

(16) 河川水質の日間変動とその解析

東京大学工学部 松尾 友矩

〃 〃 〇味村 立一

〃 〃 三沢 庸助

I はじめに

近年環境汚染問題の深刻化にともない環境保全のための各種の規制策が講じられるようになってきているが、その中において環境監視あるいはモニタリングの占める位置は非常に大きなものがあるといえる。

河川等の水環境についても各行政体はそれぞれにかなり大規模な監視システムを整備してデータの集積・管理を精力的に進めてきている。しかし、それらのシステムの成果が現実の環境保全にとって有効な情報としてフィードバックされているかという点においては必ずしも十分であるとはいえないのが実情である。おそらく、この不十分さは現在の自動監視装置自身が持つ不正確さに由来する部分も大きい、一方においてデータ解析の方法がまだ十分に確立されていなかったり、現象自体に対する認識が不十分だったことによるところも大きいと思われる。

本研究においては以上のような認識のもとに河川水質の変動特性とその変動を支配する要素を整理することをねらいとして次のような検討を行なった。

i) 河川水質における日間変動の特性を定量的に評価すること。

ii) 変動を支配する要素としての日照の影響を調べること。

iii) 水質変化における物理モデル（例えば Streeter-Phelps の式）の係数値を月間平均の値として評価すること。

以下、それらの具体的な作業、結果について報告する。

II データと解析方法

ここで使用したデータは東京都公害局水質汚濁常時監視センターによる時間ごとの自動観測データである。表-1、図-1に測定地点、測定月日の一覧を示す。測定項目は水温、pH、DO、濁度、塩素イオン、電導度の6項目である。データは20秒に一度プロットのチャートと10分毎に中央局に送られそれを1時間平均した毎時データの2種であるが、メンテナンスや送信回路の混乱によりチャート読みとくい違ふところはチャート読みを正しい値として補正した。

解析には以下の2つの方法を用いた。

i) 自己相関関数、パワースペクトル密度関数

自己相関関数、コログラム、パワースペクトル密度関数は $x(t)$ を時系列データとしてそれぞれ式-1、式-2、式-3で定義

される。パワースペクトル密度関数の諸性質を述べると、 $x(t)$ が周期 $T=1/f_0$ を持つとき、 $G(f)$ は $f=f_0$ でピークを持ち、 $x(t)$ がランダムな変動をする場合、 f によらずほぼ同じ値をとり、きわだったピークは存在せず、 $x=at$ のように x がリニアートレンドを持つとき、 $f=0$ でピークが出現する。

測定地点	期 間	日数	類型
野川 (1)	S.50 8/1-8/31	31	D
	S.51 2/1-2/29	29	
	S.51 3/1-3/31	31	
野川 (2)	S.51 3/1-3/31	28	D
和田橋	S.50 8/1-8/15	15	AA
	S.51 3/5-3/31	27	
羽 村	S.50 8/1-8/16	16	A
	S.51 2/1-2/29	29	
秋 川	S.50 8/1-8/22	22	A
	S.51 2/1-2/21	21	
浅 川	S.50 8/1-8/21	21	B
	S.51 2/1-2/29	29	

表-1 測定地点・測定月日

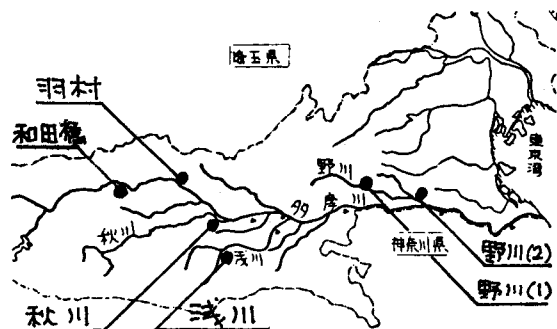


図-1 測定地点図

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

$$C(\tau) = R(\tau)/R(0) \quad (2)$$

$$G(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \quad (3)$$

ii) 相互相関関数、クロススペクトル密度関数

相互相関関数およびクロススペクトル密度関数はそれぞれ式-4、式-5で定義される。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (4)$$

$$G_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (5)$$

$G_{xy}(f)$ は直交する2成分から成り、2成分間の合成ベクトルと実数軸との角を θ_{xy} とすると任意の周波数 f に対して入出力系の時間おくれ T を

$T = \theta_{xy}(f) / 2\pi f$ で求めることができる。

また2変数間に周期 $T = 1/f_0$ で相関があれば、

$|G_{xy}(f)|$ は $f = f_0$ でピークを持つ。

河川における水質は流量と負荷量によって支配されるものであるが、周辺の生活に直接的に影響を与えるのは水質を通してである。与えられたデータが水質だけだったこともあるが、ここではまず水質に現われる現象に限って解析を進める。

III 変動特性の検討

i) 各水質指標の示す日間変動について

各水質項目の原変動はその一例が図-2に示される。これらの原変動に対してコレログラムとパワースペクトル密度関数を計算した結果はそれぞれ図-3、4及び図5、6で示される。

自己相関関数の減衰のしかた及びパワースペクトル密度関数のピークの現われ方を参考にして水質変動のタイプを ①持続型(周波数の小さい付近にピークを持ち自己相関関数が長期にわたって尾を引いていくもの) ②周期型(明確な24時間の周期をもつもの) ③ランダム型(パワースペクトル密度関数におけるピークの幅が広く、自己相関関数が急速に減衰していくもの)に分類した。

各測定地点、水質項目ごとの支配的な変動の特性は表-2のようにまとめられる。

季節、地点を問わず水温、pH、DOは日間での変動(24時間の周期をもつ変動)が卓越していることがわかる。それに対して濁度、塩素イオン、電導度は周期的というより持続的ないしはランダム変動をしていることがわかる。

このことは周期性の強い指標については、例えば環境基準への合否を調べる場合のようにデータの統計的な一様性の確保がより望まれるときには、季節的なこと、天候による影響などの他に採水時刻にまでも注意を払うことが必要であることを示している。

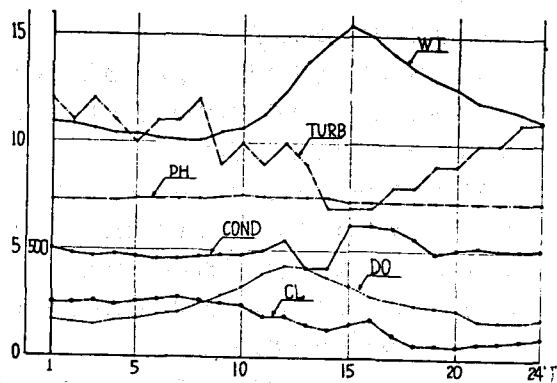


図-2 原変動

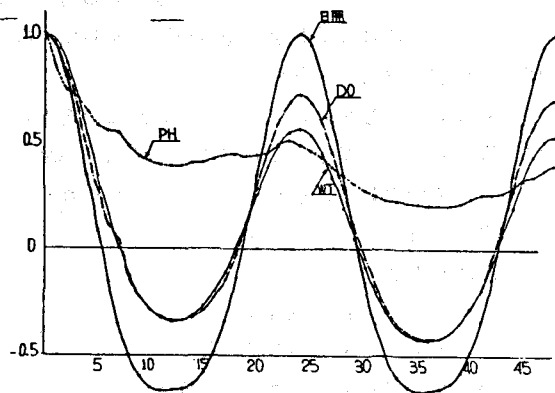


図-3 コレログラム(野川(1)3月)

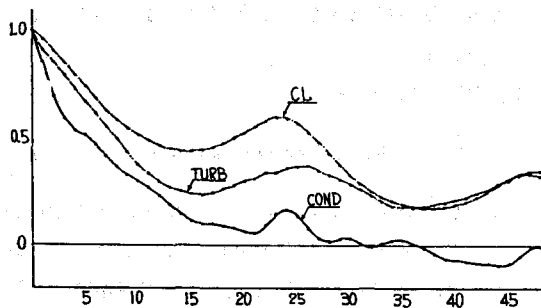


図-4 コレログラム(野川(1)3月)

Ⅱ) 12時間周期の変動について

24時間の周期をもつ水温、pH、DOは図-5に示されるように次に卓越する周期成分として12時間の周期成分を持つことがわかる。

潮汐の影響の全く考えられない河川水質におけるこの12時間周期の変動が現われる原因については発生源等における人為的な原因があるのではないかと考えられたが、一般的にいて人間生活の中には12時間の周期を持つ活動は考えにくい。

そこで、河川水質の変動に関係がありそうな変動パターンをとり出してその中の24時間周期成分の持つパワースペクトル値と12時間周期成分の持つパワースペクトル値の比(R値)を求め河川水質における値との比較を行なってみた。

検討の対象とした変動パターンは、昼と夜を1、0で区別するような矩形波と日照量を示す太陽高度を定式化した変動の2つとした。それらはそれぞれ次のように定式化される。

① 矩形波の変動

$$x(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t < 12 \\ 0 & 12 \leq t < 24 \end{cases} \quad (6)$$

このときのパワースペクトル密度は

$$S(n) = \frac{A^2}{24} \left(\frac{1}{16} + \frac{1}{\pi^2 (2n-1)^2} \right)$$

よってR値は $R = S(2) / S(1) = 0.45$ として求められる。

② 太陽高度の変動

$$\sin h = \sin \phi \sin \rho + \cos \phi \cos \rho \cos \omega t \quad (7)$$

ただし ϕ ; 緯度、 ρ ; 赤緯、 t ; 時間、 h ; 太陽高度
 ω ; $2\pi / 24$ 、として $h = 0$ になる $t = t_1$ 、 t_2 が日の出、日没の時刻に相当する。したがって見かけの日照の時間変化は次のように定式化される。

$$x(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_1 \\ \cos \phi \cos \rho \cos \omega t + \sin \phi \sin \rho & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & t_2 < t \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

この変動のパワースペクトル値を計算した結果(3月について)は図-4に合わせて示してある。この変動におけるR値は2月; 0.26、3月; 0.19、8月; 0.11である。

各河川での水温、pH、DOの測定値からR値を表-3に示す。

この結果だけからでは明確な結論は述べられないが、野川流域でのR値は日照のR値ときわめて似ているのに対して、その他の地点では一般に小さくなっていることが注目される。(浅川の8月のpHについては

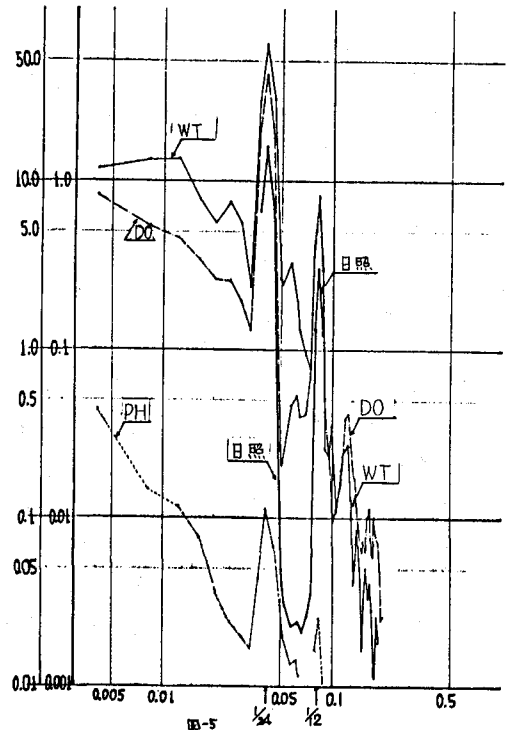


図-5 パワースペクトル密度関数(野川(1)3月)

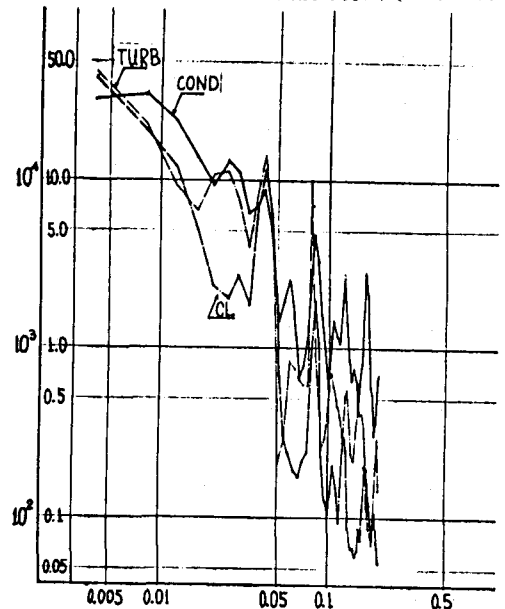


図-6 パワースペクトル密度関数(野川(1)3月)

検討していないが)

R値は平らななべ底型の変動パターンが現われるとともに大きくなり正弦(余弦)形の変動パターンに近づくにつれて小さくなる傾向を持っている。

この変動パターンが河川流域のいかなる特性によってもたらされるのかは明らかでないが、野川は多摩川流域にあっても下流の平野部を流れる汚染の進んだ都市内河川であるのに対してその他は上流部の山間を流れる比較的清浄な流れの地点であるということは注意しておくべきことと思われる。

ここにとりあげた指標の持つ特性によるところも大きいのであろうが河川の流況、汚染、富栄養化の進行、及び日照の変動は観測される水質の変動に対して重要な関係を持っていることがわかる。

VI 物理モデルとの対応

河川の水質の日間変動を支配するものとして日照が大きな影響をもつがここでは相対的な理論日照量に式-8を適用して、水温、pH、DOとの関連について解析を行なった。

i) 日照-D Oの位相位について

物理モデルとしてStreeter Phelpsの式をJ. M. Schurr^{*}らの研究を参考にして変形し解析に用いた。DO不足量変化は大気からの再ばっ気と水中の有機物による酸素消費、光合成による酸素生成より成り、流れ方向に定常状態であると仮定する。また光合成による酸素生成は日照強さに比例するとした。DO不足量の変化は式-9の微分方程式で表わされる。

$D = O_s - O$ (O_s = 飽和DO量、 O = DO量) を式-9に代入し、 I 、 O を一定部分と変動部分に分け、 $I = \langle I \rangle + \Delta I(t)$ 、 $O = \langle O \rangle + \Delta O(t)$ 、 $k_1 C$ を一定とおくと式-10、式-11が得られる。

$$\frac{dD}{dt} = -k_2 D + k_1 C - \alpha I \quad (9)$$

D : DO不足量 k_1 : 呼吸係数
 C : BOD k_2 : 再ばっ気係数
 I : 日照量 α : 光合成係数

$$k_2 \langle O \rangle = k_2 O_s - C k_1 + \alpha I \quad (10)$$

$$\frac{d\Delta O}{dt} = -k_2 \Delta O + \alpha \Delta I \quad (11)$$

理論日照量を $J(t)$ として平均的な不透過率を $\langle R \rangle$ とすると $I(t) = (1 - \langle R \rangle) J(t)$ であり、また $J(t)$ をフーリエ級数で近似すると式-12のようになる。

$$J(t) = J_0 + \sum_{n=1}^N J_n \cos(\Omega_n t), \quad \Omega_n = 2\pi n/24 \quad (12)$$

式-11に式-12を代入して式-13を得て、それを解けば式-14、15、16を得る。

	水 温		pH		DO		溶 度		塩素イオン		電 導 度	
	測定値	標準値	測定値	標準値	測定値	標準値	測定値	標準値	測定値	標準値	測定値	標準値
野川(山)	○	○			○	○			○	○		○
3月	○				○		○	○		○		○
8月	○				○	○				○		○
野川(山)	○				○					○		○
和田橋	○				○	○		○	○		○	○
8月	○				○	○		○	○		○	○
羽村	○	○			○	○		○	○		○	○
8月	○				○	○		○	○		○	○
秋川	○	○				○		○	○		○	○
8月	○				○	○		○	○		○	○
浅川	○				○	○		○	○		○	○
8月	○				○	○		○	○		○	○

表-2 変動支配因子一覧

	水温	pH	DO
野川(1) 2月	0.230	0.188	0.246
3月	0.131	0.228	0.172
8月	0.081	0.138	0.125
野川(2) 3月	0.130	0.167	0.235
和田橋 3月	0.221	0.094	0.065
8月	0.123	0.020	0.074
羽村 2月	0.093	0.072	0.106
8月	0.063	0.002	0.042
秋川 2月	0.152	0.038	0.081
8月	0.084	0.012	0.018
浅川 2月	0.184	0.222	0.033
8月	0.128	0.638	0.090

表-3 R値一覧

$$\frac{d\Delta O}{dt} = -k_2 \Delta O + \alpha (1 - \langle R \rangle) \sum_{n=1}^N J_n \cos(\Omega_n t) \quad (13) \quad \hat{A}_n = \alpha (1 - \langle R \rangle) / \sqrt{\Omega_n^2 + k_2^2} \quad (15)$$

$$\Delta O = \sum_{n=1}^N \hat{A}_n \cos \Omega_n (t - T_n) \quad (14) \quad T_n = 1 / \Omega_n \tan^{-1} (\Omega_n / k_2) \quad (16)$$

次に自己相関関数を計算すると式-17となり、 $G_{xy}(f)$ を求めると、 $f = \Omega_n / 2\pi$ のときは解けて式-18を得る。 S_n を $|G_{xy}(\Omega_n / 2\pi)|/2$ とすると、 $\hat{A}_n$ は式-19で求められる。

$$R(\tau) = \sum_{n=1}^N \frac{J_n \hat{A}_n}{2} \cos((T_n - \tau) \Omega_n) \quad (17) \quad G_{xy}(\Omega_n / 2\pi) = 2 J_n \hat{A}_n (\cos T_n \Omega_n + j \sin T_n \Omega_n) \quad (18)$$

$$\hat{A}_n = S_n / J_n \quad (19)$$

T_n はクロススペクトル密度関数の性質から直接求められ、 T_n 、 $\hat{A}_n$ が判明すれば式-15、16から k_2 、 $\alpha(1 - \langle R \rangle)$ が決まり、式-10より $k_1 C$ が求められる。 S_n 値を見ると24時間周期($n=1$)での相関が卓越している所以以下の議論では $n=1$ について計算した値を比較する。

理論日照量のフーリエ係数は $J_1 = 0.323$ (2月)、 0.401 (3月)、 0.488 (8月)となった。

計算した k_2 、 $k_1 C$ 、 $\alpha(1 - \langle R \rangle)$ について表-4に示した。

計算した k_2 はChurchillや村上等が求めている実測値とオーダー的にも近く物理的意味を満足しているといえる。まず k_2 の季節変化を見るならば羽村、浅川、秋川では夏の方が大きく冬小さく、あるものは負になっている。モデルで k_2 が負になることは考えにくい、光合成による酸素生成と考え合わせて、光合成でできた酸素が水中に溶けきれずに大気に放散された分が再び気係数を負にしていると考えれば、なお問題は残るが、一応の説明はつくことになる。特に和田橋の8月では大きな負値をとっているが、これは小河内ダムの影響で河川水はすでに酸素過飽和になっていたため大気中への放散がより大きくなっていたためである。

一般に再び気係数は流速と水深に大きく支配されるが、夏に大きく冬に小さいという傾向は多摩川流域における流量の夏冬での変化を考えれば定性的には k_2 値の変化は流量の変化に対応しているといえる。しかし、平野部を流れ汚染河川でもある野川が最大の k_2 値を与えることについては流量等に関する試料の不十分さもあり、説明は不十分なままに残される。

次に、光合成速度 $\alpha(1 - \langle R \rangle)$ と平均的な呼吸速度 $k_1 C$ の季節変化を見ると羽村、和田橋、浅川、秋川とも、光合成速度、呼吸速度ともに夏の方が大きい。水温上昇で生物の働きが活発になり生物量が増加したため光合成も盛んになりまた呼吸量も多くなったと思われる。

野川では他の地点に比べて光合成速度、呼吸量とも大きい。これは栄養物が多く生物量が多いためと推定される。しかし季節変化を見ると3月の方が8月よりも大きく、これだけのデータから確定的なことは言えないが水温による生物量増加よりも栄養物による生物量増加が大きくいっていると思われる。特に平均水温を比べても野川では最低の2月でも10℃以上あり生物の生育を阻害する程水温が下がらないため高レベルの呼吸量を維持すると考えられる。

ここに求めてきた k_2 値、光合成量、呼吸速度などが一定程度河川に起きている現象を説明しうることが示されている。そしてこれら各数値はそれぞれ月平均的な意味を持つものであることを考えれば水質予測

	T_1 (hour)	k_2 (1/hour)	S_1 (O_2)	$\alpha(1-\langle R \rangle)$ (O_2 /hour 日照量)	$k_1 C$ (O_2 /hour)
野川(1) 2月	-0.252	-3.963	12.095	148.72	117.02
3月	0.348	2.866	24.988	179.34	188.26
8月	0.852	1.154	29.226	83.86	92.42
野川(2) 3月	0.216	4.625	23.904	276.14	313.14
和田橋 3月	3.336	0.219	6.406	5.45	17.62
8月	-0.288	-3.467	8.222	58.58	54.42
羽村 2月	6.144	-0.010	3.585	1.24	1.23
8月	0.480	2.070	15.394	65.82	65.44
秋川 2月	6.180	0.515	8.859	7.19	7.18
8月	1.932	0.161	12.953	14.34	14.15
浅川 2月	-1.160	-0.870	7.183	20.07	17.37
8月	1.128	0.861	36.329	72.98	75.91

表-4 k_2 、 $k_1 C$ 値

等における諸特性値の推定値としては非常に大きな意味を持つのではないかと期待される。

ii) 日照-水温の位相差

日照-水温の位相差を表-5に示す。結果を見ると地点によらず同程度の位相差を持ちかつ夏と冬での差があることが注目される。そこでこの位相差の定性的な関係を調べる意味で、以下のようなモデルを考えてみた。

水面から単位水柱に与えられる熱量は $H_s = S + L + V$ で表わされる。^{*}ただし、 S : 正味放射量、 L : 顕熱伝達量、 V : 潜熱伝達量。各々は式-20 ~ 22 で表わされ、水深を単位水深とし、気温は日照よりも約 $\pi/4$ 遅れて正弦波で変化すると仮定して、微分方程式を作成し解けば式-23の如くとなる。

$$S = (1-A) I_0 + R_N \quad (20) \quad \begin{array}{l} A: \text{反射率} \quad I_0: \text{日照量} \quad R_N: \text{正味の長} \\ \text{波放射量} \quad h: \text{伝達係数} \quad \theta_a: \text{気温} \end{array}$$
$$L = h(\theta_a - T) \quad (21) \quad \begin{array}{l} T: \text{水温} \quad e_a: \text{空気中の水蒸気量} \end{array}$$
$$V = k(e_a - e_s) \quad (22) \quad e_s: \text{表面水温に対する飽和水蒸気量}$$

$$T = e^{-(h+ak)t} \left[(h+ak) \int (1-A) \sum_{n=0}^N J_n \cos n\omega t e^{k't} + (R_N - kh) e^{k't} + Bh \cos(\omega t - \phi) e^{k't} + k e_a(t) e^{k't} dt + C \right] \quad (23)$$
$$\therefore k' = h + ak$$

これを $A(t)$ 、 B は1ヶ月位の間ではほぼ一定として、周期成分だけを抽出すれば式-24となる。

$$T_{\text{cycle } 24} = k \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + k^2}} \left[\alpha J_1 \cos(\omega t - \theta) + Bh \cos(\omega t - \theta - \phi) \right] \quad (24)$$

位相差 θ は季節に関係なく、 θ' が季節変動することが式-25で示されている。

$$\frac{1}{\tan \theta'} = \frac{1}{\tan \phi} + \frac{\alpha J_1}{Bh \sin \phi} \quad (25)$$

α は夏太陽高度が高くなるため増加するし J_1 も先に述べたように夏増加する。気温振幅 B も夏増加するが J_1 の増加率をこえないので、このモデルは定性的には水温の位相差を説明している。モデルに汚濁因子は含まれていないが結果からも野川とその他の河川との差異は認められなかった。ただ和田橋は小河内ダムの影響で流れ方向の定常状態が達成されない等の原因で夏の方が位相差が大きくなったのではないだろうか。

iii) 日照-pHの位相差

日照-pHの位相差については検討を行っていないが、結果だけを表-5に合わせて示した。

仮定の多い定性的な解析になってしまっているが、常時観測されているデータの中には思わぬ程多くの情報が含まれている(可能性がある)ということは確実であり今後の解析がさらに必要であろう。最後に心よくデータを提供していただいた東京都公害局の宮本氏にお礼の言葉を申し上げます。

[参考文献] ① Schurr, J.M. and Ruchti, J. 「Dynamics of O_2 and CO_2 exchange, photosynthesis, and respiration in rivers from time-delayed correlations with ideal sunlight」 *Limnology and Oceanography*, vol.22, March, 1977, PP208~225

② 水資源ハンドブック(昭和41年) PP.86~87 朝倉書店

	TWT (時間)	TpH (時間)
野川(1) 2月	4.72	-2.22
3月	4.55	-1.39
8月	3.76	1.08
野川(2) 3月	5.14	4.22
和田橋 3月	2.72	2.47
8月	3.78	-1.03
羽村 2月	5.64	3.50
8月	4.54	2.68
秋川 2月	5.86	4.33
8月	5.10	3.24
浅川 2月	5.27	4.30
8月	3.96	3.00

表-5
水温-日照、pH-日照の位相差