

地下温度データを用いた地表面温度履歴の復元

後藤 秀作¹⁾・キム ヒョンチャン²⁾・内田 洋平¹⁾・大久保泰邦³⁾

1. はじめに

現在, 世界中で大きな問題となっている地球温暖化は, 気温の上昇だけではなく地表面の温度も上昇させている. この地表面の温度上昇の影響は地下へと伝播し, 地下深部からの熱流量と岩石の熱伝導率で決まる地下温度(ここでは「バックグラウンドの温度」と呼ぶ)に対する温度擾乱として記録される. 地下水流動がない場合, 地表面温度変化の影響は熱伝導のみで地下に伝播する. Harris and Chapman (1997)は, 岩石の熱拡散率が $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ の半無限媒体の表面でパルス状の温度変化があった場合を想定し, 地下の温度擾乱が現れる深度を計算した. その結果, 10年, 100年および1,000年後に温度擾乱の最大値は地表面からそれぞれ25m, 80mおよび250mの深さに現れることを示した. この計算の結果は, 深さ数百mまでの地下温度は過去千年間の地表面温度変化の情報を記録する潜在能力があることを示している. その一方で, 熱伝導で地表面温度の変化が地下へ伝播するとき, 深さが増加するに従ってその振幅が減衰するという特徴がある. 特に短周期の変動ほど減衰しやすいため, 地下の温度擾乱は地表面温度変化の長期傾向に関する情報を有していると考えられる.

地下温度データから地表面温度履歴を復元し, それを基に過去の気候変動を推定する研究が北米やヨーロッパを中心に行われている. この研究は, 地下の熱の移動形態が熱伝導のみであると仮定し, 地下温度から地表面温度変動に起因する温度擾乱を抽出して, 過去の地表面温度の時間変化を復元するというものである. 気候変動の研究で最も有効な手法は気象観測であるが, 世界中で気象観測が始まったのは

19世紀後半以降であるため, それ以前の気候変動については何らかの情報から推測しなければならない. 地下温度データから地表面温度履歴を復元する方法は, 過去の気候変動を推定する有力な手法の一つである.

地下温度データを用いた地表面温度履歴復元の従来の研究では, 北米において過去100-200年間で地表面温度が 2°C 上昇したことが明らかにされた(例えば, Wang, 1992; Harris and Chapman, 1997; Majorowicz *et al.*, 1999; Majorowicz and Safanda, 2001). ヨーロッパでは, 現在の温暖化の前にやや低温の時期があったことが明らかにされた(例えば, Clauser and Mareschal, 1995; Rajver *et al.*, 1998; Correia and Safanda, 2001). さらにフランスとチェコでは中世温暖期と小氷期の存在を示す結果が得られている(Mareschal and Vasseur, 1992; Bodri and Cermak, 1997).

現在, 日本の気温は100年あたり 1.06°C の割合で上昇している(気象庁, 2005). これは全世界の陸域の気温の上昇率($0.74^\circ\text{C}/100\text{年}$)よりも大きく, 都市化や工業化等の人間活動が温暖化を促進している可能性を示している. 地下温度データから地表面温度履歴を復元する研究は北米やヨーロッパが中心であり, 日本を含む東アジア地域はその空白域となっている. 筆者らは, 東アジア地域の温暖化の開始時期とその規模や人間活動との関連性を調べるため, 地下温度データから地表面温度履歴を復元する研究に取り組んでいる. 本稿では, 地表面温度変化がどのように地下に伝播するかを解説し, 韓国南東部の都市ウルサンで得られた地下温度データから地表面温度履歴を復元した研究例を紹介する.

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 韓国地質資源研究院
3) 産総研 国際部門

キーワード: 地表面温度履歴, 地下温度, 気温上昇, 地球温暖化, 人間活動

2. 熱伝導による地表面温度変化の地下への伝播

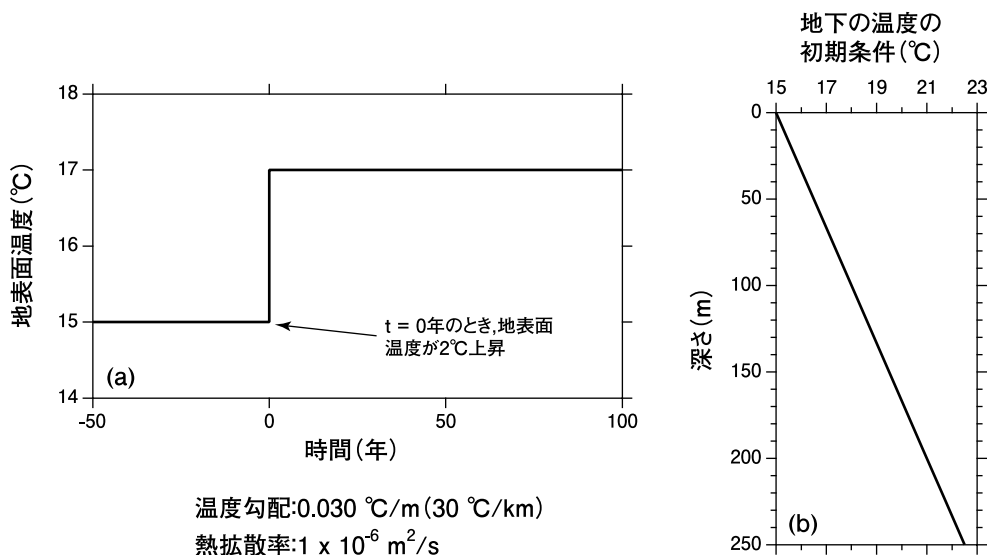
地表面の温度が変化すると、その影響は地下に伝播する。地下への熱移動を考える場合、地下水流動が存在すると問題が複雑になる。そのため、地下温度データから地表面温度履歴を復元するとき、地下温度データに地下水流動の影響が確認されないものを厳選し、熱の移動が熱伝導のみによると仮定して解析を行う。以下では、熱の移動は熱伝導のみと仮定し、簡単なモデルを使って地表面温度変化がどのように地下に伝播するか解説する。

まず均質で一様な半無限媒体を考える。この媒体の熱拡散率は一般的な岩石の値である $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ とする。現在を $t=0$ 年とし、時間 $t < 0$ 年ときに地表面の温度は第1図aに示すように 15°C で一定で、地下の温度(初期温度)は第1図bに示すように直線的な分布であるとする(温度勾配は $0.030^\circ\text{C}/\text{m}$)。ここでは、この初期温度をバックグラウンドの温度とする。 $t=0$ 年とき、地表面温度がステップ状に 2°C 上昇し、そのまま一定に保たれるとする。このとき、10年、20年、50年および100年後の地下の温度分布は第2図aのようなになる。比較のため、バックグラウンド(初期温度)の温度も示してある。10年後、地表面温度変化の影響は深さ70mまで達している。20年、50年お

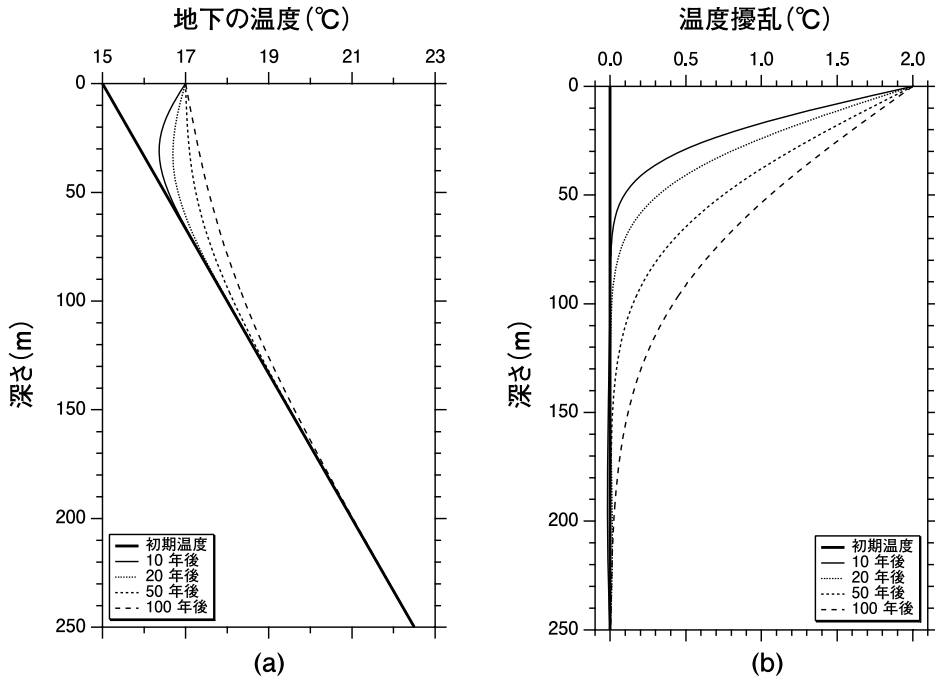
よび100年後になると、地表面温度変化の影響はそれぞれ110m、160mおよび230mまで達する。

熱の移動が熱伝導のみの場合、地下の温度はバックグラウンドの温度と地表面温度変化に起因する温度擾乱の重ね合わせで表すことができる。この性質を利用すると、地下温度からバックグラウンドの温度を差し引くことにより温度擾乱を抽出することができる。第2図bに温度擾乱を抽出した結果を示す。温度擾乱が時間の経過と共に深部に伝播していることが窺える。地表面温度履歴の復元は、このように地下温度から抽出した温度擾乱から復元する。

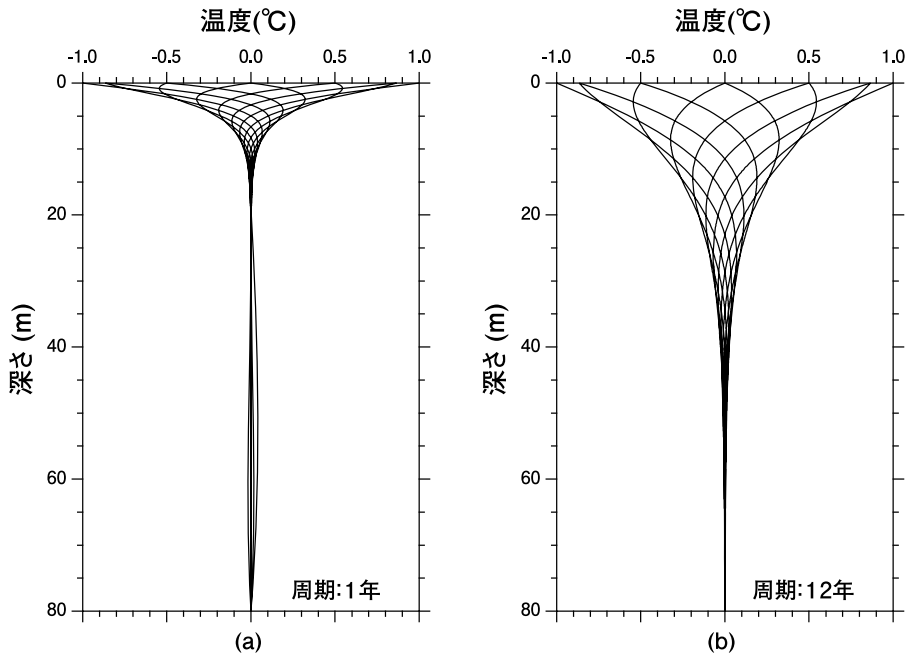
次に、地表面温度変化の地下への伝播における周期依存性について見ていこう。熱伝導による熱の移動は拡散現象である。そのため、地表面温度変化が地下へ伝播する過程でその振幅は徐々に減衰する。ここでは、地表面の温度が周期的に変動している均質・一様な半無限媒体を仮定する(岩石の熱拡散率： $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)。第3図aに、周期1年で振幅が 1°C の温度変動が地表面にあるときの地下の温度擾乱を1ヶ月毎に計算した結果を示す。この場合、温度擾乱が地表面から25mでほぼ完全に減衰していることがわかる。一方、第3図bは周期12年で振幅が 1°C の地表面温度変動があるときの地下の温度擾乱を1年毎に計算した結果を示す。この場合、温度擾乱が



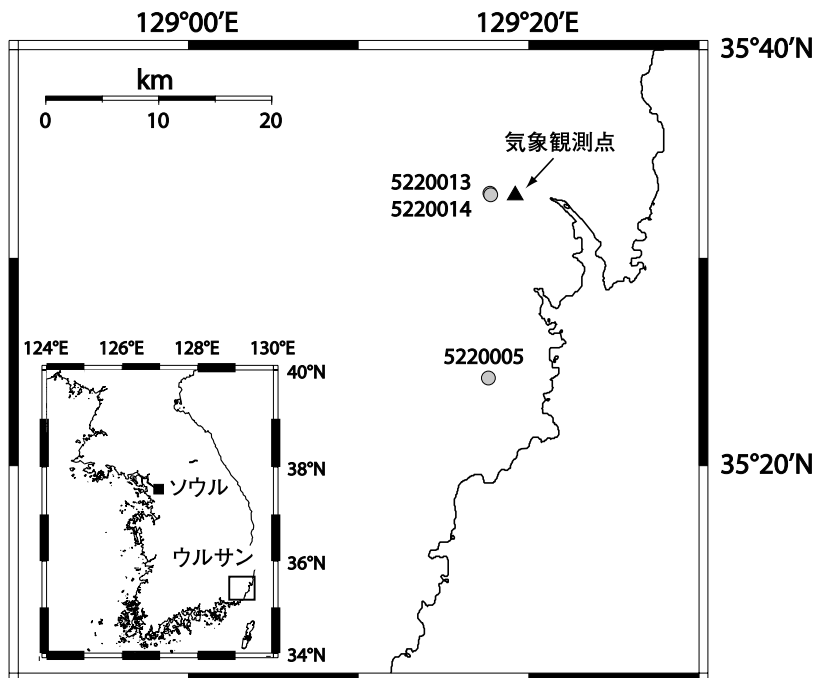
第1図 地表面温度変化の地下への伝播の計算モデル。(a) 計算で使用する地表面温度変化。現在を $t=0$ 年とし、それ以前の地表面温度は 15°C で一定とする。 $t=0$ 年で地表面温度が 2°C 上昇し、そのまま保たれたとする。(b) $t < 0$ 年の地下温度プロファイル。これをバックグラウンドの地下温度とする。



第2図 地表面温度変化の地下への伝播の計算例. (a) 地表面温度変化の影響を受けた地下温度プロファイル. (b) 地下温度から地表面温度変化に起因する温度擾乱を抽出したもの.



第3図 周期的な地表面温度変動があるときの地下の温度擾乱. (a) 周期1年で振幅が1°Cの地表面温度変動に対する温度擾乱の1ヶ月毎の変化. (b) 周期12年で振幅が1°Cの地表面温度変動に対する温度擾乱の1年毎の変化.



第4図 韓国南東部ウルサンの孔井と気象観測点の位置.

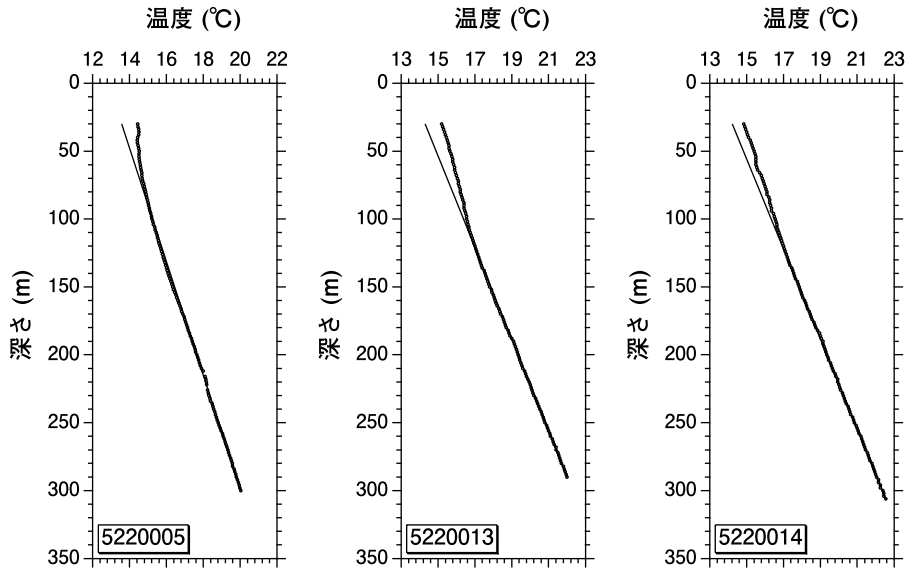
深さ70mにまで達している。両者の図の比較から、短周期の変動ほど浅い深度で減衰することが理解できる。第3図の例の場合、深さ25mでは周期12年の地表面温度変動に関する情報を抽出することができるが、周期1年のものは減衰しているため抽出することができない。深さが増加すると、短周期の変動の情報は抽出しづらくなる。そのため、地下の温度擾乱から復元した地表面温度履歴はその長期変動を示すことになる。

実際に地下温度から地表面温度履歴を復元する場合、地表面温度変化をステップ関数の重ね合わせ (Beltrami *et al.*, 1992; Shen and Beck, 1992) やフーリエ級数 (Wang, 1992) で近似する方法がとられる。より詳しい地表面温度履歴の復元手法は、これらの文献を参照されたい。

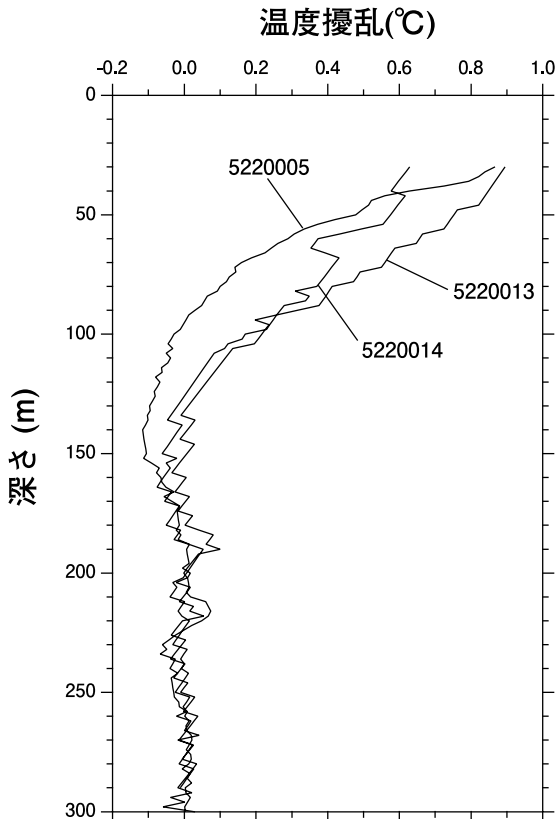
3. 地表面温度履歴の復元：韓国南東部ウルサンでの適用例

ここではGoto *et al.* (2005a) による韓国南東部の都市ウルサン (第4図) での地下温度データから地表面温度履歴を復元した結果を紹介する。ウルサンでは

1986年から韓国地質資源研究院が地下水・温泉調査の目的で19孔井における温度検層を行っている。これらの孔内温度データから地表面温度履歴を復元するため、地下水流動の影響が認められない3孔井 (5220005, 5220013 および 5220014) を選定した (第4図)。これらの孔井の孔内温度が計測されたのは1988～1990年である。第5図にこれらの孔井で計測された温度および180mよりも深い温度データから推測したバックグラウンドの温度を示す。地表面に近いほど計測温度はバックグラウンドの温度よりも高くなっており、過去から現在にかけて地表面の温度が上昇したことを示している。第6図に計測温度からバックグラウンドの温度を差し引いた温度擾乱を示す。深さ30mで温度擾乱が孔井のデータを平均すると0.8℃に達している。この温度擾乱を地表面まで外挿することにより、地表面温度の振幅は少なくとも1℃以上あることが推測される。ウルサンの年平均気温 (第7図) は1946年から1988年の間に0.6℃上昇している。しかし、この年平均気温の上昇は地下30mの温度擾乱の振幅を説明することができないことから、ウルサンでは気象観測を開始した1946年より前に温暖化が始まったと考えられる。



第5図 ウルサンの孔井で計測された孔内温度. 太線は計測温度, 細線は180mよりも深い温度データから推測したバックグラウンドの温度を示す.

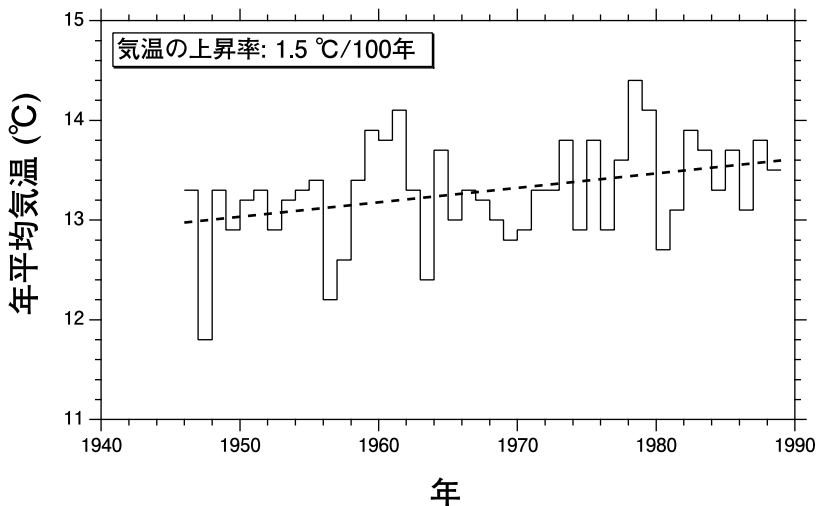


第6図 ウルサンの孔内温度データから抽出した温度擾乱.

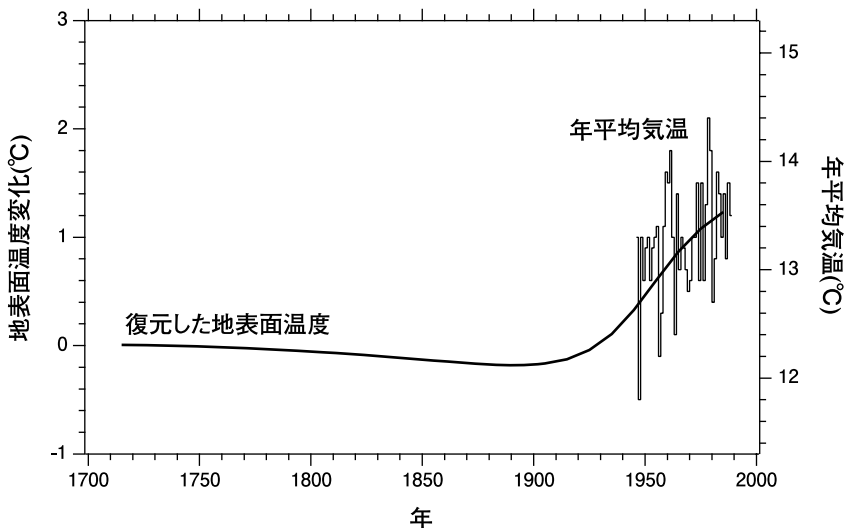
Goto *et al.* (2005a) は、一様・均質の半無限媒体を仮定し、地表面温度変動をステップ関数の重ね合わせで近似することで第6図の温度擾乱から地表面温度履歴を復元した. その結果を第8図に示す. 比較のため、ウルサンの年平均気温もプロットした. 復元した地表面温度から、19世紀後半に低温の時期が存在したことが推測される. 同様な低温期が北米(例えば、Wang, 1992; Harris and Chapman, 1997; Majorowicz *et al.*, 1999; Majorowicz and Safanda, 2001) やヨーロッパ(例えば、Cluser and Mareschal, 1995; Rajver *et al.*, 1998; Correia and Safanda, 2001) の地表面温度履歴の復元結果でも報告されている. 20世紀に入るとウルサンの地表面温度は上昇を始める. 1988年までに1.5°C上昇しており、その温度上昇率は2.0°C/100年である. これは日本の気温の上昇率(1.06°C/100年)や全世界の陸域の気温の上昇率(0.74°C/100年)よりも大きく(気象庁, 2005), この地域の人間活動が温暖化を促進している可能性を示唆している.

4. おわりに

本稿では地表面温度変化が熱伝導で地下に伝播



第7図 ウルサンの年平均気温。点線はこの範囲の年平均気温を最小自乗法でフィットした結果を示す。



第8図 地表面温度履歴の復元結果。比較のため、ウルサンの年平均気温も示す。

するときの特性を解説し、東アジア地域の温暖化の開始時期や都市化や工業化等の人間活動との関連性を調べる研究の一つの例として、韓国南東部の都市ウルサンでの地表面温度履歴の復元に関する研究を紹介した。地下温度から地表面温度履歴を復元する研究は北米やヨーロッパが中心であり、東アジア地域はその空白域となっている。東アジア地域は現在最も開発が行われている地域の一つであり、今後の温暖化の傾向を推定するためにこの地域での地表面

温度履歴復元の研究は重要である。その一方で、この研究は地下での熱移動が熱伝導のみの場合に限定されている。そのため、日本のように地下水が豊富な地域では地下温度データから地表面温度履歴を復元することが困難である。Goto *et al.* (2005b)は、地下水流動が鉛直方向のみで速度が一定であれば地下温度データから地表面温度履歴を復元することができる可能性を示している。今後、地下水流動がある地域で地下温度データから地表面温度履歴を復元す

る手法を開発する研究も同時に進める必要があると思われる。

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.
- Bodri, L. and Cermak, V. (1997) : Climate changes of the last two millennia inferred from borehole temperatures: results from the Czech Republic - Part II, *Global Planet. Change*, 14, 163-173.
- 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.
- Goto, S., Kim, H.C., Uchida, Y. and Okubo, Y. (2005a) : 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. and Kinoshita, M. (2005b) : Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface, *J. Geophys. Res.*, 110, B01106, doi:10.1029/2004JB003419.
- Harris, R.N. and Chapman, D.S. (1997) : Borehole temperatures and a baseline for 20th-century global warming estimates, *Science*, 275, 1618-1621.
- 気象庁 (2005) : 異常気象レポート2005 近年における世界の異常気象と気候変動 ～その実態と見通し～ (VII), 374p.
- Majorowicz, J.A. and Safanda, J. (2001) : Composite surface temperature history from simultaneous inversion of borehole temperatures in western Canadian plains, *Global Planet. Change*, 29, 231-239.
- 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.
- Mareschal, J.C. and Vasseur, G. (1992) : Ground temperature history from two deep boreholes in central France, *Global Planet. Change*, 6, 185-192.
- Rajver, D., Safanda, J. and Shen, P.Y. (1998) : The climate record inverted from borehole temperatures in Slovenia, *Tectonophysics*, 291, 263-276.
- 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.
- Wang, K. (1992) : Estimation of ground surface temperatures from borehole temperature data, *J. Geophys. Res.*, 97, 2095-2106.

GOTO Shusaku, KIM Hyung Chan, UCHIDA Youhei and OKUBO Yasukuni (2006) : Reconstruction of ground surface temperature history from underground temperature data.

< 受付 : 2006年9月7日 >