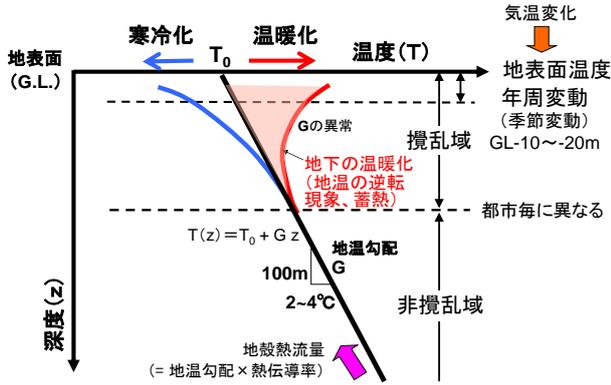


図-4 都市域における地温鉛直分布の一般的な特徴 (模式図)<sup>5)</sup>

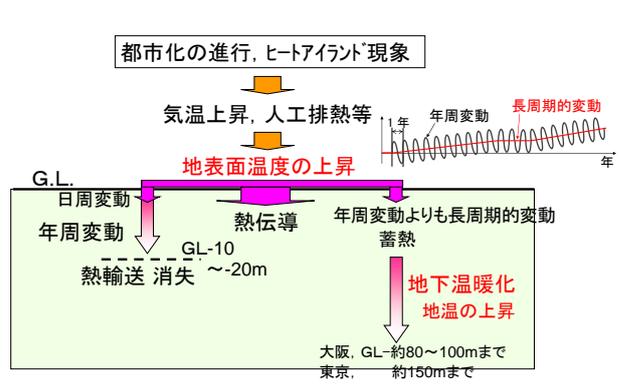


図-5 都市域における地下温暖化の模式図

①については、観測井全てで地温分布に必ずしも明瞭な極小値が認められない。②については、ほとんどの観測井の深さは100m未満と浅く、地温勾配で決まる地下温暖化前の定常的な地温分布が定かでない。③については、①や②の指標よりも主観の入る余地がなく、簡潔で分かりやすい。以上のことから、2013年から当面の指標として③を採用している。図-6は、図-3の2ケースにおいて、G.L.-40m深さの地温（以下、G.L.-40m地温と呼ぶ）の経年変化を示したものである。ここで、G.L.-40m地温を選んだ理由<sup>10)</sup>は、

- ・地温の年周(季節)変動深さの下端(深度20m)から、大阪都心部の観測井孔底(深度60m)までの中間深度
- ・大阪での地下温暖化の深さ約80~100mの中間付近深度

であることによる。地表面温度がステップ状のケースでは、100年単位の長期間で見れば地温の経年変化は曲線形を示すが、10年単位の短期的で見ればほぼ直線変化と見なせる。一方、直線状のケースでは、おおよそ50年経過以降では直線変化と見なせる。また両ケースとも深度が大きくなるほど曲線形はよりなだらかになる。

#### 4. 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水位観測井6本である。2015年までの地温観測日の一覧表を表-1に示す。地温観測機器と観測方法は、当シンポジウムでの既往発表<sup>5)10)</sup>に記載しているので割愛するが、観測に用いた水中温度計の測定精度は±0.05℃、分解能は0.001℃である。

図-7(次ページ参照)は、N1~N6観測井全てについて、観測された地温鉛直分布、年平均気温(大阪管区気象台)、ならびに土質柱状図、井戸スクリーン位置を示したものである。同図には直近2年分の地温鉛直分布(2015年を赤太線、2014年を青太線)をより分かりやすくするために拡大図も示している。拡大分布図を見ると、表-2にまと

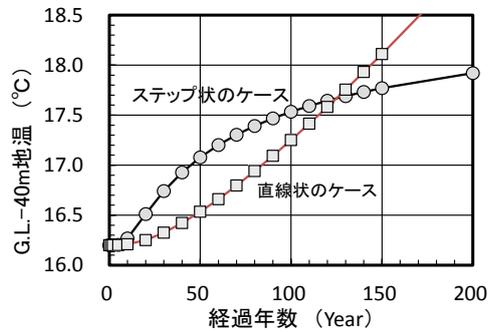


図-6 G.L.-40m地温の経年変化

表-1 地温観測日

観測井No. (名称)	2009	2011	2012	2013	2014	2015
N1 (福島公園)		12/15				10/16
N2 (西梅田公園)	4/28		11/6	2/4	5/19	8/11
N3 (西天満公園)			8/11	9/29	8/3	8/20
N4 (中之島西公園)		12/14				10/21
N5 (西船場公園)						10/16
N6 (市道道修町線)	—	12/15				
NK (中之島B)	2005/10/4					
18.馬場町(Ⅱ)	1998/12/4	2003/10/15	2011/6/14			

表-2 地温鉛直分布の乱れ (2014年~2015年)

観測井	深度G.L.-m	地層	観測井	深度G.L.-m	地層
N1	26 ~ 32	As(L)	N2	20 ~ 40	As(L), Tg1
N3	33 ~ 38	Tg1	N4	33 ~ 44	Tg1
N5	31 ~ 41	Tg1	N6		地温分布の乱れはなし

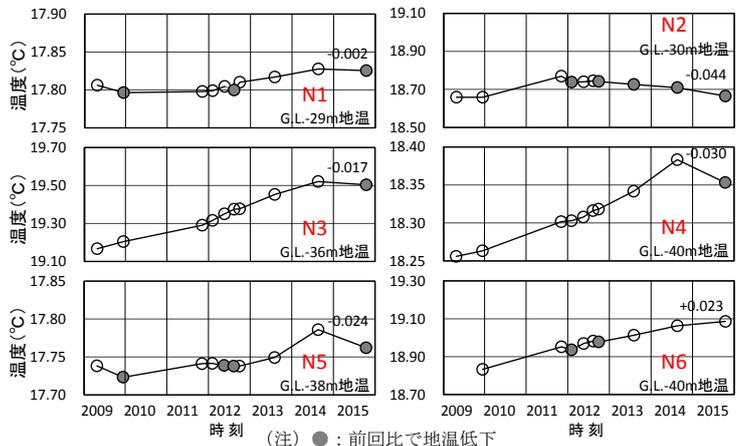


図-8 特定深度での地温の経時変化

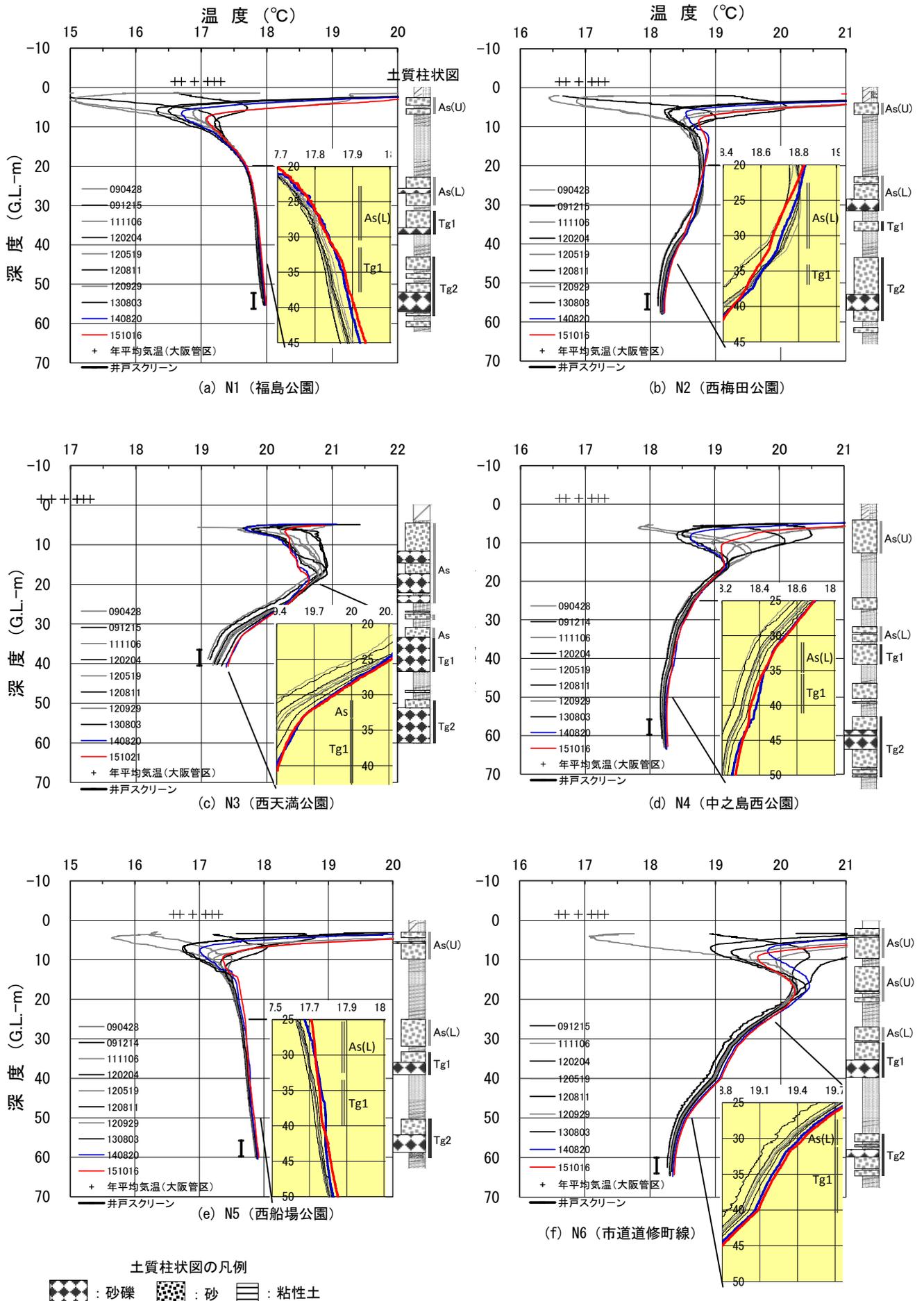


図-7 大阪都心部（大阪中之島周辺）における地温鉛直分布（観測値）と土質柱状図

めた観測井、深度、地層において、2015年地温>2014年地温で、かつ両者の平行状態が崩れて下凸型の分布状態、すなわち2015年の地温鉛直分布が乱れていることが分かる。乱れが生じている中心的な地層は、沖積下部砂質土層 As(L)と第1洪積砂礫(天満砂礫)層 Tg1 という帯水層である。N6 観測井のみそのような地温鉛直分布の乱れは生じていない。

上述した地温鉛直分布の乱れを図-8の経時変化で示す。各観測井において、プロットした地温の深度は2015年地温と2014年地温の差が大きい深度であり、縦軸スケールの違いに注意されたい。図には、地温が前回比で低下した時を●印で、また2015年地温と2014年地温の差も記している。地盤に地下水流動がない状態においては、図-6で説明したように、地温の短期的経年変化はほぼ直線的な増加と見なせるが、そのような状況を示す観測井は、N3 および N4 観測井の2009年～2014年の期間である。N2 観測井では2013年から地温低下が継続しており、他の観測井とは異なる変化を示している。

## 5. 地温鉛直分布の乱れに対する考察

### (1) 2015年の地温の乱れ

ある深度における地温が前回観測値よりも低くなるには、観測井の地温よりも低い周辺の地下水が、地下水流動により観測井を水平方向に横切る現象が考えられる。すなわち、地下水流動による熱の移流である。被圧地下水が流動するためには、被圧地下水に動水勾配がなければならない。図-9は、地温観測井から約1～2m離れた位置に設置されているTg1層の地下水位観測井における地下水位の経時変化を示したもので、地温観測日を破線◆で明示している。図によると、2014年の地温観測日から2015年の地温観測日までの間で、中之島周辺広範囲のTg1層の地下水位が約0.3m(N6観測井)～1.1m(N4観測井)低下しているのが分かる。

As(L)層やTg1層は建設工事における地下水位低下工法の揚水対象層になることを考慮すると、工事揚水によりAs(L)層およびTg1層の地下水位が低下し、工事の揚水井戸に向かう水平方向の地下水流動が広範囲に発生したものと考えられる。

このような帯水層As(L)やTg1を揚水対象とした工事揚水で地下水位が低下し、As(L)およびTg1を中心に生じた地温鉛直分布の乱れは、大阪市環境局が所有・管理する港A,B観測井(大阪港沿岸部の安治川の左岸側、八幡屋公園近く)における2003年10月と2005年10月の地温観測結果の差異からも認められている<sup>7)</sup>。

### (2) 2012年の地温の乱れ

2012年においてもN1,N2,N5およびN6観測井の地温は、前回比で0.001～0.015℃という微小な低下(図-8参照)が生じている。この2012年の地下水位低下量は図-9に示すように約0.3m(N3観測井)～0.6m(N1観測井)であり、2015年の地下水位低下量ほど大きくはない。2012年の地温の乱れも工事揚水による地下水流動による影響と考えられる。なお、地下水位低下が生じていない2013年と2014年では、N2観測井を除き、地温の乱れは生じていない。

地温の乱れ(地温への影響)は揚水規模が大きいほど生じやすいが、地温観測井周辺における、三次元的な地温分布と揚水による地下水の流向・流速に左右される。それゆえ、揚水規模と地温の乱れ程度を見るためには、精度の高い広域地下水浸透流解析と地温観測井周辺での熱移流解析に頼らざるを得ないと考えられる。

## 6. 大阪都心部における

### 地下温暖化の進行状況

3.3節で述べたように、地下温暖化の進行性を評価する際、G.L.-40m地温の経時変化からその地温と上昇速度を、2013年から当面の指標として採用している。図-10は、G.L.-40m地温の経時変化とその上昇速度を示したものである。図中、N4とN5観測井の地温上昇速度は、2015年の地温が前年の地温よりも低下しているので、参考値とする。図によると、N4およびN5観測井以外の観測井では

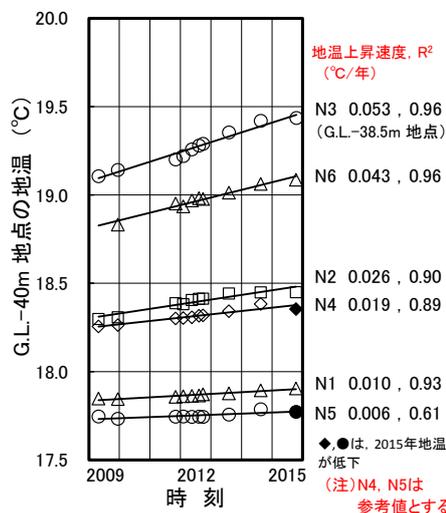


図-10 G.L.-40m地温の経時変化

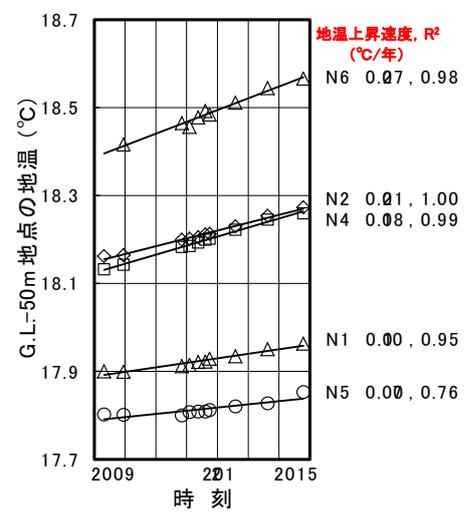


図-11 G.L.-50m地温の経時変化

2013年当シンポジウムでの発表以降、2013年、2014年、2015年と地温は上昇し続けている。また、地温の上昇速度は地温そのものが高いほど大きい。地温が最も高いN3観測井の地温上昇速度は0.05℃/年で、この速度は、図-2で示した大阪管区気象台の過去132年間（1883年～2014年）の気温の平均上昇速度0.020℃/年や戦後以降（1947年～2014年）の気温上昇速度0.028℃/年よりも約2倍程度大きい。一方、地温の低いN1観測井では、地温上昇速度は0.01℃/年と低い。G.L.-40m地温の上昇速度が気温の上昇速度を上回っている観測地点は、一つの解釈として、都市化の進行に伴う地表面温度の上昇速度が気温の上昇速度よりも大きいことが考えられる<sup>10)</sup>。

G.L.-40m地温の地層は、建設工事での被圧地下水揚水により地下水流動が起きやすい帯水層であるため、地下水流動による熱の移流に伴い地温鉛直分布の乱れが生じやすい。そのため、G.L.-40m地温のみを地下温暖化の進行性を評価する指標とすることには不十分である。そこで、大阪における地下温暖化の深さ100mの半分でもあるG.L.-50m地温も指標に加えることとする。G.L.-50mの地層はTg1層とTg2層の間の粘性土層Ma12またはTg2層に相当する。Tg2層を揚水対象層とした工事揚水は大深度開削工事以外稀であるので、地下水流動によるG.L.-50m地温の乱れは生じにくいと考えられる。図-11にG.L.-50m地温の経時変化とその上昇速度を示す（N3観測井は孔底がG.L.-40mであるためG.L.-50m地温は観測できない）。2015年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N6観測井の地温上昇速度は0.027℃/年で、戦後以降の気温の上昇速度0.028℃/年とほぼ同程度である。このことから、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。

## 7. まとめ

大阪都心部において、大阪管区気象台観測所における年平均気温は、1982(M15)年に観測開始以降、長期平均的に2.0℃/100年の速度で上昇している。また5年移動平均値から今日の長期的な気温上昇が始まった時期を推定すると、終戦後の1947(S22)年からで、2.8℃/100年の速度で上昇している。

2009年～2012年までの地温観測結果と同様、2013年～2015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.-40m地温とその上昇速度のみを用いることは、帯水層における地下水流動による熱の移流に伴い地温鉛直分布が乱れることがあり、不十分であることから、地温分布の乱れが生じにくいG.L.-50m地温も指標に加えることが適切である。G.L.-50m地温が最も高いN6観測井では、G.L.-50m地温が0.027℃/年の上昇速度を示しており、戦後以降の気温上昇速度0.028℃/年とほぼ同程度である。

## 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., T. Uemura : 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., 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) 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.
- 8) 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.
- 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) 大阪管区気象台: 大阪の気象百年, (財)日本気象協会関西支部, pp.6-8, 1982.
- 13) 西村修一: 大阪府における地球温暖化の状況について, 大阪府地球温暖化防止活動連絡調整会議 話題提供資料, 一般社団法人 大阪府みどり公社 HP, 2015.
- 14) 地下水地盤環境に関する研究協議会: 平成 23 年度～27 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, 2011～2015.