

地中温度に記録保存されている過去の気温変動

北岡 豪一

岡山理科大学フロンティア理工学研究所

2019年12月15日受理

岡山市内の深さ105 mの井戸で2007年7月から2012年6月までの5年間、坑井内温度の観測を行った。熱伝導モデルを使って過去130年の気温データから温度プロファイルを復元したところ、地層の熱拡散率を $5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、バックグラウンド地温勾配を $0.180 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ 、地表面と空気の温度差を $0.78 \text{ }^\circ\text{C}$ としたとき、実測プロファイルと理論プロファイルがほぼ一致した。地表での近年の温暖化の熱が地中に侵入し、地熱によるバックグラウンド場に温度異常として記録されている。

キーワード：坑井内温度、地下温度プロファイル、気温履歴、地中の熱伝導

1. はじめに

2002年7月に岡山市内（清心町）の深さ42 mの井戸で井戸内の水温を観測したところ、深さとともに温度の下がる奇妙な現象に遭遇した。2007年7月に、岡山理科大学構内の深さ105 mの井戸で孔内の温度を観測したところ、浅部では前観測と同様に深さとともに急に低くなるが、深さ40 m付近で極小となり、深部では深さとともに直線的に上昇するプロファイルが得られた。大阪平野でも類似のプロファイルが報告されており¹⁾、このような現象はいろいろな地域で起こっていることが認識された。その後、筆者らは大阪平野で地温調査を行う機会があり、多くの井戸（最深300 m）で類似のパターンの温度の鉛直分布が観測された²⁾。

地層は熱伝導率が低いので、地表の温度が上昇すると、その熱が地中を拡散しながらゆっくり下方に伝播する。観測された地温の特徴的な分布には温暖化に伴う地表温度の変化が反映されているのかもしれない。実際、この理大井戸を利用して、2007年7月から2012年6月までの約5年間、1月ごとに地温の鉛直分布の観測を行ったところ、期待したように、月ごとに地層が温まりつつある状況が確認された。

この井戸内水温の鉛直分布は滑らかであり、地下水の流れによる影響が少なく、熱伝導支配の現象が現れているように見えるので、解析を試みることにした。

手始めに、人類のエネルギー消費量が指数関数的に上昇してきているので³⁾、岡山における気温も、第一近似として、指数関数的に上昇してきたと仮定して計算したところ、実測水温の鉛直分布とみごとなフィッ

ティングが得られ、しかも、これから推定される過去の気温変化は岡山気象台の気温資料⁴⁾とそれほど矛盾しないものであった（Appendix）。このことは、過去の気温が地下温度に記録保存されている可能性を示すものである。もし、井戸内水温の鉛直分布から過去の地表温度の変遷が推定できれば、気象観測の記録以前の時代や、気象資料のない地域における環境変化を知る手掛かりを与えることになる。

本稿は、気温の時系列データを用いた熱伝導解析を行い、実際の水温の鉛直分布が過去の気温変動に対応しているのかどうか確かめようとしたものである。

2. 観測方法

対象の観測井戸は、2007年3月に掘り上げられたもので（図1、海拔12 m）、深さ105 m、内径12.5 cmの塩ビ管である⁵⁾。井戸内の地下水面は地表から約6.2 mにあるが、ポンプで揚水しようとしても水がまったく得られなかった。柱状図によると、固結した山ジャリ層が深さ70 m以深の花崗岩を覆っており、全体的に水の通りの悪い地層でできている。

井戸内の水温-深度の測定にはデータロガー内臓の温度圧力計（アレック電子社製COMPACT TD計）を用いた。圧力計の精度は水深にして1 cm（分解能1.5 mm）、応答時間は1 sec以内である。サーミスター温度計の精度は $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ （分解能は $1/1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ）で、応答時間は約10 secである。サーミスターの応答がやや遅いので、センサーをゆっくり降下させながら記録をとる必要がある。



図1 観測井戸の位置（岡山理科大学構内）
カシミール3Dおよび地理院地図を使用

具体的には、井戸管の直上約50 cmの高さに滑車を固定し、先端にTD計をつけたステンレスワイヤーを回転ハンドル付きの巻上げ機で一定速度で降下させた。実際は、1 sec間隔でロガーにデータを記録させながら、センサーを約2 cm/secの速さで約1時間半をかけて孔底まで降下させた。この降下速度と応答時間では、圧力計に記録される深さよりも20 cmほど浅い位置の温度が記録されることになる。深さに対する温度勾配からするとそのずれは0.006~0.01 °C程度である。また回転ハンドルによる手動操作ではセンサーを一定速度で降下させることがむずかしく、温度プロファイルに振幅0.01 °C前後の脈が生じた。センサーの降下速度と手動操作に伴うデータの観測誤差は±0.01 °Cの程度であるが、それによる地温プロファイルの解析への影響は無視できるものとする。

なお、井戸内水温が周囲の地層の温度を表しているかという点については、半径 a の円管の壁の温度が急変したとき、時間 t 後の円筒中心の温度は、水の熱拡散率を κ として、 $\kappa t/a^2$ の値が1になると管壁の温度とほぼ等しくなる⁶⁾。すなわち、半径6 cmの円管では、管壁の温度が変化しても管中心の水温は約7時間で壁の温度になる。年周期程度以上のゆるやかに変化する変動を対象にする場合は、井戸管内の水温は周りの地層の温度を表しているとみて差し支えない。

3. 観測結果

3-1 温度プロファイル

図2は、毎月観測された5年間のデータから約1年おきに抽出してプロットしたものである。

図中の破線は2010年7月10日の深部の直線部分を外挿したものであるが、浅部ほどこの直線からのずれが大きく、地温の上昇速度が速くなっている。もし、地表温度が一定であれば、地下深部から地表に向かう地熱の流れが存在するので、地下温度は深さに対して一定の勾配をもった直線的な分布になるが、観測された

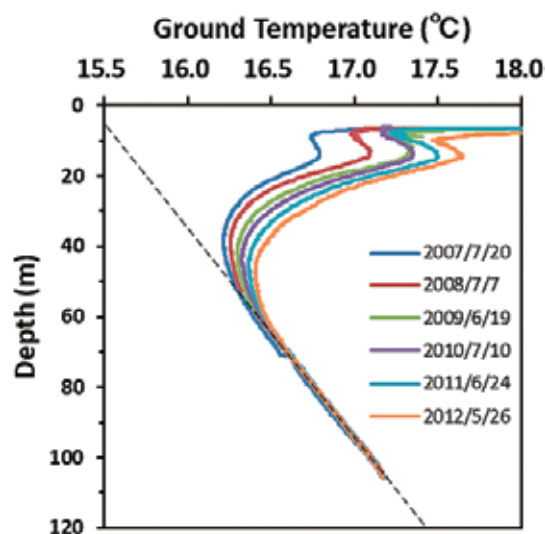


図2 地温プロファイルの変遷
(北岡⁷⁾を改変)

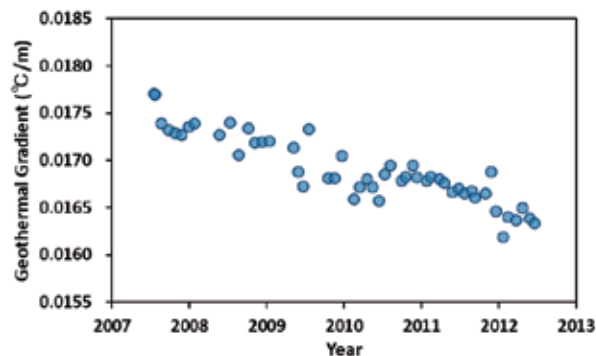


図3 深度80 m~100 m区間における地温勾配の変化

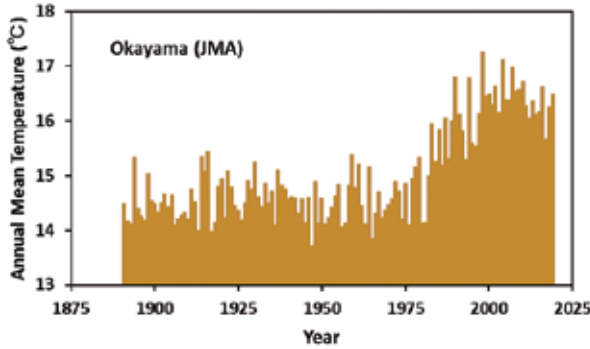
地温は、深さ40 m付近までの浅部で熱が地表から深部に向かって流れている状況を示しており、近年地表温度が上昇したことが読み取られる。

図3は、深さ80 mから100 mの区間の温度分布を直線とみなして、その勾配を観測ごとにプロットしたものである。地温勾配が時期とともに低下しており、地表からの熱の影響が100 m深でも進展中であることを示している。したがって、図2の破線は、定常状態としてのバックグラウンド地温を意味していない。

3-2 岡山における気温の変動

気温の季節変動などの周期的な変動はその振幅を減衰させながら地中を伝搬する。周期の短い成分ほど早く減衰し、年変動以下の短い成分は約15 mで減衰してしまう。温暖化など、年周期よりも長い現象だけがそれ以深で現れる。

気温として、岡山では、1891年の観測開始以来蓄積されている岡山気象台の資料⁴⁾が利用できる。図4は毎日の平均気温から年平均値を求めて図示したもの


 図4 岡山における年平均気温の変化⁴⁾

である。岡山気象台は何度か移転しているが、それによる地温解析への影響は小さいとみなすことにする。

図4をみると、1980年ごろから気温の上昇が顕著にみられるので、その影響が地温のプロファイルに現れていると思われる。なお、2000年台に入ってからいくらか低下の萌しがみられる。

4. 地温の解析

4.1 解析の方法

簡単のため、地層中の熱は上下方向に熱伝導で伝わるものとし、地下水の流れによる影響は無視できるものとする。地表から深さ z 、時間 t における地層中の温度を $\theta(z, t)$ で表し、それが一次元熱伝導方程式

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

を満たすものとする。ここに、 κ は地層の熱拡散率で、地層の密度を ρ 、比熱を c 、熱伝導率を K としたとき、 $\kappa = K/\rho c$ である。

はじめ、地層全体の温度がゼロのとき、地表温度がある時点からある一定の値を取り、それが1万年続けば、地下の温度は100 m深まで地表温度とほぼ同じで一樣になるので、はじめ、地層全体の温度が一定の A である状態を想定することができる。その状態を初期状態とする。

その状態で、地表温度が $t=0$ から $t=\tau$ までの間一定の B となり、 $t>\tau$ で A に戻るというパルス状の変化があると、深さ z における温度は、 $0 < t < \tau$ で、

$$\theta(z, t) = A + (B - A) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right), \quad (2)$$

$t > \tau$ では、

$$\theta(z, t) = A + (B - A) \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t-\tau)}}\right) \right] \quad (3)$$

で表される⁶⁾。ここに、 erfc は誤差関数である。

時間軸を等間隔 τ で区切り、地面の温度は区間内で一定であるとする。区間に番号1, 2, ...をつけ、番

号 i における地表温度を $B(i)$ で表すと、番号 n の時間間隔の midpoint における深さ z の温度 $\theta(z, n)$ は、(2)式と(3)式を重ね合わせて、

$$\theta(z, n) = A + \sum_{j=1}^n \left[(B(j) - A) \left\{ \operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{\kappa(n-i+1/2)\tau}} - \operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{\kappa(n-i-1/2)\tau}} \right\} + (B(n) - A) \operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{\kappa\tau/2}} \right] \quad (4)$$

で表される。

ところで、一般に、地表温度は気温と異なる。それは、地下深部からの地熱フラックスが存在することと、また、地表で短波と長波の放射、顕熱と潜熱の輸送があるからである。さらに、植生や人工物など地表面の状態によって影響を受ける。地表面の温度を境界条件として設定することはむずかしいので、ここでは、とりあえず、地表温度は年平均気温よりも δ だけ高いものとし、 δ は一定であると仮定する。

初期状態として、上記のように、地表温度が長期にわたり一定の状態を仮想する。式(4)は、始め、地層温度が深さに対して一定の A である状態が仮定されているが、深さ z に対して直線的に上昇している場合は重ね合わせることが可能である⁶⁾。

深部から一定の熱フラックスが存在する定常状態における地温 θ を、地温勾配を α 、地表温度を β として、

$$\theta = \alpha z + \beta \quad (5)$$

で表すことにする。定常的な気温を γ とおけば、地表温度は $\beta = \gamma + \delta$ である。

このように仮定すると、(4)式の右辺第1項の A は、

$$A = \alpha z + \gamma + \delta \quad (6)$$

となる。第2項以降では、区間番号 i における気温を $C(i)$ で表すと、

$$B(i) - A = C(i) - \gamma \quad (7)$$

とできる。

実際の計算では、初期状態としての定常気温 γ は、気象観測の始まった1891年から1900年までの10年間の年平均気温の平均(14.51℃)をとることにする。(7)式の $C(i)$ には岡山の年平均気温(図4)を用いる。

まず、 κ にある値を与えて、観測データのある時点における地温分布を(4)、(6)、(7)式を用いて計算する。それを試行錯誤で、 α と δ を調整しながら実測地温に近づけるという方法をとることにする。今回は、最小二乗法を適用していないので、 κ 、 α 、 β 、 γ 、 δ の値は最確値ではなく、いくらか任意性が含まれる。

4.2 計算の結果

前記のように、過去の気温変化を指数関数で近似したとき、最小二乗法によってフィッティングのよい結果が得られたので（Appendix参照）、まず、その方法で推定された熱拡散率 κ の値（ $5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ）を用いて計算してみる。

図5は、2007年から2012年の観測時期における計算プロファイルである。これは、実測値の孔底温度と40 m深付近の極小温度と照らし合わせながら α と δ の値を調整して得たものである。

毎年の年平均気温を用いることによって、図のように、極小をもつ温度プロファイルが計算され、極小となる深さが図2の実状に近い結果が得られる。得られた $0.018 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ の地温勾配は岡山地域で開発された深層温泉における掘削柱状図の地温分布と矛盾しないものである。ただし、地表温度と年平均気温との差 δ が 0.78

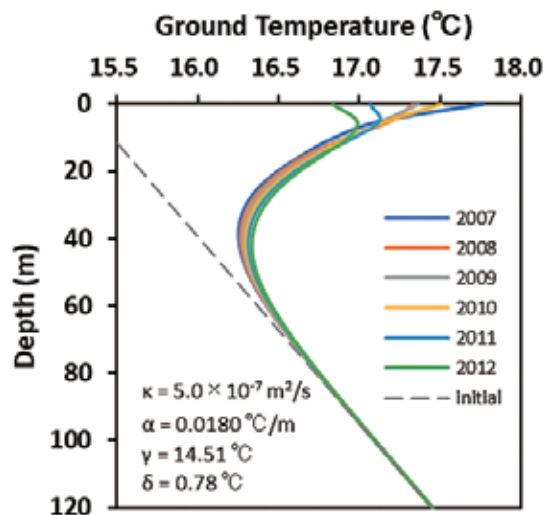


図5 $\kappa = 5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合

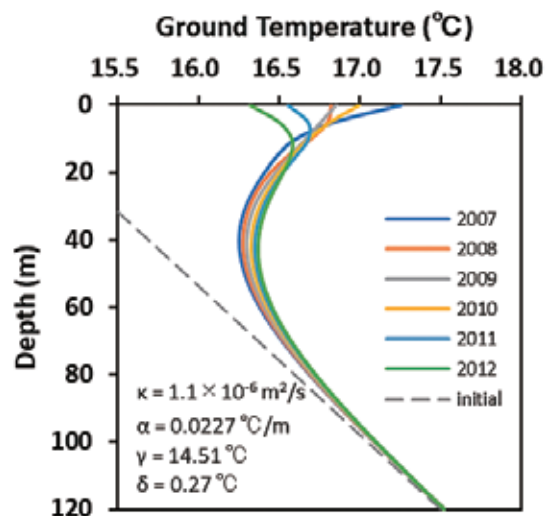


図6 $\kappa = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合

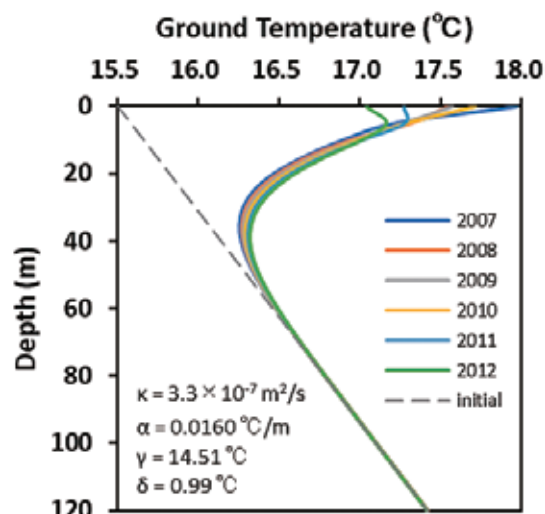


図7 $\kappa = 3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合

$^\circ\text{C}$ となる理由については不明である。

図6と図7は、熱拡散率 κ に、それぞれ、花崗岩の値（ $1.10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ⁶⁾）と砂質の湿潤土壌の値（ $3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ⁶⁾）をあてた場合の結果である。

熱拡散率が約2倍の花崗岩ではプロファイルのパターンが広がり、実状からはなれてくる。熱拡散率が約2/3倍の砂質土壌では温度が極小になる深さが実状よりも浅くなる。

このことから、熱拡散率 κ として、 $5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 前後の値が適当ではないかと考えられる。

4.3 地中温度の変化

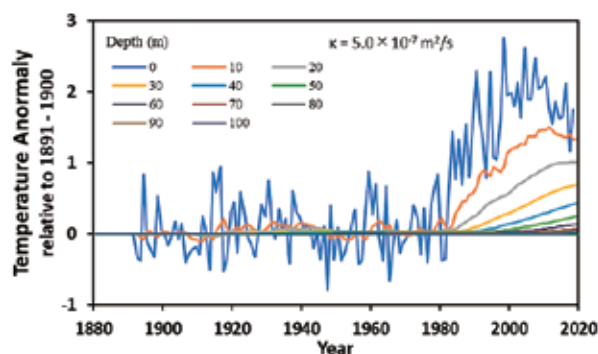


図8 定常状態からの偏差

図8は、熱拡散率が図5の $\kappa = 5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合における地中温度の初期状態からのずれの変化を深さごとに示したものである。深さ0 mの折れ線は年平均気温の偏差を表す。この図から見られるように、地中温度は1980年を過ぎたところから上昇している。

図9は、図5と同じ条件で、1900年以降、10年おきに地中温度の分布を示したものである。1980年ころま

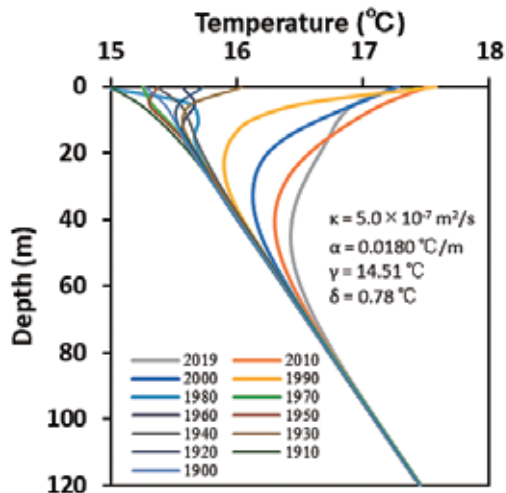


図9 1900年以降の各時期における地温分布

では、初期状態からの定常的な地温分布が維持されていたが、それ以降の時期で地層が地表から温められ、深部に伝搬している状況が示されている。このような図をつくることによって、地中に蓄積されつつある温暖化のエネルギー量を見積もることができよう。

5. 課題

5-1 地下水の流れの影響

熱伝導理論だけで、観測された地温のプロファイルの形状を、定性的ではあるが、ある程度までは説明できたように思われる。しかし、計算結果の図5と観測結果の図2を比べると、20 m前後以浅は気温の年変動の影響がみられるのでその部分を除くと、浅層部では、実測地温の方が年あたりの上昇速度が大きくなっており、再現性は必ずしもよいとは言えない。

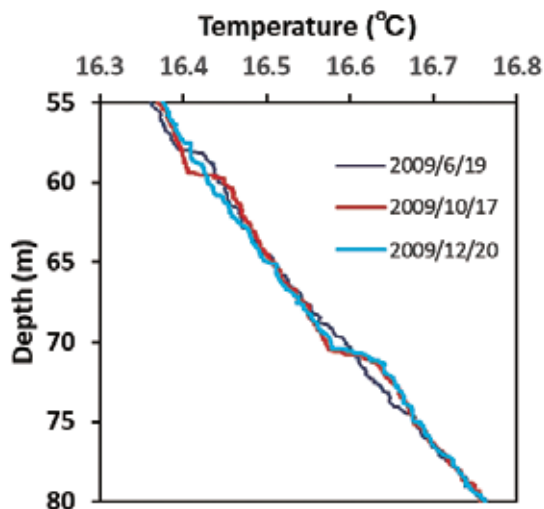


図10 坑井内水温の階段構造の例

図10は2009年における地温分布の一部を拡大して示したものである。この年は、6月の観測ではステップ構造は見られなかったが、7月21日、8月9日と8月10にそれぞれ日降水量が60.5 mm、76.5 mmと50.5 mmの強い降雨があり、10月の観測で60 m付近と70 m付近に2段のステップ構造が現れ、12月には上側の1段が消え、翌年の2月の観測では完全に消えた。ある程度まとまった降雨があるとステップ構造が現れ、数か月経過すると消えている。このような現象は5年間で3回起こっている。これらは、比較的深部で地下水の水平流が地温に影響を与えたことを示していると考えられる。

一方、雨水は地表からゆっくり下方に浸透しているはずであるから、それが地温に影響を与えている可能性がある。その証拠を実測データの中から見出すことはできないが、浸透流を考慮した解析を行うことにより浅部の実際の地温分布にさらに近づけることができるかもしれない。

5-2 地温プロファイルから長期変動がみられないか

以上は、気象庁による観測期間内での議論である。ただし、観測以前の気温は、観測初期の年平均気温が長く続いていたと仮定した。ところが、天然には観測期間の長さよりも周期の長い現象が存在する。例えば、Kitagawa and Matsumoto (1995)⁸⁾は屋久杉の年輪の炭素同位体を分析して2,000年間にわたる気温変動を追跡している。そのデータを調和解析すると、図11に示すように周期1,230年、振幅0.9 °Cの周期的な変動が浮かび上がる。このような周期性はMoberg et al. (2005)⁹⁾にも見られ、調和解析すると周期がよく一致している。

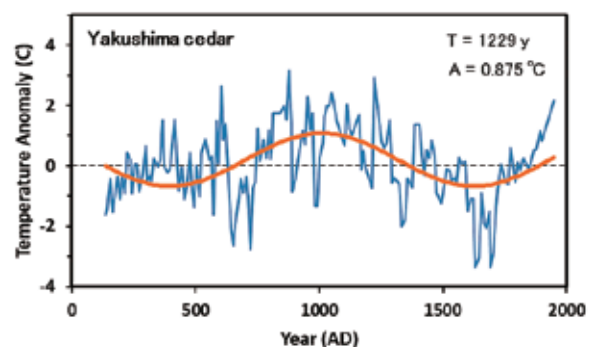


図11 屋久杉の年輪から推定された気温変化⁸⁾

図12は、熱拡散率が $5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、地表で起こるいろいろな周期の変動が地中で減衰する特性を示したものである。岡山地域においても、1,200年周期の変動があると推定され、もし、その振幅が1 °Cの程度であれば、図12から今回の観測の精度で十分に検出

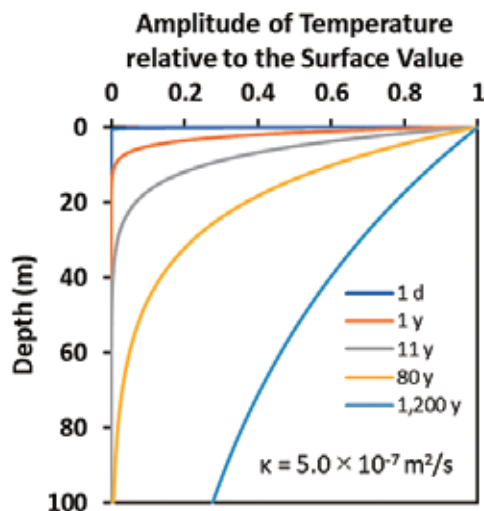


図12 周期的変動の深さに対する減衰

できるはずである。地温を解析するための方法論の精度が高められれば、このような長周期の変動も明らかにされるものと思われる。

6. おわりに

地中温度の鉛直分布の中に、温暖化に伴う地表温度の変動履歴が記録保存されていることが、ある程度は確かめられたように思われる。今回は、最小二乗法を適用していないので、結果は最確値ではなく、いくらかの任意性が含まれている。最適な κ , α , δ などの値が推定できるよう改善が望まれる。また、逆解法の手法が取り入れられれば、地温の鉛直分布の観測データから気温の記録が開始される以前の時代にまで環境の変動が解析されうるものと思われる。深さ100 m程度の地温の鉛直分布には過去数100年間にわたる環境変動に関する情報が秘められているといえる。

Appendix 気温が時間とともに指数関数的に上昇する場合の地温プロファイル

気温が一定の上昇率で上昇する場合、すなわち境界温度が時間に対して指数関数的に上昇する場合は、Carslaw and Jaeger (1959)⁶⁾に解が与えられている。パラメーターは熱拡散率と境界温度の上昇率である。これを利用すると、実測地温分布から長期にわたる気温変化を最小二乗法によって推定することができる。

はじめ、地下温度が $\theta_g = \alpha z + \beta$ で表される定常状態にあるとし、地表温度が $t > 0$ で

$$B(t) = \beta + p e^{\lambda t} \quad (A1)$$

のように指数関数的に上昇する場合を考える。 p は $t=0$ における気温の定常状態からのシフト量、 λ は気温の上昇率である。

この解は、

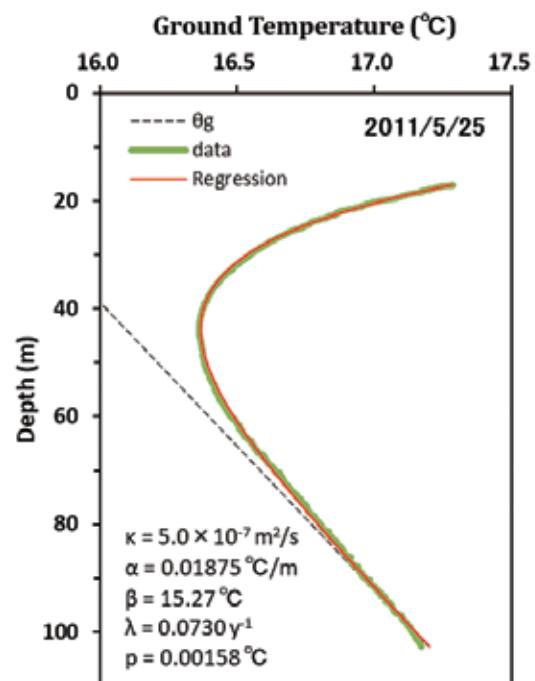
$$\theta(z, t) = \beta + \alpha z + \frac{p}{2} e^{\lambda t} \left\{ e^{-z\sqrt{\lambda/\kappa}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} - \sqrt{\lambda t}\right) + e^{z\sqrt{\lambda/\kappa}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{\lambda t}\right) \right\} \quad (A2)$$

で与えられる⁶⁾。

パラメーターは、初期温度を与える α と β 、地層の熱拡散率 κ 、気温の初期シフト量 p 、および気温の上昇率 λ の計5個である。 $t=0$ としてAD 1900をとることにする。

2011年5月25日に観測された温度データを用いて解析した結果の例を図A1に示す。薄緑の線が実測値、赤の線が回帰線である。きわめてよいフィッティングが得られる。

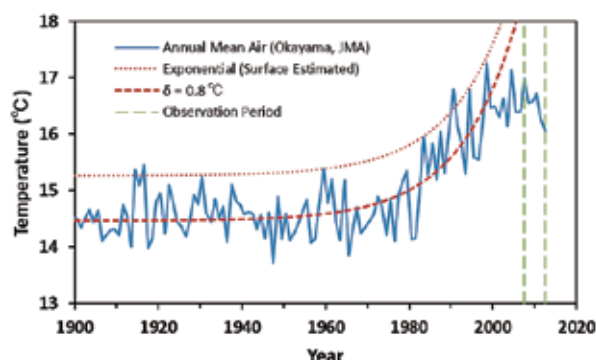
これから推定される熱拡散率 κ の値は、 $5.01 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、地表温度の偏差の初期値 p と上昇率 λ の値は、それぞれ、 $0.00158 \text{ }^\circ\text{C}$ (1900年値)と $7.3 \text{ } \%/y$ である。



図A1 指数関数型の気温変化におけるフィッティング

定常地表温度 β の値として $15.27 \text{ }^\circ\text{C}$ が得られたが、これは初期の年平均気温 γ の値よりも約 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 高い。そこで、推定された指数関数型の地表温度を $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ だけ下げた温度が気温に対応されたとすれば、図A2に破線で示したように、実線の気象庁の年平均気温 (図4)の変動をある程度近似しているようにみえる。

なお、このフィッティングのよさから、1,200年周



図A2 推定された気温の指数関数型変化と年平均気温

期の成分を取り出そうと試みたが、最小二乗法の収束がうまくゆかず、成功までには至っていない。

過去の全体の気温変動を指数関数のようなパラメータの少ないひとつの関数で近似することには問題が残るが、フィッティングには便利であり、大筋を把握するには有効であると思われる。

謝辞

本稿は、岡山理科大学理学部基礎理学科の歴代のゼミ生が観測して得た汗水の結晶が基になっている。巣立っていった学生に感謝したい。

参考文献

- 1) Taniguchi, M. and T. Uemura: Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 152(4), 305-313, 2005.
- 2) 北岡豪一・有本弘孝・吉岡竜馬：温暖化に伴う大阪平野の地温モニタリング，地下水地盤環境に関するシンポジウム2010論文集，69-80，2010.
- 3) 資源エネルギー庁：エネルギー白書，<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>. (2020年 1 月閲覧)
- 4) 気象庁：過去の気象データダウンロード，<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2020年 1 月閲覧).
- 5) 北岡豪一・西村敬一・山下栄次：岡山の地下水位とその地球潮汐に異変—熊本地震の影響か？—，岡山理科大学技術科学研究年報，第35号，37-44，2017.
- 6) Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger: "Conduction of Heat in Solids", Second ed., Oxford at the Clarendon Press, 1959.
- 7) 北岡豪一：地球温暖化の影響，小野寺真一・齋藤光代・北岡豪一編著「瀬戸内海流域の水環境—里水—」，吉備人出版，224-228，2018.
- 8) Kitagawa, H. and E. Matsumoto: Climatic implications of $\delta^{13}\text{C}$ variations in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) during the last two millenia. *Geophys. Res. Lett.*, 22(16), 2155-2158, 1995.
- 9) Moberg, A., D. M. Sonechkin, K. Holmgren, N. M. Datsenko and W. Karlén: Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data, *Nature*, 433, 613-617, 2005.

Air temperature history recorded to the borehole temperature in Okayama, Japan

Koichi KITAOKA

*Research Institute of Frontier Science and Technology, Okayama University of Science
1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

Temperature logs in a borehole of 105 m in depth, in Okayama, have been carried out once a month for five years from July 2007 to June 2012. The temperature-depth profiles are reconstructed from the air temperature data for the last 130 years by the heat conduction model in the homogeneous material. The theoretical profile is analogous to the observed profiles, when the thermal diffusivity of material is $5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, the background geothermal gradient is $0.018 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$, and the temperature difference between the ground surface and the air is $0.78 \text{ }^\circ\text{C}$. Thus, the recent warming heat on the ground surface have penetrated the subsurface and have been recorded as temperature anomaly to the background thermal field governed by the heat flow from the interior of the Earth.

Keywords: borehole temperature, temperature-depth profile, air temperature history, underground heat conduction