地下温度データを用いた過去の地表面温度履歴の推定 ーバンコク地域への適用ー

濱元栄起*・山野 誠**・後藤秀作*³・谷口真人*⁴

要 旨

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播する。この性質を利用すると、地下の温度分布から過去数百年間の地表面温度変動の履歴を推定することができる。この手法は、これまで北米やヨーロッパで広く用いられてきた。本論文では、地表面温度変動が簡単な関数で表される場合を例として、地下温度分布がどのように乱されるかを示した。また、最近100年間に地表面温度がほぼ直線的に上昇した場合について、逆問題解析の手法を用いて地下温度分布から過去の地表面温度変動を推定した結果が、仮定した温度変動と整合的であることを示した。次にこの方法を、バンコク地域の地下水観測井で2004年、2006年、2008年に計測した温度データに適用した。温度計測を行った44地点のうち、解析に適した6地点のデータを選び、地下の地質構造が多層であることを考慮したモデルを用いて過去300年間の地表面温度の履歴を推定した。その結果、すべての地点で最近100年間に地表面温度が上昇していることがわかった。上昇幅は測定点ごとに異なり0.4~2.4Kで、都市近郊や農村地帯に比べて都心において大きい。この違いはヒートアイランド現象や土地利用の変化など都市化の影響を反映している可能性が高い。さらに、地表面温度変動の復元結果を用いて、1900年以降に地中に蓄えられた熱量の推定を行った。バンコク都心部で1990年までに蓄積された熱量は、北半球での平均値の2~3倍に達している。この地下温度分布から地表面温度変動や熱の蓄積過程を推定する手法は、他の都市にも適用可能であり、地球温暖化や都市化の熱的影響についての議論に有用であると考えられる。

キーワード：地表面温度・気候変動・孔井内温度・ヒートアイランド・バンコク

1. はじめに

地球科学分野における研究や資源探査によって、これまで多数の孔井で温度分布の計測（温度検層）が行われてきた。地表面付近の地下の温度分布は、過去から現在までの地表面における温度変動による影響を受けている。このような温度分布を注意深く解析することで過去数百年程度の地表面温度変動の情報を知ることができる(たとえば、Wang, 1992; Huang et al., 2000)。そしてこの

情報は、全地球規模での温暖化や都市のヒートアイランド現象を議論するうえで重要な情報となる。

過去の気温の記録は、場所によって約200年程度まで残っているが、これよりも前の記録については皆無である。気温データの記録がない時代や場所において温度変動を推定する方法として、本論文で述べる地下の温度分布からの推定のほか、土壌中の同位体や木の年輪、氷床のコア試料、サンゴの化石を用いたものなどがある(たとえば、Briffa et al., 1990; Fisher et al., 1996; Morgan

2009年5月12日原稿受付; 2010年2月5日受理

* 埼玉県環境科学国際センター

〒347-0115 埼玉県北埼玉郡騎西町上種足 914

** 東京大学 地震研究所

〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

*³ 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1

*⁴ 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

〒603-8047 京都市北区上賀茂本山 457-4

and van Ommen, 1997; Lough and Barnes, 1997)。本論文で述べる方法は、直接温度を指標として地表面の温度を推定する点の特徴である。この方法によって推定される温度は、過去の「地表面温度」であり、「気温」ではないことに注意しなければならないが、これまでの研究により、地表面温度は地表付近の気温と密接に関連していることが示されている(Gonzalez-Rouco et al., 2003; Chapman et al., 2004)。

孔内の温度データから過去の地表面温度変動を推定する研究は、1980年代から主に北米やヨーロッパの多数の地点で行われてきた(たとえば, Lachenbruch and Marshall, 1986; Beltrami et al., 1992; Wang and Lewis, 1992; Bodri and Cermak, 1998)。そして過去100-200年間の地表面温度は上昇傾向にあることが明らかにされている(たとえば, Wang, 1992; Clauser and Mareschal, 1995; Harris and Chapman, 1997; Rajver et al., 1998; Majorowicz et al., 1999; Majorowicz and Safanda, 2001; Correia and Safanda, 2001)。アジア地域でも最近になってこの手法を用いた推定が行われ、過去100年から200年間で地表面温度が大きく上昇していることがわかってきた(たとえば, Goto et al., 2005a, 2005b; 上岡ほか, 2007; Cermak et al., 2006; Goto et al., 2009; Hamamoto et al., 2009; Lubis et al., 2009)。日本国内において孔井内の精密な温度分布の測定は、これまで地下水流動の研究などの一環として行われているが(たとえば, 内田ほか, 2002; 宮越ほか, 2003), 過去の地表面温度変動を復元した研究例は少ない。国内での例として Goto et al. (2005a)が、琵琶湖湖畔の観測点の温度データから過去3000年間の地表面温度変動を推定した研究がある。彼らは、この地点の地表面温度は気候変動だけではなく湖の水位変化による影響も受けた、と解釈することで地下の温度分布を説明できることを示した。

地中の温度分布は、全地球的な温度変動のほか、都市化に関連したヒートアイランド現象や土地利用変化などの環境変化による影響も受けている(たとえば, Ferguson and Woodbury, 2007)。このような環境の変化を議論するためには、都市とその周辺地域の複数の孔井で温度分布を計測し、その結果を空間的に比較することが有効である。たとえば、大阪平野の複数の地点で地下温度分布を測定した結果から、最近の温度上昇は近郊よりも都市の中心部の方が大きいということがわかってきた(Taniguchi and Uemura, 2005)。

現在、アジアの大都市を対象として都市の地下環境の変化を調べる国際研究プロジェクト「都市の地下環境に残る人間活動の影響(総合地球環境学研究所。代表: 谷口真人)」が進行中で(Taniguchi et al., 2009), このプロジェクトの一環としてアジア地域の複数の都市で、孔井内の温度分布の計測が行われている(Yamano et al.,

2009)。とくにバンコク地域は、観測を行ううえで条件の良い孔井が多く、Hamamoto et al. (2009)によって2004年、2006年、2008年に合計44地点で温度分布の計測が行われた(Fig.1)。本論文では、孔井内の温度分布を用いて過去の地表面温度変動の履歴を推定する原理について述べ、この手法をバンコク地域の地下温度分布のデータに適用した結果を紹介する。

2. 原理

地表面温度の変動は、地下へゆっくりと伝播し、地下の温度分布を擾乱する。地表面温度変動は、フーリエ級数(Wang, 1992)や階段関数の重ね合わせ(Beltrami et al., 1992; Shen and Beck, 1992)で近似することができる。

まず地表面温度が周期変動をしている場合について、地下の温度分布がどのように乱されるかを示す。ここでは地表面温度変動は、以下のように周期 P の余弦波で表わされるものとする。

$$T(z=0, t) = T_0 + A \cos\left(\frac{2\pi}{P}\right) \quad (1)$$

T_0 は地表面温度の平均値、 A は振幅である。地下の熱物性が一様である場合、一次元の熱拡散方程式

Fig.1. Locations of groundwater monitoring stations where borehole temperature measurement was conducted. Squares, circles, and stars are the stations where measurements were made once, twice, and three times, respectively. Solid symbols represent the stations where ground surface temperature (GST) reconstruction analysis was made. The broken ellipse approximately shows the city of Bangkok.

Fig.2. Subsurface temperature perturbation by a sinusoidal GST change with a period of 100 years.

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

を解くことにより、地下温度分布は、

$$T(z, t) = T_0 + G \cdot z + A \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\kappa \cdot P}} z\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{P} - \sqrt{\frac{\pi}{\kappa \cdot P}} z\right) \quad (3)$$

と求められる。ここで G は擾乱を受けていない温度勾配、 κ は熱拡散率をあらわしている。この式は、擾乱の振幅は、深さに対し指数関数的に減衰することを示している。たとえば変動の周期が 100 年、地表における振幅が 1K、熱拡散率が $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である場合、地下の温度分布が受ける擾乱は Fig. 2 のようになり、約 150m の深さまで温度が乱されることがわかる。(3)式より擾乱が及ぶ深さは周期の平方根に比例するから、周期が 300 年であれば約 250m の深さまで擾乱されることになる。

一方、地表面温度変動は、階段関数を用いて表わすこともできる。この場合、変動が周期性をもつことを仮定する必要がないため、変動に長期トレンドが含まれている場合の解析により有効である。以下では、地表面温度変動を階段関数の重ね合わせ

$$T(z=0, t_{i-1} < t \leq t_i) = T_0 + \Delta T_i \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

で表す。ここで、 T_0 は地表面温度の基準となる温度 ($t = t_0$ 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 T_0 の差である。 $t = t_M$ (現在) における地下の温度分布は、熱拡散方程式(2)を解くことによって以下のように表される (Carslaw and Jaeger, 1959)。

$$T(z, t = t_M) = T_0 + G \cdot z + \sum_{i=1}^M \Delta T_i \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_{i-1})}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_i)}}\right) \right] \quad (5)$$

ここで、 erfc は余誤差関数である。この式から、擾乱が及ぶ深度は、各温度変動が起こってから経過した時間の

Fig.3. Subsurface temperature perturbation by a step change in GST by 1 K (1, 10 100, 300, and 500 years after the change).

平方根に比例することがわかる。たとえば、地表面温度が 1 K 上昇してから 1, 10, 100, 300, 500 年後に地下の温度分布が受けている擾乱は、Fig. 3 のようになる(熱拡散率が $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合)。

また、温度変動の伝播は、熱拡散率にも依存している。そこで熱拡散率が $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合について地表面温度が 1K 上昇してから 100 年後の地下の温度分布を計算した (Fig. 4)。(5)式からわかるように、地表面温度変動の影響が及ぶ深さは熱拡散率の平方根に比例する。この結果、熱拡散率が $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ であると約 60m の深さまで影響が及ぶのに対し、 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である場合は約 200m の深さまで影響が伝わる。地表面温度が周期変動をする場合についても同様である ((3)式参照)。

以上では地下の物性は一樣であるとしてきたが、実際

Fig.4. Dependence of subsurface temperature perturbation on thermal diffusivity of the subsurface material, assuming a step change in GST by 1 K at 100 years before observation.

には地下の地質は多層構造である場合が多い。このとき、各層内の熱物性は一樣とすると、層ごとに一次元の熱拡散方程式が成り立つ。

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{k_n}{\rho \cdot c} \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

T_n , k_n は n 番目の層内の温度と熱伝導率, ρ は密度, c は比熱であり, 熱拡散率 κ と熱伝導率 k の間には $\kappa_n = k_n / (\rho \cdot c)$ の関係がある。ただし, ここでは $\rho \cdot c$ はすべての層で一様とし, 熱伝導率のみが異なるものとする。また, 層境界では, 温度と熱流量が連続であり, 以下の式が成り立つ。

$$T_n(z=z_n, t) = T_{n+1}(z=z_n, t) \quad (7)$$

$$k_n \frac{\partial T_n(z=z_n, t)}{\partial z} = k_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}(z=z_n, t)}{\partial z} \quad (8)$$

$$(n=1,2,\dots,N-1)$$

ここで z_n は層境界の深さを表す。地表面における境界条件は, 一様モデルの場合と同様に(1)式や(4)式のように表すことができ, 下端 $z = z_0$ (N 番目の層の底)における境界条件は

$$k_N \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=z_0} = q_b \quad (9)$$

で表わすことができる。 q_b は地下深部からの熱流量であり, この条件は(3)式および(5)式で擾乱を受けていない温度勾配 G を与えることに対応する。

Fig.5. (a) Hypothetical change in GST (1K increase in the last century) and reconstructed GST history. (b) Subsurface temperature profile calculated from the hypothetical change in GST.

以上の議論は, 地表面温度が過去から現時点までに変化した場合, 地中の温度分布にどのように影響を及ぼすかについて述べたものである。言い換えれば, 現在の地中の温度分布は, 過去から現在までの地表面温度変動によって形成されたものであると考えられる。したがって地中の温度分布を注意深く解析すると, 過去から現在までの地表面温度変動の履歴を知ることができる。すなわち (5)式中の温度変化量 ΔT_i や熱拡散率 κ_i , 基準となる温度 T_0 , 地表面温度変動によって乱されていない温度勾配 G を未知数と考え, 地中の温度分布をよく説明するように決めることができる。多層構造モデルの場合, 各層の内部の熱物性が測定されていないければ, 各層の熱拡散率 (あるいは熱伝導率) も未知数として扱うことになる。これらの未知数の決定には, 逆問題解析の手法であるベイズ法が有効である(たとえば, Tarantola, 1987; Shen and Beck, 1992)。

ここでは, ある地表面温度変動を仮定し, その影響を受けた地下の温度分布を逆問題解析することで, どのように地表面温度変動を推定できるかを示す。地表面温度が最近 100 年間に 1K ほぼ直線的に上昇した場合を想定し, これを階段関数の重ね合わせで表す(Fig. 5a)。(5)式を用いてこの変動が地下へ熱拡散によって伝搬した場合の地下温度分布を計算すると, Fig. 5b のようになる。次にこの地下温度分布が観測データであるとして逆問題解析を行い, 過去の地表面温度変動を推定した(Fig. 5a)。推定値は, 最初に仮定した変動に非常に近いものであり, 過去の地表面温度変動を推定する方法として, 地下の温度分布の逆問題解析が有効であることを示している。

3. バンコク地域への適用

3.1 孔井内温度分布の計測

ここではバンコク地域で計測した地下温度分布のデータを用いて, 過去の地表面温度変動の復元解析を行う。バンコクは, 人口約 600 万人で東南アジアの大都市のひとつであり, チャオプラヤ川の氾濫原である中央平野南部に位置している(Fig. 1)。バンコク都心部は, この 40 年間で人口増加と経済成長によって急速に拡大し, 地下水の揚水によって地盤沈下をひきおこした。そこで地下水流動系の調査を目的として, バンコクやその周辺で地下水観測のための井戸が掘削された(たとえば, Buapeng and Lorphensri, 1999)。これらの地下水観測井の多くは, 孔井内の温度計測に利用することができる。Hamamoto et al.(2009)は, バンコク地域およびその周辺の観測井で合計 44 地点 (2004 年 7 月に 33 地点, 2006 年 6 月に 19 地点, 2008 年 3 月に 16 地点) の孔井内温度計測を行った。これらの中には, 同一地点で年をかね繰返し測定を行った場所もある (12 地点で 2 回, 5 地点で 3 回)。

Fig.6. Borehole temperature profile at the station X (Fig. 1) measured in March 2008.

Fig.7. Borehole temperature profiles at the station Y (Fig. 1) measured in 2004, 2006, and 2008.

多くの測定地点はバンコク中心部から 30km 以内に位置しているが、いくつかの地点は、中心から 80 km 以上離れた北部の農村地帯に位置している (Fig. 1)。井戸の深さは、都心部の多くの地点で 200 から 250m であり、北部で 200m 未満である。これは揚水として利用する帯水層の深さに対応している。温度計測の分解能は 0.01K、測定間隔は 1m または 2m である。

バンコク地域は河川の堆積作用によって粒径や土質の異なった層が重なり合っている。このため、地層ごとに熱物性が異なると考えられ、解析を行う場合、多層モデルを用いてそれぞれの層の熱伝導率も未知数として扱うことが必要である。

3.2 地表面温度変動の推定

バンコク地域で測定した多くの地点では、地下水流動の影響を受けていると思われる温度分布のデータが得られている。地下水流動があると、(2)式で記述される熱拡散に加えて地下水流動によっても熱が運ばれる（移流）ため、流動の向きや速さに関する情報なしに地表面温度変動を復元することは困難である。そこで、本研究では、地下水流動の影響を受けていない温度分布データを選び解析を行うことにした。このため、測定したそれぞれの温度分布について地下水流動による影響の有無を評価することが必要である。本研究ではまず地下温度分布の形状をもとに地下水流動の影響を判断した。Fig. 6 に地下水流動の影響を受けている温度分布の例を示す (Fig. 1 の X 地点)。この例では地表面から約 90m 付近と約 190m 付近で温度に不自然な低下が見られ、地下水流動の影響を受けていることが明らかである。また地下水流動が時間的に変化している場合は、時間をあけて測定した温度

分布を比較することで地下水流動を検出できる可能性がある。Fig. 7 は、2004 年、2006 年、2008 年に温度計測を行った孔井の例である (Fig. 1 の Y 地点)。地表面から 70~120m 付近でそれぞれの温度分布は異なった形状をしており、地下水流動が時間的に変化していることを示している。

本研究では、以上のような判断方法によって地下水流動の影響を受けていないと思われる 6 地点 15 本の温度プロファイルを選んだ (Fig. 8)。そして地表面温度変動は地下へ熱伝導のみで伝播するものとし、地下の各層ごとの熱物性の違いを考慮した多層構造モデルを用いた解析を行った。バンコク地域における大部分の観測井では、地質柱状図が作成されており、熱物性の層境界はこれを参考にして決定した。原則として地層境界が熱物性境界であるものとしたが、薄い地層や隣接した地層の性質が近い場合は、複数の地層をまとめて一層として扱った。解析には Goto et al.(2009)の数値計算プログラムを使用した。

この解析によって現在から遡ることのできる年代は、温度分布を計測した最深の深さによって決まる。バンコク地域で測定した孔井の深さは 200~250m 程度であるので、現在から 300 年程度が復元可能な限界となる。一方、最近の変動の復元については、温度分布を計測したもっとも浅い深さによって限界が決まる。本研究で解析に用いた地点では、水位が 20~40m 程度であり、これより浅い部分の温度計測は行うことができない。したがって最近 10~20 年間については推定が難しいことになる。そこで西暦 1700 年から 1990 年までを復元の範囲とし、この間を 10 年ごとに区分して解析を行った。測定地点によっては、期間をあけて 2~3 回の繰り返し計測

を行ったところもある。このような場合、各回の温度分布を個別に解析し、その結果を平均することでその地点の代表的結果とした(Fig. 9)。過去の地表面温度は10年の区分ごとに推定されるので、Fig. 9では、階段関数状に推定値を示した。また、基準となる温度 T_0 も逆問題解析によって求められるが、Fig. 9には、各観測点における T_0 (1700年の地表面温度) との差のみを示した。

解析によって推定した地表面温度変動がどの程度の誤差をもつかは、観測誤差や、解析に用いるモデルが現実の事象とどれだけ差があるかに依存する。本研究で用いる逆問題解析では、求めようとする未知数について、他の情報に基づいて推定した値を先験値として与える。さらに各未知数の値がとり得る範囲を先験値の分散として与えることができるが、この分散値のとり方によって結果がばらつき、解析誤差につながる。そこで本研究では、それぞれの先験値の分散値を変化させて解析を実施し、結果にどの程度影響するかを調べた。その結果、復元した地表面温度変動の誤差は 0.5K 以内であると推定された。

Fig.8. Temperature profiles selected for GST reconstruction analysis, which were measured in July 2004 (top), June 2006 (middle), and March 2008 (bottom).

地下温度分布から復元したバンコク地域における地表面温度変動の履歴を見ると、解析を行った6地点すべてで最近100年間に地表面温度が上昇している。その温度上昇の大きさは各地点で異なり、0.4から2.4Kの範囲にある。北部農村地帯(観測点A)や最近都市化が進んだチャオプラヤ川西岸の南西部(観測点EとF)より、古くから都市が発展した都心部(観測点C)で温度上昇の幅が大きい。一方、バンコク地域における気温の実測記録によると、都心部の気温の年平均はこの50年間に2K上昇している(たとえば、Kataoka et al., 2009)。C地点の地下温度分布から推定した地表面温度変動は、この都心部の気温変動の長期的な傾向と整合的である(Fig. 9)。さらに都心部と周辺地域における気温の上昇幅を比較すると、都心部の方が大きく、これも地表面温度変動の復元結果と同じ特徴を示している。この特徴は、ヒートアイランド現象や地表面環境の人為的变化など、都市化の影響によるものと考えられる。したがって、バンコク地域の地下温度分布には、都市化による熱環境変化の過程が記録されていると言えよう。

本研究では、地下温度分布に対する地下水流動の影響を温度分布の形状や繰り返し測定の結果から評価したが、地下水が一様にゆっくりと流動し、その時間変化が小さい場合は、影響を検出することが難しい。したがって、本研究で解析に用いた温度分布データでも、地下水流動の影響を受けている可能性が否定できない。バンコク地域では地下水の化学分析や数値シミュレーションなどによって地下水流動のパターンが明らかにされつつある(たとえば、Sanford and Buapeng, 1996; Yamanaka et al., 2009)。今後これらの研究成果をもとにして地下水流動の影響も考慮した解析を行うことで、さらに信頼性のある地表面温度変動の推定が行えると期待される。

Fig.9. GST histories reconstructed from the selected temperature profiles (locations of the stations are shown in Fig. 1). Gray curve is the mean annual surface air temperature at a meteorological station in the city of Bangkok.

Fig.10. Subsurface temperature profiles calculated from the GST history reconstructed at the station C at intervals of 10 years from 1900 to 1990.

3.3 蓄熱量

次に地下の蓄熱量の変化という観点から、地下の熱環境の変遷を議論する。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(たとえば, Huang, 2006)。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、

$$Q = \int \rho c \cdot [T(z) - T'(z)] \cdot dz \quad (10)$$

であらわされる。ここで、 $T(z)$ はある時刻における深さ z における温度、 $T'(z)$ は比較の基準となる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、1900年から1990年までに地下の温度分布がどのように変化してきたかを(5)式により10年間隔で計算した(Fig. 10にC地点の地下温度分布の変化を示す)。次にこの結果と(10)式を用いて蓄熱量を計算し、年代ごとに示した(Fig. 11)。蓄熱量が、1900年以降の地表面温度変動の上昇にほぼ対応して増加しており、近年その増加率が増していることがわかる。

Beltrami et al. (2006)は、北半球に位置する558地点の地下温度分布を解析し、北半球の陸域において単位時間、単位面積あたりの地下への熱の蓄積量が、どのように時間変化してきたかを見積もった。その結果、1780年から1980年までの平均的な蓄熱の速さを 20.6 mW/m^2 、1930年から1980年までのそれを 29.6 mW/m^2 と推定し、最近50年間の熱の蓄積の速さはそれ以前に比べて極めて大きいと結論付けている。また、1900年から1990年までの蓄熱の速さは、 $25 \sim 30 \text{ mW/m}^2$ と見積もられており、この期間の蓄熱量は $70 \sim 85 \text{ MJ/m}^2$ 程度となる。これは本研究で見積もったバンコク市近郊に位

Fig.11. Amount of heat stored in the subsurface after 1900 calculated using the reconstructed GST histories (Fig. 9).

置するB地点の蓄熱量に近い。バンコク都心部のC地点では、北半球の平均の2~3倍もの熱が蓄積されたことになる。このように都市域では、人間活動の影響によって地下への熱の蓄積が急速に進んでいるものと考えられる。

4. まとめ

地下の温度分布は、地表面温度変動による影響を受けており、これを逆問題解析することで地表面温度変動の履歴を推定することができる。過去の地表面温度変動の情報は地球温暖化や都市化の影響を議論するうえで重要である。この手法をバンコク地域で測定した6地点の地下温度分布データに適用した。この解析では、多層構造を考慮し、過去300年間の地表面温度変動の推定を行った。得られた結果は、この100年間に地表面温度が $0.4 \sim 2.4 \text{ K}$ 上昇したことを示しており、上昇量は北部農村地帯やチャオプラヤ川西岸よりも都市部で大きい。この差は、ヒートアイランド現象や地表面環境の人為的な変化などの都市化の影響によるものと考えられ、バンコク地域の地下温度分布には、都市化による環境変動の過程が記録されていると言える。さらに復元した地表面温度変動に基づいて、1900年以後に地下に蓄積された熱量を推定し、その時間変化をあきらかにした。その結果、都心部での蓄熱量は、北半球の平均の2~3倍に達することがわかった。このように、地下温度分布から推定した地表面温度変動の履歴や地下への蓄熱の過程は、都市の発展や都市環境の変化について議論するうえで重要な情報となる。

謝 辞

この研究は、総合地球環境学研究所のプロジェクト「都市の地下環境に残る人間活動の影響（プロジェクトリーダー：谷口真人）」の一環として行われました。バンコク地域における孔内温度計測はタイ地下水資源局の Somkid Buapeng 氏, Oranuj Lorphensri 氏, 九州大学の西島潤氏, 上岡慎氏そして千葉大学の Vuthy Monyrath 氏の協力のもと行われました。また、二人の匿名査読者からは有益な助言を多数頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Beltrami, H., Jessop, A. M., and Mareschal, J. C. (1992): Ground temperature histories in eastern and central Canada from geothermal measurements: evidence of climatic change, *Global Planet. Change*, **6**, 167-184.
- Beltrami, H., Bournon, E., Kellman, L., and Gonza'lez-Rouco, J. F. (2006): Spatial patterns of ground heat gain in the Northern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06717, doi:06710.01029/02006GL025676.
- Bodri, L., and Cermak, V. (1998): Last 250 years climate reconstruction inferred from geothermal measurements in the Czech Republic, *Tectonophysics*, **291**, 251-261.
- Briffa, K. R., Bartholin, T. S., Eckstein, D., Jones, P. D., Karle'n, W., Schweingruber, F. H., and Zetterberg, P. (1990): 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia, *Nature*, **346**, 434-439.
- Buapeng, S., and Lorphensri, O. (1999): Records of groundwater and land subsidence in Bangkok and adjacent provinces. Mitigation of Groundwater Crisis and Land Subsidence in Bangkok Project (MGL Project), *Technical Report No. 1/2542*, 145pp.
- Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1959): *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London, 510pp.
- Cermak, V., Safanda, J., Bodri, L., Yamano, M., and Gordeev, E. (2006): A comparative study of geothermal and meteorological records of climate change in Kamchatka, *Stud. Geophys. Geod.*, **50**, 675-695.
- Chapman, D. S., Bartlett, M. G., and Harris, R. N. (2004): Comment on "Ground vs. surface temperature trends: Implications for borehole surface temperature reconstructions" by M.E.Mann and G. Schmidt, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07205, doi:07210.01029/ 02003GL 019054.
- Clauser, C., and Mareschal, J. C. (1995): Ground temperature history in central Europe from borehole temperature data, *Geophys. J. Int.*, **121**, 805-817.
- Correia, A., and Safanda, J. (2001): Ground surface temperature history at a single site in southern Portugal reconstructed from borehole temperatures, *Global Planet. Change*, **29**, 155-165.
- Ferguson, G., and Woodbury, A. D. (2007): Urban heat island in the subsurface, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23713, doi:23710.21029/22007GL032324.
- Fisher, D. A., Koerner, R.M., Kuivinen, K., Clausen, H.B., Johnsen, S.J., Steffensen, J-P., Gundestrup, and N., Hammer, C.U. (1996): Intercomparison of ice core ($\delta 180$) and precipitation records from sites in Canada and Greenland over the last 3500 years and over the last few centuries in detail using EOF techniques, in *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 years*, edited by Jones, P. D., Bradley, R.S. and Jouzel, J., Springer, Berlin, 297-328.
- Gonzalez-Rouco, F., von Storch, H., and Zorita, E. (2003): Deep soil temperature as proxy for surface air-temperature in a coupled model simulation of the last thousand years, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2116, doi:2110.1029/2003GL018264.
- Goto, S., Hamamoto, H., and Yamano, M. (2005a): 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.
- Goto, S., Kim, H. C., Uchida, Y., and Okubo, Y. (2005b): Reconstruction of the ground surface temperature history from the borehole temperature data in the southeastern part of the Republic of Korea, *J. Geophys. Eng.*, **2**, 312-319.
- Goto, S., Yamano, M., Kim, H. C., Uchida, Y., and Okubo, Y. (2009): Ground surface temperature history reconstruction from borehole temperature data for studies of human impacts on climatic change in East Asia, in *From headwaters to the ocean*, edited by Taniguchi, M., Burnett, W. C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, U., 529-534, Taylor & Francis Group, London.
- Hamamoto, H., Kamioka, S., Nishijima, J., Vuthy, M., Goto, S., and Taniguchi, M. (2009): 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.
- Harris, R. N., and Chapman, D. S. (1997): Borehole temperatures and a baseline for 20th-century global warming estimates, *Science*, **275**, 1618-1621.
- Huang, S., Pollack, H. N., and Shen, P. Y. (2000): Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, *Nature*, **403**, 756-758.
- Huang, S. (2006): 1851-2004 annual heat budget of the continental landmasses, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L04707, doi:10.1029/2005GL025300.
- 上岡慎・濱元栄起・江原幸雄・後藤秀作 (2007): バンコク地域におけるヒートアイランド現象の評価～孔井内温度データからの地表面温度復元～, 九大地熱・火山研究報告, **16**, 26-39.
- Kataoka, K., Matsumoto, R., Ichinose, T., and Taniguchi, M. (2009): Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years, *Sci. Total Environ.*, doi:10.1016/j.scitotenv.200809015.
- Lachenbruch, A. H., and Marshall, B. V. (1986): Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic, *Science*, **234**, 689-696.
- Lough, J. M., and Barnes, D. J. (1997): Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: a proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural changes, *J. Exp. Marine Biology and Ecology*, **211**, 29-67.
- Lubis, R., Miyakoshi, A., Yamano, M., Taniguchi, M., Sakura, Y., and Delinom, R. (2009): Reconstructions of climate change and surface warming at Jakarta using borehole temperature data, in *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management*, edited by Taniguchi, M., Burnett, W. C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, U., Taylor & Francis Group, London, 541-545.
- Majorowicz, J. A., Safanda, J., Harris, R. N., and Skinner, W. R. (1999): Large ground surface temperature changes of the last three centuries inferred from borehole temperatures in the Southern Canadian Prairies, Saskatchewan, *Global Planet. Change*, **20**, 227-241.
- Majorowicz, J. A., and Safanda, J. (2001): Composite surface temperature history from simultaneous inversion of borehole temperatures in western Canadian plains, *Global Planet. Change*, **21**, 231-239.
- 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林武司 (2003): 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.
- Morgan, V. and van Ommen, T. D. (1997): Seasonality in late-Holocene climate from ice core records, *The Holocene*, **7**, 351-354.
- Rajver, D., Safanda, J., and Shen, P. Y. (1998): The climate record inverted from borehole temperatures in Slovenia, *Tectonophysics*, **291**, 263-276.
- Sanford, W. E., and Buapeng, S. (1996): Assessment of a groundwater flow model of the Bangkok basin, Thailand, using carbon-14-based ages and paleohydrology, *Hydrogeology Journal*, **4**, 26-40.
- Shen, P. Y., and Beck, A. E. (1992): Paleoclimate change and heat flow density inferred from temperature data in the Superior Province of the Canadian Shield, *Global Planet. Change*, **6**, 143-165.
- Taniguchi, M., and Uemura, T. (2005): Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **152**, 305-313.
- Taniguchi, M., Burnett, W. C., and Ness, G. D. (2009): Integrated research on subsurface environments in Asian urban areas, *Sci. Total Environ.*, **404**, 377-392.
- Tarantola, A. (1987): *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*, Elsevier, Amsterdam, 613pp.
- 内田洋平・大久保泰邦・宮越昭暢 (2002): 地下水データと深部孔井データの孔底温度の比較から求めた関東平野の地温勾配, 物理探査, **55**, 191-198.
- Wang, K. (1992): Estimation of ground surface temperatures from borehole temperature data, *J. Geophys. Res.*, **97**, 2095-2106.
- Wang, K., and Lewis, T. J. (1992): Geothermal evidence from Canada for a cold period before recent climatic warming, *Science*, **256**, 1003-1005.
- Yamanaka, T., Mikita, M., Tsujimura, M., Lorphensri, O., Shimada, J., Hagihara, A., Ikawa, R., Kagabu, M., Nakamura, T., Onodera, S. and Taniguchi, M. (2009) : Assessment of enhanced recharge of confined groundwater in and around the Bangkok metropolitan area: numerical experiments and multiple tracer studies, *Proc. International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management (IGS-TH 2009)*, Bangkok, Thailand, February 2009, CD-ROM.
- Yamano, M., Goto, S., Miyakoshi, A., Hamamoto, H., Lubis, R. F., Vuthy, M., and Taniguchi, M. (2009): Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution, *Sci. Total Environ.*, **407**, 3120-3128.

Estimation of the past ground surface temperature history from subsurface temperature distribution — Application to the Bangkok area —

Hideki Hamamoto*, Makoto Yamano**, Shusaku Goto*³ and Makoto Taniguchi*⁴

ABSTRACT

Temperature change at the ground surface slowly propagates into subsurface formations by thermal diffusion, which enables us to estimate the ground surface temperature (GST) history of the past several hundred years from temperature profiles measured in boreholes. This method has been applied to GST reconstruction studies mainly in North America and Europe. We show how the past GST change disturbs the subsurface temperature distribution for simple cases. Inversion analysis of the subsurface temperature profile calculated from a hypothetical nearly linear change in GST demonstrates that GST history can be well reconstructed from borehole temperature data. We applied this method to Bangkok and the surrounding area, where many groundwater monitoring wells are available for temperature profile logging. Temperature measurements were conducted at 44 stations in 2004, 2006 and 2008. Selected profiles at six stations were analyzed to reconstruct GST histories of the last 300 years using a model taking account of multi-layered formations. All of the estimated GST histories show surface warming in the last century. The amount of temperature increase varies by site and ranges from 0.4 to 2.4 K, larger in the city than in suburban and rural areas. This tendency may reflect urbanization process in the Bangkok metropolitan area such as heat island effect and land use change. We estimated the amount of heat stored in the subsurface since 1900 based on the reconstructed GST histories. The subsurface heat storage in the city of Bangkok is much larger than the average in the Northern hemisphere. These types of analyses of GST history and subsurface heat storage will provide useful information on global warming and thermal influence of urbanization.

Keywords: ground surface temperature, climate change, borehole temperature, heat island effect, Bangkok

Manuscript received May 12, 2009; Accepted February 5, 2010.

* Center for Environmental Science in Saitama
914 Kami-tanadare, Kisai-machi, Kitasaitama-gun, Saitama
347-0115, Japan

** Earthquake Research Institute, University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

*³ Institute for Geo-Resources and Environment,
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

*⁴ Research Institute for Humanity and Nature
457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8047,
Japan