

水温形成に関与する因子および表流水水温の変動解析

○ 東北大学工学部 平田 強

(田) 佐藤 敦久

I. はじめに 水質構成成分の質的変換を行なう主たる素反応は生物・化学的反応であり、これらは反応温度による影響を強く受ける。また、静水域においては水体の安定性を支配する要因の一つはその水体の水温分布(正確には密度分布)であり、水温に基づく水体の挙動により水質の変化過程が転換される。一方、表流水の水温形成には気象因子が大きく関与しており、特に日射量、気温、風速、湿度の四因子の寄与が大きい。本研究はこれらの気象因子と河川水温の日周変動についての知見を得るとともに、表面熱収支に基づく表流水の水温形成について若干の解析的表現を試みたものである。なお、使用したデータは全て釜房湖流域内において得られたものである。

II. 気象因子の変動特性 32日毎の日射量のフーリエ変換により得られた12組(明)のフーリエ係数を平均して求めた年平均フーリエスペクトルを図-1に示す。24, 12時間周期(周期数1, 2 (1/2))成分が卓越し、さらに8時間周期成分も小さいながらもピークとして存在しており、日射量の平均的な日周変化は(4)式において j を最大3として取扱えば、

$$f(t) = A_0 + \sum_{j=1}^3 A_j \cos(j\omega t + \alpha_j) \quad (4)$$

よいとわかる。そこで $j=0 \sim 3$ の各月毎の振巾を図-2、また24時間周期成分の振巾に対する12, 8時間周期成分の比を図-3のようになり、 $j=2, 3$ の成分が日周変化特性の季節変化を追跡し、明確な年周性を示すが、日量に関しては必ずしも明確な年周性は示さない。

気温、風速、湿度については4月の1ヶ月分のデータしか数値化されていないため、データの制約からスペクトルの精度はやや落ちるが、その大略は把握することができる。まず、これら三因子のフーリエスペクトルを図-4~6に示す。24時間以下の短周期成分についてみると、気温では24時間周期性が卓越し、次いで12時間周期性が若干認められるが、風速では卓越する周期成分は認められず、また湿度では24時間周期性が若干認められるものの、その卓越性は小さい。

III. 河川水温の変動特性 河川水温については釜房湖流入河川の前川に設置した水温自動観測装置により得られたデータを1年分について利用でき、日射量の場合と同様に、年平均フーリエスペクトルを図-7、各成分の振巾と振巾比の月別の値をそれぞれ図-8, 9に示す。河川水温の場合も24, 12時間周期成分が卓越した成分として存在するが、それ以外の卓越成分は存在しない。振巾比では冬期に大きく夏季に小さくなる傾向はあるものの、日射量の場合のように明確な年周性は想定できず、また各成分の振巾においては24, 12時間成分は日射量の場合と似たような変化を示すが、定数項においては日射量の場合よりもむしろ河川水温の場合の方が明確な年周性を示すことが注目される。

IV. 表面熱収支による河川水温の形成 水の出入のない単一河川においてその水深を D 、平均流速を v 、流下方向の乱流拡散係数を k とし、時間、場所によらず一定であると、熱の出入は、その水表面のみであるとすると、熱収支式はEuler的表現であれば(2)式となる。

$$\rho \theta \frac{\partial t}{\partial t} + \rho v \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - F(x, t, \theta) = 0 \quad (2)$$

θ : 水温, t : 時間, x : 流下距離, F : 水に加えられる正味の熱エネルギー

F として流域の平均的な値を用いることにより、(3)式で表わされる。

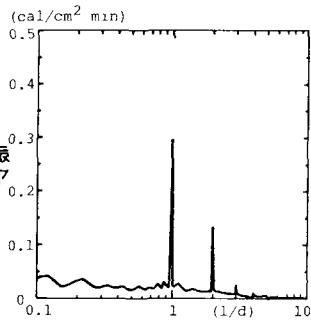


図-1 日射量のフーリエスペクトル

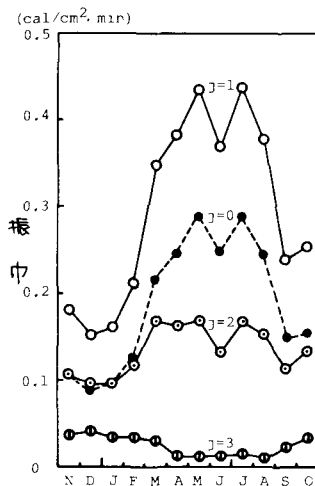


図-2 日射量各成分の月別振巾

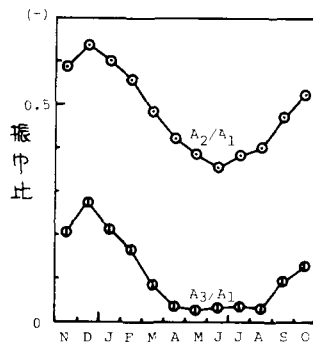


図-3 日射量各成分の月別振巾比

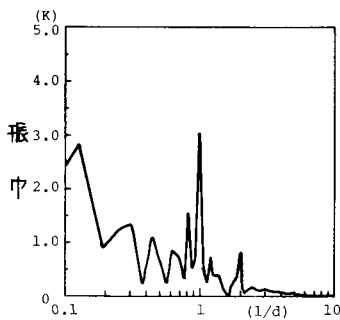


図-4 気温のフーリエスペクトル

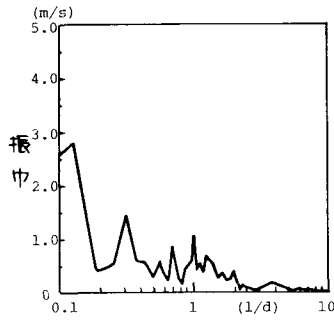


図-5 風速のフーリエスペクトル

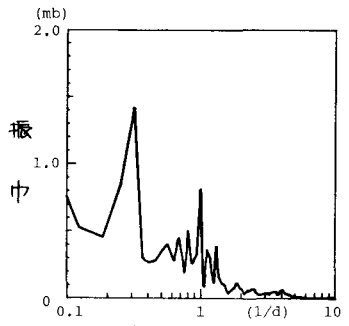


図-6 湿度のフーリエスペクトル

$$F(x, t, \theta) = F(x, \theta) = (1-a)I + R + H + LE \quad \dots \dots (3)$$

a: 反射率, I: 日射量, R: 長波放射, H: 顕熱収支, LE: 潜熱収支

$$= \epsilon \sigma T_e^4, R = \epsilon \sigma f \{ (a_1 + b_1 \bar{e}_a) \theta_a^4 - \theta^4 \}, H = r_1 (\theta_a - \theta), LE = r_2 (e_a - e_w) \quad \dots (4)$$

ϵ : 放射率 (=1.0), σ : Stefan-Boltzmann 定数, f : 長波放射収支に関する雲量係数, a_1, b_1 : 大気放射に関する係数, θ_a : 気温, r_1 : 顕熱伝達係数, r_2 : 潜熱伝達係数, e_a : 大気中の水蒸気圧, e_w : 水温 θ における飽和水蒸気圧

==> II で得られた結果から,

$$\left. \begin{aligned} I &= A_0 + \sum_{j=1}^m A_j \cos(j\omega t + \delta_j), \quad \theta_a = B_0 + \sum_{j=1}^m B_j \cos(j\omega t + \beta_j) \\ e_a &= \bar{e}_a, \quad r_1, r_2 = \text{const} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

とすると、 e は絶対温度の逆数の関数 ($e_w = \exp(b_e - a_e/\theta)$) に近似し、 R と LE について θ の周りで Taylor 展開して一次の項まで近似式を用いると、 $x=0$ で $\theta = \bar{\theta}_0 + \sum_{j=1}^m \theta_{0j} \cos(j\omega t + \delta_j)$ および $x=\infty$ で θ_j は有限値に収束する境界条件で (2) 式を解くと次式 (6) が得られる。

$$\theta(x, t) = \frac{H_3}{H_1} - \left(\frac{H_3}{H_1} - \bar{\theta}_0 \right) \exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) + \sum_{j=1}^m \theta_{0j} \exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \cos\left(j\omega t + \delta_j - \frac{G_2 x}{2}\right) + \sum_{j=1}^m C_j \left\{ 1 - \exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \left(2 \cos\left(\frac{G_2 x}{2}\right) - \exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \cos\left(j\omega t + \delta_j + \phi_j + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= 4\epsilon\sigma f \theta^3 + r_1 + r_2 a_e \exp(b_e - a_e/\theta) / \theta, \quad H_2 = 4\epsilon\sigma f B_0^3 (a_1 + b_1 \bar{e}_a) + r_1, \\ H_3 &= (1-a)A_0 + \epsilon\sigma f \{ (a_1 + b_1 \bar{e}_a) B_0^4 + 3\bar{\theta}^4 \} + r_1 B_0 + r_2 \{ \bar{e}_a - (1 - \frac{a_e}{\theta}) \exp(b_e - a_e/\theta) \}, \\ C_j &= \left[\{ (1-a)A_j^2 + H_2^2 B_j^2 \} / \{ H_1^2 + (C\epsilon\theta j\omega)^2 \} \right]^{\frac{1}{2}}, \\ G_1 &= \nu/k, \quad G_2 = G_1 + 4H_1/kce, \quad G_3 = G_1 - \left\{ G_1^2 + \frac{4H_1^2}{kce} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad G_4 = \left\{ G_2^2 + \frac{4H_1^2}{kce} \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ \delta_j &= -\arctan \left[-\{ (1-a)A_j \sin \delta_j + H_2 B_j \sin \beta_j \} / \{ (1-a)A_j \cos \delta_j + H_2 B_j \cos \beta_j \} \right], \\ \phi_j &= -\arctan \{ C\epsilon\theta j\omega / H_1 \}, \quad \frac{\pi}{2} = -\arctan \left[\exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \sin\left(\frac{G_2 x}{2}\right) / \{ 1 - \exp\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \cos\left(\frac{G_2 x}{2}\right) \} \right] \end{aligned}$$

(6) 式において、右辺第 1, 2 項が平均値、第 3 項が $x=0$ の境界で与えられた振巾の減衰過程、第 4 項が 外的因子 (気象因子による出入) による水温の形成過程を意味し、 x が十分大きいときは水温の易的な変化は消え、移流、拡散項は意味を失くなる。現時点では気象因子のデータが不十分であり、 ν, ϵ, k に関する資料がないため (6) 式による具体的な河川水温の評価はできないが、河川水温のスペクトル解析により得られた 24, 12 時間周期成分の卓越性の定性的裏付けとしては有効であろう。今後 気象データの数値化を進めて (6) 式の有効性の検討を行なうとともに、 ν, ϵ, k を定数として扱うことの問題点について検討が必要であろう。

V. 討議 気象データを提供していた気象庁管理庁のみに依頼せず、本研究の計算は全て東北大学大型計算機センターの ACOS システム NEAC システム 700 を用いて行な

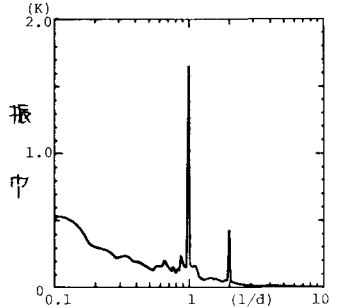


図-7 河川水温のフーリエスペクトル

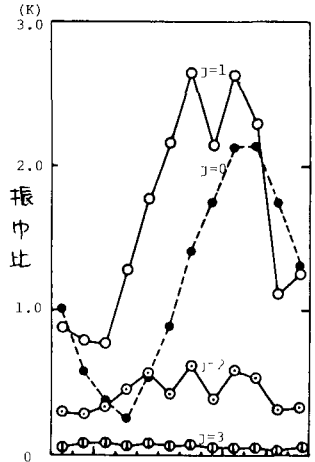


図-8 河川水温各成分の月別振巾比

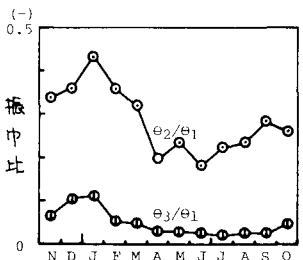


図-9 河川水温各成分の月別振巾比