### 大阪平野における地下温暖化の実態

○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>・水間健二<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

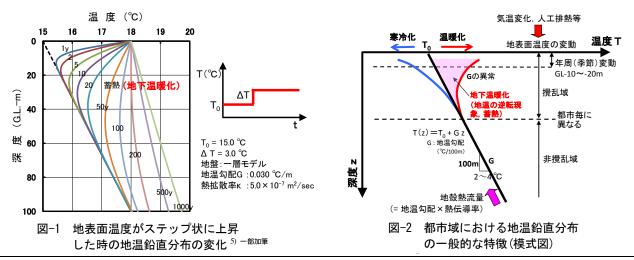
都市域における都市化の進行やヒートアイランド現象は、地表面温度を上昇させ、地中では主に熱拡散によって表層から深さ方向に地下温度を徐々に上昇させている。すなわち、"地下の温暖化"である。地下温度が上昇すると地層から化学成分の溶出や汚染物質の離脱が促進され、土壌水や地下水の水質だけでなく地下の微生物活動にも影響が生じる可能性がある。これら地下温暖化に伴う地下環境への影響は、隠れた熱汚染問題であり、現在、各方面で研究が進められている。一方で地下の温暖化には、地下温度上昇分の地中熱が蓄積されているため、その蓄熱分も活用できるという利点もある。地下温暖化の将来にわたる変化を予測し、その対策や活用を講じる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>1) 2)</sup> により主に大阪湾沿岸部と郊外を対象に実施された(以降、一斉調査と呼ぶ)。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の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、その成果の一部を北岡ほか <sup>3) 5)</sup>、有本ほか <sup>4) 6) 7)</sup>、濱元ほか <sup>8)</sup> により報告済みであり、現在は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)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。

本稿は、地中熱研究委員会の研究成果の一部として、大阪平野の 2011 年一斉調査で得られた 30 地点の地下温度(地下水位観測井の井戸管内の水温鉛直分布)の観測結果について、過年度一斉調査からの経年変化、大阪平野の地下温暖化の実態(地下温度の高さ、地下温度の上昇速度等)について報告するものである。

#### 2. 地下の温暖化を示す地温鉛直分布

地上の温暖化に伴う地温形成のメカニズムは、熱的性質が一様な半無限の媒体(地層)で表面(地表)の温度がステップ状に上昇したとして、媒質内温度分布の変化を熱伝導理論を用いて計算すると理解しやすい。**図-1** は、地表面温度 15.0  $^{\circ}$  、地温勾配 0.030  $^{\circ}$  ペ の直線温度分布を温暖化開始前の定常的な地温分布として、地表面温度がステップ状に 3.0  $^{\circ}$  と上昇した時の地温鉛直分布の変化  $^{5}$  を示したものである。この図より、地下温暖化を示す地温分布の特徴は、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。この温度の上昇部分(増分)が地下温暖化で蓄積された地中熱(蓄熱)であり、地表面温度が一旦上昇した後、



Actual States of Subsurface Warming in Osaka Plains, Japan

Hirotaka Arimoto<sup>1</sup>, Makoto Taniguchi<sup>2</sup>, Hideki Hamamoto<sup>3</sup>, Yasuhiro Kishimoto<sup>4</sup>, Kenji Mizuma<sup>5</sup>, Akira Kobayashi<sup>6</sup> ( ¹Geo-Research Institute, ²Research Institute for Humanity and Nature, ³Center for Environmental Science in Saitama, ⁴Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, ⁵Osaka Prefectural Government, Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, <sup>6</sup>Kansai University )

KEY WORDS: Urbanization, Osaka Plains, Observation well, Temperature

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する。 図-2は、地盤に地下水流動がない仮定で、都市域における地温鉛 直分布の一般的な特徴を示した図である。地温鉛直分布は、地下 深部からの熱供給(地殼熱流量)と地表面温度 Toにより決定される が、地表面温度変動のうち、年周変動以外の長周期的変動がより 地下深部に伝導していき、地温勾配 G の異常(地温の逆転現象)を もたらす。この地温分布の攪乱域が地下温暖化(蓄熱)の範囲であ り、その深さは都市毎に異なる。大阪で約100m、東京で約150m という解析結果<sup>2)</sup>も報告されている。

#### 3. 地下温度の観測

#### (1) 大阪平野で地温観測した井戸

2011 年大阪平野一斉調査と大阪都心部の地温観測井の位置図 をそれぞれ図-3と図-4に示す。前者の井戸(●印)は、河川流域水 文観測のための単管井戸10本,広域地盤沈下観測のための単管井 戸8本および二重管井戸12本の合計30本であり、図中には気象 庁の測候所を▲印(A~F)で示している。後者の井戸は、地下水協 議会が所有する単管井戸6本(N1~N6)と,大阪市が所有する単 管井戸の馬場町(Ⅱ)と二重管井戸の中之島 B である。二重管井戸 とは、地下水位観測用の外管と地盤沈下観測用の内管(ロッド)の 二重管構造(**写真-2**(a)(b)参照)を意味する。

## (2) 地温の観測方法

従来からの地温観測は、観測井管内の水温鉛直分布の測定が行 われている。井戸管内の水の温度は、井戸管の材質や井戸管と地 層との密着度などの影響を受けるが, 時間変動が小さい場合は, 周囲の地層の温度にほぼ等しく、近似的にその深さの地温を表し

 $20_{\bullet}$ Nara Pref. Osaka Pref Observation Meteorological station

2011 年大阪平野一斉調査 における観測井の位置図



図-4 大阪都心部における観測井の位置図

単管井戸における地温観測を写真-1に示す。観測は、温度と圧力を同時に計測できる測定器(メモリーを内蔵)を手動の 巻き上げ機を用いて井戸管中を約2cm/sec の速度(記録間隔1sec)で降下させることによって行った。降下速度は経験上,2 cm/sec 程度がベストであり、降下速度が 5 cm/sec 程度よりも速いと、温度の応答に若干のずれが生じたり、また、水に乱れを生じさ せる可能性がある。測定器は JFE アドバンテック社製の Compact-TD 計で、水深 500 m まで計測可能である。

一方,二重管井戸における地温観測を写真-2に示す。二重管井戸では,井戸深部での外管径の段落ちと外管と内管の間 にあるセントライザーの存在(写真-2(b)参照)により、外管と内管の隙間が狭いことから、単管井戸の測定器よりも直径の 小さい温度測定器を採用した。観測は、温度センサーケーブルに 1m 間隔の目印を付けた温度センサーを井戸内に手動で 降下させながら, 温度を深度 1m 間隔に高精度デジタル温度計で読み取る方法で行った。水深 400 m まで計測可能である。



(a) 単管井戸



ているものと考えられる。通常の地温勾配では、大口径の管内でも水の対流は生じない。

(b) 井戸管頭部



(c) 地温観測状況 写真-1 単管井戸における地温観測



(d) 温度測定器



(a) 二重管井戸



(b) 井戸管頭部



(c) 地温観測状況



温度センサー

1cm 程度

0.001 °C

±0.3 F.S.

0.76 cm

+01 °C 0.01 °C

(d) 温度測定器

写真-2 二重管井戸における地温観測

#### 4. 大阪平野における地温観測結果

#### (1) 大阪平野の地温状態

2011 年春,連名者谷口を研究代表とする共同研究グループにより,大阪平野の30地点で地温鉛直分布の一斉調査が行われた。この一斉調査は1998年と2003年の一斉調査を引き継いだもので,同じ井戸での観測を行って地下温暖化の進行状態を把握することが目的である。2011年一斉調査の地温観測結果をまとめて**図-5**に示す。G.L.-50mまたは-100m地点の地温が低い観測井13,31 および32 を除いて,深層(>50 m)における地温は,深度に対して,2本の平行線(地温勾配:0.033  $^{\text{C}}$ /m,間隔:3.5  $^{\text{C}}$ )の間に収まる。一方,浅層(<50 m)では,深層の地温勾配から外れ,高温側に湾曲する。これは明らかに,**図-1**で示した地下温暖化の特徴を示している。

3回の一斉調査(一部の観測井では 1998年は未調査)で得られた地温分布の経年変化を図-6と図-7に示す。観測地点それぞれで土地利用や地表面被覆形態,さらには地層状態に違いがあるにも係わらず地温は上昇している。このような地温上昇は34.泉南を除く他の観測井全てで認められたことから、大阪平野において都市化の進行している地域では、地下温暖化が着実に進行していると考えられる。

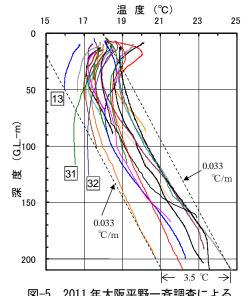


図-5 2011 年大阪平野一斉調査による 地温鉛直分布(観測値)<sup>7) - 部加筆</sup>

なお、34.泉南の地温鉛直分布は、先述した一般的な特徴(**図-2** 参照) とは異なる特異な**S**字状の分布を示していることから、地温データの扱いには注意する必要がある。

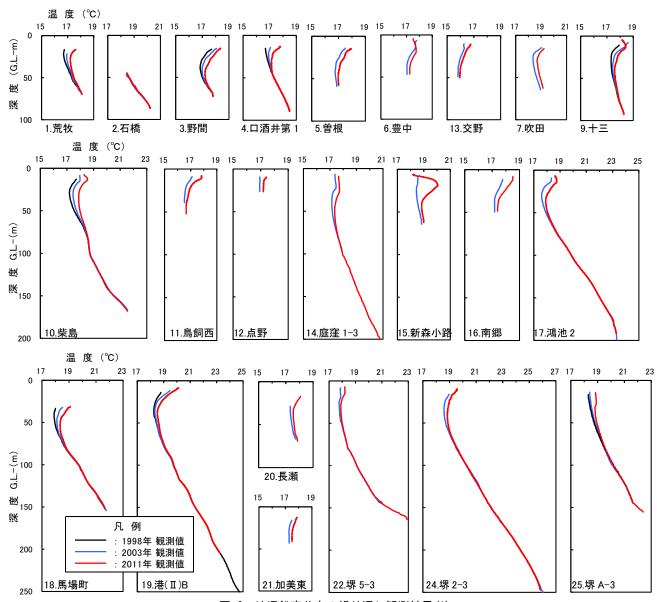
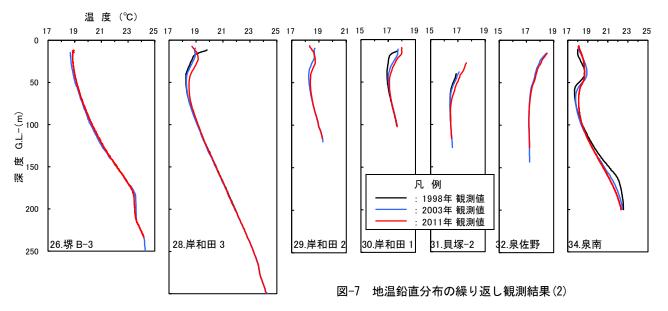


図-6 地温鉛直分布の繰り返し観測結果(1)



# (2) 地温の低い観測地点の考察

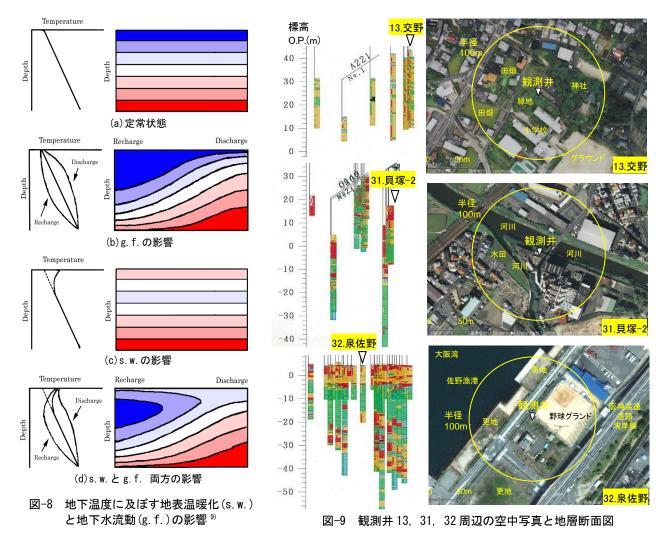
**図-5** において、観測井 13,31,32 の地温が他の観測井よりも相対的に低いことについて、一つの考察を試みる。地下温暖化前後の地温鉛直分布の形状は、地下水流動の有無で、**図-8** に示す4つの模式図に大別される。すなわち、

(a):一定の地温勾配で表される地下温暖化前の定常的な地温分布

(b): (a)の状態から地中鉛直方向に地下水涵養・流入(Recharge)や地下水流出(Discharge)といった地下水流動 (groundwater flow)の影響を受ける場合の地温分布 (地下温暖化前の定常的な地温分布と言ってもよい)

(c): (a)の状態から地表温暖化(surface warming)が生じた場合の地温分布

(d): (b)の状態から(c)の地表温暖化が生じた場合の地温分布



である。図-9は、地温の低い13.交野、31.貝塚-2 および32.泉佐 野の井戸周辺の空中写真と地層断面図を示したものである。13. 交野では、観測井の周囲に田畑や緑地、小学校敷地周りには水路 が存在するうえ、砂質土層が主体の地層構成となっている。31. 貝塚-2では、2つの中小河川に挟まれ、砂質土層優勢の地層構成 にある。32.泉佐野では、大阪湾の佐野漁港に近接し、観測井の周 囲はグランドや更地の状態であるが、層厚 10m 程度の粘性土層 が水平に堆積している。前二者は、雨水浸透しやすい地表面被覆 と水平に堆積した厚い粘性土層が存在しない地層構成から、地下 水涵養が生じている可能性もあり、地下温暖化の弱い(d)の Recharge タイプに近い。一方で後一者は、水平で厚い粘性土層 の存在から地下水涵養の可能性は低く, それよりも地温勾配が小 さい状況下での(c)タイプに近いと推測される。

上述したような地形、地質に基づく全観測井における地温鉛直 分布のタイプ区分については、今後の研究課題としたい。

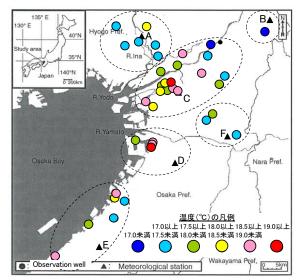


図-10 G. L. -40m 地温の平面分布図 7) カラ-図化

# 5. 大阪平野における 地下温暖化の実態

# (1) G. L. -40m 地温の分布と その上昇速度

地下温暖化を評価する当面の指標 として, G.L.-40m 地温とその上昇速 度を採用する<sup>7)</sup>。G.L.-40 m 地温の採 用は,2003年大阪平野一斉調査の結 果から, 大阪平野の地下温暖化の深 さは GL-約 80 m<sup>2)</sup> まであり, その中 間深さをとったものである。

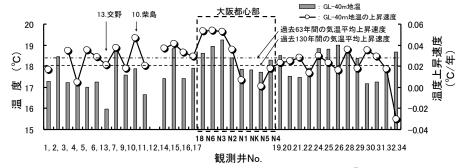


図-11 G. L. -40m 地温とその上昇速度の分布 <sup>7)</sup>

図-10 は、各々観測井の G.L.-40 m 地温を大阪平野の白地図へプロッ トした結果である。プロットしたデータには、図-3に記載のない郊外 の観測井(大阪市大正区の1本,柏原市の1本)で観測したデータも 含まれている。また、気象庁測候所と観測井の位置関係から、観測井 を測候所毎に目安としてのグループ化も行っている。図によると,地 温は郊外ほど低く、反対に沿岸部や都心部では高い傾向を示すことが 分かる。

G.L.-40 m地温とその上昇速度についてまとめた結果を表-1 と図-11 に示す。表では、図-3 および図-10 で示した気象庁測候所 A~F 毎に G.L.-40 m 地温の上昇速度の平均値を参考値として付記した。図表から、 以下のことが分かる。

- ① G.L.-40 m 地温とその上昇速度は、観測井毎に異なる。
- ② G.L.-40 m 地温の最も高い観測井は、大阪都心部の N3 西天満の 19.27 ℃で,次いで同じ都心部の N6 道修町である。
- ③ G.L.-40 m 地温の上昇速度は、特異な地温鉛直分布を示す 34.泉南 を除いて, 0.001~0.054 ℃/年の範囲にある。
- ④ G.L.-40 m 地温の上昇速度が最も大きい観測井は、大阪都心部の N6 道修町の 0.054 ℃/年で, 次いで同じ都心部の 18.馬場町と N3 西天満である。これら井戸の地温上昇速度は0.050℃/年以上の速 さで、大阪管区気象台の過去 130 年間の気温平均上昇速度 0.020 ℃/年や過去 63 年間の 0.028 ℃/年の約 2 倍程度大きい。
- ⑤ 大阪管区気象台の気温平均上昇速度 0.020 ℃/年以上となる観測 井の数は、計23本で、全34本の約2/3にも及ぶ。
- ⑥ 地温上昇速度が最も小さい観測井は、大阪都心部の N5 西船場で、 次いで4.口酒井, N1 福島である。いずれも0.01 ℃/年未満である。

表-1 G.L40m 地温とその上昇速度 <sup>ハー部加筆</sup>					
測候所	観測 井戸	観測	GL-40m	G.L40m地温の	
测候所 No.			地温	上昇速度 (°C/年)	
INO.	No.	所名	(°C)	2003~2011*	平均値
	1	荒牧	17.30	0.017	
	2	石橋	18.48*	***	
Α	3	野間	17.25	0.035	0.024
(豊中)	4	口酒井第1	17.15	0.005	0.024
	5	曽根	17.03	0.035	
	6	豊中	17.26	0.029	
B(枚方)	13	交野	15.99	0.021	0.021
	7	吹田	18.77	0.038	
	9	+=	17.59	0.018	
	10	柴島	17.89	0.047	
	11	鳥飼西	16.67	0.020	
	12	点野	***	***	
	14	庭窪1−3	17.42	0.037	
	15	新森小路	18.85	0.041	
	16	南郷	17.44	0.033	
С	17	鴻池2	17.93	0.029	0.000
(大阪管区)	18	馬場町(Ⅱ)	18,63	0.053	0.032 (都心部
	N6	道修町	18.97	0.054	を除く)
大阪	N3	西天満	19.27	0.053*	を除く)
都心部	N2	西梅田	18.41	0.036	
HI), C, D)	N1	福島	17.86	0.007	
	NK	中之島B	17.86*	_	
	N5	西船場	17.74	0.001	
	_ N4	中之島西	_18.31_	0.018	
	19	港(II)B	18.52	0.024	
F(八尾)	20	長瀬	17.55	0.025	0.027
	21	加美東	17.49	0.029	
	22	堺5−3	17.91	0.013	
D (堺)	24	堺2−3	18.84	0.030	0.021
	25	堺A-3	18.83	0.023	
	26	堺B-3	19.01	0.016	
	28	岸和田3	18.62	0.036	
E	29	岸和田2	18.40	0.018	0.034
	30	岸和田1	17.19	0.035	
(熊取)	31	貝塚-2	17.26	0.030	
	32	泉佐野	17.77	0.017	
	34	泉南*	18.67	-0.030	
(注) *** :CI =40m+5m内に地温データな					

: G.L.-40m±5m内に地温データなし (注) \*\*\*

: 地温上昇速度 算出できず

18.48\*: G.L.-44.0m地点での地温 17.86\*: 2005/10/04の地温

0.053\*: G.L-38.5m地点での地温上昇速度 大阪都心部の地温上昇速度:2008年~2012年のデータ 泉南: 特異な地温鉛直分布であり, 地温データの扱いには要注意

G.L.-40 m 地温の上昇速度が気温平均上昇速度を上回っている井戸は、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可能性が考えられる。

### (2) 大阪平野の地下温暖化

大阪平野において、**図-12** に示す観測井で地下温暖化の深さを分析した。そのうち、今回分析した結果を**図-13** に示す。図より、各井戸の破線を地下温暖化が始まる前の定常的な地温分布を表すものとすると、地下温暖化の深さは井戸毎に異なるが、概ね G.L.-70~-90 m 程度と推測され、既に報告した大阪都心部の 18.馬場町(大阪管区気象台の近傍)の深さ80 m  $^{71}$  と同程度である。このことは、大阪都心部以外の地点でも、ローカルな地下温暖化が早くから起こっていた可能性がある。

### 6. まとめ

大阪平野および大阪都心部において、地下の温暖化は着実に進行中である。地下温暖化の進行性の指標として、G.L.-40m地温とその上昇速度で評価すると、G.L.-40m地温の最も高い観測井は、大阪都心部の N3 西天満の 19.27  $^{\circ}$ Cで、次いで同じ都心部の N6 道修町である。

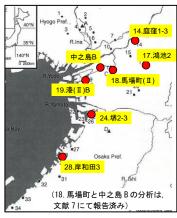


図-12 地下温暖化を分析した 観測井の位置図

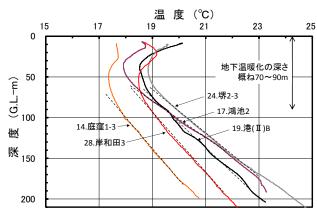


図-13 大阪平野における地下温暖化の状況

謝辞: 2011年の大阪平野一斉調査は、住友財団研究助成金(研究代表者: 谷口真人)により実施されたもので、地温観測に際しては、国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所ならびに猪名川河川事務所、大阪府環境農林水産部、大阪市環境局から数々の便宜供与をいただいた。あわせてここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Taniguchi, M. and T. Uemura: Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan, Physics Earth Planetary Inter., 152, pp.305-313, 2005.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Taniguchi, M. Shimada, J. Tanaka, T. Kayane, I. Sakura, Y. Shimano, Y. Dapaah-Siakwan, S. and Kawashima, S.: Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow, 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan, Water Resources Research, Vol.35, No.5, pp.1507-1517, 1999.