

大阪都心部における地下温暖化の実態

○有本弘孝¹・北岡豪一²・谷口真人³・濱元栄起⁴

¹(株)地域地盤環境研究所・²岡山理科大学理学部・³総合地球環境学研究所・⁴埼玉県環境科学国際センター

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、その温暖化以前の地中熱を対象とした再生可能エネルギー以上に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。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¹⁾²⁾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：大阪工業大学 青木一男教授)によって実施され、その成果の一部を北岡ほか³⁾⁵⁾と有本ほか⁴⁾⁶⁾により報告済みである。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、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、大阪都心部の8つの観測井で観測された地下温度(地下水位観測井の井戸管内の水温度鉛直分布)について、その温度分布を大阪平野の約30地点のそれと比較し、大阪平野から見た大阪都心部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)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℃、地温勾配0.030℃/m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℃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る地中熱(蓄熱)であり、地表面温度が一旦上昇した後、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。

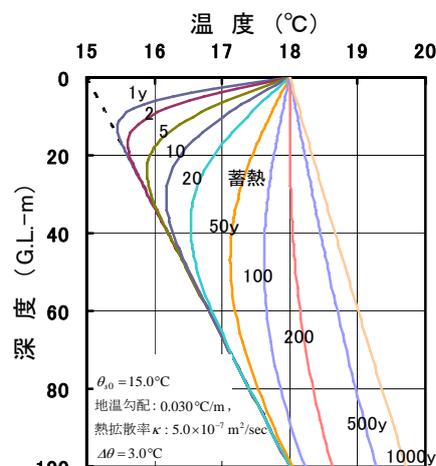


図-1 地表面温度がステップ状に上昇した時の地温分布の変化⁵⁾

3. 地下温度の観測

(1) 大阪都心部で地温観測した井戸

地温の観測井戸は、地下水協議会が所有する広域地下水位観測井のうちの6井戸(N1~N6)と、大阪市が所有する中之島Bおよび馬場町(II)観測井で、それらの位置を図-2に示す。なお、N3観測井は上町断層の西方約150m離れ、馬場町観測井は大阪管区気象台の観測位置に近接している(離隔約30m)。N1~N6観測井の孔底深度は、N3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G.L.-約40m、その他の井戸では第2洪積砂礫層(Tg2)を対象とするためにG.L.-60m前後である。一方、中之島Bおよび馬場町観測井の孔底深度は、大阪広域地盤沈下を観測するために前者ではG.L.-約180m、後者ではG.L.-約150mと深い。

(2) 地温観測日

表-1に地温観測日を示す。2011年11月~2012年8月に実施したN1~N6観測井の地温観測は、四季における地温分

Actual states of subsurface warming in the central area of Osaka City, Japan

Hiroataka Arimoto¹, Koichi Kitaoka², Makoto Taniguchi³, Hideki Hamamoto⁴ (¹Geo-Research Institute, ²Okayama University of Science, ³Research Institute for Humanity and Nature, ⁴Center for Environmental Science in Saitama)

KEY WORDS: urbanization, Osaka area, observation well, temperature

布変化の把握を目的としたものである。

(3) 地温の観測方法

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。

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 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、温度の測定精度は $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 、分解能は 0.001°C 、水深の精度は $0.3\% \text{F.S.}$ 、分解能は 0.76cm 、水深 500 m まで計測可能である。

4. 中之島周辺の N1~N6 観測井の地温観測結果

図-3 (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。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。

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 13~20 m⁶⁾ までの地温には季節変動が生じている。
- ③ 季節変動のない深度 20 m 以深に着目すると、地温が全般的に低い N1 と N5 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おり、その時間変化は小さい。ところが、N3, N4 および N6 観測井では時間経過とともに地温がほぼ一様に増加している。
- ④ N2 観測井では深度約 30 m を中心に上凸、N6 観測井でも深度約 40 m を中心に上凸の温度分布のパターンを示す部分が見られる。この上凸の中心深度の土層は、N2 では砂質土層 (As(L))、N6 では砂礫層 (Tg1) と粘性土層 (Ma12) の層境に対応している。

上述③の地温の同様増加について検討する。図-4 は、地温の季節変動深さの下端(深度 20 m)から井戸孔底(深度 60 m)の中間深度である G.L.-40m 地点について、地温の経時変化を示したもので、地温の変化を直線近似した地温上昇速度も明示している。図によると、地温が高い井戸ほど地温の上昇速度が大きくなっている。地温の高い N3 および N6 観測井の地温上昇速度は $0.05^{\circ}\text{C}/\text{年}$ で、この速度は、図-5 に示す大阪管区気象台の過去 130 年間 (1883 年~2012 年) の気温の平均上昇速度 $0.020^{\circ}\text{C}/\text{年}$ や過去 63 年間 (1950 年~2012 年) の平均上昇速度 $0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ よりも約 2 倍程度大きい。一方、地温の最も低い N5 観測井では、地温はほとんど上昇していない。

5. 大阪都心部の地下温暖化の実態

5.1 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、大阪平野の約 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 年一斉調査時の観測井位置図を図-6 に、地温分布の全観測結果を図-7 に示す。図-7 によれば、深層 (> 50 m) におけるほとんどの地温は、深度に対して、2 本の平行線 (地温勾配: $0.033^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、間隔: 3.5°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、



図-2 大阪都心部における観測井の位置

表-1 地温観測日

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

(注)地温データの所有者
 N1~N6観測井、中之島B観測井: 地下水水質研究委員会の地温WG(主査: 北岡教授)
 馬場町(II)観測井: 総合地球環境学研究所の研究プロジェクト(研究代表者: 谷口教授)

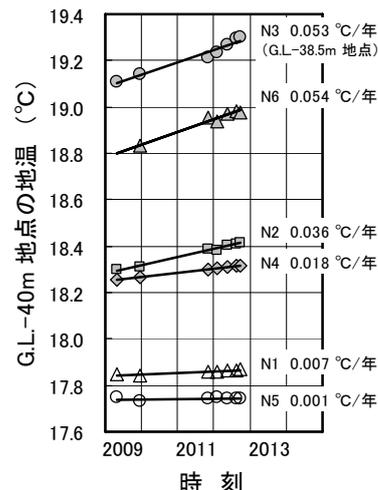


図-4 G.L.-40m 地点の地温経時変化

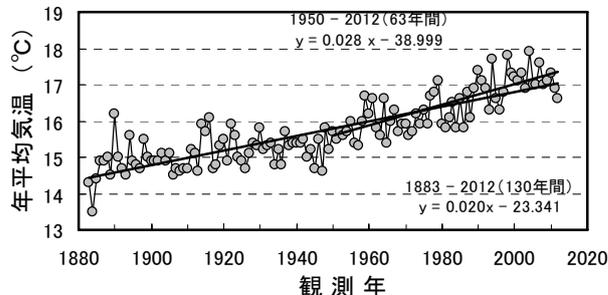


図-5 大阪管区気象台における気温の経年変化

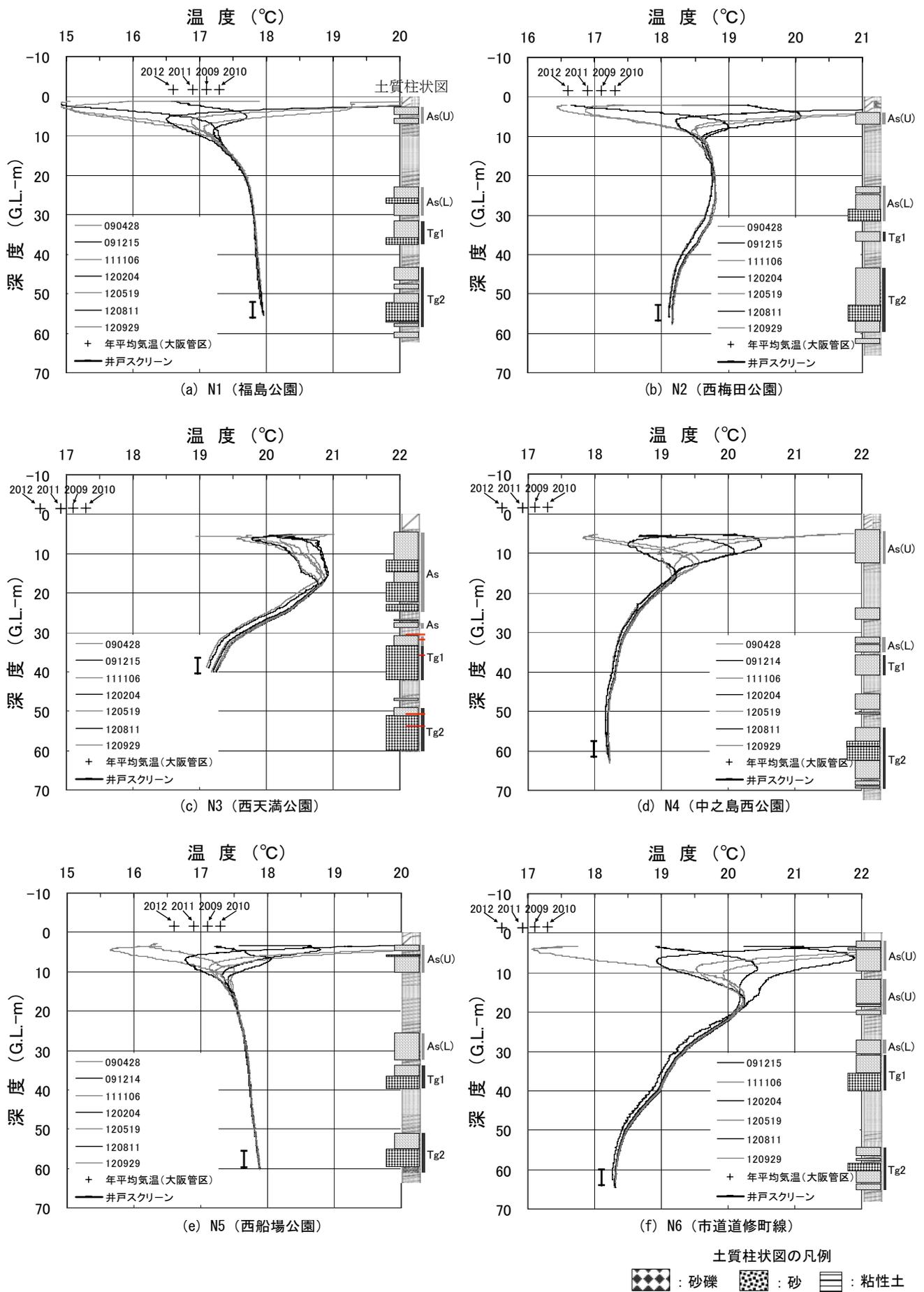


図-3 大阪中之島周辺における地温鉛直分布(観測値)と土質柱状図

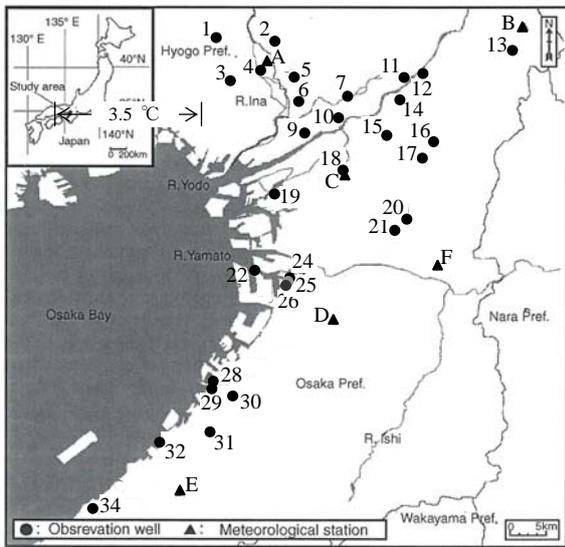


図-6 2011年大阪平野一斉調査における観測井戸の位置図

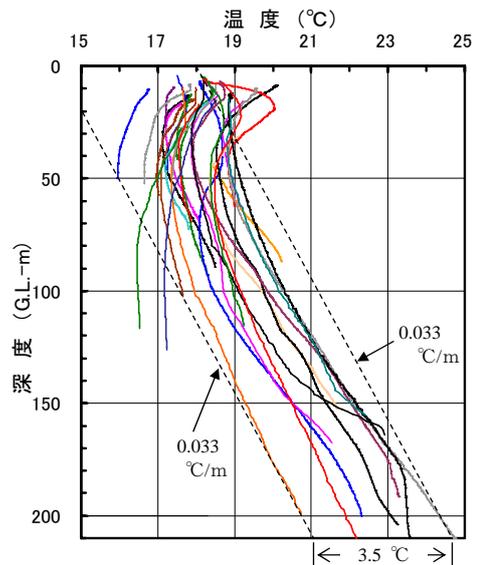


図-7 全観測井戸における地温鉛直分布 (観測値)

図-1 で示した地下温暖化の特徴を明らかに示している。

3回の一斉調査(一部の観測井では1998年調査はされていない)で得られた地温分布の経年変化の一例を図-8に示す。No.18馬場町は都心部の公共施設用地、No.19港は市街地の総合公園近傍、No.13交野は郊外の小学校用地に位置する。これら土地利用形態に違いがあるにも係らず地温は上昇している。このような地温上昇は一つの観測井(後出する表-2のNo.34泉南)を除く他の観測井全てで認められたことから、大阪平野全体において地下温暖化が着実に進行していると考えられる。

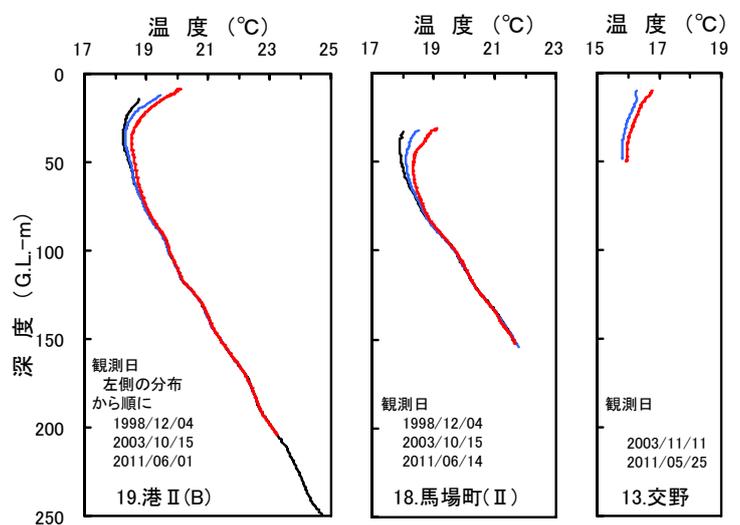


図-8 地温鉛直分布の繰り返し観測結果の一例

5.2 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として、

図-1の地温分布変化を考慮すると、以下の3つが考えられる。

- ① 地温鉛直分布の極小値の深さとその地温
- 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 GL-40 m地点の地温とその上昇速度

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100 m未満と浅く、地下が温暖化する前の定常的な地温分布が定かでない。③について、GL-40 m地点は、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 m²までであり、その中間深さをとったものである。この③については、観測井の孔底深度が40 m以上あれば評価することができ、①や②の指標よりも指標値の算定に客観性があることから、当面の指標として③を採用することとする。以後、GL-40 m地点の地温をGL-40 m地温と呼ぶ。

5.3 大阪平野から見た大阪都心部の地温状態

(1) 地温鉛直分布

大阪都心部の地温状態について、大阪平野全体の地温分布から見た

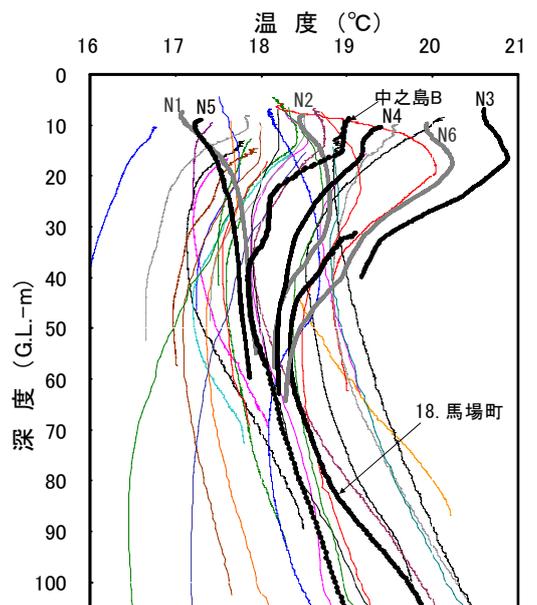


図-9 大阪平野から見た大阪都心部の地温鉛直分布 (観測値)

場合の検討を行う。地温鉛直分布について、大阪平野から見た大阪都心部の状況を図-9に示す。N1~N6 観測井のデータは、2011年一斉調査と同じ年の観測データ(2011年11月)である。季節変動の影響を受けない深度20mから50m程度までの浅層の地温に着目すると、N3 西天満の地温が最も高く、次いでN6 道修町が高い。そして、No.18 馬場町、N2 西梅田、N4 中之島西と続く。これらの地温分布は、大阪平野全体から見れば地温の高い範囲に位置している。一方、中之島BやN5 西船場、N1 福島の地温は、大阪平野全体から見れば中程度の高さと言えよう。

(2) G.L.-40m 地温の分布とその上昇速度

各々観測井の地温鉛直分布から G.L.-40 m 地温を読み取り、その温度を大阪平野の白地図へプロットした結果を図-10に示す。プロットしたデータには、表-1に記載のない郊外の観測井(大阪市大正区の1井戸、柏原市の1井戸)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-10 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。このことは、郊外よりも沿岸部、都心部ほど都市化の進行に伴う地下温暖化が進んでいることを意味している。

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-2と図-11に示す。表では、測候所毎に 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。

表-2と図-11によると、以下のことが分かる。

- ① No.34 泉南を除いて、G.L.-40 m 地温の上昇速度は観測地点によって異なり、0.001~0.054 °C/年の範囲にある。特に大阪都心部ではその差異が顕著である。
- ② 地温上昇速度が最も大きい地点は、大阪都心部の N6 道修町で、次いで、No.18 馬場町、N3 西天満である。これら地点の地温上昇速度は 0.050 °C/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 °C/年や過去63年間の気温平均上昇速度 0.028 °C/年の約2倍程度大きい。
- ③ 大阪管区気象台の気温平均上昇速度 0.020 °C/年以上となる観測地点の数は、計23地点で、全34地点の約2/3にも及ぶ。
- ④ 一方で、地温上昇速度が最も小さい地点は、大阪都心部の N5 西船場で、次いで No.4 口酒井、N1 福島である。いずれも 0.01 °C/年未満である。

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可能性が考えられる。これらの解析や、土地利用状態の変化と地表面被覆形態の違いが地温に及ぼす影響等については、今後の研究課題としたい。

5.4 大阪都心部の地下温暖化

大阪都心部に位置する N1~N6 観測井、中之島 B および No.18 馬場町の地温鉛直分布を重ねて図-12に示す。図より、N1~N6

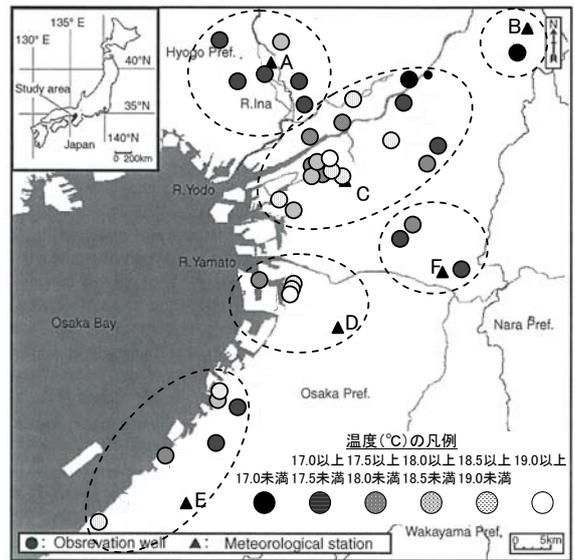


図-10 G.L.-40m 地温の平面分布図

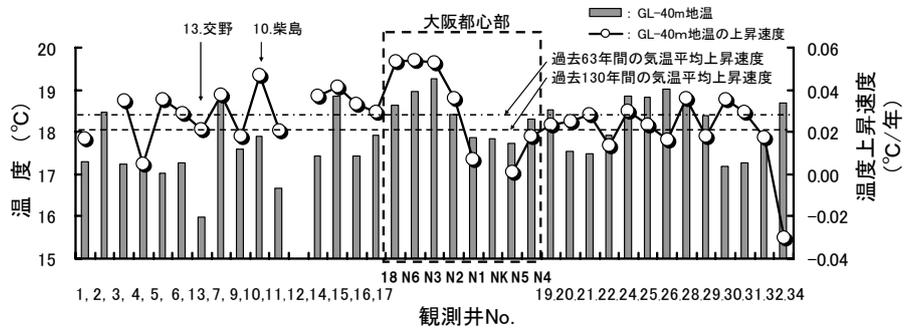


図-11 G.L.-40m 地温とその上昇速度の分布

表-2 G.L.-40m 地温とその上昇速度

測候所 No.	観測井 No.	観測所名	G.L.-40m 地温 (°C)	G.L.-40m地温の上昇速度 (°C/年)	
				2003~2011年*	平均値
A (豊中)	1	荒牧	17.30	0.017	0.024
	2	石橋	18.48*	***	
	3	野間	17.25	0.035	
	4	口酒井	17.15	0.005	
	5	曾根	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	
C (大阪管区)	9	十三	17.59	0.018	0.032 (都心部を除く)
	10	柴島	17.89	0.047	
	11	鳥飼西	16.67	0.020	
	12	点野	***	***	
	14	庭窪	17.42	0.037	
	15	新森小路	18.85	0.041	
	16	南郷	17.44	0.033	
	17	鴻池	17.93	0.029	
	18	馬場町	18.63	0.053	
	N6	道修町	18.97	0.054	
	N3	西天満	19.27	0.053*	
	N2	西梅田	18.41	0.036	
	N1	福島	17.86	0.007	
	NK	中之島B	17.86*	-	
大阪都心部	N5	西船場	17.74	0.001	
	N4	中之島西	18.31	0.018	
	19	港	18.52	0.024	
	20	長瀬	17.55	0.025	
	21	加美東	17.49	0.029	
	22	堺5	17.91	0.013	
D (堺)	24	堺2	18.84	0.030	0.021
	25	堺A	18.83	0.023	
	26	堺B	19.01	0.016	
	28	岸和田3	18.62	0.036	
E (熊取)	29	岸和田2	18.40	0.018	0.034
	30	岸和田1	17.19	0.035	
	31	貝塚	17.26	0.030	
	32	泉佐野	17.77	0.017	
	33	泉南	18.67	-0.030	
	34	泉南	18.67	-0.030	

(注) *** : G.L.-40m±5m内に地温データなし
 - : 地温上昇速度のデータなし
 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

観測井と中之島Bでは、中之島Bの地温勾配で表される温度分布 a 線を、No.18 馬場町では馬場町の地温勾配で表される温度分布 b 線を、それぞれ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、大阪都心部における地下温暖化の深さは地点毎に異なるが、概ね G.L.-50~80 m 程度と推測される。最も温暖化の進行した N3 西天満では、温暖化開始前から G.L.-20m で約 3°C, G.L.-40m で約 1.5°C の地温上昇が見込まれる。

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。観測 34 地点中 23 地点において、G.L.-40m 地温の上昇速度は、過去 130 年間の大阪管区気象台の気温平均上昇速度よりも大きい。

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、都心部の N3 西天満の

G.L.-40m 地温は全観測地点の中で最も高く (19.27 °C)、その上昇速度も大きい (0.05 °C/年)。これは大阪管区気象台の気温平均上昇速度の約 2 倍程度の大きさで、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。

中之島 B および馬場町の地温勾配で表される温度分布を、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、大阪都心部における地下温暖化の深さは観測地点毎に異なるが、概ね G.L.-50~80 m 程度と推測される。

謝辞：

本報告は、地下水地盤環境に関する研究協議会に設置された「地下水水質研究委員会」の研究成果として報告するものである。中之島周辺の地温観測に際しては、中之島高速鉄道(株)、京阪電鉄(株)、地下水協議会から数々の便宜供与をいただいた。また、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., 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.

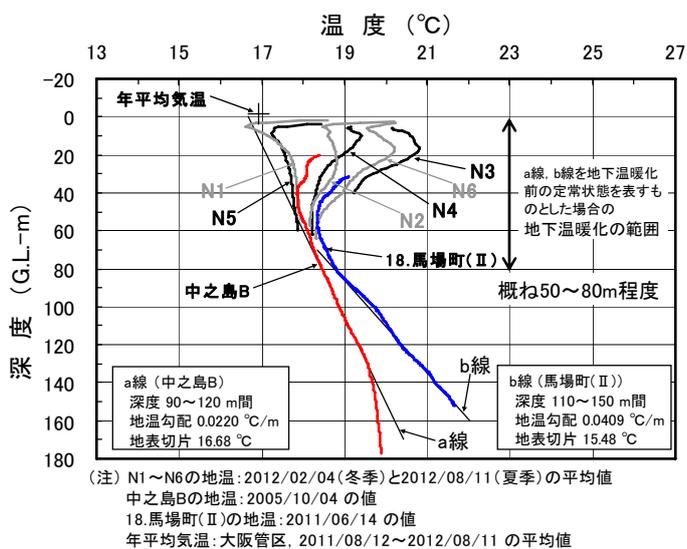


図-12 大阪都心部における地下温暖化の状況