

大阪中之島周辺における地下温度鉛直分布の特徴

(株)地域 地盤 環境 研究所 有本 弘孝
岡山理科大学 理学部 北岡 豪一
総合地球環境学研究所 谷口 真人
埼玉県環境科学国際センター 濱元 栄起

1. はじめに

現在進行しつつある都市域のヒートアイランド現象は、地表面温度を上昇させ、熱が地表から地下に熱拡散と水の移流によって運ばれ蓄積されてゆくので、表層から深さ方向に地下温度を徐々に着実に上昇させている。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、土壤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、現在研究が進められている。

一方で、地下の温暖化は、再生可能エネルギー以上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もある。このような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も地下温度の実状を正確に把握しておくことは極めて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、2003年、谷口ら¹⁾により主に大阪湾沿岸部と郊外を対象に実施された。その後2009年、都市化が古くから始まった大阪市中心部を対象とした概略調査が、筆者らが所属する「地下水地盤環境に関する研究協議会」の地下水水質研究委員会(委員長：青木一男)によって実施され、その成果の一部を北岡ら²⁾により報告済みである。今後、地下温暖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、今、都市化の最も進んだ都市中心部における地下温暖化の正確で詳細な実態を調査研究することは極めて有意義であると考えられる。

そこで地下水水質研究委員会では、2011年11月～2012年8月の間で秋冬春夏のほぼ等間隔に各1回、中之島周辺の地下水位観測井戸で地下温度観測を実施した。本稿は、その観測結果を速報的に報告するものである。

2. 地下温度の観測

(1) 中之島周辺で地温観測した井戸

中之島周辺で地温観測した井戸は、「地下水地盤環境に関する研究協議会」が所有する広域地下水位観測井のうちの6井戸(No.1～No.6)で、それらの位置を図1に、井戸周辺の全景を附属資料の付写真1に示す。観測井の孔底深度は、No.3井戸では第1洪積砂礫層(Tg1)の被圧地下水位を観測するためにGL.-約40m、他の井戸では第2洪積砂礫層(Tg2)を対象とするためにGL.-60m前後である。また、全ての観測井は内径φ75mmのステンレスケーシング管で、その管頭状況を写真1に示す。

(2) 地温観測日とその気温

地温観測は、四季による明瞭な違いを捉えるために、その観測日の設定には大阪管区気象台の気温データを使用した。本調査開始前の2011年10月当時、最初の地温観測は秋季の観測であった。そこで、大阪管区気象台において2011年1月～9月の日最高・日最低気温が観測された日を参考に、夏季

観測井名称
No. 1 : 福島公園
No. 2 : 西梅田公園
No. 3 : 西天満公園
No. 4 : 中之島西公園
No. 5 : 西船場公園
No. 6 : 市道道修町線 中之島 B



図 1 観測井の位置

の観測日を 8 月上旬に、冬季の観測日を 2 月上旬に設定し、春季および秋季の観測をそれらのほぼ中間日とした。

結果的に地温観測日を、秋季が 2011 年 11 月 6 日、冬季が 2012 年 2 月 4 日、春季が 5 月 19 日、夏季が 8 月 11 日とした。

地温観測日の気温を大阪管区気象台の気温データから見てみると、夏季の観測を最後に行ったので、2012 年 9 月末日から過去 1 年間の日平均気温の経時変化に各観測日の気温をマーキングした結果を図 2 に、

また、地温観測日の気温、平均気温等の数値をまとめて表 1 に示す。

大阪管区気象台において、夏季冬季の地温観測日の日平均気温は各々 29.0 °C、5.3 °C で、夏季観測日から過去 1 年間の日平均最高気温 31.1 °C に対して夏季観測日では約 2 °C 低く、冬季観測日では日平均最低気温 1.1 °C に対して約 4 °C 高い。しかし、平均温度で比較すると、夏季および冬季観測日の平均気温 17.2 °C に対して 1 年間の平均気温は 16.9 °C で、両者はほぼ同じ温度と言える。このことから、夏季冬季の観測日の日平均気温は、1 年間の日最高最小気温をほぼ表していると判断される。なお、春季秋季の観測日の気温は、いずれも年平均気温よりも約 3 °C 高い。



写真 1 観測井の管頭状況

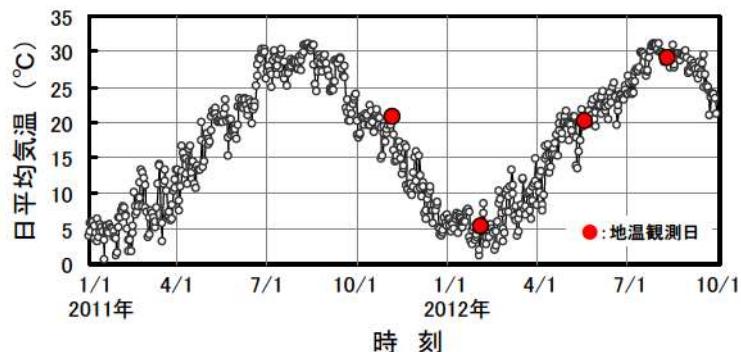


図 2 大阪管区気象台の日平均気温と地温観測日

表 1 地温観測日と大阪管区気象台の気温データ

地温観測日	観測日 の間隔 (日)	大阪管区気象台*		
		観測日の 日平均気温(°C)	2012/2/4 と2012/8/11 の平均気温 (°C)	2011/8/12 ～2012/8/11 の代表気温 (°C)
[秋季] 2011/11/6	0	20.7	平均 18.8	平均 16.9 最大 31.1 最小 1.1
[冬季] 2012/2/4	90	5.3		
[春季] 2012/5/19	105	20.1		
[夏季] 2012/8/11	84	29.0		
(11/6)	(87)			

大阪管区気象台の所在地: 大阪市地下鉄 谷町四丁目駅の近く

(3) 地温観測方法

地温観測では、観測井内の水温鉛直分布の観測の他に、参考値として観測井近傍における地表面下5 cm の土壤温度（以下、地表面温度と呼ぶ）と地表面上 1.5 m の空気温度（以下、气温と呼ぶ。大阪管区気象台の气温は气温(大阪管区)とし両者を区別する）も観測した。また、No.4（中之島西公園）観測井では、観測井から北側に堂島川(井戸中心からの離れ約 21 m)が、南側に土佐堀川(井戸中心からの離れ約 18 m)が存在することから、両河川内の水温も参考値として観測した。

観測井内および河川内の水温鉛直分布の観測は、温度と圧力を同時に測定できる測定器(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 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 Compact-TD 計で、温度の測定精度は±0.05 °C、分解能は 0.001 °C、水深の精度は 0.3%F.S.、分解能は 0.76 cm、水深 500 m まで計測可能である。また、地表面温度と气温は精度±0.1 °C の棒状標準温度計で測定した。

(4) 地温観測結果

観測井毎の地温と年平均气温（大阪管区）を図 3 に示す。各々観測井における地温データの始まりは、井戸管中の水位面を表している。なお、气温および河川内水温も含めた全観測結果は附属資料にまとめた。図 3 の観測結果には、以下のような特徴が見られる。

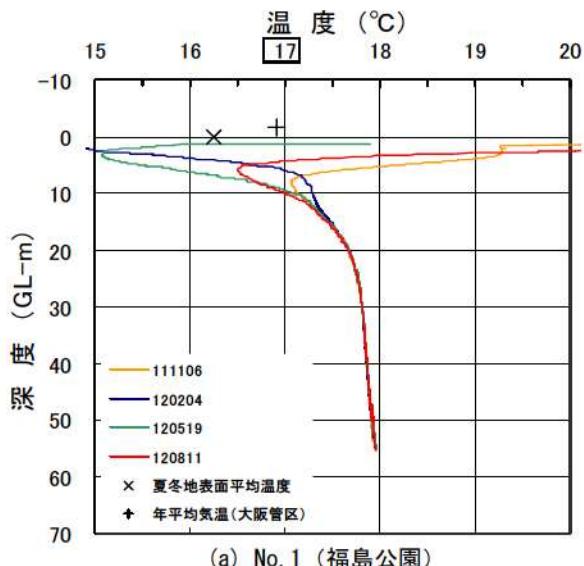
- ① 地温そのものと地温分布のパターンが観測井によってかなり異なっている。
- ② 地表面から深度 10 数 m までの地温には季節変動が生じている。
- ③ 地温の季節変動と夏冬地表面平均温度および年平均气温（大阪管区）の関係を見ると、No.1、No.2 および No.5 観測井では、夏冬地表面平均温度および年平均气温（大阪管区）は季節変動の範囲内にあるが、No.3 と No.4 観測井では季節変動の範囲外にありその範囲よりも低い。
- ④ 明瞭な季節変動のない深度 20m 以深に着目すると、No.1 と No.5 観測井では極小を示すような分布ではなく深度に対して直線的な分布となっている。また、No.3 と No.6 観測井では時間経過とともに地温が一様に増加している。
- ⑤ No.2 観測井では深度約 25 m で上凸、No.6 観測井でも深度約 40 m で上凸の温度分布のパターンを示す部分が見られる。

上述②について、地温の季節変動の深さについて検討する。地温の季節変動の深さを、「地温の季節変動幅が日平均气温（大阪管区）の年変動幅の 0.2 %となる深さ」と定義すると、气温（大阪管区）の年変動幅が 30 °C であるから、地温の季節変動の深さは地温の年変動幅が 0.06 °C となる深さである。観測地温の年変動幅が 0.06°C となる深さを観測井毎に拾い出すと表 2 に示す値が得られる。表によれば、季節変動の深さは、観測井毎に異なるものの深度 13~20 m の範囲にあり、No.1 観測井で一番浅く No.6 で一番深い。このことを付写真 1 に示した地表面の土地利用形態と対比してみると、No.1 では全ての観測井の中でも樹木が一番多く、No.6 では樹木がない舗装道路である。このような地温の季節変動の深さの差異は、地層構成や地層の熱物性値の差異等のほかに、地表面の土地利用形態の差異、すなわち地表面温度の差異とも関係があると考えられる。

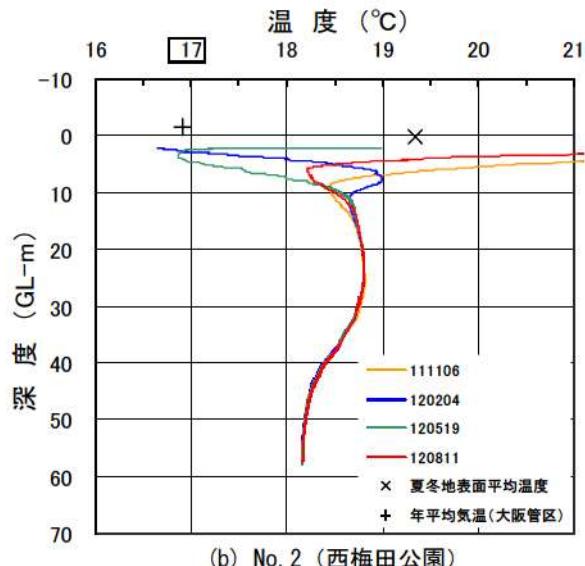
地中構造物の構築深度は GL.-20 m 以内が多いので、地中構造物の多くは地温の季節変動という負荷を受けていることとなる。

表 2 地温の季節変動の深さ

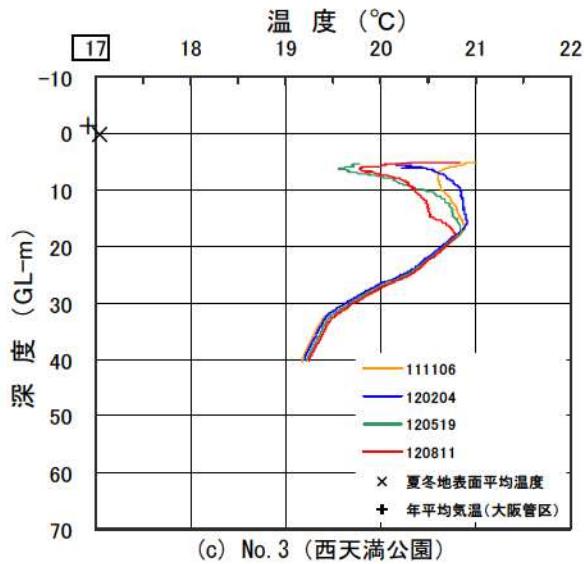
	日平均气温(大阪管区)の年変動幅の0.2%となる深さ(G.L.-m)
No.1(福島公園)	12.9
No.2(西梅田公園)	13.9
No.3(西天満公園)	17.8
No.4(中之島西公園)	18.9
No.5(西船場公園)	16.0
No.6(市道道修町線)	19.9



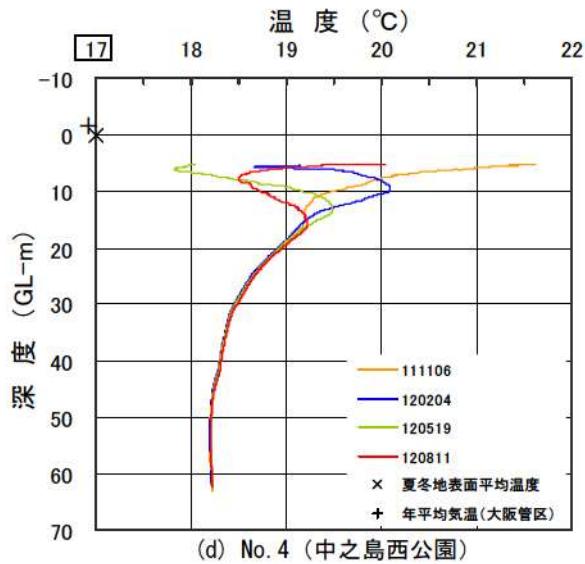
(a) No. 1 (福島公園)



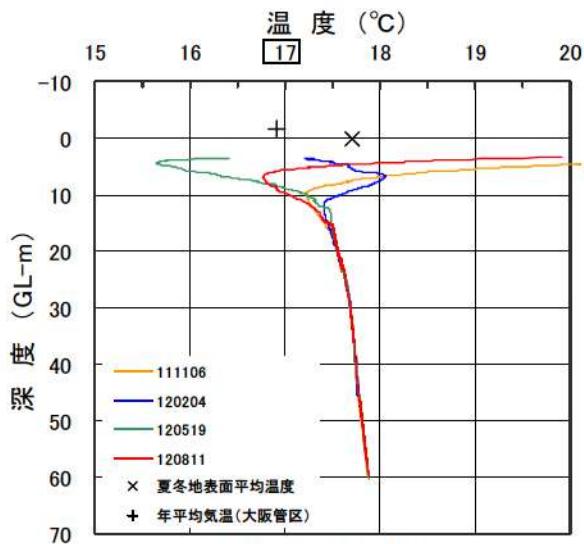
(b) No. 2 (西梅田公園)



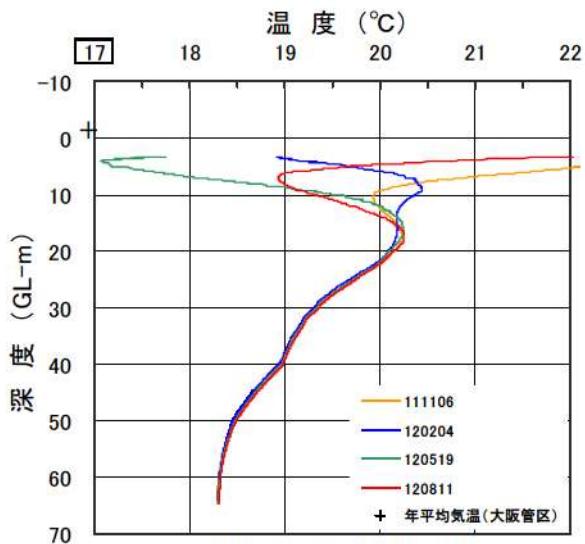
(c) No. 3 (西天満公園)



(d) No. 4 (中之島西公園)



(e) No. 5 (西船場公園)



(f) No. 6 (市道道修町線)

(地表面がアスファルト舗装であるので地表面温度は測定できていない)

図3 大阪中之島周辺における地温鉛直分布（観測値）

3. 地温の季節変動

(1)一次元熱拡散方程式による簡単な計算例

浅層部で観測された地温鉛直分布の季節変動を検討するため、地下水の流れがなく地温が熱拡散だけによって支配されている場合を想定し、半無限の一様媒質における一次元熱拡散方程式を考える。

一次元熱拡散方程式 $\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta(z,t)}{\partial z^2}$ に、地表面の境界温度として正弦関数 $\theta(0,t) = A \sin(\omega t)$

が過去から無限に繰り返し与えた時の深さ方向温度分布は次式(1)で与えられる。

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

ここに、 θ ：温度 (°C), z ：深さ (m)

t ：時間, A ：境界温度の片振幅 (°C)

$\omega : 2\pi/T$, T ：境界温度の変動周期 (sec)

κ ：媒質の温度拡散係数 (m^2/sec)

一次元熱拡散方程式を利用した簡単な計算例として、以下の計算条件による計算結果を図4に示す。

【計算条件】

①地表面温度 (図4(a)の地表面温度を参照)

平均温度 : 17.15 °C

(夏季観測日と冬季観測日の気温(大阪管区)

の平均値 $(29.0\text{ }^{\circ}\text{C} + 5.3\text{ }^{\circ}\text{C})/2$

片振幅 A : 11.85 °C

(夏季観測日と冬季観測日の気温差

$(29.0\text{ }^{\circ}\text{C} - 5.3\text{ }^{\circ}\text{C})/2$

最大値の発生日 : 8月1日

変動の1周期 : 365 day

②媒質

地層 : 1層

地層の温度拡散係数 κ :

$6.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$

(湿り砂地・粘土 $6.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ を参考)

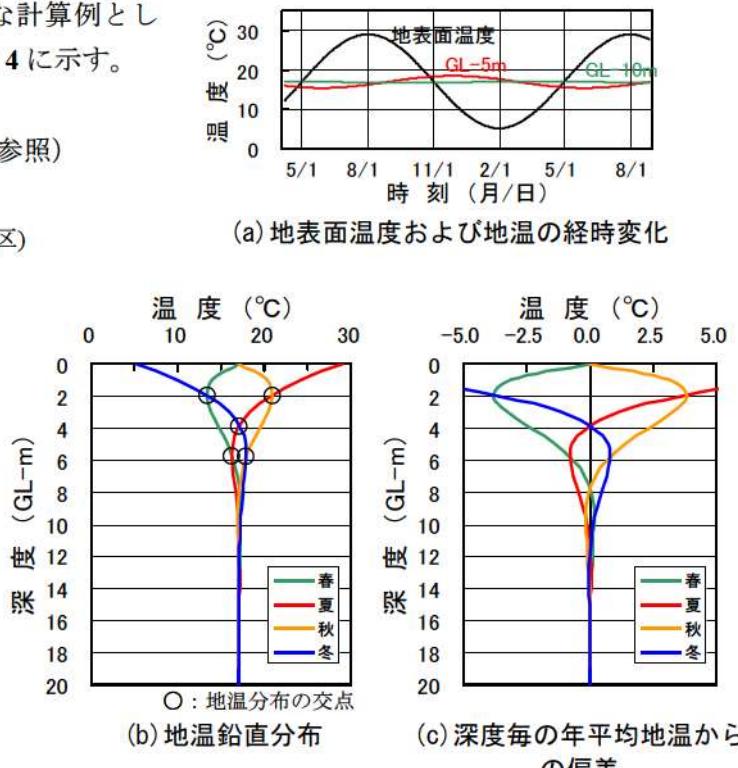


図4 一次元熱拡散方程式による計算結果

図中において、春は2月1日、夏は8月1日、秋は11月1日、冬は2月1

日を意味する。式(1)の温度は(a)図に示すように深さに伴う振幅の減衰と位相の遅れを伴うことから、(b)図で示す春夏秋冬の地温分布にはいくつかの交点が存在する。さらに、全ての深度にて平均温度は地表面の境界平均温度に等しい。また、当計算条件での地温の季節変動の深さは14.4 mとなり、表1で示したNo.1, No.2およびNo.5観測井の季節変動深さと大きく違わない。(c)図は、後に観測井間の地温観測結果と比較するため、地温分布を深度毎の年平均地温からの偏差で表わし、横軸をスケールアップした図である。

(2) 観測結果

図3で示した地温観測結果において、季節変動している部分を観測井間で比較するため、図4(c)と同様な分布図を作成する。夏季観測日の地温分布と冬季観測日の地温分布の深度毎平均値を求め、それを年平均値とみなしてそれからの偏差で比較する。その結果を図5に示す。図より、以下のような特徴および傾向が見られる。

- ① No.3 観測井では図4(b)で示した地温分布の交点はあるものの不明瞭である。他の観測井では明瞭に現れており、分布のパターンが比較的良く似ている。また、図3(c)に示した一様な媒質における一次元熱拡散方程式による簡単な計算結果とも良く類似していることから、地表面からの熱が地中に拡散しているのが理解できる。
- ② GL.-5~6 m付近と GL.-10~15 m付近で現れる夏季(8/11)と冬季(2/4)の地温分布交点の間の変動幅で比較すると、No.1, No.2, No.3, No.5, No.4, No.6 観測井の順に大きい。
- ③ 観測井の地温分布をグループ化してみると、No.6 と No.4 観測井、No.1 と No.2 と No.5 観測井、No.3 観測井の3つのグループに分けられる。

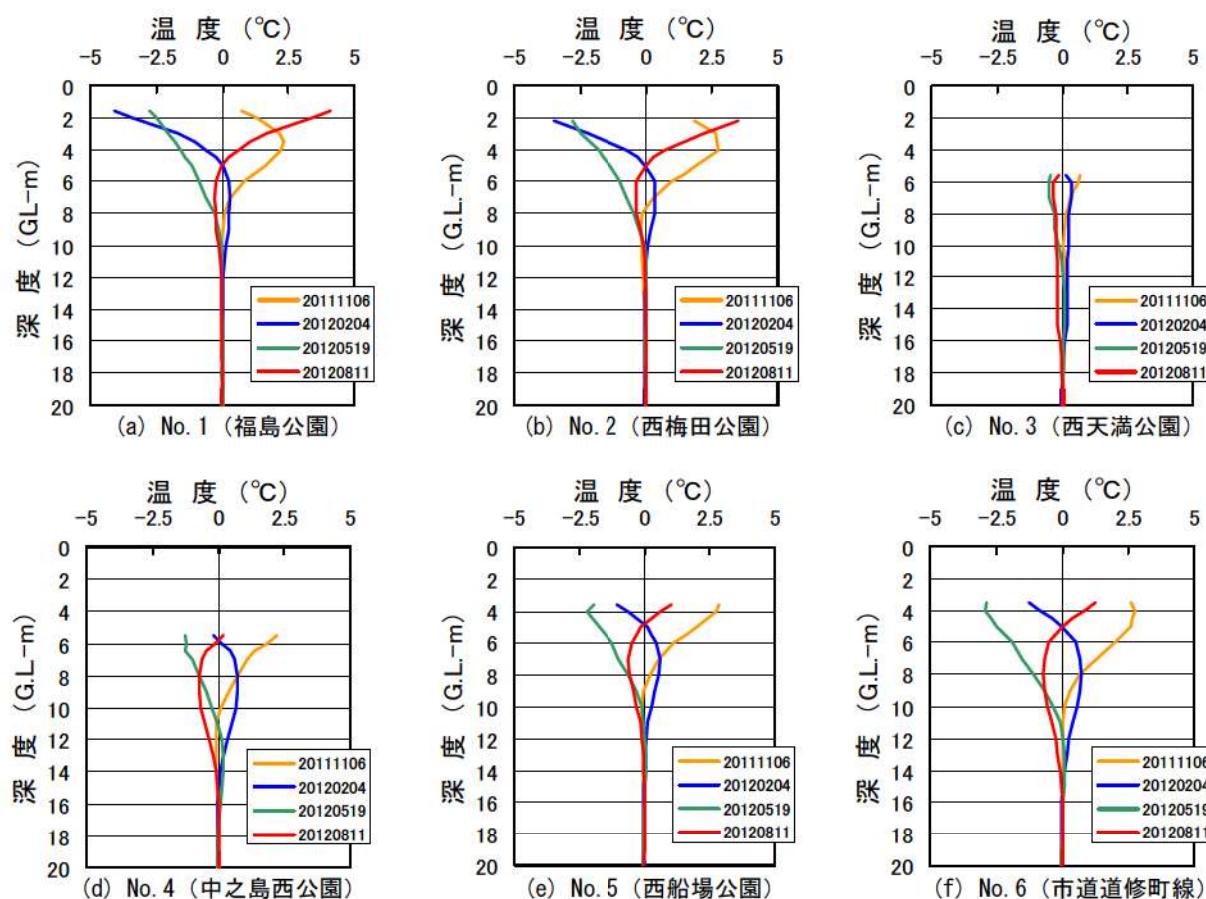


図5 G. L. -20m 以浅における地温年平均値からの偏差の鉛直分布

4. 地下温暖化の実態

各観測井の地温分布を総括するため、各深度で夏季観測日の地温と冬季観測日の地温の深平均を求め、その鉛直分布を図6に示す。同図には、深度100 m以上の地温分布を持つ既往観測結果として、大阪市環境局が所有する中之島B観測井（位置は図1参照、2005年10月4日観測）の地温分布も重

ねて示した。また、年平均気温（大阪管区）も地表に+印でプロットした。

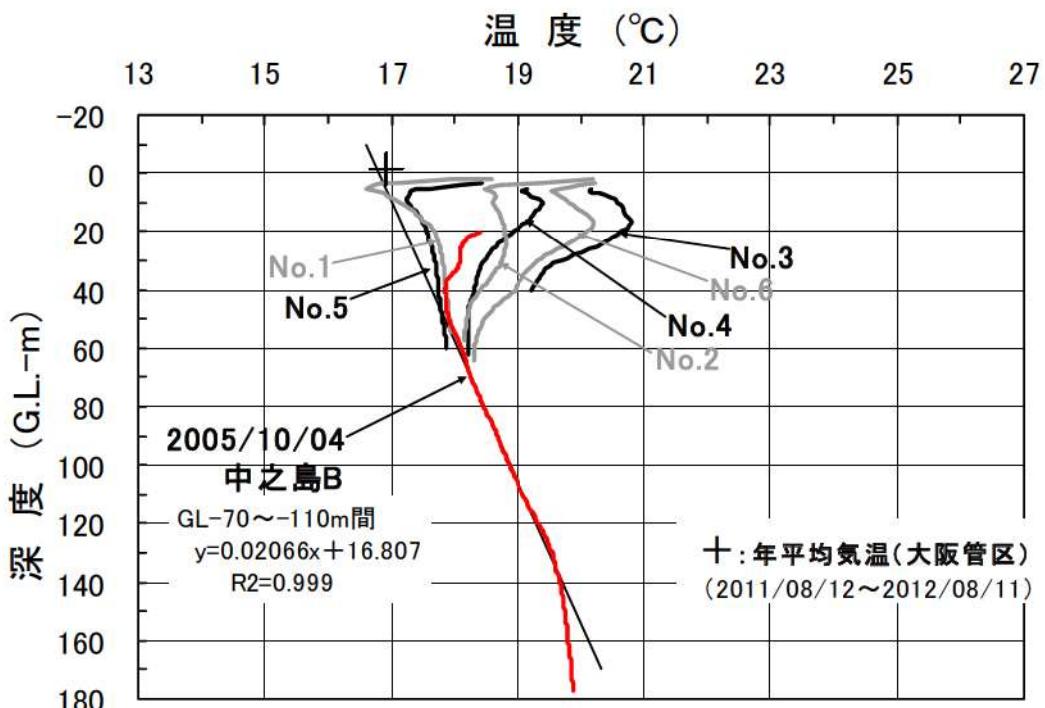


図6 中之島周辺における年平均地下温度の鉛直分布

(中之島Bの地温分布では、季節変動が含まれていると考えられる
深度20m以浅のデータはプロットしていない)

図より、以下のような特徴および傾向が見られる。

- ① 深度20~40mの浅層地温は、No.3（西天満公園）で最も高く、次いでNo.6（市道修道町線）で高い。両地点で地温が極小となる深さは孔底（No.6では深度60m程度）よりも深くなっている。地温が高いものほど極小となる深度が深い傾向が見られる。
- ② No.1（福島公園）とNo.5（西船場公園）では極小が不明瞭で、地温は低い。
- ③ No.3やNo.6では、ローカルな温暖化（ヒートアイランド現象）が早くから起こっていた可能性がある。しかし、隣り合うNo.5、No.2（西梅田公園）の地温がなぜ深度50m以浅の浅層で高くないのか今のところ不明である。
- ④ 深度20m以深の地温を全般的にみると、観測した範囲内では、地温の範囲は、深度20mで約3.0°C幅と広いが、深度60mになると約1°C幅に縮まり、2005年に観測した中之島Bの地温分布に近づく傾向が見られる。
- ⑤ 中之島Bの地温勾配で表される温度分布（直線）は、地下温暖化前の定常的な温度分布を表すものとすると、中之島周辺における地下温暖化の深さは地点毎に異なるが、概ねGL.-50~80m程度と推測される。

5. おわりに

中之島周辺における6本の観測井で観測された地下温度鉛直分布の特長について、速報的にとりまとめた。その結果、地温分布には、地温が場所によって、また深度によってかなりの違いが見られた。

この違いは何に因果いているのか、観測地点毎に、地層構成、過去から現在までの長期的な地下水位の変化、地表面温度の大きさと変動、観測地点周辺の土地利用履歴および地下構造物構築履歴等の相違を調査し、それらと地温分布の関係について今後検討する予定である。

謝 辞

中之島周辺の地温観測に際しては、地下水協議会から数々の便宜供与をいただいた。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) 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.

附属資料

No. 1 福島公園



No. 2 西梅田公園



No. 3 西天満公園



No. 4 中之島西公園



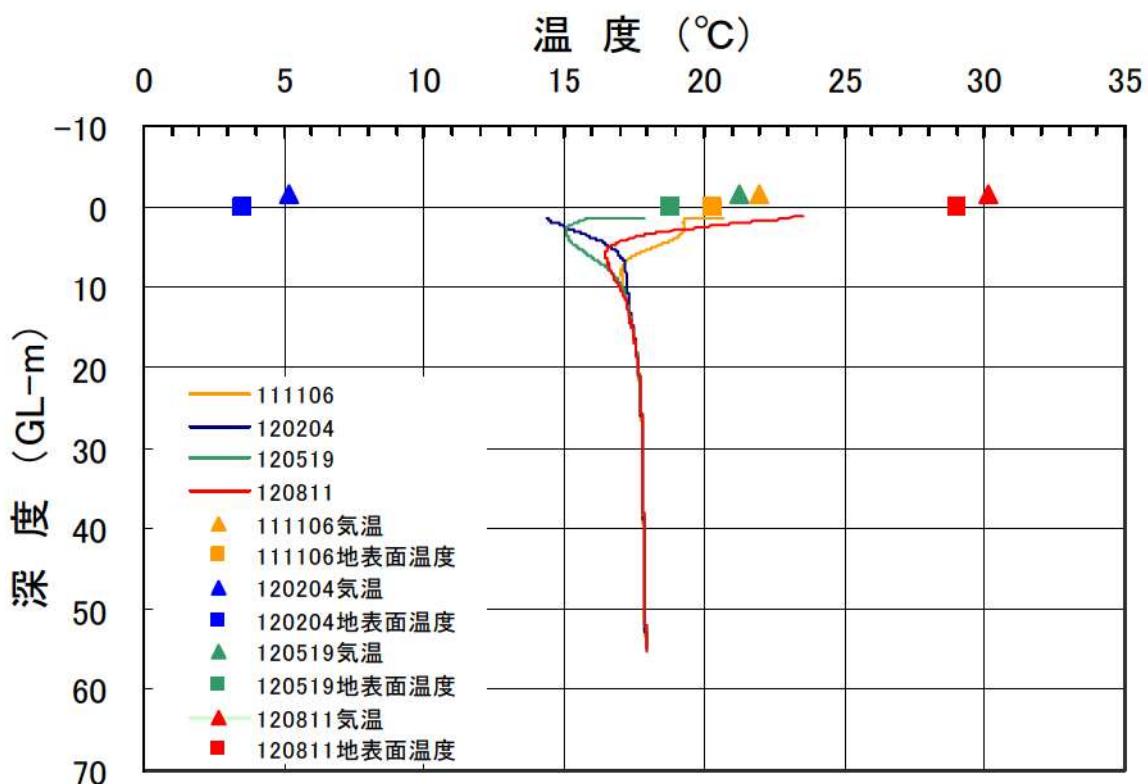
No. 5 西船場公園



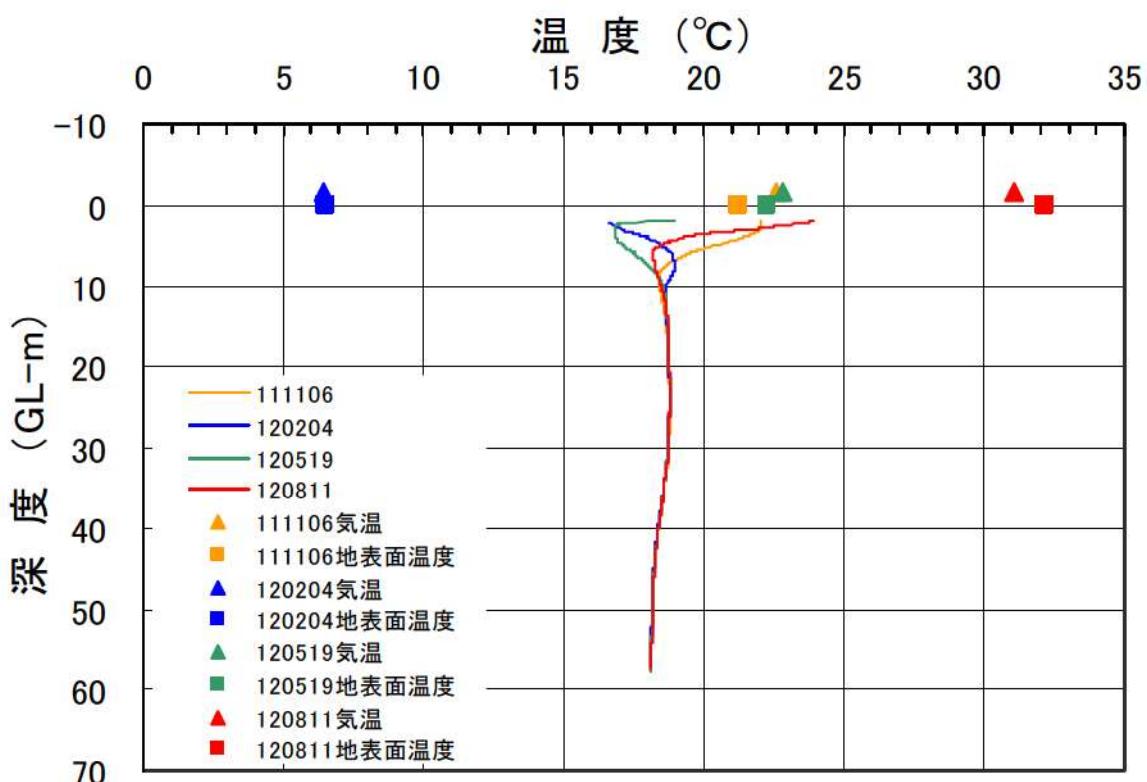
No. 6 市道道修町線（どしょうまち）



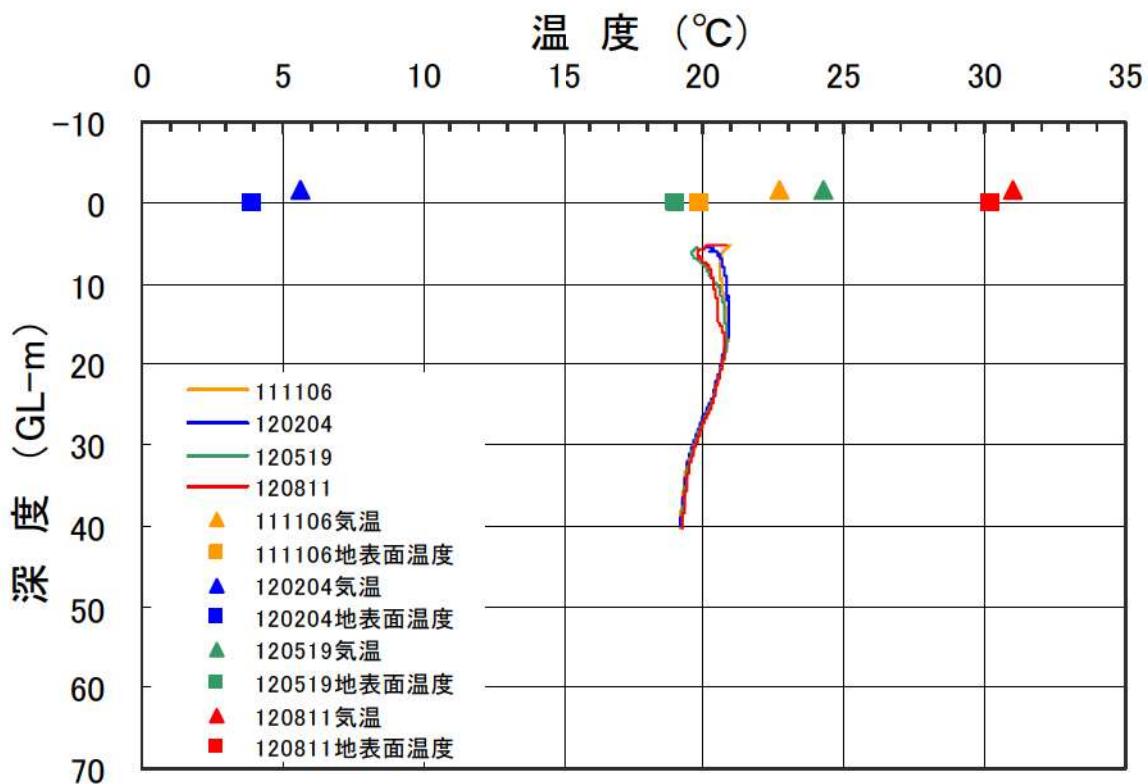
付写真 1 地温観測した観測井の周辺全景（2010年6月11日撮影）
(黄色の↓は、観測井の位置を示す)

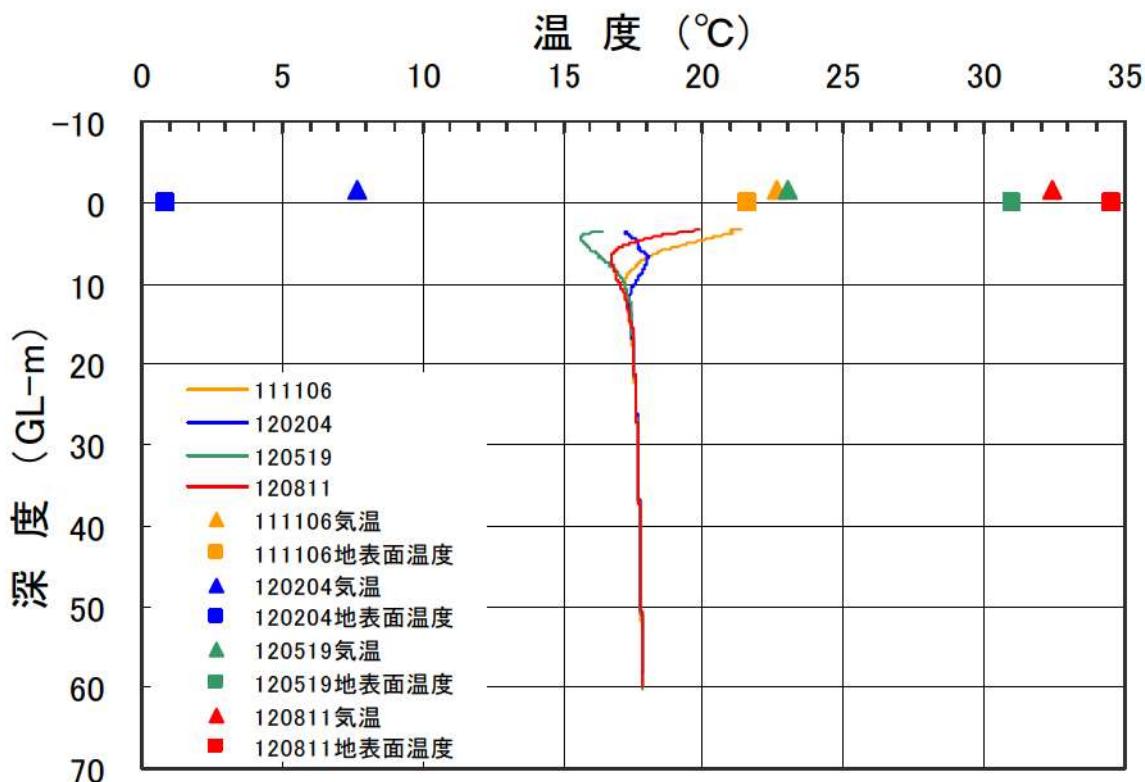


付図1 No.1(福島公園)における観測結果

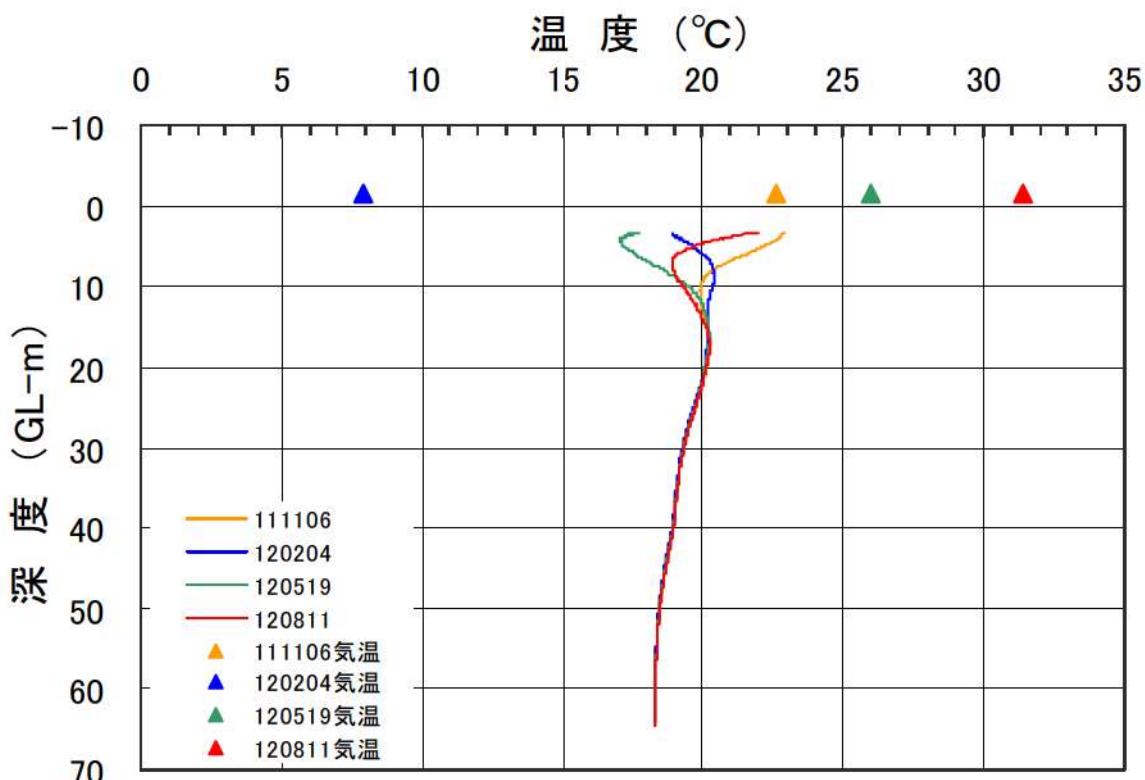


付図2 No.2(西梅田公園)における観測結果





付図 5 No. 5 (西船場公園) における観測結果



付図 6 No. 6 (市道道修町線) における観測結果

(No.6 観測井の地表面温度は、アスファルト舗装につき棒状標準温度計による測定はできていない)