

大阪都心部における地下温暖化履歴の推定

濱元栄起¹・有本弘孝²・北岡豪一³・谷口真人⁴

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

1. はじめに

国内外で地下水観測井等を活用し、地下温度の鉛直分布が計測されている。これらの計測結果から、温暖化が大気だけでなく地下にも進行していることが明らかになってきた。地下の温暖化の原因として、地表における地球温暖化や都市のヒートアイランド現象、土地利用の変化による熱エネルギーバランスの変化や地下鉄、地下街、下水熱など人工構造物から地中への排熱による影響等が考えられる¹⁾。このような地下温暖化は地下熱汚染とも呼ばれ、土壌中の微生物環境への影響や地下水への重金属の溶出等の悪影響を引き起こされる可能性も懸念されている。

地下の温暖化について調べる研究は、主に北米やヨーロッパなどで数多く行われてきた。本研究と同様の手法で現在の地下温度分布から逆解析を用いて地表面温度履歴を推定する研究事例もこれらの地域で多い²⁾³⁾。一方、アジア地域でも、地下温度を測定し、地下温暖化を把握する研究が近年進められている。例えば、バンコク地域では、44地点で地下温度調査が実施され、このうちの6地点で、逆解析を適用した過去300年間にわたる地表面温度と地下温度履歴を推定する研究が行われている⁴⁾。この研究では、都市の地下温暖化に着目し、地表面温度の上昇幅は、都心部で高く、周辺地域、農村地域の順に減少することを明らかにした。この他にも、韓国地域⁵⁾やロシアカムチャッカ地域⁷⁾などの事例を挙げる事ができる。

日本国内でも、様々な地域で地下温度調査が行われており、大都市及びその周辺地域で行われた調査として、東京地域⁸⁾や大阪地域⁹⁾などの事例が挙げられる。このうち大阪地域では、Huangら¹⁰⁾が長期間の気温データから地下温度分布を推定した結果と実測値を比較し、後者のほうが前者に比べて高いことを示した。一方、大阪都心から離れた淡路島や琵琶湖湖岸でも比較的深い観測井を用いて、それぞれ1470m、560mの深さまで地下温度測定が行われ、逆解析によって地表面温度履歴が推定されている⁶⁾¹¹⁾¹²⁾。一方、長期間の地下温度分布の変動を実測したものとして北岡ら¹³⁾は、岡山地域において地表面から100mまでの深度を対象に、2007年から1か月間隔で長期間の地下温度分布の変動を実測し、その変動が地表面における温度変動に起因することを示した。

本研究では、特に大阪の都心部で測定した地下温度データを対象に、逆解析によって地表面温度と地下温度の履歴を推定して、大阪都心部における地下温暖化の履歴と現状を把握することを研究の目的とする。

2. 大阪都心部における地下温度データ

本研究では、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」の研究プロジェクト¹⁴⁾および総合地球環境学研究所の研究プロジェクト⁹⁾によって測定された大阪都心部の3地点の地下温度データを対象とした。このデータは、分解能0.01Kまたは0.001Kの自記温度計を用いて測定された。各観測点の位置を表-1および図-1に示す。また、各地点で測定した温度分布を図-2に示す。中之島Bについては、深度20~40mの区間の温度分布で地下水流動に起因すると思われる擾乱が見られた。また深度約120m付近を境に、120m以深で温度勾配が小さくなっていた。その理由としてこの深度を境にした熱物性構造の変化や地下水流動による擾乱の可能性が考えられるが、地下温度データだけでは判断することが難しい。そこで中之島Bの温度データについては、120m以浅を解析の対象とした。ただし20~40mの局所的な影響を避けるため、多項式近似することで大局的な温度分布の形状を推定し、これを解析のための生データとみなした。各観測点における深部の温度勾配を比較すると、高い順から馬場町(II)、港(II)B、中之島Bである。各観測点の温度分布の極値は、それぞれ約80m、約80m、約40mの深さに見られることから、各観測点における最近百年~数十年程度の地表面の温度上昇による影響がこの深度付近まで伝搬しているものと推察される。各地点の極値の深さの違いは、地下温度上昇の開始時期や上昇幅、地下の熱物性を反映しているためと解釈できる。これに加えて地下水流動がある場合には、熱移流効果も含まれることになる。ただし本論文で用いる3地点については、地下温度分布の形状から、中之島Bの一部の深度を除き、地下水流動の影響が小さいものと判断される。

Reconstruction of subsurface warming in Osaka area

Hideki Hamamoto¹, Hiroataka Arimoto², Koichi Kitaoka³, Makoto Taniguchi⁴ (¹Center for Environmental Science in Saitama, ²Geo-Research Institute, ³Okayama University of Science, ⁴Research Institute for Humanity and Nature)

KEY WORDS: Subsurface temperature, Climate change, Land use change, Heat island, Osaka area

表-1 観測点の位置

観測点	緯度(度)	経度(度)	測定深度(m)	測定日
中之島B	34.69	135.51	177	2005/10/4
馬場町(II)	34.68	135.52	152	2011/6/14
港(II)B	34.66	135.45	204	2011/6/1

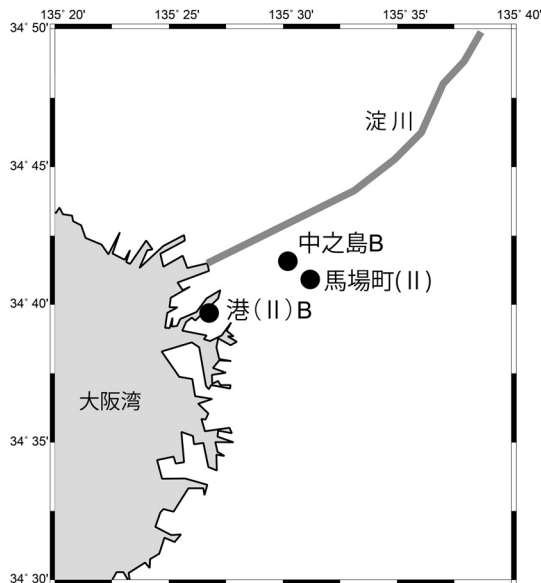


図-1 観測点のマップ

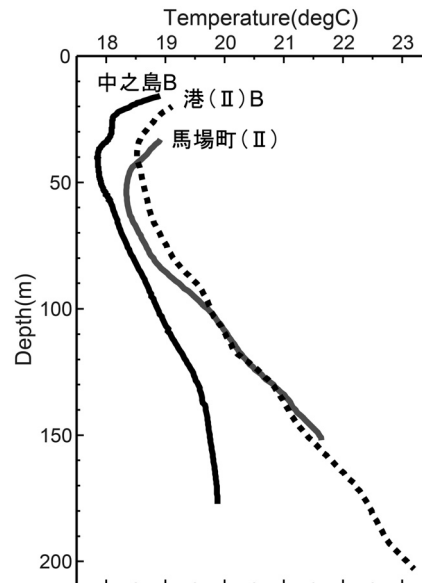


図-2 各観測点の地下温度分布

3. 解析手法

地表面の温度変動が地下へ伝搬する場合、地下水流動による熱移流の影響や周辺からの熱の伝搬がない場合には、1次元の熱伝導方程式を解くことで地下の温度分布を知ることができる。地下の熱物性が均一であるものとする熱拡散方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

で表される¹⁵⁾。ここで、 κ は熱拡散率、 z は深さ、 T は温度である。さらに、熱拡散率 κ は、熱伝導率 K と密度 ρ 、比熱 c_p を用いて以下のように表される。

$$\kappa = \frac{K}{\rho c_p} \quad (2)$$

一方、地下の熱物性が地層ごとに変化している場合には、多層構造を考える必要がある。この場合、各層内の熱物性が同様とすると、層ごとに以下の一次元の熱拡散方程式が成り立つ。

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \kappa_n \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

κ_n は n 番目の層内の熱拡散率、 T_n は層内の温度である。また各層の熱拡散率 κ_n は、熱伝導率 K_n と密度 ρ_n 、比熱 $(c_p)_n$ を使って

$$\kappa_n = \frac{K_n}{\rho_n (c_p)_n} \quad (4)$$

のように表される(本研究では、解析の都合から密度と比熱は、全体で一様であるものとした)。それぞれの層境界では、温度と熱流量が連続であることから、以下の関係式が成り立つ。

$$T_n(z = z_n, t) = T_{n+1}(z = z_n, t) \quad (5)$$

$$K_n \frac{\partial T_n(z=z_n, t)}{\partial z} = K_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}(z=z_n, t)}{\partial z} \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

ここで z_n は層境界の深さを表す。さらに、地表面における温度変動をステップ関数で近似するものとし

$$T(z=0, t_{i-1} < t \leq t_i) = T_{ref} + \Delta T_i \quad (7)$$

と表し、さらに地下深部からの熱流量を q_b とすると

$$q_b = K_N \frac{\partial T(z=z_b, t)}{\partial z} \quad (8)$$

と表される。このとき地下の温度分布は (5)~(8)式を境界条件として(3)式を解くことで知ることができる。ここで、 T_{ref} は地表面の基準温度($t=t_0$ における温度)、 ΔT_i は t_{i-1} から t_i の間の地表面温度と基準温度 T_{ref} との差である。

逆に、地下の温度分布のデータや地質構造境界の深度情報が予め分かっているのであれば、これを逆解析することで、(7)式で表される地表面温度変動、地下の各層の熱物性、深部からの熱流量を推定することができる。特にこのような解析を行ううえでベイズ逆解析が有効であるため、この手法を用いた^{16) 17)}。本研究の解析には後藤ら¹²⁾が作成した多層構造を考慮したベイズ逆解析プログラムを用いた。

逆解析のためのデータ（データパラメータ）は、1m間隔の温度とする。これらの温度データをベクトルで表し、

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}(d_1, d_2, \dots, d_m) \quad (9)$$

と表示する。ここで m は測定データの個数で、 d は、それぞれ各深度の温度である。

逆解析によって推定する未知のパラメータは、地表面温度変動の履歴を表した(7)式の T_{ref} 、 T_i 、(4)式で表される各層の熱伝導率 K_n 、(8)式で表されている深部からの熱流量 q_b である。これらのパラメータを以下の(10)式のようにベクトル表記し、逆解析によって求めるべき未知のパラメータ（モデルパラメータ）とする。

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(T_{ref}, \Delta T_n (i=1, 2, \dots, N), K_n (n=1, 2, \dots, N), q_b) \quad (10)$$

これらのモデルパラメータは、以下の評価関数の最小化によって推定を行う。

$$S(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{g}(\mathbf{p}) - \mathbf{d})^t \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{g}(\mathbf{p}) - \mathbf{d}) + (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^t \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \right] \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{g}(\mathbf{p})$ は推定温度、 \mathbf{p}_0 は先験値である。さらに \mathbf{C}_d は \mathbf{d} に対する共分散行列、 \mathbf{C}_m は \mathbf{p} に対する共分散行列を表す。(11)式に基づいてモデルパラメータを求めるため、本研究では、(12)式に示すガウス-ニュートンの離散式を用いた。

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \left(\mathbf{G}_k^t \mathbf{C}_d^{-1} \mathbf{G}_k + \mathbf{C}_p^{-1} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{G}_k^t \mathbf{C}_d^{-1} [\mathbf{d} - \mathbf{g}(\mathbf{p}_k)] - \mathbf{C}_p^{-1} (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_0) \right\} \quad (12)$$

ここで \mathbf{p}_k は \mathbf{p} の k 番目の推定値を表す。また \mathbf{G}_k は、

$$\mathbf{G}_k = \left(\frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \right)_{\mathbf{p}_k} \quad (13)$$

である。この反復式を Fortran プログラムによって計算した。このとき先験値は、各地点の地下温度分布や地質情報を参考にして決定した。例えば中之島 B では、地表面の基準温度 T_{ref} の先験値を 16.38 ± 1.00 °C、地殻熱流量 q_b を 25 ± 10 mW/m²、地表面の温度増分 ΔT_i を 0.00 ± 3.00 K、各層の熱伝導率は、地質によって変え、粘土層やシルト層で 1.4 ± 0.5 W/m/K、砂層や礫層で 1.8 ± 0.5 W/m/K とした。

4. 大阪都心部の地下温度データの解析及び結果

4.1 地表面温度変動履歴の推定

地表面における温度変動は地下へ熱拡散によってゆっくりと伝搬する。そのため、現在の地下温度分布は、過去から現在までの地表面温度変動履歴を反映していることになる。例えば、過去 100 年間の地表面温度変動履歴は、熱拡散率 κ を 3×10^{-7} m²/s 程度とした場合、地下約 150m の深さまで影響することになる。本解析では、1700 年以降の地表面における温度変動履歴を 10 年間隔の階段関数として表し、各ステップの高さ ΔT_i を未知数とした。また地下の地層ごとの熱伝導率 K_n 、地下深部からの地殻熱流量 q_b 、擾乱を受けていない場合の地表面温度 T_{ref} も未知数として扱い、地下温度データをベイズ逆解析してこれらの未知のパラメータを推定した(図-3)。一般に、過去の地表面の温度変動ほど、測定誤差や変動の減衰によって推定することが難しくなる。本解析では、測定データの精度や測定深度などに依存する不確定

性を自己相関係数による評価手法で指標化した（この指標化の詳細は、Goto and Yamano, 2010 を参照）。この指標を用いて地表面温度変動に関する情報を引き出すには不確実性が大きいと判断された範囲を破線で示した（すなわち実線部分は破線に比べて、信頼性は高い）。解析に用いた地下温度データのうち、馬場町(II)と港(II)Bは、2011年に測定したものを、中之島Bは2005年のものを用いた。そのため前者は1700年から2010年まで、後者は1700年から2000年までを推定期間とした。ただし、地下水位が地表面よりも低い場合、この区間には温度データがない。したがって直近の温度の推定値には、誤差が含まれていることに留意しなければならない。解析に用いた温度の深さは、馬場町(II)が152m、港(II)Bが203m、中之島Bが122mまでである。地質構造は、地質柱状図情報を参考に、それぞれ22層、21層、12層とした。

これらの解析の結果、最近100年間の地表面温度の上昇幅は、馬場町(II)が最も大きく、約6K上昇したものと推定された。測定地点間の上昇幅の違いは、地表面における土地利用の変化や周辺環境による違い、地表面温度の上昇時期の違いなどを反映しているものと解釈される。例えば、土地利用に関して港(II)は、約100年前に埋め立てによってできた場所であることから、この観測点では、海から陸へという被覆状況の変化による影響が内在している可能性がある。中之島Bの結果は、他の地点と少し特徴が異なり1960年頃、推定期間中において温度が最も低下し、その後急激に上昇している。これは、深さ50m付近の温度低下を反映しているものと思われる。この温度低下は、実際の地表面における温度低下のほかに、河川近傍であることによる地下水流動への擾乱や地表面における土地利用等の変化も原因として考えられることから、今後、土地利用の変遷等、地理的な情報も含め解釈したい。また、比較のために図中に、大阪気象台で測定された過去約100年間の気温データ¹⁸⁾を示した。大阪気象台は大阪市内で過去複数回の移転歴があるため、厳密には、移転によるデータの不連続性を考慮しなければならないが、地表面温度履歴の推定結果と気温の長期間の傾向とが整合的であることがわかる。ただし温度の上昇幅は、地表面温度履歴から推定した結果のほうが高めである。この結果はHuangら¹⁰⁾の結果と整合的である。

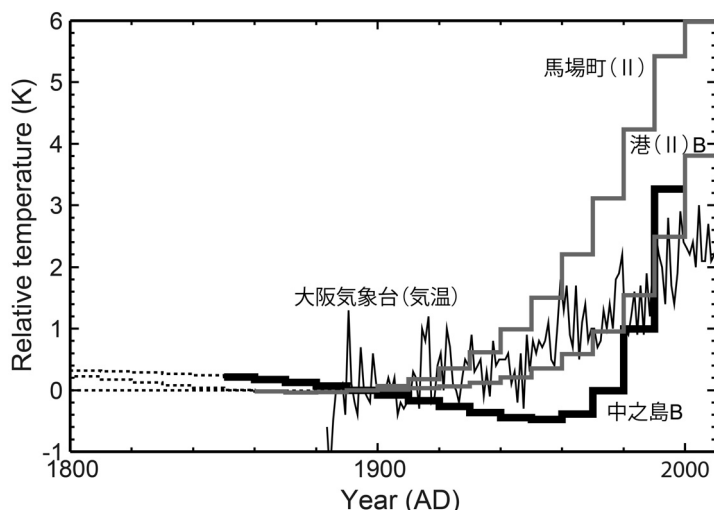


図-3 地表面温度履歴推定結果

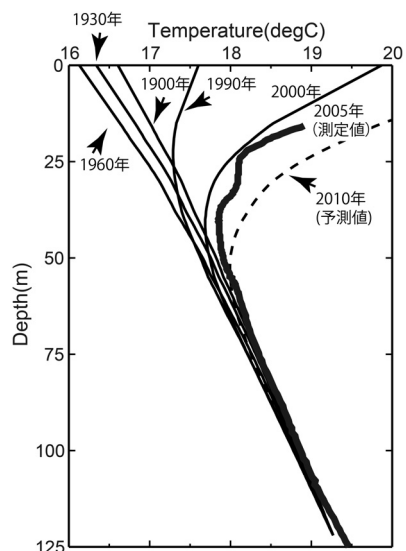


図-4 中之島Bにおける地下温度履歴推定結果

4.2 蓄熱量の推定

前節では、各地点の過去から測定時までの地表面温度履歴の推定結果を示した。この推定結果を用い(3)式を適用することで、地下温度についても時間的な変化を計算することができる。図-4に中之島Bにおける地下温度履歴の推定結果を示す。同様の手法で、馬場町(II)、港(II)Bについても推定した。これらの2地点は2011年に測定を行っているため2010年まで推定した(ただし地下水面が深さ20~40mであるため、最近10年程度の推定値の信頼性は低い可能性がある)。また、中之島Bの解析は、地下温度を2005年に測定を行っているため、2005年以降の地表面温度を計算することが

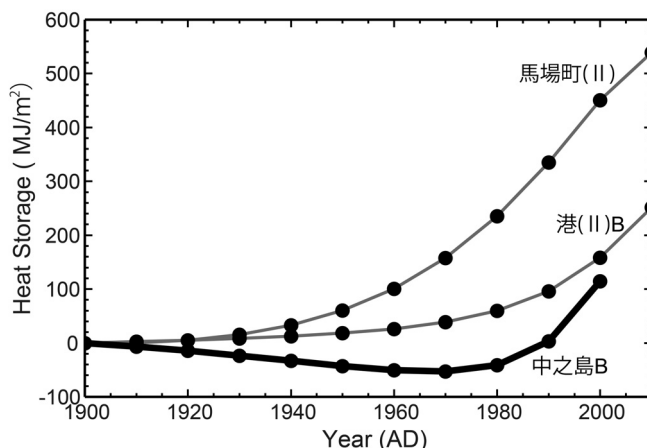


図-5 最近100年間の蓄熱量の推定結果

できない。そこで中之島 B の地表面の温度が 2005 年以降も同じ割合で上昇したものと仮定し、地下温度の予測を行った(図-4 の破線)。その結果、計算値と実測値とが整合的であることが確認されたほか、地下温度も、地表面温度に連動し、上昇していることが定量的に明らかにされた。

地表面温度が上昇すると、地下に向かって熱が伝搬され、その結果として地下に熱が蓄積される¹⁹⁾。ここでは、復元した地表面温度変動をもとに、1900 年以降に単位面積あたりの地下に蓄えられた熱量を求めてみる。この蓄熱量 Q は、

$$Q = \int \rho c \cdot [T(z) - T'(z)] \cdot dz \quad (14)$$

で表される。ここで、 $T(z)$ はある時刻における深さ z における温度、 $T'(z)$ は基準となる 1900 年の深さ z における温度である。まず、各観測点の地表面温度変動の推定結果を用いて、(14) 式を用いて蓄熱量を計算し、年代ごとに示した(図-5)。蓄熱量は、1900 年以降の地表面温度変動の上昇に対応して大きくなっており、特に近年その増加率が大きくなっている。馬場町(II)で 550MJ/m²、港(II)B で 200MJ/m²である。これに対して中之島 B は 1900 年~2000 年の蓄熱量は 100MJ/m²であるが、図-4 のように地下温度が 2010 年まで上昇したと仮定すると、港(II)B と同程度以上の値になるものと推定される。

4.3 アジアにおける他の地域との比較

本研究と共通する手法で、日本国内及びその周辺地域で地表面温度履歴の推定を行った結果を比較する。このうち都市化の進んでいないカムチャッカ半島では、最近 100 年間に地表面温度が約 0.5℃上昇している⁷⁾。また埼玉地域では、3~4℃²⁰⁾、バンコク地域の都心部で約 3℃の上昇が推定されている⁵⁾²⁰⁾。また大阪から大阪湾を隔て対岸にある淡路島でも推定が行われ、約 1℃と推定されている¹²⁾。これに対して大阪都心は 4~6℃程度である。これらの上昇幅は、温度データを取得した時期や測定深度、また解析方法やパラメータの設定の違いがあり、それぞれの推定結果を単純には比較できないが、大阪都心は有意に大きい。これは、地球温暖化による影響に加えて、都市のヒートアイランド現象や土地利用の変化(例えば、草地や森林からアスファルトや人口構造物への変化による地中への熱の吸収率の上昇)、地中における人工構造物(地下街や地下鉄、下水)などから発生する熱の蓄熱などの影響が及んでいる可能性がある。

バンコク地域でも蓄熱量が推定されており、都心部で 200MJ/m²と推定されている。大阪地域は、200~550MJ/m²程度であることからバンコク都心部と同程度かそれ以上の蓄熱があったものと推定される。

5. 資源としての地下の熱エネルギー

地下の熱エネルギーは資源として活用することも可能である。そのひとつとして「地中熱利用システム」を挙げることができる。このシステムは、冷暖房や給湯等の用途のために数十~百メートル程度の熱交換井を掘削し、周辺の地層を熱源とするものである。このシステムを設置する場合には、事前に設置点付近の熱環境や採熱率等を評価することが必要不可欠である。この評価の基礎データのひとつとして自然状態の地下温度も重要なデータとなる。したがって地中熱利用システムの普及のためにも地下温度データを整理し、広く社会に発信することが重要である²¹⁾。大阪地域においてもこれまで数多く地下温度測定が実施されており、この方面での活用が今後期待されている。地下温度情報が社会に発信されている国内事例のひとつとして、埼玉地域を挙げることができる。この地域では 25 箇所地下温度調査を行い、そのデータを地質地盤に関する資料集に掲載している²²⁾。一方、地中熱利用システムは地中との熱交換を行うため、将来多数のシステムが集中して設置された場合に、地下熱環境へ影響を及ぼす可能性もある。このような場合、自然状態の熱環境を把握したうえで、採熱と排熱のバランスをとりながら運転することで地下熱環境への負荷を低減させることが可能であると考えられている。さらに運転パターンを工夫することで、これまで人間活動によって蓄積された熱エネルギーもうまく活用できる可能性もある。

6. まとめ

大阪都心部において、測定した地下温度データをもとに、地表面温度変動履歴の推定を行った。その結果大阪都心では、この 100 年間に 4~6℃の温度上昇があったものと推定された。さらに地表面温度変動の推定結果を用いることで、地下温度の変動履歴や、この 100 年間の蓄熱量を推定した。その結果、大阪都心における地下温暖化の程度は、大阪湾の対岸の淡路島における結果よりも有意に高いことがわかった。またアジアの大都市圏としてバンコクの都心の推定結果と比較すると同程度以上であることがわかった。このような結果から、大阪都心の地下温暖化は、地球温暖化による影響に加えて、都市化による土地利用の変化やヒートアイランド現象による影響も含まれているものと推察される。また地下熱に関する情報や地下熱環境への負荷の推定結果は、地中熱利用システムの普及に役立つ基礎情報としても重要であり、エネルギーの活用という面からも期待される。

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す。本論文で用いた地下温度データは、地下水質委員会（委員長：青木一男 大阪工業大学 教授）及び住友財団研究助成金（研究代表者：谷口真人）によって測定されました。また解析の一部は、科学研究費補助金・若手 B（課題番号 24710040：研究代表者：濱元栄起）、埼玉県環境科学国際センター自主研究事業（研究代表者：濱元栄起）、総合地球環境学研究所研究プロジェクト（研究代表者：谷口真人）の支援のもと実施しました。東京大学地震研究所の山野誠准教授には、地下温度データの解析手法についての助言を、産業技術総合研究所の後藤秀作研究員には、解析プログラムの提供と助言を頂きました。埼玉県環境科学国際センターの細野繁雄領域長、白石英孝担当部長、八戸昭一研究員、石山高研究員、佐竹健太研究員には、地下の熱エネルギー活用に関する助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) Ferguson, G. and Woodbury, A. D. : Urban heat island in the subsurface, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23713, doi:23710.21029/22007GL032324., 2007
- 2) Beltrami, H., Jessop, A. M., and Mareschal, J. C. : Ground temperature histories in eastern and central Canada from geothermal measurements: evidence of climatic change, *Global Planet. Change*, **6**, 167-184, 1992
- 3) Bodri, L., and Cermak, V. : Last 250 years climate reconstruction inferred from geothermal measurements in the Czech Republic, *Tectonophysics*, **291**, 251-261, 1998
- 4) Hamamoto, H., Kamioka, S., Nishijima, J., Vuthy, M., Goto, S., and Taniguchi, M. : Estimation of the past ground surface temperature change from borehole temperature data in the Bangkok area, in *From headwaters to the ocean*, edited by Taniguchi, M., Burnett, W. C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, U., Taylor & Francis Group, London, 535-539, 2009
- 5) 濱元栄起・山野誠・後藤秀作・谷口真人：地下温度データを用いた過去の地表面温度履歴の推定-バンコク地域への適用-, *物理探査*, **62**, 575-584, 2009
- 6) Goto, S., Hamamoto, H., and Yamano, M. : Climatic and environmental changes at southeastern coast of Lake Biwa over past 3000 years, inferred from borehole temperature data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 314-325, 2005
- 7) Cermak, V., Safanda, J., Bodri, L., Yamano, M., and Gordeev, E. , A comparative study of geothermal and meteorological records of climate change in Kamchatka, *Stud. Geophys. Geod.*, **50**, 675-695, 2006
- 8) 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林武司：地下温度分布からみた関東平野の地下水流動, *日本水文学会誌*, **33**, 137-148, 2003
- 9) Taniguchi, M., and Uemura, T. : Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 305-313, 2005
- 10) Huang, S., M. Taniguchi, M. Yamano, and Chung-ho : Detecting urbanization effects on surface and subsurface thermal environment-A case study of Osaka, *Sci. Total Environ*, **407**, 3142-3152, 2009
- 11) Yamano, M., and Goto, S. : Long-term temperature monitoring in a borehole into the Nojima fault, southwest Japan. *Island Arc* **10**, 326-335, 2001
- 12) Goto, S., and Yamano, M. : Reconstruction of the 500-year ground surface temperature history of northern Awaji Island, southwest Japan, using a layered thermal property model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **183**, 435-446, 2010
- 13) 北岡豪一：地中の温度に記録されている岡山の温暖化履歴, 中部地質調査業協会, シンポジウム「岡山の防災と環境・地盤問題」講演要旨集
- 14) 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, 27-38, 2012
- 15) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. : *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London, 510pp, 1959
- 16) Tarantola, A., and Valette, B. : Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Rev. Geophys.* **20**, 219-232, 1982
- 17) Shen, P. Y., and Beck, A. E. : Paleoclimate change and heat flow density inferred from temperature data in the Superior Province of the Canadian Shield, *Global Planet. Change*, **6**, 143-165, 1992
- 18) 気象庁:ウェブページ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>, 2013
- 19) Huang, S. : 1851-2004 annual heat budget of the continental landmasses, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L04707, doi:04710.01029/02005GL025300., 2006
- 20) Hamamoto, H., Yamano, M., Goto, S., Hachinohe, S., Shiraiishi, H., Ishiyama, T., Miyakoshi, A., Taniguchi, M., Arimoto, H., and Kitaoka, K. : Reconstruction of the thermal environment evolution from subsurface temperature distribution in Japan and Thailand, Abstract GC23C-1084 , 2012
- 21) 濱元栄起・八戸昭一・白石英孝・石山高・佐坂公規：低温地熱資源情報整備を目的とした地中熱利用地域特性解析, 埼玉県環境科学国際センター報, **12**, 128, 2012
- 22) 濱元栄起・八戸昭一・白石英孝・石山高・佐竹健太・佐坂公規・宮越昭暢・林武司・山野誠：地下温度データ集:埼玉県地質地盤資料集, 第III章, 761-775, 2012

(原稿受理 2013.8.XX)