

S3) 水環境に地球温暖化の影響は出ているのか？

北岡豪一・竹内 徹・住田有里佳（岡山理大・同院・同学）

はじめに

現在進行中の環境の温暖化は、生物多様性の低下など、地上、水中、地中の生態系に深刻な影響を与えるものとして、さまざまなフォーラムで活発に議論されている。我が国における温暖化は130年以上にわたる気象庁の長期資料をみて明らかで、各地の年平均気温は、年々加速性を増しながら上昇している。

温暖化の現象は、化石燃料を主なエネルギー源とする人間活動によって引き起こされ、太陽によるエネルギー循環系にその廃熱が付加されることに起因すると考えられている。付加された熱の大部分はエネルギー循環の遅い大地に蓄積され、それが赤外線放射によって大気を温める。大地の温暖化は、実際、世界各地の地温の鉛直分布に明瞭に現れており、温暖化の履歴は地温の鉛直分布として記録保存されている。地温の鉛直分布から当該地域における過去の温暖化の履歴が推定できる可能性がある。

ところで、地温の分布は過去の地表温度の履歴が明らかでなければ理論的に求めることができない。この分野では、地温分布から過去の地表温度の履歴を求めようとする逆問題解析の方法が一般に採られていて、過去数100年の地表温度の再現まで行われようとしている。しかし、パラメータが多すぎる。過去の気温データが揃っていない地域では、気温変化の定式化を行えば、順問題として、少ないパラメータで地温分布が再現できる可能性がある。

一方、河川水に関しては、水温は一過性であり、自然界に記録がない、ということが課題であろう。できるだけ長期にわたる河川水温データに頼るしかない。ある気温変動を想定して、順問題としてやるしかないのかも・・・。

温暖化の諸現象

気温、地温、水温（河川、湖沼、内海、・・・）

旭川における河川水温の長期変動は住田のポスター。

観測

河川の水温変化の要因を探るため、湧水、用水路、河川の水温を10分間隔で記録をとってみると、実にさまざまな現象がみられる（ポスター：水谷、長堂、中村）。水温の短期諸現象が気温の変動との関連で長期の変動とどのように繋がっているのか、それを明らかにすることが課題である。

温暖化の表現

気象庁の各地の気温の長期変化（温暖化）のパターンを見ると、それを指数関数で第1近似的に表現できないかと誘惑に駆られる。近似できるとすれば、それは何を意味しているのか、について粗く考えてみた。

ある範囲の環境（バルク）のエネルギー量（大気、地表、地中を含めた熱量）を E 、その範囲にある物質が単位時間に正味受け取る熱量を Q とすれば、 $dE/dt = Q$ が成立するので、環境の温度を θ_E 、熱容量を C_E とすれば、 $C_E \cdot d\theta_E/dt = Q$ とできる。 Q の中味は、短波放射 R_S 、長波放射(↓) R_A 、長波放射(↑) R_G 、顕熱輸送 H 、潜熱輸送 L 、地熱伝熱 G 、及び人間活動による廃熱 A として、 $Q = R_S + R_A + G - R_G - H - L + A$ 。温暖化前は ($A = 0$)、受熱量と放熱量が平衡していて、 $dE/dt = 0$ 、i.e. $Q_{st} = R_S + R_A + G - R_G - H - L = 0$ とし、 A が加わることによって新たな状態に移行したと仮定する。 Q_{st} はゼロではなくなるが、移行に長時間を要するものとして $Q_{st} \approx 0$ を仮定すると、 $d\theta_E/dt \approx A/C_E$ となる。

人類のエネルギー消費の歴史をみると、産業革命以降急激にエネルギー消費が拡大し、指数関数的に増加しているようにみえ（図1）、世界の平均的な気温（IPCC）もある程度それに呼応しているように見える。

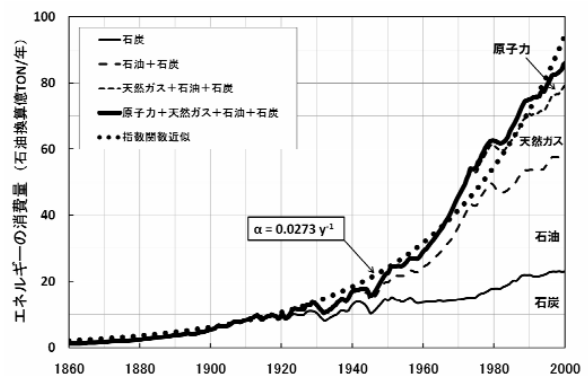


図1 世界のエネルギー消費量の変遷
消費量は茅(2003)の図から水力と薪炭を除いたもの。

そこで、人間のエネルギー消費量（年当たり） A は、 $A = A_0 e^{\alpha(t-t_0)}$ の形で近似できるものとする。この微分は $dA/dt = \alpha A$ であるから（ α は増加率）、エネルギー消費量の増加速度がそのときのエネルギー消費量に比例していることを表す。粗い仮定であるが、これは人間という生き物のもっている性質を反映したものであるのかも知れない。

ローカルなエネルギー消費においてもこれと同じ特性を仮定し、また、環境の温度 θ_E の変化は気温 θ_a の変化に比例的であるとして(遅れを無視して強引に)、 $d\theta_a/dt = B \cdot d\theta_E/dt$ を仮定すると(B は定数)、 $d\theta_a/dt = \beta \cdot e^{\alpha(t-t_0)}$ となる。ここに $\beta = A_0 B / C_E$ である。 $t \rightarrow -\infty$ における気温を θ_{ab} (定数)として積分すると、 $\theta_a = \theta_{ab} + (\beta/\alpha) \cdot e^{\alpha(t-t_0)}$ となる。 β/α は、 $t = t_0$ における気温上昇 $\theta_a - \theta_{ab}$ を表す。気温の温暖化の履歴特性をパラメータ α 、 β 、 t_0 を用いて表してみる。

第1近似(最小二乗法)では、まあまあという感じである。ただし、近年、 A にかけりがみられるので(図1)、この表現は過去の事象だけにしか適用できないのかも知れない。(無限の資源と環境が前提)

解析方法: 順問題として

1) 地温の鉛直分布

表面温度が指数関数変化するときの半無限媒質の解析解が Carslaw & Jaeger (1959)にあるので、地温への解析的な取扱いは可能である。フィッティングの結果、地表温度は気温よりも高く、その差は温暖化とともに大きくなっていることが知られる(蓄熱)

2) 河川水温の時間変化

1960年頃から水道局、1970年頃から県で、公共用水の水温・水質データが全国で蓄積されている。旭川の水温は確実に上昇している(住田のポスター)。どう扱えばいいのだろうか? 近藤純正(1994)と新井正(2004)を参考にして、予察的に試みる。

1次元: 川筋 x 軸。川の断面積 S 、川幅 W 、水深 D は川筋に沿って一様、水温 θ と流速 U は川断面で一様とする。 h : 熱伝達係数(正味長波放射も含めて)、 I : 日射量、 a : 日射吸収係数、 e : 蒸発量、 q_g : 地下水流入量、 θ_g : 流入地下水温、 κ : 渦動拡散係数、として、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \nu(\theta - \theta_a) + \sigma - \varepsilon + \gamma(\theta_g - \theta)$$

$$\kappa \equiv \frac{K}{\rho c}, \nu \equiv \frac{hW}{\rho c S} \approx \frac{h}{\rho c D}, \sigma \equiv \frac{aIW}{\rho c S} \approx \frac{aI}{\rho c D}$$

$$\varepsilon \equiv \frac{eLW}{\rho c S} \approx \frac{eL}{\rho c D}, \gamma \equiv \frac{q_g}{S}$$

- 気温のステップ状変化: $\kappa = 0$, $\gamma = 0$ として、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\nu \left(\theta - \theta_a - \frac{\sigma - \varepsilon}{\nu} \right)$$

初期条件: $t = 0$, $\theta = \theta_0(x)$

$$\theta(x, t) = \theta_a + \frac{\sigma - \varepsilon}{\nu} + \left\{ \theta_0(x - Ut) - \left(\theta_a + \frac{\sigma - \varepsilon}{\nu} \right) \right\} \cdot e^{-\nu t}$$

$\theta_0(x) = \theta_i$ (一定)なら、 x, U に無関係になる(図2)

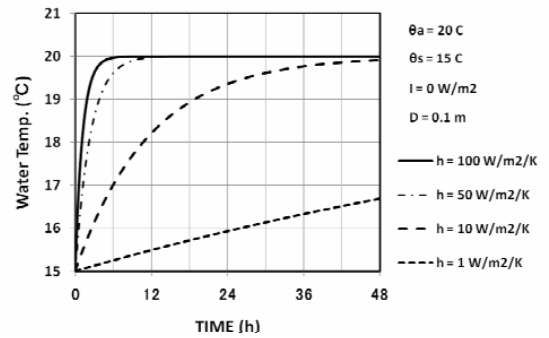


図2 気温が15 から20 に変わったときの水温変化(h による違い)

- 日変動, 年変動は省略。
- 長期変化: 気温の温暖化: 指数関数的上昇の場合
変動部分だけ: $\sigma = 0$, $\varepsilon = 0$, $\gamma = 0$, $\kappa = 0$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\nu(\theta - \theta_a)$$

気温の変動部分: $\theta_a = p \cdot e^{\alpha t}$

境界条件: $x = 0$, $\theta = 0$

初期条件: $t = 0$, $\theta = \theta_0(x)$

$$\theta = \frac{\nu p}{\alpha + \nu} e^{\alpha t} + \left\{ \theta_0(x - Ut) - \frac{\nu p}{\alpha + \nu} \right\} e^{-\nu t}$$

重ね合わせのため、 $\theta_0(x) = 0$ とすると、

$$\theta = \frac{\nu p}{\alpha + \nu} (e^{\alpha t} - e^{-\nu t}) = \frac{1}{1 + \alpha/\nu} \cdot \frac{\beta}{\alpha} e^{\alpha(t-t_0)} \cdot (1 - e^{-\nu(1+\alpha/\nu)t})$$

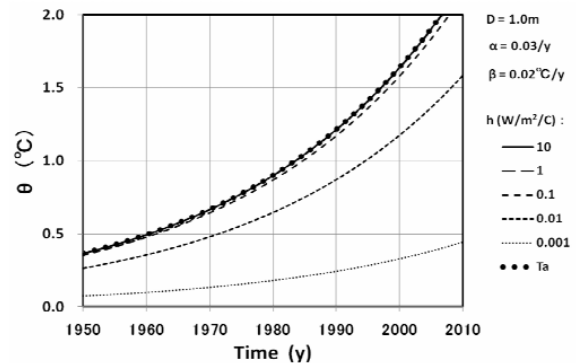


図3 河川水温の温暖化影響の計算(h による違い)

河川水温の長期変化について

普通の熱伝達係数(10 W/m²C程度)では、河川水温の長期変化は気温の温暖化に追従する(図3)。これは河川水温が気温に遅れる実状と異なる。その矛盾は蒸発量の増加によると考えたい。蒸発速度は飽差(飽和比湿と比湿の差)に比例する。狭い温度範囲では飽和比湿は水温に比例的とみなせる。比湿も気温と比例的であるとみなせば、その差にバルク係数を乗じた蒸発効果は熱伝達と同じ形で表せ、熱伝達係数 h を減らす方向である(同じオーダー)。温暖化はみかけの h を減らしているのではなからうか。つまり、顕熱輸送と潜熱輸送の微妙な兼ね合いが河川水温の長期変化に関係しているように見える。