

# 気温変化と地下の温度構造

内田 洋平<sup>1)</sup>・後藤 秀作<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地下の温度場は、地下深部からの熱伝導(地殻熱流量)や地下水の流動に伴う熱移流の影響だけではなく、地上からの熱伝導の影響も受けている。水文学の分野では、古くから、地下温度場への地下水流動に伴う熱移流の効果に着目して、広域の地下水流動系と地下温度構造に関する研究が行われてきた。国内における3次元の地下温度分布と地下水流動に関する研究には、谷口ほか(1989)の阿蘇西麓台地、Sakura(1993)の米沢盆地、内田ほか(1993)の山形盆地における同様な研究がある。また、内田(1998)は濃尾平野において、地下水の揚水が地下水流動系と地下温度分布に与える影響を現地観測と3次元地下水流動・熱輸送モデルによって示した。宮越・内田(2001)は、関東平野に分布する地盤沈下対策用観測井で水理水頭と地下水温を測定し、その分布から関東平野の地下水流動系を推定した。いずれの研究も、その基礎となっているのはStallman(1963)の熱輸送の式と、Domenico and Palciauskas(1973)の地下水流速と地下温度分布に関する研究である。

一方、地下の温度分布の中には、地表面での気候変化の歴史が記録されていることも知られている。表面温度の変化は地下に伝播し、測定しうる変化の伝播速度は地表での温度の攪乱の振幅と期間に依存している。例えば、地温の日変化の及ぶ深さは地表面下約20~80m、年変化のそれは5~16mである(榎根, 1980)。一方、数10万年にわたる更新世の氷期の効果は地表下数1,000mにも及んでおり、最後の2,000年の気候変化の効果は地表下500mにまで及んでいるとされている(Jessop, 1990)。また、近年の大きな気候変化である1880年から1940年の地表の温暖化現象によって、北アメリカ、ヨーロッパやオーストラリア

の多くの場所で地下50mから100mの間で地温の逆転現象が生じていることも報告されている(Cermak, 1971; Jessop, 1990)。

本稿では、地表の温度変化が地下温度場に与える影響を紹介し、地下温度データを用いた気候変動復元の可能性について述べる。

## 2. 地表の温度変化と地下の温度構造

### 2.1 地下温度の逆転現象

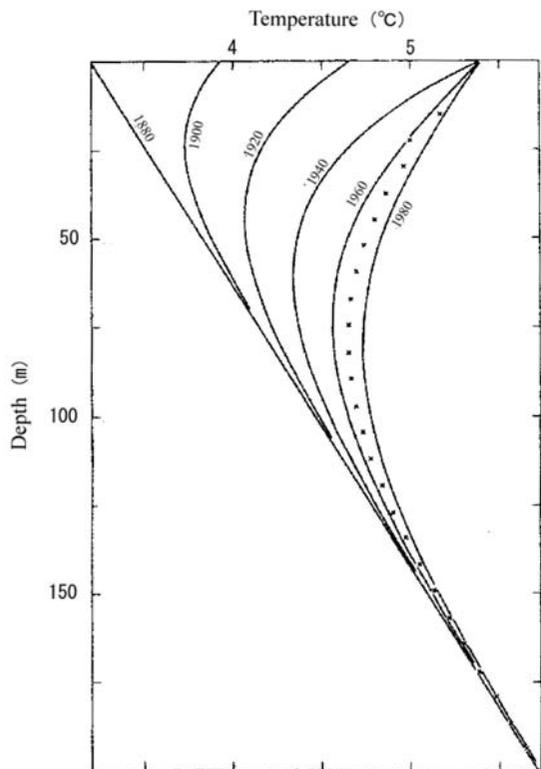
第1図は、カナダのカプスカシン(Kapusksing)付近における1970年の地下温度プロファイルと、1880年の3.2℃から1940年の5.4℃までの直線的な気温上昇があった場合について計算された地下温度プロファイルの変化を、20年間隔で示したものである。気温の上昇に伴って地下温度プロファイルの上部が湾曲し、地下温度の最小値を示す深度が深部へ移動していく。この図は、気温の温暖化が地下温度プロファイルの逆転現象の大きな要因となっていることを示している。

### 2.2 濃尾平野

内田・佐倉(1999)は、濃尾平野における地下水流動と地下温度構造の調査を進める中で、濃尾平野の北部で地下温度プロファイルの逆転現象を認めた。この地温逆転現象は、平野南部では観測されていない。第2図に濃尾平野における標高-100mの地下温度分布と地温逆転が確認された観測地点を示す。濃尾平野の広域的な地下水は、主に平野の北部で涵養され、平野中心部および伊勢湾方面へ流動していると考えられている。地下の温度分布はこのような広域流動系による熱移流の影響を受けて、平野北部の涵養域では14℃と低く、流出域である中心部から伊

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

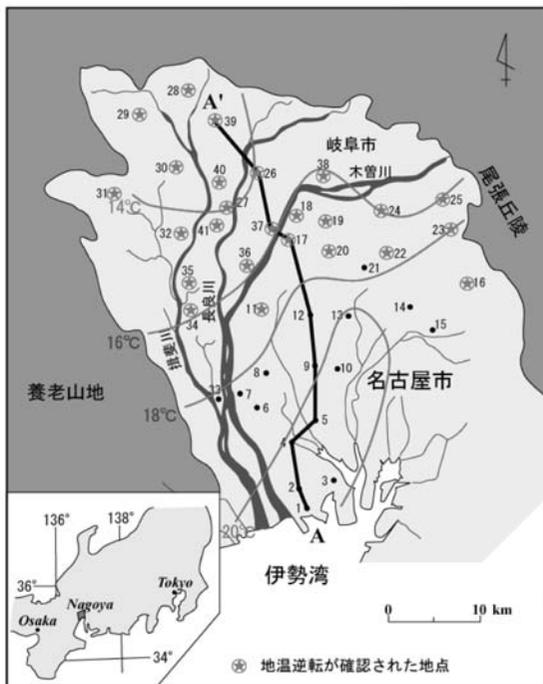
キーワード: 気温上昇, 地下温度構造, 地下水流動, 熱輸送, 地温逆転



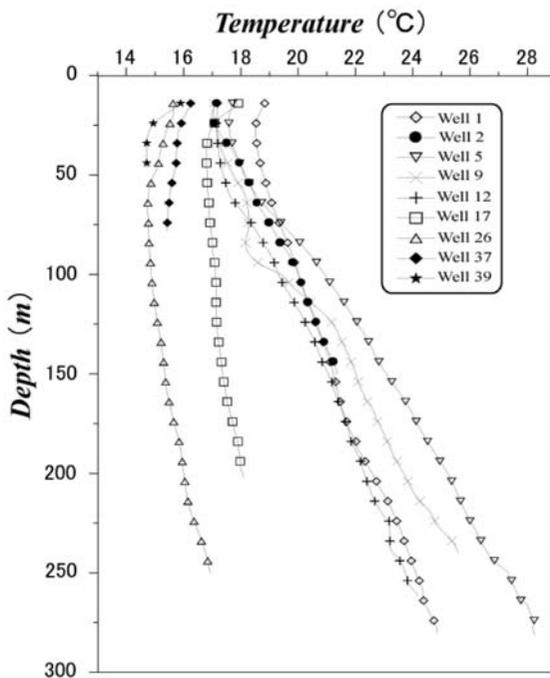
第1図 1880年から1970年まで直線的に地表面温度が上昇する気候モデルから計算した地下200mの温度プロファイル。×印はカナダのカプスカシンで得られた1970年における観測値 (Jessop, 1990)。

勢湾方面にかけて20℃以上と高くなっている (内田, 1998 ; 内田・佐倉, 1999)。

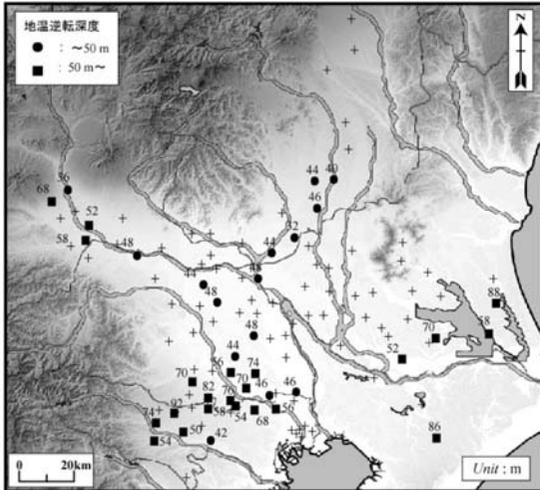
濃尾平野では1890年から1990年の100年間で年平均気温が約2℃上昇している。これらの気温上昇が地下の温度分布に影響を与え、地温逆転を引き起こしていると考えられている。第3図に濃尾平野のA-A'断面 (第2図) における温度プロファイルを示す。第3図から、観測井17から北部に位置する観測井で、深度50mから100mの間に地温逆転が生じていることがわかる。そして、濃尾平野における地温逆転現象は南部の地下温度プロファイルでは認められない。Uchida *et al.* (1999) は、地下水の流れによる熱移流と地表面温度上昇の両者を考慮した濃尾平野の非定常3次元数値シミュレーションを行った。それによると、地下水の涵養域では、地下水の下向きのフラックスによる熱移流効果によって地下の温度は低くなっており、そこへ地表面の温度上昇の影響が加わること



第2図 濃尾平野における標高-100mの地下温度分布と地温逆転が確認された観測地点 (内田・佐倉 (1999) に加筆修正)。



第3図 濃尾平野のA-A'断面 (第2図) における地下温度プロファイル。

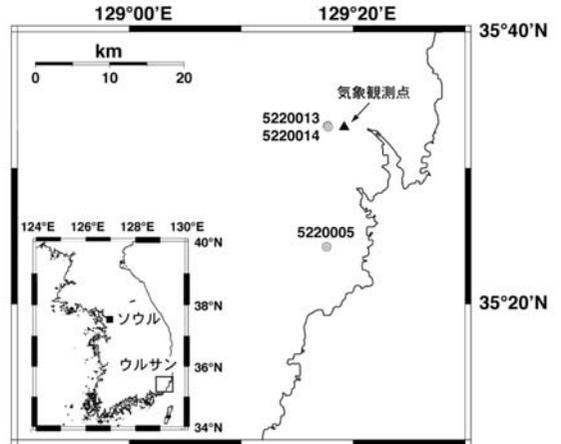


第4図 関東平野における地温逆転の分布とその深度 (宮越・内田, 2001).

によって、地下50mから130mの間に地温逆転が形成される。一方、地下水の流出域では、地下水の上向きのフラックスによる熱移流効果によって地下の温度は地表の温度よりも高くなっている。したがって、地表面の温度上昇の影響は地下へは及ばず、地温逆転は形成されない。

### 2.3 関東平野

宮越・内田 (2001) は、関東平野の地下温度分布を測定し、多くの観測地点で地温の逆転現象を指摘した。関東平野では1900年から2000年の100年間で、年平均気温が約2.0℃上昇している。この気温上昇に伴う地表面温度の上昇により、地温の逆転が形成されたと考えられる。地温逆転は、埼玉県丘陵部、茨城県常陸・常総台地部、群馬県利根川上流部、栃木県鬼怒川沿いおよび関東平野中央部で認められた (第4図)。地温逆転の深度については、地下水流出域と考えられる関東平野中央部および鬼怒川沿いの低地では深度38～46mと浅く、地下水涵養域と考えられる群馬県利根川上流部および茨城県台地部では深度44～80mで観測され、特に埼玉県丘陵部では深度56～140mと深い。このような地温逆転の分布形態には、平野内の地下水流動が大きな影響を与えていると思われる。宮越・内田 (2001) は、地下水と熱の流れに関する鉛直一次元の解析解を用いることにより、地温の逆転深度は、平野周辺部の地下水涵養域



第5図 韓国・ウルサン地域と解析に用いた地下温度データの測定地点。

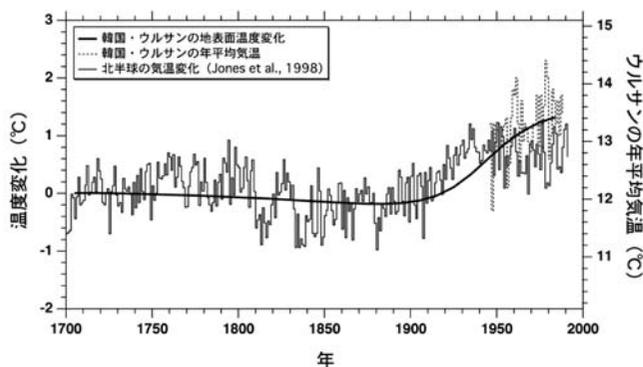
ではより深層に、逆に平野中心部の地下水流出域ではより浅層に認められることを明らかにした。

### 3. 地下温度データを用いた気候変動復元

過去から現在に至る気候変動を知ることは、地球環境の変化や人間活動が地球環境に与えた影響を理解することにつながる。それは、将来の気候変化を予測することにも結びつくと考えられる。

前章で説明したように、地下の温度分布には地表面温度の変化が記録されていることがある。このデータを上手く抽出し解析することで、地下の温度データから地表の温度変化を推定できる可能性がある。解析にあたり、地下の温度構造は地下水流動による熱移流の影響を強く受けていることが一番の問題点である。

Goto, et al. (2005) は、韓国南東部の都市・ウルサンにおける地下温度データを用いて、地表面温度変化の復元を試みた。ウルサン地域 (第5図) では、19地点のボーリング孔における地下温度プロファイルが存在する。その温度データを精査し、地下水の影響がないと考えら得る3カ所の地下温度プロファイルを選定した。また、地表面温度を復元する解析条件としては、地下の物性が一様であり、かつ熱伝導のみで地表面温度変動の影響が地下に伝播すると仮定した。その解析結果によると (第6図)、19世紀の後半に小



第6図 気候変動の復元解析結果。破線はウルサンの年平均気温、細線は北半球の気温変動履歴。

規模な寒冷期が現れた後、20世紀に入ってから地表面温度は上昇を開始し、1980年までに約1.5K地表面温度が上昇したとしている。

また、Goto, et al. (2005)はこの地表面温度変動の復元結果を他の気温の復元結果と比較した。第6図中の黒の実線が地表面温度変動の復元結果、破線はウルサンの年平均気温、細線は、Jones, et al. (1998)による年輪やアイスコアなど複数のproxy indicatorを基に復元した北半球の気温変動履歴である。それぞれの分解能が異なっているが、地表面温度変動の復元結果はproxy dataによる復元結果のトレンドをよく説明していると思われる。

#### 4. おわりに

本稿では、地下温度の逆転現象についてその要因について述べ、日本における観測例として、濃尾平野と関東平野を紹介した。地温の逆転は、全ての地域で形成されているとは限らず、その分布には偏りがある。その原因としては、広域地下水流動による熱移流の影響が挙げられる。地下の温度が地表面温度よりも高い場合、気温上昇の影響は地下へ伝播しない。反対に、地下の温度が地表面温度よりも低い場合には、気温上昇の影響が地下へ伝播して、地下温度プロファイルに記録される。このように地下の温度構造は、地下深部からの熱伝導や地下水流動に伴う熱移流の影響だけではなく、気温変化の影響も地表面からの熱伝導という形で受けており、地下の温度データは、様々な情報を含んでいると言えよう。

地下の温度データを用いた気候変動の復元は、世界各地で行われはじめている。しかし、そこで求められた気候変動復元は、熱伝導のみによる熱輸送を想定して解析されており、水の流動に伴う熱移流を評価したものは国内・国外を通してほとんどない。前述したように、地下の温度データには多くの情報が含まれているので、それらの情報を分離し、地表面温度変化の情報だけを抽出することが今後の大きな課題である。

#### 参考文献

Cermak, V. (1971) : Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millennium. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 10: 1-19.

Domenico, P. A. and Palciauskas, V. V. (1973) : Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84: 3803-3814.

Goto, S., Kim, H.C., Uchida, Y. and Okubo, Y. (2005) : Reconstruction of the ground surface temperature history from the borehole temperature data in the southeastern part of the Republic of Korea, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2, 312-319.

Jessop, A. M. (1990) : *Thermal Geophysics*. Elsevier, Amsterdam, p306.

Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P. and Tett, S.F.B. (1998) : High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures, *Holocene*, 8, 455-471.

榎根 勇 (1980) : 水文学, 大明堂, 272.

宮越昭暢・内田洋平 (2001) : 関東平野における地下温度分布と地下水流動系, *地質調査研究報告*, 52, 253-290.

Sakura, Y. (1993) : Groundwater flow estimated from temperatures in the Yonezawa basin, northeast Japan. *Int. Assoc. Hydrol. Publ.* 215, 161-170.

Stallman, R. W. (1963) : Computation of ground-water velocity from temperature data, *USGS Water Supply Paper*, 1544-H, 36-46.

谷口真人・島野安雄・榎根 勇 (1989) : 地下水温を用いた阿蘇西麓台地の地下水流動解析. *ハイドロロジー*, 19, 171-179.

内田洋平 (1998) : 濃尾平野における揚水の地下温度場と与える影響について. *日本水文科学会誌*, 28, 45-60.

内田洋平・佐倉保夫 (1999) : 濃尾平野における地下温度プロファイル. *地質調査所月報*, 地質調査所, 50, 635-659.

Uchida, Y., Sakura, Y. and Anderson, M. P. (1999) : Subsurface temperature field in the Nobi Plain, Central Jpn. In Sakura, Y., and Tang, C., eds, *Groundwater in Environmental Problems*, Chiba Univ., Japan, 43-46.

内田洋平・佐倉保夫・荒川高嗣 (1993) : 山形盆地の地下の温度分布から推定される地下水流動. *ハイドロロジー*, 23, 169-179.

UCHIDA Youhei and GOTO Shusaku (2006) : Surface temperature changes and subsurface thermal structure.

<受付: 2006年8月31日>