

地中の温度に記録されている岡山の温暖化履歴

岡山理科大学 北岡豪一

グローバル、及びローカルな気候温暖化は、陸水、海洋全般、さらに地中まで及び、生態系への影響が深刻なものとして懸念されている。地下に蓄積されつつある温暖化エネルギーは、すでに莫大な量に達しており、将来のエネルギー資源として、その有効利用が考えられている。

地中の温度には、過去の地表温度の履歴が記録保存されている。本報告は、井戸管中の温度の鉛直分布から過去の環境温度の変遷を推定しようと試みたものである。

1. 岡山における地温の観測

- 2002 年、清心町の建設工事用の地盤調査井戸（深度 37 m、図 1 の A 点、現在なし）で、地温の鉛直分布を観測する機会があり、地温が深さとともに下がっているという結果が得られた（図 2）。付近では優勢な地下水の流れは考えられないので、このような地温分布には、地表の温暖化の影響が現れている可能性があり、地温の鉛直分布に関心をもつようになった。
- 2007 年に、自衛隊に隣接する理大敷地内（標高 10 m）で深さ約 100 m の井戸（図 1 の B 点）が掘られた。地温の鉛直分布を観測したところ、清心町と同様に、浅部では深さとともに温度が下がり、深さ 40 m 付近で極小、さらに深部では深さとともに直線的に上昇する分布が得られた。
- 地温の分布が比較的滑らかであることから、これは、岡山における地表温度の温暖化を表していると考えられる。幸い、この井戸は未利用の状態にあり（水が得られないため）、2007 年 7 月から月 1 回の割で鉛直分布の観測を行っている。
- 地温は、各深度で、毎月、着実に上昇していることが明らかとなった（図 3）。

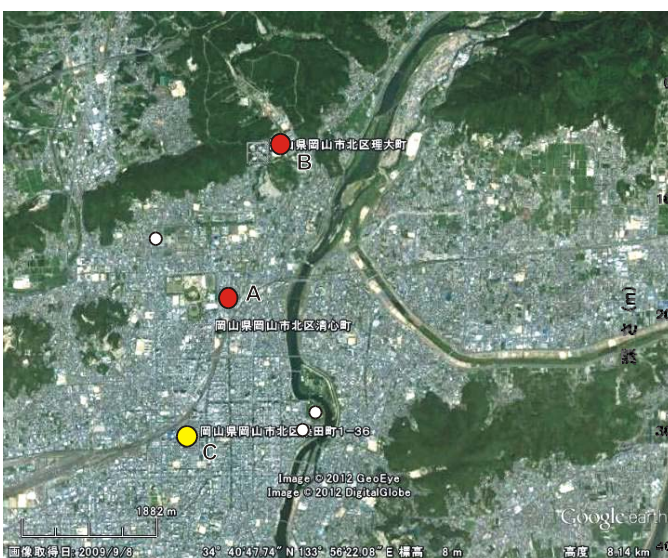


図 1 観測井戸の位置。A：清心町井戸，B：理大井戸，
C：岡山気象台（○は、旧気象台の位置）

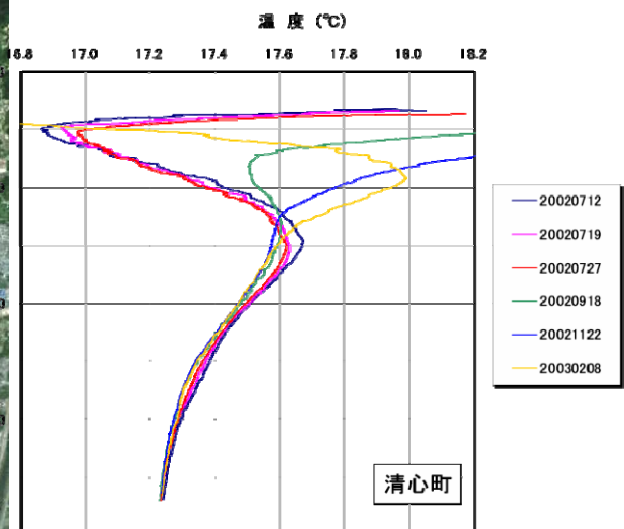


図 2 A 点における地温（2002 年）

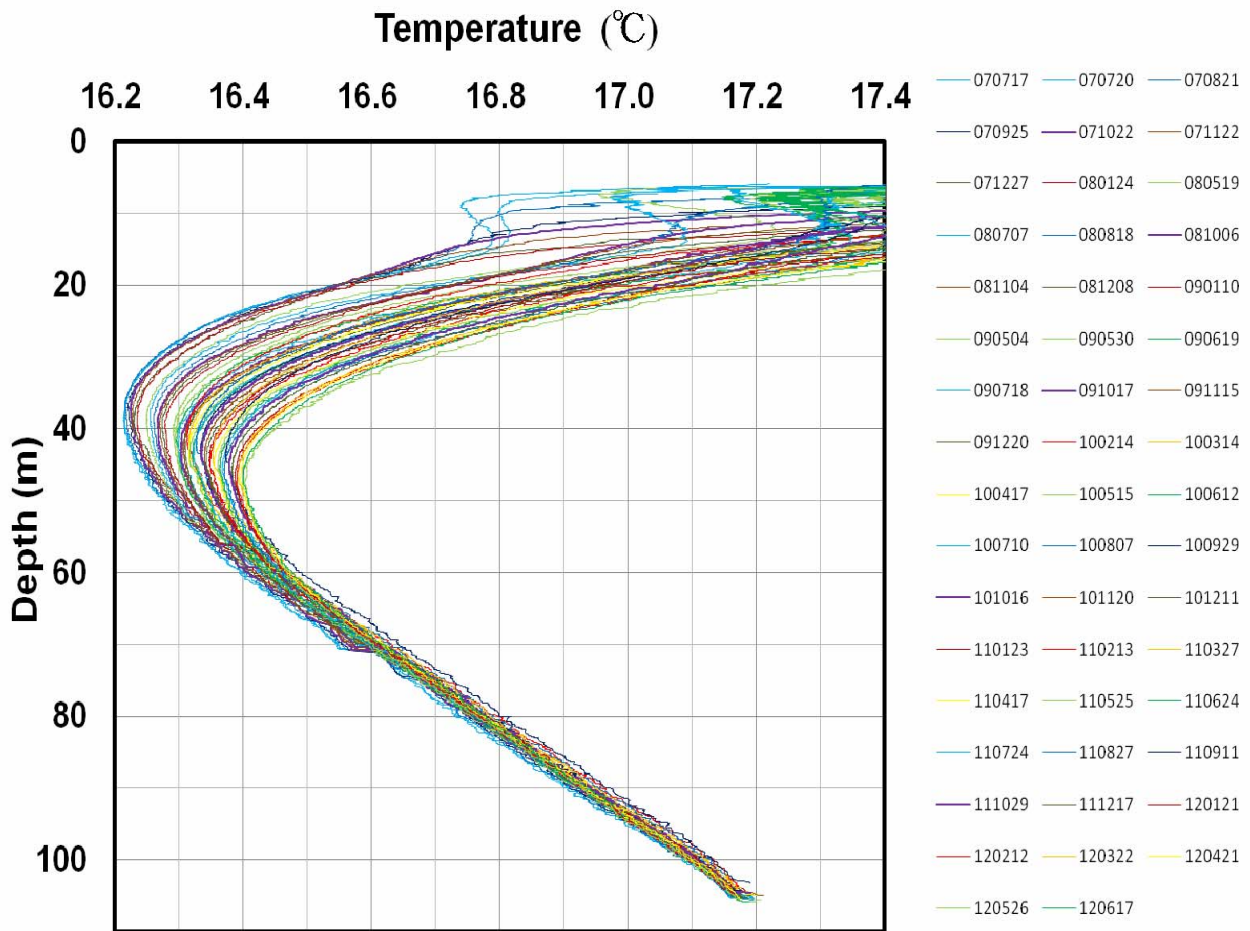


図3 理大井戸（観測点：B）における地温分布（2007年7月以降，月1回）
 温度計：COMPACT-TD計（JFEアレック社）：分解能0.001℃，1.5mm
 センサーの降下速度：2cm/s（ゆらぎは，手動による降下のため）
 柱状図によると，深度70m以深が花崗岩，それ以浅は固結した礫混じりの堆積層。

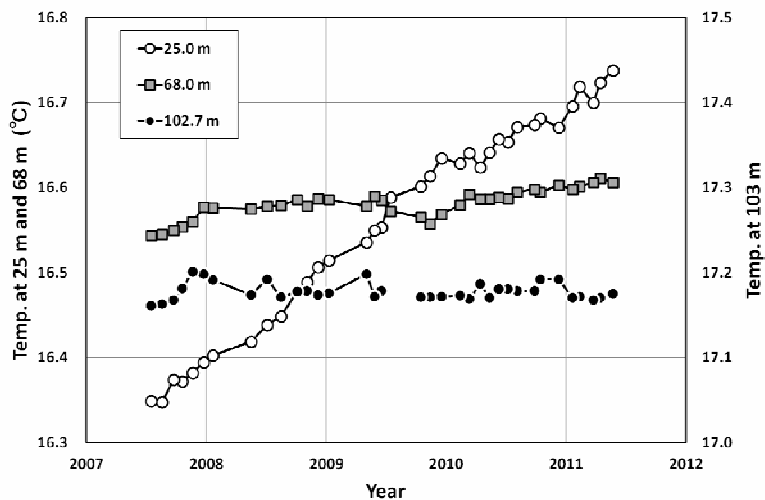


図4 深さによる温度変化の違い

- 地温の鉛直分布には，その地域の過去の地表温度の履歴が保存されていることから，温暖化のエネルギーは地下に蓄積されつつあるといえる。

- 最近、この温暖化による地中の蓄積エネルギーを有効活用するための研究がはじまっている。
- 地温の鉛直分布を逆解析することによって、過去の地表温度を推定する試みも行われ、地表温度の変遷と地域の発達史との整合性が認められている（濱元，2012）。しかし、逆解析法は、コンピュータによる複雑な過程を経るため、因果性を明らかにすることがむずかしい。
- ここでは、地表の温暖化が地下に進展して行く過程を理解するため、過去の地表温度の変化を単純な関数形で表現し、それを境界条件として、できるだけ数学的に解析する順解法で探ろうとする。

2. 大阪平野における地温の観測例（2011）

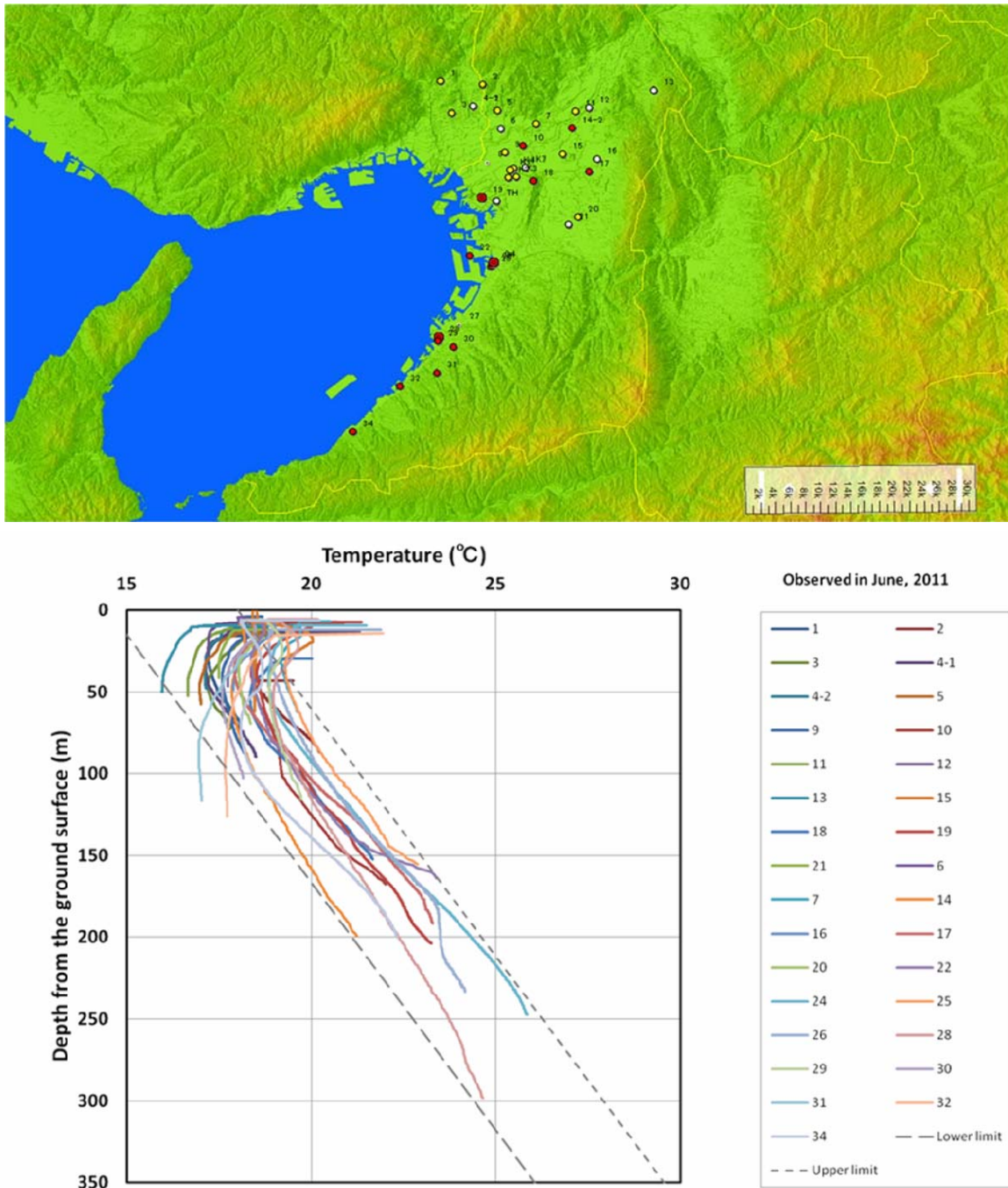


図5 大阪平野における地温の観測点と地温の鉛直分布（観測：2011年）（有本，北岡，谷口，濱元，2012）

- 大阪平野では、地温、およびその鉛直分布のパターンが場所によってかなり異なっている。全体として2本の平行線の間におさまり、山地に近いところでは低温側、平地部では、上町断層に沿って高温側に分布する。
- これらのことから、地温の分布には、地下水の上下方向の流れによる影響が考えられる。

3. 温暖化とは

- 温暖化には、地球全体で起こっているグローバルな部分と、都市域で顕著に生じるヒートアイランド現象と呼ばれるローカルな部分が含まれる。
- グローバル部分に関しては、化石燃料の消費による人間活動の影響が議論されている。CO₂濃度に関する議論が多いが、基本的には、人間活動による廃熱が温暖化の大きい原因になっているものと思われる。
- 地球の平均気温は、過去百数十年の間、いくらかアップダウンを伴いながら、全体として、指数関数的に上昇しているとみることができる(図6)。一方、地球全体の化石燃料の消費量も指数関数的に上昇している(図7)。また、大気中のCO₂濃度も指数関数的に上昇している。

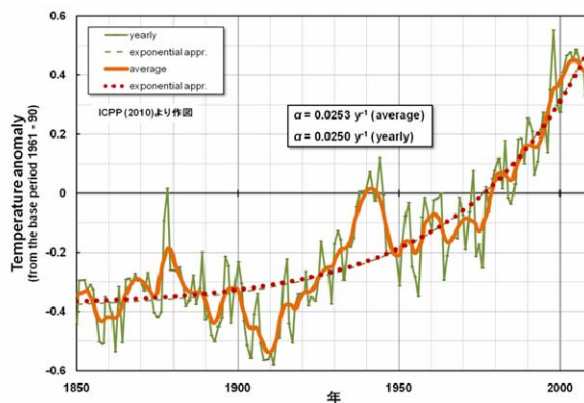


図6 地球の平均気温の変遷 (IPCC, 2010)

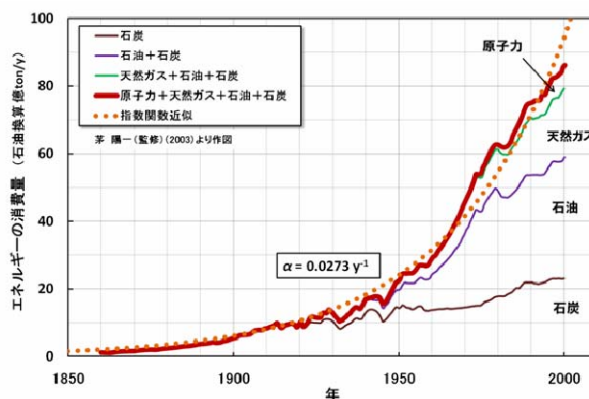


図7 世界のエネルギー消費量の変遷 (薪炭は除く) (茅 陽一, 2003)

- 指数関数的な振る舞いは、上昇率、あるいは、増加率、成長率が一定の場合に起こる。たとえば、世界の化石燃料の消費量 Q に着目し、その増加率が λ (一定) であるとすれば、

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda Q \quad (1)$$

で表される。時間 $t=0$ における消費量を Q_0 とすれば、消費量 Q は、次式のように、指数関数的に増加することになる。

$$Q = Q_0 \cdot e^{\lambda t} \quad (2)$$

CO₂ 排出量が石油消費量に比例的であるとすれば、環境（大気）中の CO₂ 濃度 C （平衡濃度からの偏差）は、

$$\frac{dC}{dt} = aQ \quad (3)$$

で近似でき（ a は定数）、また、環境温度 T （平衡温度からの偏差）についていても、消費量 Q は発熱量に比例的であるとみなせるので、温度上昇による宇宙への放熱量増加を無視すれば、

$$\frac{dT}{dt} = bQ \quad (4)$$

と大ざっぱな近似ができてよい（ b は定数）。指数関数は積分しても指数関数であるから、CO₂ 濃度も温度も指数関数的に変化することになる。

- そう考えると、温暖化が指数関数的であるということの原因は(1)式ということになる。(1)式は、消費量の増加率がそのときの消費量に比例することを意味する。これは、人間は豊になれば、ますます豊かさを求め、便利になれば、ますます便利さを求めることを意味しているのだから、温暖化は、人間の性質に起因しているように見えないこともない。したがって、人間活動の環境への影響は、いろいろな要素において、指数関数の形で現れやすいとみることができよう。
- 一方、近年、同位体科学の進歩により、過去、数千年、数万年、数千万年以上にわたる環境の温度変化があきらかにされつつある。計器による温度記録がはじまった 1800 年台以前の温度変化に関する情報が精度を増して、次第に明らかになりつつある。それによると、現在の温暖化には、自然の温暖化がかなり含まれているということになりそうである。

4. 計器記録以前の環境温度の変化

- 最近、屋久杉を利用して、過去 2 千年にわたる温度変化が明らかにされた (Kitayama et al., 2000)。この変動は、地球全体の平均的な変動 (Moberg et al., 2003) と極めてよく類似している。振幅は両者でかなり異なるが、位相はよく一致しているのだから、双方の結果は互いに信頼性があると思われる。

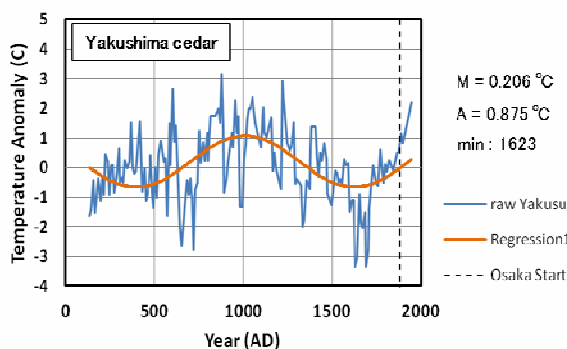


図 8 屋久杉のデータ (Kitayama et al., 2000)

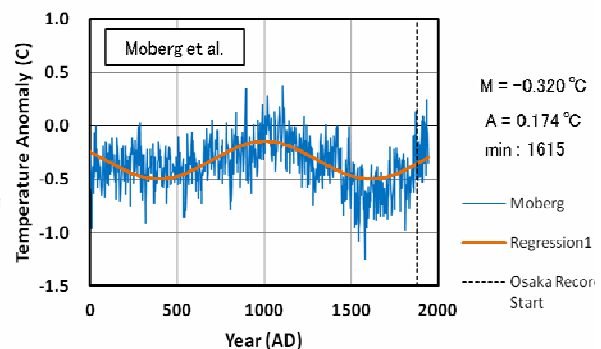


図 9 地球の平均的溫度 (Moberg et al., 2003)

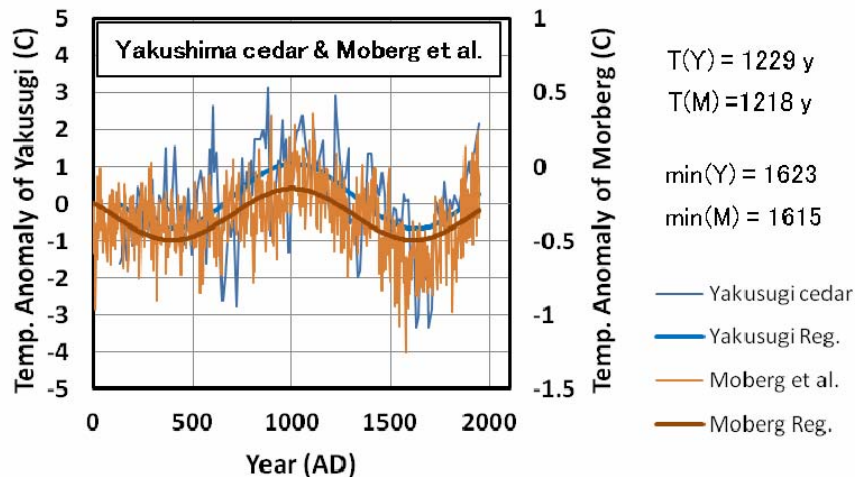


図 10 屋久杉データと地球の平均的温度と比較

凡例の $T(Y)$, $T(M)$ は、それぞれ、屋久杉、Moberg et al. から推定される周期を表し、 $\min(Y)$, $\min(M)$ は、それぞれの極小となる西暦年を表す。

- 少なくとも過去数千年の間では、西暦 1000 年前後が高温期、1620 年前後が低温期になっていて、それ以降上昇期にはいる。現在も上昇の途上にある。この長期変動の振幅は、屋久杉の場合、約 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。
- このような長周期の変動には、太陽活動の周期性に関係しているという議論が行われている。最近の観測によると、太陽活動が静穏期に入る徴候が認められるので、自然の変動としては、寒冷化の方向に向かうようである。
- このように、過去の気温変動があきらかにされたので、現在の温暖化には、長周期の自然現象と、過去 100 年程度の人間活動による影響の二つの効果が考慮されなければならなくなった。
- 地温の解析を行う前に、このような環境温度の変動のパターンがどのようなものであるのかについて、整理しておく必要がある。

5. 温度変化の表現について

- 計器記録期間の温度には、多少のアップダウンを伴いながらも、年とともに着実に上昇し、そのパターンは指数関数的である (図 6)。
- 上記のように、指数関数的な変化は、ある平衡値からのずれに対して、上昇率が一定の場合に現れる。平衡温度が T_e のとき、実際の温度が T であれば、平衡からのずれは $T - T_e$ である。 Δt 年間の上昇温度が ΔT のとき、1 年当たりの上昇率を λ とすれば、 λ は $\Delta T / \{(T - T_e) \cdot \Delta t\}$ である。これを微分形でかくと、

$$\frac{dT}{dt} = \lambda(T - T_e) \quad (1)$$

である。 t_0 年における気温が T_0 のとき、 $p = T_0 - T_e$ とおくと、この式は、

$$T = T_e + p \cdot e^{\lambda(t-t_0)} \quad (2)$$

となる。すなわち、上昇率 λ が一定であれば、指数関数的に増加する。

ここで、人間活動による影響を T'_h で表し、

$$T'_h = p \cdot e^{\lambda(t-t_0)} \quad (3)$$

とおく.

- 自然現象による長周期の変動 T'_n は, その周期を τ , 振幅を A として,

$$T'_n = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}t + \varepsilon\right) \quad (4)$$

で表されるものとする.

- 気温は, 人類活動による効果 T'_h と自然現象による効果 T'_n の和:

$$T = T_e + T'_h + T'_n \quad (5)$$

で表されるものとする.

6. 岡山における過去の気温の記録

- 岡山気象台による観測記録資料は, 1890年から120年間にわたるものである.
- 岡山気象台は1890年に岡山城内で業務を開始して以来, 1896年に内山下, 1949年に桑の木町, そして, 1982年10月に現在の桑田町へと, 3回移転している.

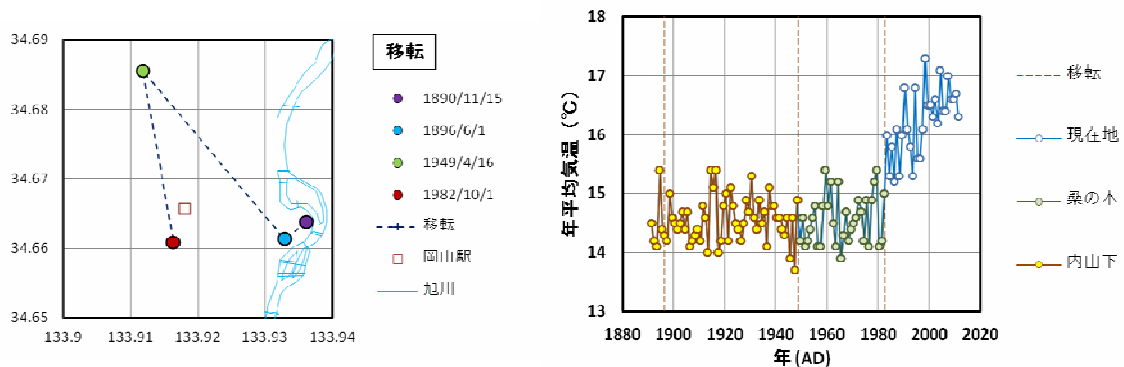


図 11 岡山地方気象台の移転

- 年平均気温からみると, 桑の木町から桑田町へ移転したとき, 明らかな不連続性が認められる.
- 岡山の年平均気温のデータに対して, 温度が指数関数的に変化するものとして, 最小二乗法を使って, もっともフィットする指数関数形を求めてみると, 岡山の気温は, 他の地域にくらべて上昇率が特異的に高いことに気付く (図 12).

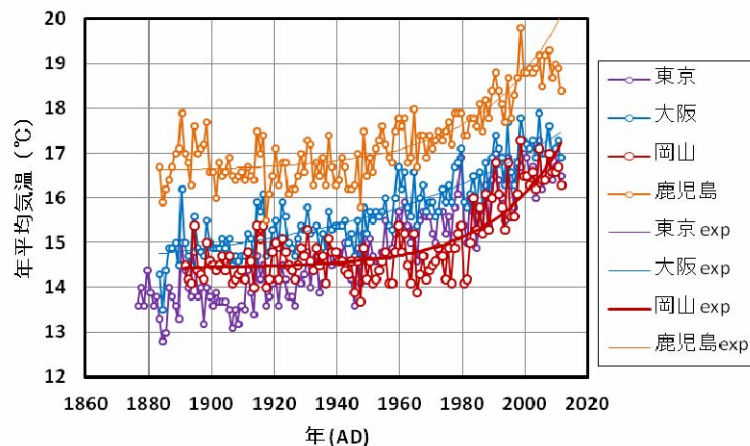


図 12 岡山 (赤) の上昇率が異常に高い.

- これは, 気象台の移転による影響: すなわち, 郊外 (桑の木町) からヒートアイランド現象の進ん

だ現在の市街（桑田町）に移転したことによる影響である。

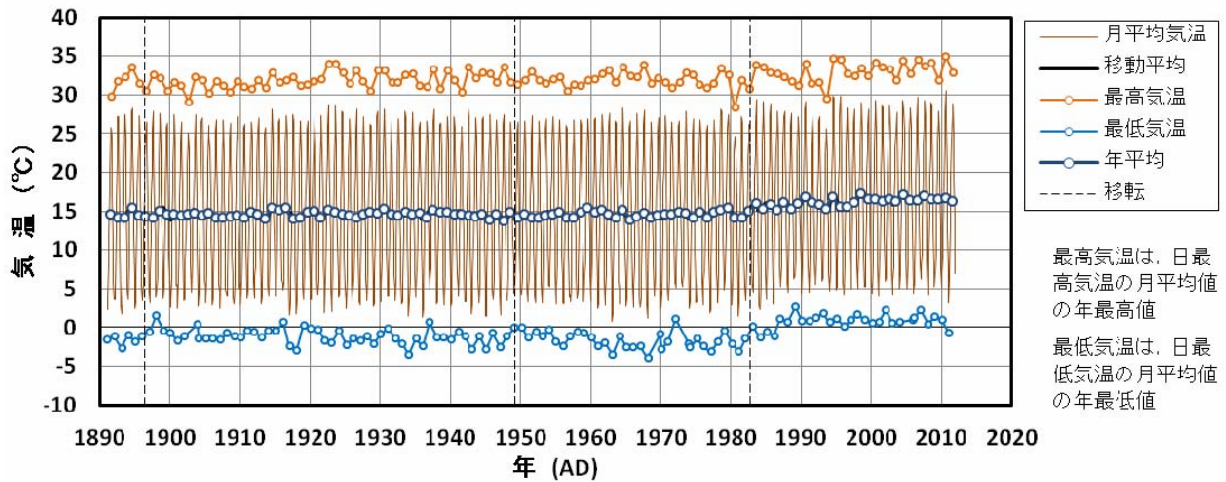


図 13 岡山気象台で観測された月平均気温，月最高気温，月最低気温，及び年平均気温の変化

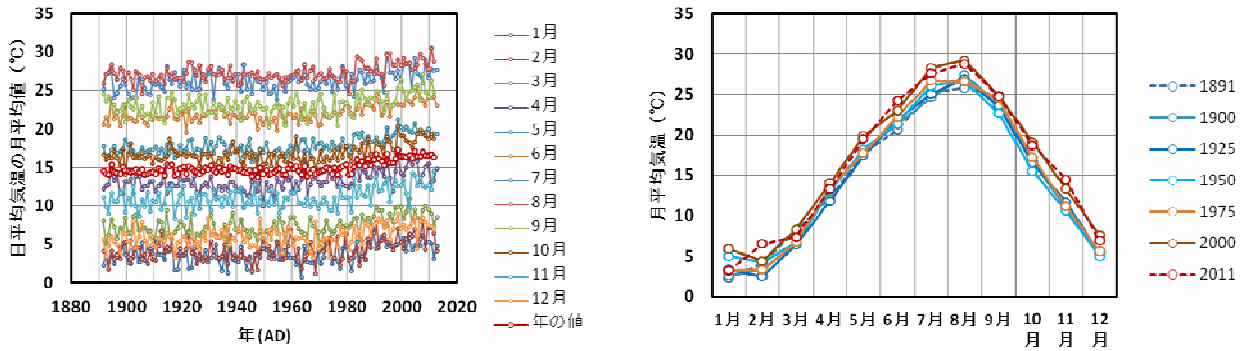


図 14 月平均気温の変化

- 岡山の温度記録データから，できるだけ，一貫性のある長期変化を抜き出すため，(1) 桑の木町に移転する 1950 年以前の内山下データは，温暖化の現象が顕著でなかった．それ以降の時期において，ヒートアイランド現象が現れるようになったが，(2) 桑の木町では，郊外に位置するため，ヒートアイランド現象が顕著に現れなかった，と考える。

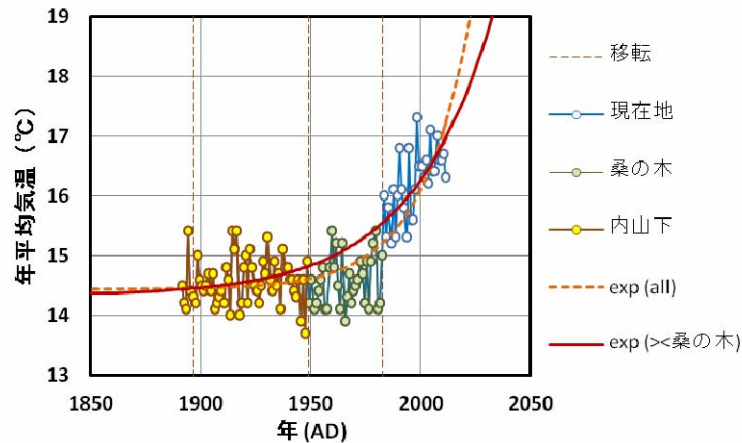


図 15 桑の木町データを除いた場合と除かない場合の指数関数近似の比較

- このように考えて，桑の木町における 33 年間のデータを除いて指数関数形を求めてみると，除

かない場合にくらべて、気温の上昇率は緩和され（図 15）、その値は、他地域と比べて、それほど不合理な値ではなくなる。全データでは、 $M = 14.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $p = 0.0195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\lambda = 0.044\text{ y}^{-1}$ 、桑の木町データを除くと、 $M = 14.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $p = 0.1318\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\lambda = 0.027\text{ y}^{-1}$ となる。（記号の意味は後述）

- そこで、以下の解析では、桑の木町のデータを除外することにする。

7. 岡山における長周期変化について

- 屋久杉のデータと岡山気象台のデータが重なる期間があるが、屋久島データは計器記録データにくらべて記録の密度が低く、ばらつきが大きいので、そのままでは比較できない。屋久島データに関しては周期的変動の回帰線（図 8）を利用し、その周期と位相を固定する。
- 岡山における振幅を推定することがむずかしいので、とりあえず、屋久島における振幅を利用して、気象台が桑の木町に移転する前の 1948 年までの 57 年間の平均気温が、その間の屋久杉の回帰線の平均温度と一致するように、屋久杉の回帰線をシフトさせ、それを岡山における自然の長期変化であるとしてみる。

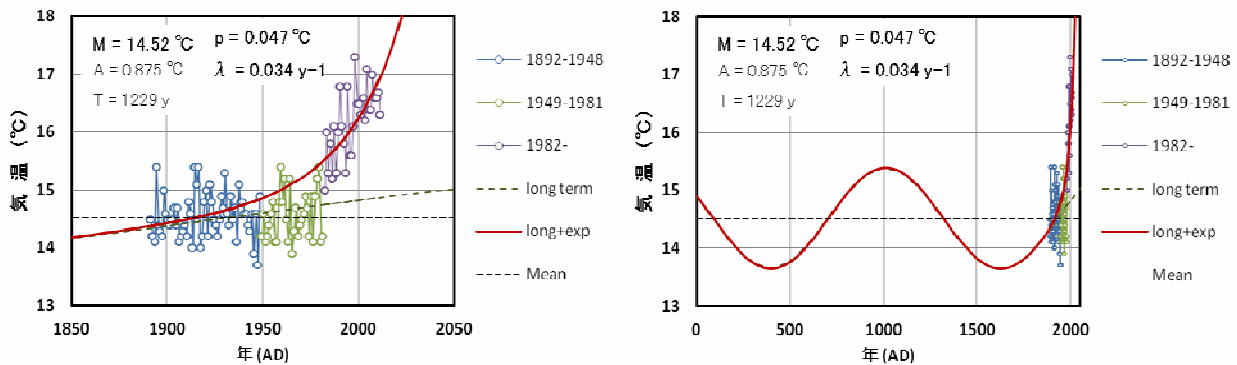


図 16 岡山における長周期変化と指数関数的温暖化の合成（振幅は屋久杉データに同じとした）

- シフトさせた屋久島回帰線を延長し、それと桑の木町時代を除く期間における気象台の観測気温（年平均気温）との差は、人間活動による正味の影響を表しているとみなすことにすれば、この差に、指数関数的変化を想定してフィッティングをかけると、正味の人間活動による温暖化を定量的に抜き出すことができる。

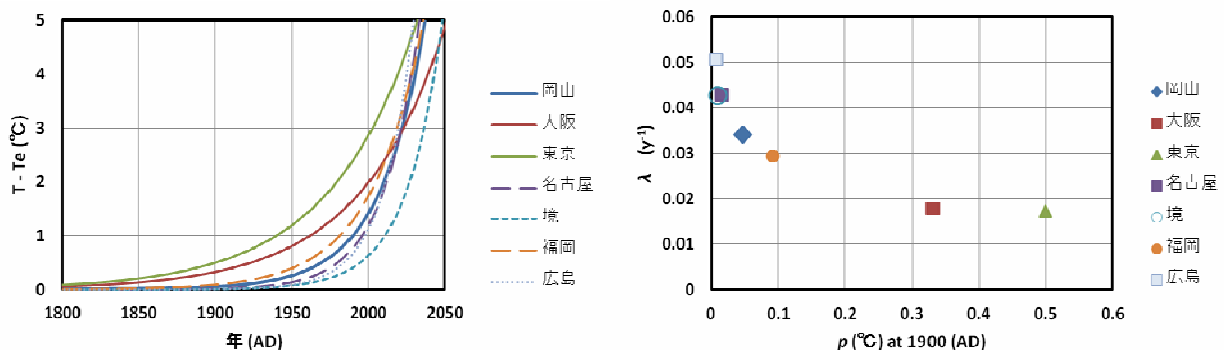


図 17 いくつかの地域で、推定した正味の人間活動による気温の上昇（回帰線）

右図は、上昇率 λ と 1900 年値 p を対比させたもの

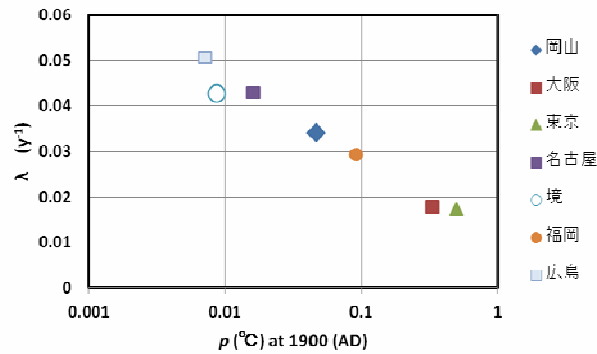


図 18 p の対数をとると、気温の上昇率 λ との間に直線的な関係が見られる。

- 岡山における正味の人間活動による温度上昇率として、3.4%/年が得られる。
- 同様にして、東京、大阪で求めると、1.7~1.8%/年の程度である。
- また、ヒートアイランド現象が小さいと考えられる山陰の境では、上昇率は4.2%と高い。
- 温度上昇が早くから始まった地域ほど上昇率が低くなっている（図 18）。その傾向に規則性が見られるのは不思議である。

8. 地表温度が指数関数的に上昇する場合の解析

- 地表温度が、指数関数的に上昇してきたと仮定した場合、地温分布から過去の地表温度を推定することは比較的容易にできる。
- 図 19 は、理大井戸データを対象に、フィッティングをかけた結果である。凡例の θ が回帰温度、 θ_g は温暖化が始まる前の平衡地温である。
- 実測データ（黄色）と回帰線（ θ ，赤線）のずれを細かくみると、データの回帰線 θ からの系統的なずれがいくらか認められ、長周期変化の成分が含まれている可能性を示している。

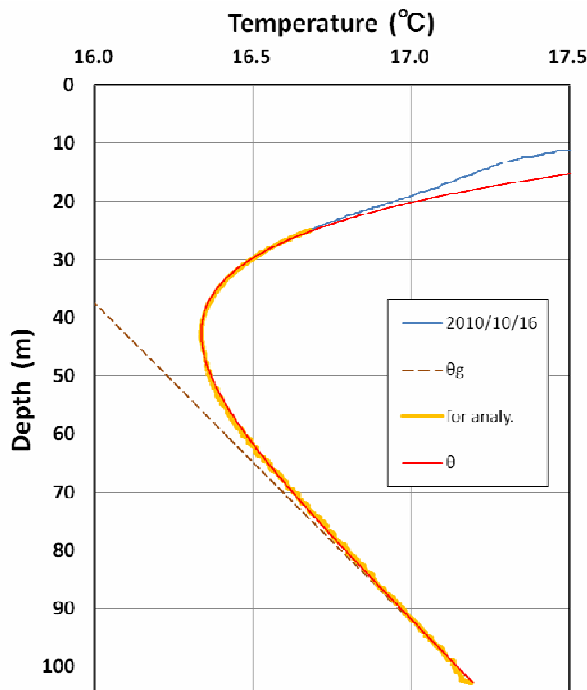


図 19 地表温度が指数関数的に変化する場合のフィッティング

黄色の線が解析に利用した範囲。赤線が回帰線である。再現性のよい結果が得られる。得られた結果は、 $\alpha = 15.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ （地表温度）、 $\beta = 0.021\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ （地温勾配）、 $\kappa = 4.2 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ （地層の熱拡散係数）、 $p = 0.021\text{ }^{\circ}\text{C}$ （1990年における地表温度の平衡温度からの変位）、 $\lambda = 0.052\text{ y}^{-1}$ （地表温度の上昇率）である。

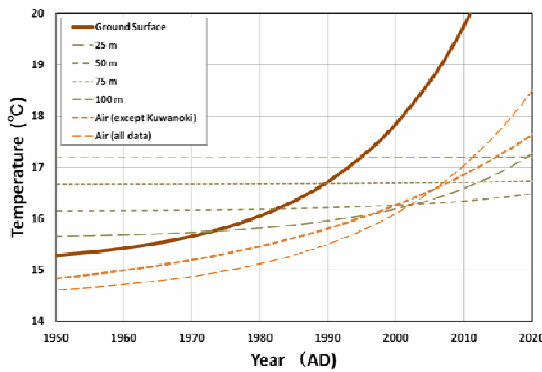


図 20 地表温度と気温

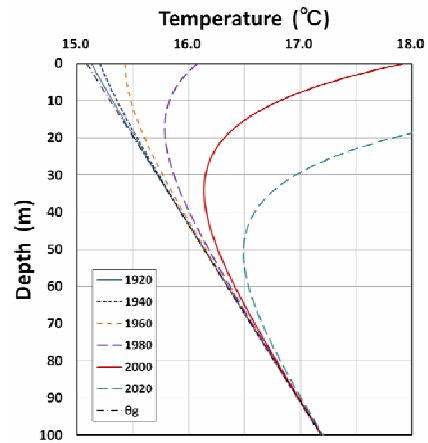


図 21 過去における地下温度の分布

- 図 20 は、推定した地表温度と気温を比べたものである。年とともに地表面温度と気温との差が拡大している。図 21 は、地温分布の変化を表し、1960 年前後から地下の温暖化が顕著になったことが知られる。

9. 地表温度の変化が地温分布に与える影響

- 地温の解析には、熱伝導の理論を利用する。一様な熱的性質をもつ地層が、水平に無限、深さ方向には半無限に広がっていると見て、1次元の問題で解析的に解くことを目指す。
- 地表の温度が一定で、水の動きのない条件では、深部からの熱流（地殻熱量）によって、深さとともに温度が高まり、深さに対して勾配が一定の直線となる。
- ところが、地表温度が変化すると、それが熱伝導で地下に伝播する。また、上下方向の水の流れがあると、地表の温度が一定でも、深さ方向に温度の分布が生じる。
- たとえば、はじめ、温度が一定で、ある時刻に地表温度がステップ状に上昇する場合は、次図のように、時間とともに地温が深部に拡散してゆく。

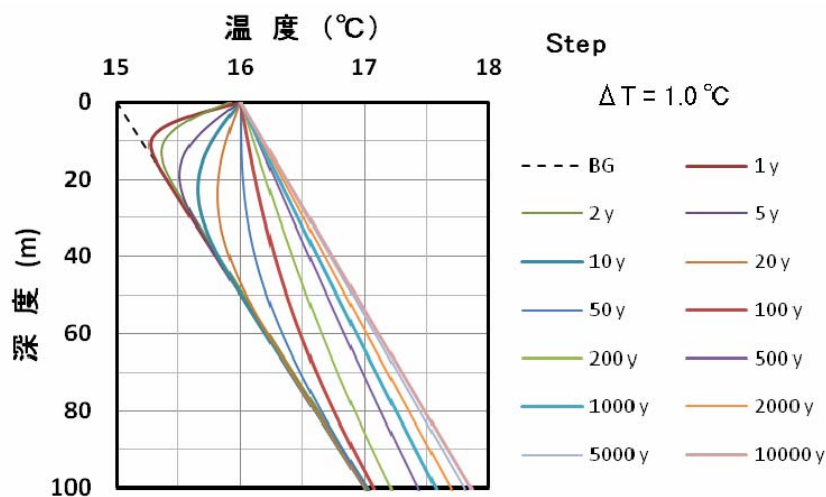


図 22 地表温度がステップ状に変化した場合の地下温度の変化 ($\kappa = 5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

地温の変化が時間とともに変化する様子 の概念図。地温が極小となる分布が現れ、現在の地温は、20年から50年の分布に類似している。

- 地表温度が指数関数的に変化する場合は、地表温度を $T = T_{BG} + p \cdot e^{\lambda(t-t_0)}$ で表現する。ここに、 λ は上昇率（上昇速度）、 p は時刻 t_0 における平衡温度 T_{BG} からの偏差を表す。 t_0 として西暦 1900 年を選んで比較することにする。図 24 は、 $p = 0.20^\circ\text{C}$ 、 $\lambda = 0.025\text{ y}^{-1}$ 、 $T_{BG} = 15^\circ\text{C}$ 、 $\kappa = 5.0 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ のとき、時期による分地温布の違いを表す。

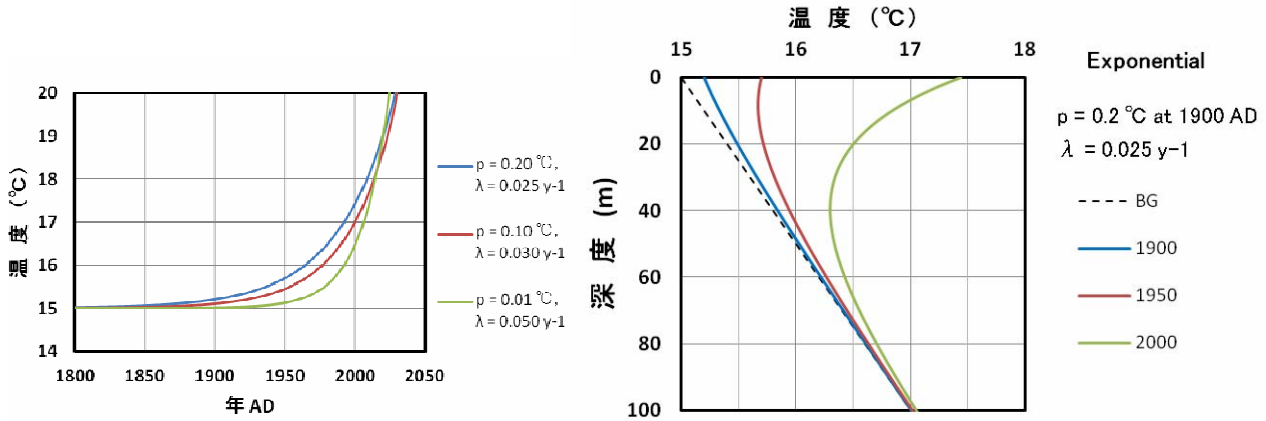


図 23 指数関数的変化

図 24 地表温度が指数関数的に変化したときの地下温度の変化

- 地下水の流れに鉛直成分があると、地温の鉛直分布に影響が現れる。一様な流れでは定常状態は達成されない（上昇流があると地温は際限なく上昇し、下降流があると地温は際限なく地表温度に近づく）。定常状態ができるためには、横の方向への熱の移動が必要である。
- 水の動きのない地層中に、ある幅の破碎帯が鉛直にあって、そこで水が上下方向に動くことができると、水の動きによって移動した熱がまわりの地層に伝熱され、定常状態ができる。
- 破碎帯と周囲の地層の間で、熱伝達を仮定すれば、1 次元の問題として取り扱うことができる。
- 次の図は、破碎帯の中で水の上下流による温度分布を示したものである。流量は、単位面積当たりのフラックス（ダルシー流速）で表し、正の値は下向き、負の値は上向きの流れを表す。
- 降水の年浸透量は $0.5 \sim 1\text{ m/y}$ の程度であるから、浸透量の数割程度の量の水が鉛直方向に移動すれば、地温は大きく影響を受けることが分かる。

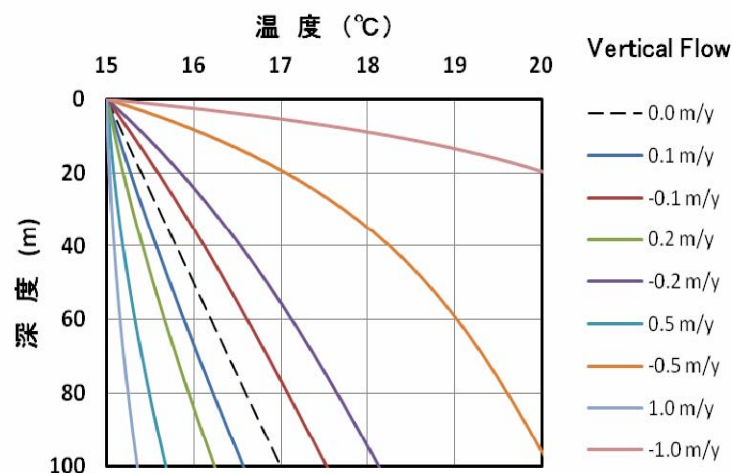


図 25 地表温度が一定で、地下水の上下流が存在するときの地下温度分布の違い（定常状態）

これは、上下流の存在する範囲（破碎帯）の温度を示す。

- ところで、同位体科学の成果により、環境温度には、自然の現象として周期 1200 年程度の周期的な変動が存在することが明らかとなった。その変動は、現在の地温分布に影響を与えうるものであり、それを考慮に入れなければならなくなった。
- 図 26 は、屋久杉データから得られた周期と位相を用い、振幅と平均値に任意の値を与えて、地表における温度変化（左図）と、この周期的な変動が地温に与える影響を（右図）を示したものである。2010 年における地温状態を示したものであるが、深部では低温期の位相が残っている。

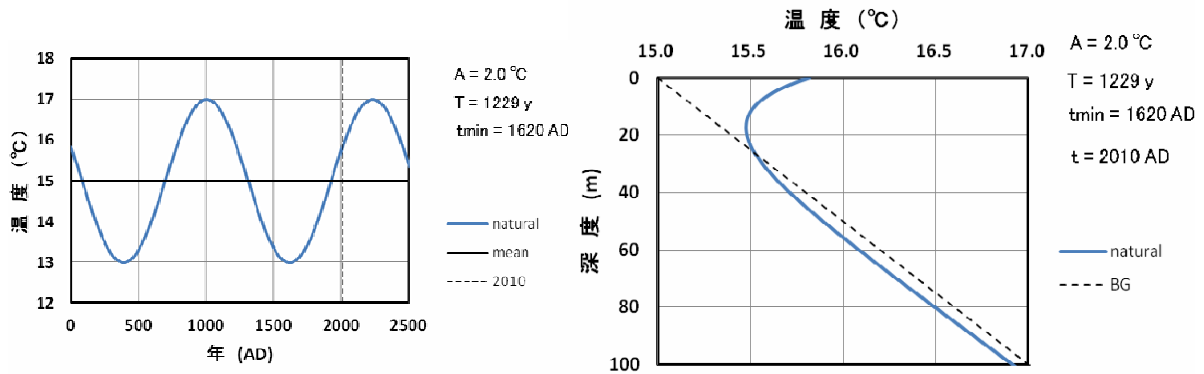


図 26 屋久杉データから推定される地表温度の長周期変動（左図）。その地下温度への影響（右図）
 周期は、1229 年、西暦 1620 年を極小、ただし、振幅と平均温度は、任意に与えた。

10. 長周期の変動成分と地下水の流れの影響を考慮した解析

- Duhamel の定理を使うと、水の流れによる効果、地表温度が周期的に変動する効果、及び指数関数的に変動する効果を別個に計算し、それらを重ね合わせることができる。
- 詳細は割愛するが、定常地下水流（上下流）の存在のもと、地表温度が長周期変動（自然の変動）と指数関数変動（人間活動による影響）のパラメータに適当な値を与え、実際の地温分布にフィットするように、最小二乗法でパラメータの値を推定する。
- 次の図は、2010 年 10 月に観測した地温データを用いてフィッティングさせたものである。
- フィッティングによって得られたパラメータは、図に示したように、

$\alpha = 14.75 \text{ }^\circ\text{C}$	地表温度の平均値
$\beta = 0.0174 \text{ }^\circ\text{C/m}$	地温勾配
$\kappa = 4.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	地層の熱拡散係数
$\nu = 6.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$	周囲の水の動かない地層との熱伝達を表す係数
$U = 0.10 \text{ m/y} = 3.2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	地下水の上昇流
$p = 0.0029 \text{ }^\circ\text{C}$	1900 年における地表温度の平衡温度からの変位
$\lambda = 0.068 \text{ y}^{-1} = 2.2 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$	地表温度の上昇率
$A = 1.58 \text{ }^\circ\text{C}$	長周期変動の振幅
$T = 1229 \text{ y}$	長周期変動の周期（屋久杉データから推定）

である。

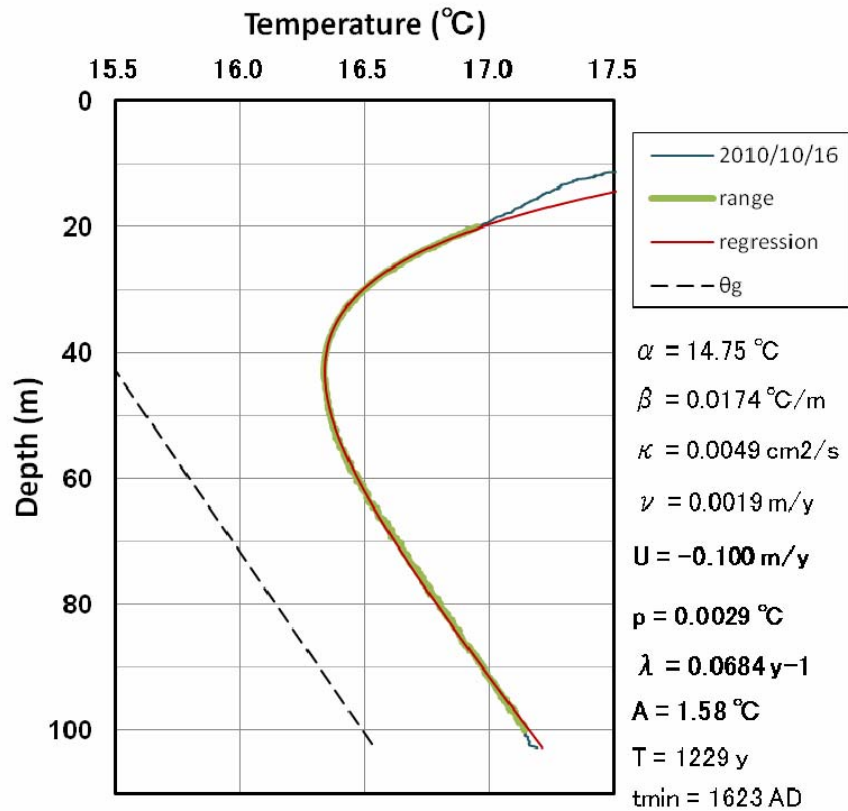


図 27 理大井戸の 2010 年 10 月 16 日に観測された地温データに理論をフィッティングさせたもの。解析範囲は、深度 20 m から 100 m (薄緑) である。赤線が回帰線、破線がバックグラウンド地温である。

- 屋久杉データにおける振幅 (気温) は $0.875\text{ }^{\circ}\text{C}$ であるが、地温分布から得られた地表温度の振幅は $1.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、約 1.8 倍大きい。理由は分からない。
- とところで、上記で推定した岡山の気温長期変動は、屋久杉の振幅を用いたものであるから、地温解析から得られた振幅を用いて、気温変動を修正する。

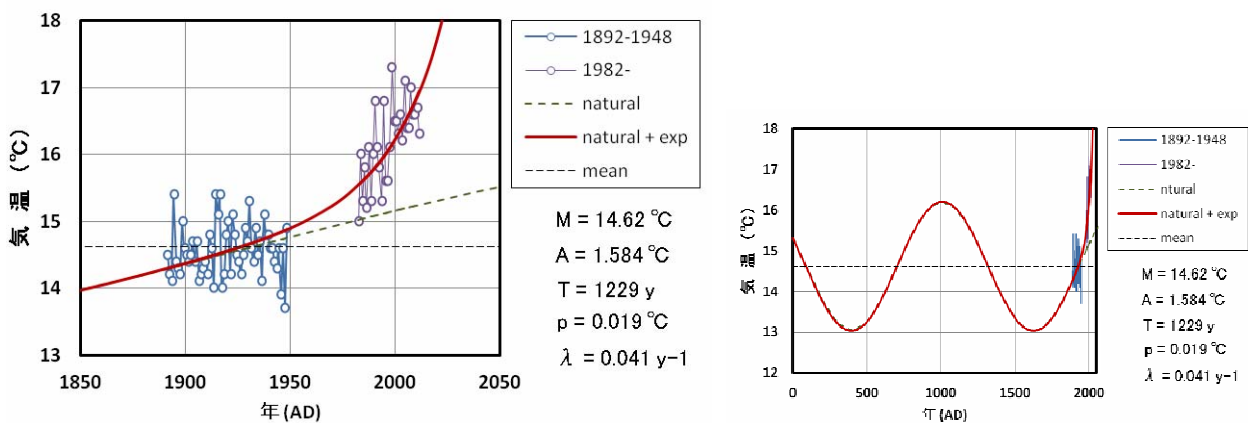


図 28 地温解析で得られた長周期変動の振幅を用いて求めた気温変動の回帰 Natural とあるのは長周期変動, exp とあるのは人間活動による影響を表す。

- 得られた気温変動の新しいパラメータは、

$$M = 14.62\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{平均気温}$$

$A = 1.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 振幅

$p = 0.019\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1900年における地表温度の平衡温度からの変位

$\lambda = 0.041\text{ y}^{-1}$ 地表温度の上昇率

である。地表温度の p の値は、気温の値に比べてかなり小さく、地表温度の上昇率 λ の値は、気温に比べて大きい。

- 次の図は、気温の変動と地表温度の変動を比べたものである。

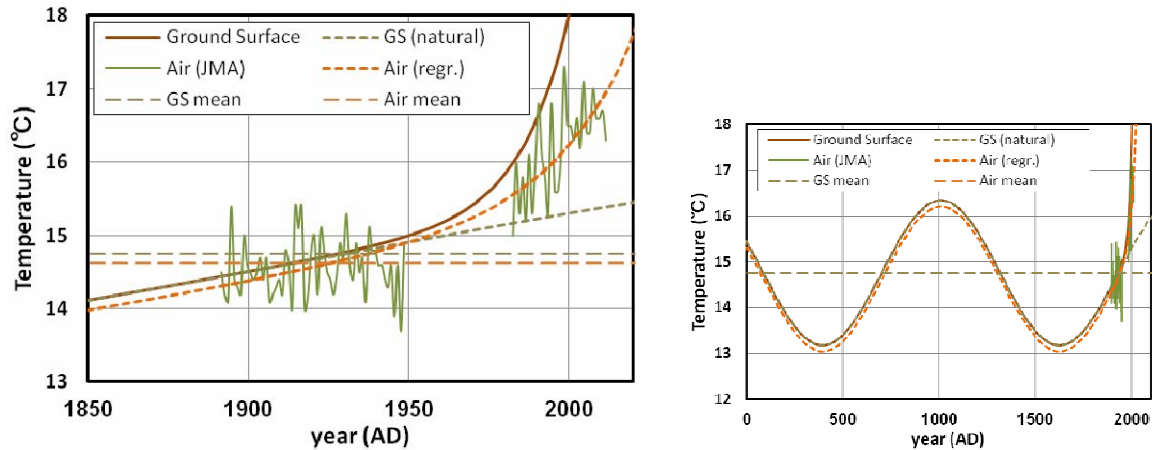


図 29 気温と地表温度の回帰を比べたもの

Natural とあるのは長周期変動，exp とあるのは人間活動による影響を表す。

- 地表温度と平均気温の差は、 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ と小さいものとなった。地表温度は気温よりも $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度高い場合が多いとされているので、これは、解析の精度の限界を表しているのかも知れない。
- また、解析の結果、上昇流の存在があきらかとなった。本観測井戸は、標高 100 m 前後の半田山の山麓、谷の出口に位置しているので、水文学的には湧昇が起こっていても不合理ではない。

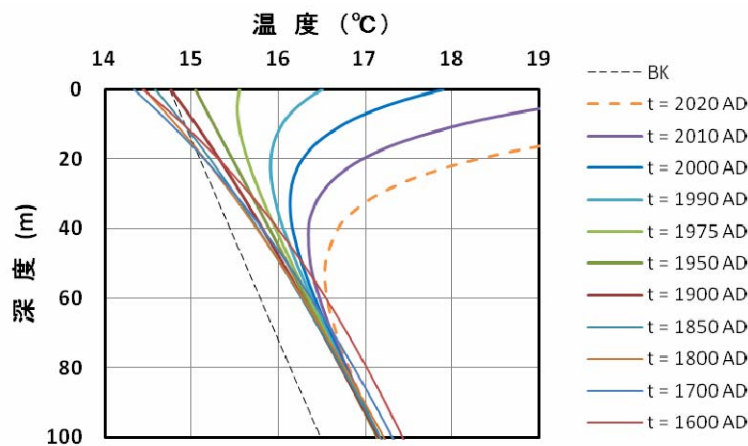


図 30 過去における地下温度の分布の変遷

地温が、バックグラウンド地温（点線）よりも全般的に高いのは、地下水の上昇流による影響である。

地温は、1970年ごろから急速に上昇が始まったことがわかる。また、地温が極小となる深度が年とともに増していることも分かる。

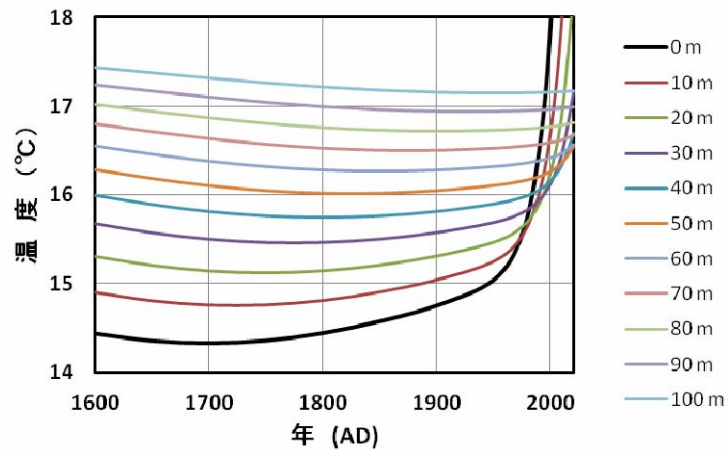


図 31 100 m 以浅の各深度における温度の変遷

凡例は地表からの深さを表す。

100 m 以浅では、長期にわたり低温下がおこっていたと考えられる。

これは、地表温度の長周期変動の影響である。

2000 年以降は、100 m 以浅では、減少の傾向は消えている。

1 1. おわりに

- 地温の鉛直分布を解析することによって、過去 2000 年間にわたる岡山の環境温度の周期的変動の振幅を推定することができた。
- 気候の温暖化には、人間活動による影響だけではなく、自然の現象もかなり含まれていることが、地温からでも、明らかにすることができたと思われる。

以上
2012/8/26