

地下温度の鉛直分布から 1000 年以上の気候の長期変動が読み取れるか？

北岡 豪一（岡山理大・理）

グローバル、及びローカルな気候の温暖化は、大気、陸水、海洋だけでなく地中まで及び、生態系への影響は深刻である。温暖化エネルギーは、地中では、大気・海洋にくらべ拡散が遅く、表層の限られた範囲に蓄積するので、資源として有効利用が考えられている。

温暖化を表す観測例として、岡山市内の井戸（理大井戸）の地温鉛直分布をあげる（Fig.1）。これはほぼ1ヶ月おきの観測であり、100 m の深度まで着実に上昇中である。

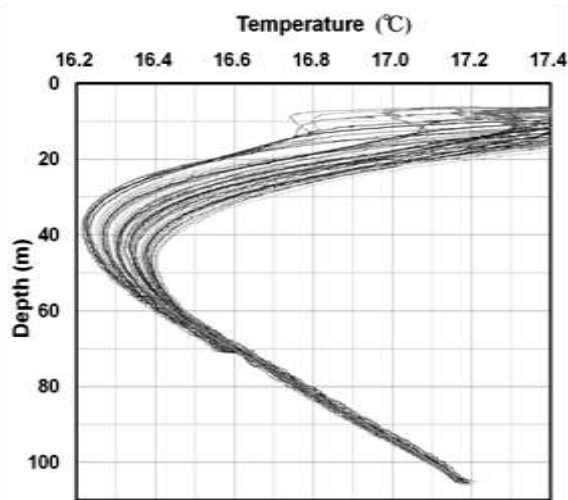


Fig. 1 岡山における地温の鉛直分布の変化
(2007年7月から5年間の推移。ほぼ1ヶ月おき)

広域でみると、Fig. 2 に大阪平野における例を示すように、地温には地域性が大きいことも特徴である。

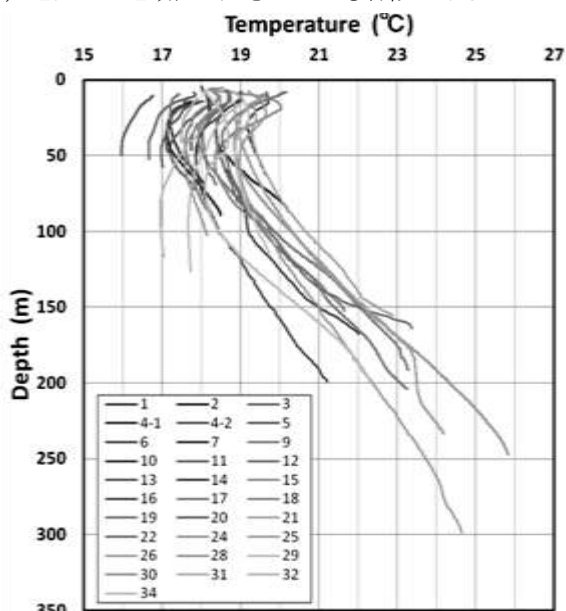


Fig. 2 大阪平野における地温の鉛直分布（有本ほか，2012）

地層の熱特性が一様で、水の流れのない場合は、地中の温度は、地表における熱的条件（気温など）と深部からの

熱フラックス（地熱）によってきまる。地表温度は日変動、季節変動、時間スケールの長い温暖化などで変化しており、時間スケールが長いほど深部まで影響が及ぶ。年変動の影響範囲（約15 m 深）よりも深部には、経年的な温暖化の履歴が記録保存されている。

近年、年輪の同位体測定から、過去2000年の長期の変動が明らかにされた。変動のパターン（周期と位相）は地球上の平均とよく符合している。現在はその上昇期にあたるので、現在の温暖化の現象には、人間活動による影響のほかに自然の現象が含まれていると考えられるようになった。

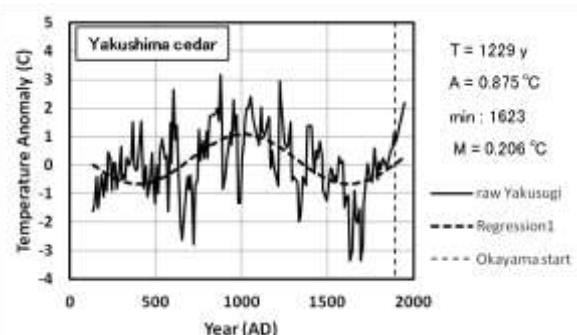


Fig. 3 屋久杉から推定された気温変動（Kitagawa,1995）

地中温度の地域性には、地域の気候のほかに、地域の人間活動の歴史性（地表条件）、および地下水の流れによる影響が考えられる。ここでは、地下水の流れが地下温度の分布に与える影響が大きいと考え、検討する。

水平に十分広い平野では、水平流が存在しても、流れが強くなければ鉛直分布は影響を受けない。地温の地域性は、地熱地帯の形成と同様、地下水の流れの鉛直成分によって生まれると考えられる。しかし、一様な流れでは定常状態にはなれない。それは、上昇流の場合、地表温度が一定でも浅層の温度は際限なく上昇し、下降流の場合、深部まで際限なく地表温度に近づくからである。したがって、地温の地域性は、水の流れの非一様性によって生じているものと考えられる。たとえば、水平な成層地層中に水が上下に動ける縦割りの構造があつて、水の流れによって深部から上昇してきた熱が周囲の地層中に拡散するような条件では、地温の定常状態が形成される。ここでは、そういう流れのある条件で地下の温暖化について検討する。

縦割りの構造に沿って上昇流が生じるのは、もともとは広域地下水流動系における水位分布によるものであろうが、いったん、上昇を始めると、縦割り部と地層の間で温度の違いが生じ、温度の違いは密度の違いであるから、縦割り部の水位は地層よりも低くなり、地層の水は縦割り部に集まる。そう考えると、縦割り部を上昇する流量は浅くなるほど増すことになる。

流量を深さの関数とすれば、移流項が非線形になって解析的に取り扱えなくなるので、ここでは、縦割り部の流量が深さに対して一定とみなされる範囲を対象にすることにする。また、縦割り部と地層の間の熱移動が温度差に比例的であるとする熱伝達で近似することによって、この問題を1次元の熱問題として解析的に取り扱うことが可能になる。

そこで、次のような条件を考える。(1) ある限られた範囲で一定流量の上昇(下降)流、(2) 深部から一定の熱フラックス(地熱)、(3) 水で運ばれた熱量は周囲の地層に熱伝達、そして、(4) 地表温度の時間変化: 指数関数的(人工的な温暖化)および周期的関数的(自然の長期変動)。ただし、地表温度の変化は、縦割り部と水の流れない地層の両方で地中に伝わる。

具体的には、深さ方向に座標 z をとり、

1. 支配方程式:

$$\text{地層: } \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial z^2}$$

$$\text{縦割り部: } \frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \nu(\theta - \theta_s(x, t))$$

とする。 ν は縦割り部と地層の間の熱伝達を表す係数。

2. 境界条件

$$z=0 \text{ で, } \theta = \theta_s = \phi(t)$$

$$z \rightarrow \infty \text{ で, } \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow \beta, \quad \frac{\partial \theta_s}{\partial z} \rightarrow \beta$$

β はバックグラウンドとしての地温勾配。

3. 地表温度 $\phi(t)$ は、

$$\phi(t) = \theta_m + p \cdot \exp(\lambda t) + A \cdot \sin(\omega t + \varepsilon)$$

とする。第2項は人間活動による温暖化影響 (λ は温度上昇率)、第3項は、千年規模の周期的変動 (A はその振幅)、第1項は、数千年間の平均地表温度である。

4. 解法

支配方程式は線形であるから、重ね合わせの原理が適用できる (Duhamel の定理より) ので、地表温度を、(1) θ_m 一定、(2) $p \cdot \exp(\lambda t)$ 、(3) $A \cdot \sin(\omega t + \varepsilon)$ としたときの解をそれぞれ求め、それらを重ね合わせればよい。パラメータは、 κ 、 ν 、 U 、 θ_m 、 β 、 p 、 λ 、 A 、 ω 、 ε の10個である。屋久杉の年輪から得られる ω と ε は世界の平均的状态と符合するので、それに基づいて固定する。そうすると、パラメータは8個になる。

岡山市内の100 m 深井戸で得た滑らかな地温の鉛直分布 (Fig.1) を用いて解析する。ところが、最小二乗法で最適条件を求めようとしても、パラメータの数が多いため、最適解の一意性を得ることは困難である。結果に強く影響を与える因子は、熱伝達係数 ν であるから、 ν の値を少し

ずつ変えて与えると、ある程度安定した最適解を得ることができる (平均二乗誤差 0.0005 °C)。岡山井戸で得られた結果は、過去数千年にわたる地表温度の平均値 (14.9 °C)、長周期変化の振幅 (0.44 °C)、および人間活動による温暖化のパラメータ (上昇率 5.6%) である。

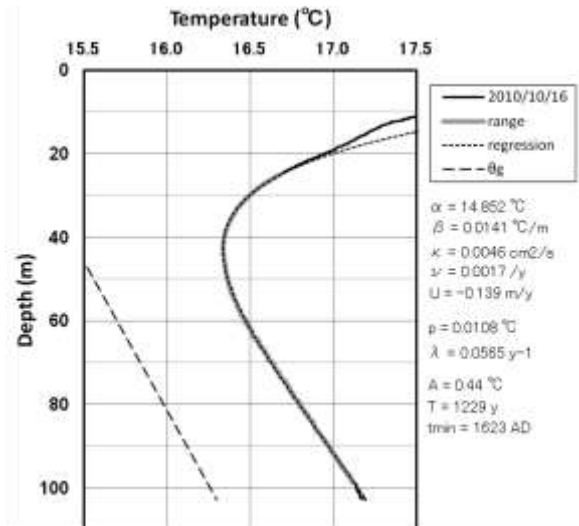


Fig. 4 フィッティング

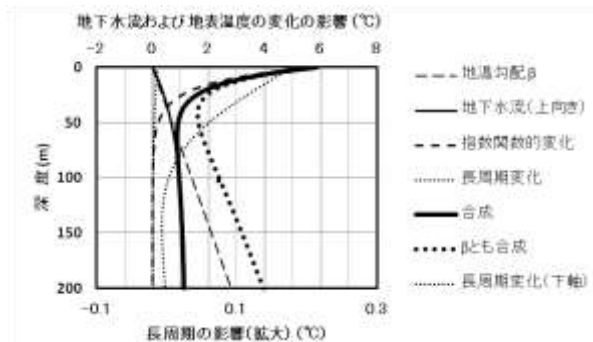


Fig. 5 地温形成の成分 (長期成分の寄与は 0.01~0.14°C)

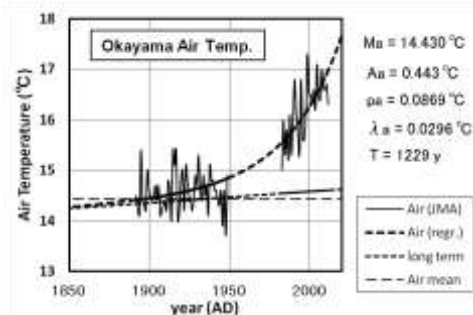


Fig. 6 岡山の気温の回帰 (長期成分の寄与は小さい)

大阪では、滑らかな地温分布が少ないので、自然の長期変化(周期, 位相, 振幅)は岡山における結果と同じにして扱うことにすると、大阪平野では上昇流のある場所と下降流の起こっている場所を推定することができる。地表の温暖化の地温への影響は、その上に重なっているとみて差し支えない。大阪平野で全般的に上昇流があり、とくに上町断層周辺で顕著である。また、山地部と山麓部で下降流が起こっている。