

水質水理の基礎

住 友 恒

1. 水質水理という用語について

水質水理という用語は未だ世に定着していない。環境の汚染等水質問題を工学的に解析する際に、従来水理学で扱われてきたパラメータを活用すればこれが水質水理であろうと漠然と理解することも少なくない。いいかえれば、従来水理学と水質学でそれぞれ別個に取り扱われてきた科学が環境とか水処理装置内という場で同時に活用されるとき、その境界領域的な範囲を水質水理と理解することも可能であろう。しかしこれは決して目新しいものではなく、従来から物質移動 (Mass Transfer) 現象として拡散理論を中心に多くの分野で研究が重ねられてきたものである。特に化学工学分野では装置内の局所的な諸現象を説明するために、その基礎原理から設計用の取り扱い方法までかなり確立された理論も少なくない。ただ最大の相違点は取り上げる現象の場が水理学のそれと同様に環境などきわめて広範に及ぶ場が多いことであろう。したがって基本原理はほとんど同じであっても、その活用法がかなり独自なものとなってくる。いいかえれば基本原理を表わす基礎式の平均化の程度、境界条件、初期条件の取り扱い方が独自なものとなる。さらに対象とする水質指標が汚染指標として独得のものであることも多く、その計測法も関連して要求される平均化の程度なども異ってくる。汚染指標に関連すれば水質水理をさらにつぎの三つに大別するのが好都合である。1) 溶解性の水質指標の挙動に関するもの、2) 浮遊性の水質指標の挙動に関するもの、3) 泥状物質の挙動に関するもの。すなわち、流体に追従して移動するもの、流体の移動と若干異なった移動をしたり、流体の移動に若干の影響を及ぼすもの、および流動を支配するものである。1) については拡散論として、2) については混相流として水理学で研究されているが、流砂の問題をも含めて筆者は今後これらすべてを水質水理と呼んでもよいのではないかと期待している。ところで、環境の汚染問題とも関連して水質水理上の研究としてたとえばつぎのような問題をあげることができる。筆者らはびわ湖南湖における水銀汚染の実測をくり返してきたが、水中濃度が湖水中の浮遊物質 (SS) と密接な相関があることを認めた。すなわち、湖面に吹く風が局所的な循環流や短絡流を発生し、底泥のまき上げを誘発し、SS 量を増大している。後にも示すように水理学的な検討と水質物質の吸着に関する考察がはじめて現象の説明を可能にしている。湖の富栄養化についても同様に流動と水質値、動・植物プランクトンの相関を検討してはじめて現象に接近できるようである。水処理装置内の諸現象のみならず、上例のような汚染解析にも水質水理の重要性が高くなりつつある現状を考え、特に重要と考える基本的事項について以下簡単にまとめ、さらに筆者らの研究のうち関連するいくつかを事例として紹介し、御批判に供したい。

2. 水質物質の挙動に関する基礎事項

2-1) 水質流動の概要

水流では表-1にまとめるように、層流下で運動量に関連してせん断応力にニュートン則が成立するのに対し、物質流については一般に拡散に関するフィックの法則が成立するものと知られている。したがって流れに伴う物質移動量 J は一次元の場合流速 u を用いて

表-1 水質物質の拡散

	条 件	拡 散 因 子
層 流	$R_e < 10^{-3}$	分子拡散 (フィックの法則)
	$R_e < 500$	分子拡散と 流速分布に基づく分散
乱 流	$R_e > 1500$	乱流拡散と 流速分布に基づく分散

次式で表わされる。

$$j = -D_m \frac{\partial c}{\partial x} + u c \dots\dots\dots(1)$$

一方、乱流下では水分子、物質分子ともに以下に示す乱流渦に支配され、そこでの物質移動量はレイノルズ相似によって運動量輸送と物質輸送が類似とみなされ、一次元の場合つぎのように表わすのが一般的である。

$$j \cong -D_t \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{u} \bar{c} \dots\dots\dots(2)$$

ここで D_t は先の分子拡散係数 D_m と異なり渦拡散係数あるいは乱流拡散係数と呼ばれる。 $\bar{u}$ 、 $\bar{c}$ は流速、濃度の時間平均値である。すなわち、一般の乱流は図-1のように大小さまざまな渦からなり、この渦が水質物質の挙動を支配する。大きい渦は水質物質をとり込んで動くため水質を混合し、壁面近傍の小さい渦は流路床の泥状の水質物質をもとり込むことがあり、その浮上等を支配する。しかもこれらの渦は流速分布や流体中でのエネルギー消費量と密接な関係にあることが知られている。したがって、水質物質の挙動特性は流速はもとより上記などの水理因子との関連を無視して記述することはできない。ここで最大の問題は水質物質の挙動をいかなる精度で記述するかであり、局所的な挙動に言及する場合は層流の場合、水質物質自体の分子拡散係数、乱流の場合渦の特性との関連で記述されるものであり、流下方向の水質の分散の程度をとり上げる場合などは流速分布特性で記述する方が有効となるなどの点である。

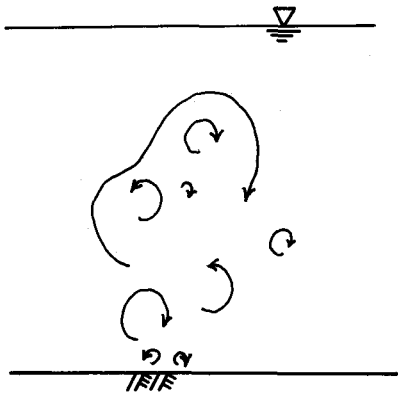


図-1 開水路における乱れ渦の概念図

2-2) 乱流渦と水質物質の拡散¹⁾

図-1のような流れで、壁面や水面から離れた流れの中心部ではあらゆる方向に均質な渦が発達しているものと考えられ、等方性の乱流と呼ばれている。そこでの渦は一定のスケール(λ_0)より大きい場合、水の粘性の影響を受けず、渦のスケール λ とエネルギー消費量 ε のみに支配されてる渦の代表的な速度 v_λ が決定されるという。したがって、次元解析より次式が得られている。

$$v_\lambda = \alpha_1 (\varepsilon \cdot \lambda / \rho)^{1/3} \quad , \quad \lambda > \lambda_0 \dots\dots\dots(4)$$

ここで α_1 は比例定数で、上記 λ_0 はマイクロスケールと呼ばれ、粘性の影響を受けはじめる状態として、レイノルズ数が 1.0 となる条件より次式のように定められている。

$$\lambda_0 = (\nu^3 \rho / \varepsilon)^{1/4} \dots\dots\dots(5)$$

λ が λ_0 より小さい渦については粘性の影響を強く受け、他の渦との相互作用はなくなり、渦のスケールに応じて次式のように比例的に減衰してゆくものと考えられている。

$$v_\lambda = \alpha_2 \cdot v_{\lambda_0} \cdot (\lambda / \lambda_0) = \alpha_2 \lambda (v_{\lambda_0} / \lambda_0) = \alpha_2 \lambda (\lambda / T_{\lambda_0}) \dots\dots\dots(6)$$

ここで α_2 は比例定数で、 T_{λ_0} は λ_0 の渦の特性を表わす時間で、レイノルズ数が 1.0 という条件 ($v_{\lambda_0} \cdot \lambda_0 /$

$\nu = 1.0$) よりつぎの関係がある。

$$T_{\lambda_0} = \lambda_0 / \nu_{\lambda_0} = \lambda_0^2 / \nu = (\nu \rho / \epsilon)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

上式より式(6)はつぎのようになる。

$$\nu_\lambda = \alpha_2 (\lambda / T_{\lambda_0}) = \alpha_2 (\epsilon / \mu)^{1/2} \cdot \lambda, \quad \lambda < \lambda_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中の ρ は水の密度, ν は水の動粘性係数を表わす。

以上のように渦の流動特性を表示することができれば水質物質の混合程度を表わす拡散係数 D_λ や浮遊性の水質物質に働きかける渦の力に関連する渦の加速度 α_λ などは次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} D_\lambda &= \beta_1 \nu_\lambda \cdot \lambda \\ \alpha_\lambda &= d\nu_\lambda / dt \sim \nu_\lambda / T_\lambda = \nu_\lambda^2 / \lambda \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ところで, スケール λ の渦が消費するエネルギー ϵ_λ は次式のように表わされるという。

$$\epsilon_\lambda \sim \nu_\lambda^3 / \lambda \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(9)の ν_λ に上式を代入して次式をえる。

$$D_\lambda = \beta_2 \cdot \epsilon_\lambda^{1/3} \cdot \lambda^{4/3} \quad \dots\dots\dots(11)$$

卓越する代表的な渦について考えれば, 拡散係数がスケールの $4/3$ 乗に比例することを表わし, この $4/3$ 乗則はリチャードソン則として知られている。

2-3) 乱流渦と浮遊物質の関係¹⁾

水質物質としては溶解性のみならず, 浮遊性の物質もきわめて重要となることが多い。そして乱流中に浮遊する微細な単一粒子の挙動は次式で表わされる。

$$\rho_p V_p \frac{dv_p}{dt} = \rho V_p \frac{dv}{dt} + C_u \rho V_p \left(\frac{dv}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) + F_d + F_e \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで ρ , V , v は密度, 体積, 速度で, サフィックス p は粒子を指し, サフィックスのないものは流体のそれぞれを指す。 C_u は仮想質量係数を表わし, F_d は抵抗力, F_e は外力を表わし, F_d についてはたとえば慣性小領域の場合次式で表わされる。

$$F_d = k_f \rho S u^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし, u は相対速度 ($u = v - v_p$) で, S は粒子の表面積, k_f は比例定数。

比較的強い乱流中での軽い微細な粒子について考えれば外力項を無視することができ, 式(12)は次式のようになる。

$$\rho_p V_p \frac{du}{dt} = (\rho_p - \rho) V_p \frac{dv}{dt} - k_f \rho S u^2 - C_u \rho V_p \frac{du}{dt} \quad \dots\dots\dots(14)$$

粒子の存在で渦の特性が変化しないものとみなしうるとき, つぎのように取り扱うことができる。

$$\left. \begin{aligned} v &= v_\lambda, \quad d\nu_\lambda / dt \cong \nu_\lambda / T_\lambda = \nu_\lambda^2 / \lambda = (\epsilon \lambda)^{2/3} / \lambda \\ du / dt &\cong u / T_\lambda = u^2 / \lambda \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

上式を式(14)に代入し, u について整理すれば, 粒子と渦の相対速度を求めることができる。

$$u = \frac{[(\rho_p - \rho) V_p]^{1/2} (\varepsilon/\lambda)^{1/3}}{[(\rho_p + C_u \cdot \rho) V_p + k_f \rho S \lambda]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ところで、水質の変化を知る上で、浮遊粒子の合一や破壊現象は重要で、粒子数の変化を支配する。この破壊に関与する流体力としては式(13)の表面力や次式で表わされる粒子表面に働く動圧力 F_p などに注目する必要がある。

$$F_p = k \rho u^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

k は比例定数。

また粒子の乱れ渦による拡散は式(16)で、 $\rho_p - \rho \cong 0$ とみなしうるとき、 $u = 0$ で乱れ渦と同様に拡散し、一般には粒子の流体運動への応答性の減少とともに拡散係数は小さくなってゆく²⁾。濁度やSSなど一般の水質問題で対象となるSSに関連する粒状物質の拡散係数としては近似的に粒状物質の存在しない場合の拡散係数と等しいものとみなすことが多い。ただ今後はさらに検討してゆく必要がある。なお、乱れの少ない重力場での定常運動としては式(12)の F_d と F_e 以外の項は無視されて、ストークスなどの終末沈降速度がえられることがよく知られている。

2-4) 境界面での水質物質の拡散

流体は流下の過程で水面や壁面など境界面で物質を交換したり、浮遊中の粒子がその表面で溶解性物質を吸着したりなどする。一例として固体表面での水質物質の移動に注目すれば、そこでは図-2に示すように、流体が乱流であっても境界面の近傍では流体が境界面の影響を受け特異な流れとなっている。 $y < \delta$ の領域では乱れ渦は消滅し、単位時間、単位面積当りの物質移動量を j と表わせればこれは次式のように一定量の分子拡散のみとなる。

$$j = -D_m \frac{dc}{dy} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$d > y > \delta$ についてはそこでの乱流拡散係数 D_t を対数分布則を示す流速 u から次式のように表わすことができる³⁾。

$$D_t = \beta_0 y^2 du/dy, \quad u = (u_* \sqrt{\alpha}) \ln(u_* y / \alpha \nu) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$j = -D_t \cdot dc/dy = -\beta u_* y dc/dy \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 β_0 、 β 、 α は比例定数。

$y = \delta$ で式(18)と式(20)の両濃度値は等しいところからつぎの条件をえる。ただし、 c_0 は主流の一定濃度値。

$$\frac{j}{\beta u_*} \ln \left(\frac{\delta}{d} \right) - c_0 = \frac{j}{D_m} \delta \quad \dots\dots\dots (21)$$

上式より、境界面での物質移動量は次式のように u_* など水理因子に制約されたものとなることがわかる。

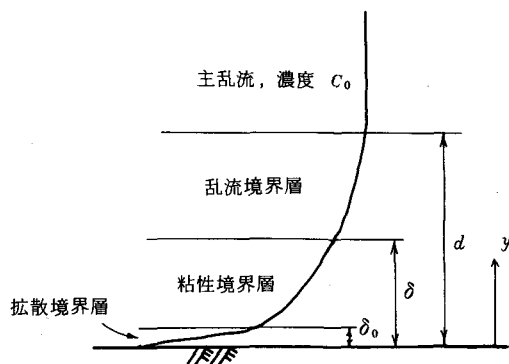


図-2 壁面近傍の流れの概念図

$$j = \frac{-D_m c_0}{\delta - \frac{D_m}{\beta u_*} \ln(\delta/d)} \quad \dots\dots\dots (22)$$

同様に、浮遊粒子への水質物質の拡散についても図-3に示すような境界層が発達する場合などは、その粒子表面への拡散物質量が次式のように表わされることが示されているので、¹⁾ 水理因子の影響を受けることが十分考えられる。

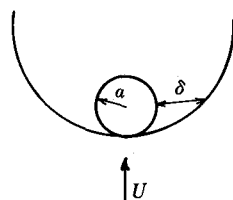
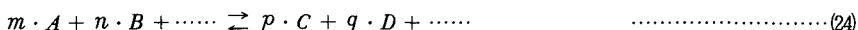


図-3 粒子周辺流の概念図

$$m = \int j dS = 7.98 c_0 D_m^{3/4} U^{1/4} a^{3/4} \quad \dots\dots\dots (23)$$

2-5) 水質物質の反応速度

水質を構成する物質 $A, B, \dots\dots\dots$ が存在し、それらの反応によって $C, D, \dots\dots\dots$ が生成される場合すなわち次式が成立する場合について、少し厳密性を欠くが、簡単に考えてみる。



ここで m, n, p, q は分子数を表わす。

質量作用の法則より反応速度たとえば A の濃度 c_A の変化は次式で表わされる。

$$\frac{dc_A}{dt} = -k_1 c_A^m c_B^n \dots\dots\dots + k_2 c_C^p c_D^q \dots\dots\dots \quad \dots\dots\dots (25)$$

さらに簡単な場合として、 $A + B \rightarrow C$ の場合、次式をえる。

$$\frac{dc_A}{dt} = -k_1 c_A c_B \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここで、 k_1, k_2 は反応速度定数で、化学の分野では分子の持つエネルギー量によってきまる定数として取り扱われ、温度条件などに支配されるものと考えられている。式(26)で、物質 B の存在量がきわめて多いときなどはほぼ定数とみなしうるとき、 c_A の変化量はそこに存在する c_A の濃度に比例することになり、これが一次反応と呼ばれる。

また、濃度 c のある物質が固体表面に吸着・脱着されるとき、それぞれの速度は次式で表わされる。

$$\frac{dA}{dt} = k'_a (1 - \theta) c, \quad \frac{dD}{dt} = k'_b \theta \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 A, D はそれぞれ吸着量、脱着量で、 k'_a, k'_b は一定温度における吸着、脱着の速度定数、 θ は吸着体表面のうち吸着可能スペースの充足率である。上式を統一的に次式で表示することもできる。

$$\frac{dc}{dt} = k_a (1 - \theta) c - k_b \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (28)$$

吸着と脱着が平衡に達しているとき、上式で $dc_A/dt = 0$ から θ と c の関係をえ(この場合ラングミュアの式という)、濃度と吸着体の単位表面積当りの平衡吸着量の関係を与える。

したがって、ここでは式(25)や式(28)で表わされる反応速度が一般の流れ場でも化学理論と同一の速度を示すものか否かが関心事となる。物質同志の接触機会(反応頻度)が流れの条件に支配されないかである。限られた場合ではあるが、拡散律速の反応では当然種々の拡散条件に支配されて反

応が進むので、水理因子の影響量にも注目する必要がある。

3. 平均水質の挙動に關与する水理因子

3-1) 水質挙動の平均化と水質水理の重要性

以上からもわかるように水質の挙動の基本は水質物質にかかわる分子の運動、衝突で、個々の現象にかかわるいわばミクロな水質水理の問題は化学、物理化学、あるいは拡散論など多くの分野で理論的にもかなり解明されている。今後は水質問題に關連する指標物質についてそれらの理論が応用されたりすることが期待されている分野である。一方、流れ系で水質物質の挙動をいかに平均化し、モデル表示すればよいかというマクロな水質水理上の問題がある。工学的にはこの点がきわめて重要で、水質挙動の表示法はその計測法にも關連して、入手データ数に限界があることも多く、記述が常に代表値の平均的挙動の表示に重点を置かざるをえないことが多い。したがって、現象の極力忠実な表示というよりも結果としての平均水質値をうまく説明しうる総括的な現象表示が実用上きわめて重要とされてきた。たとえば水中での水質の反応は分子の衝突のみに支配される現象であることは明らかであっても、分子特性よりもむしろ総括的に分子数ひいては濃度のみに比例して反応は進行するなどの表現をとり、關連する種々の特性を総括的にその比例定数の中に包含させる方法である。したがって現象を総括的あるいは平均的に表示すればする程、そこに関与する補足的な現象をも比例定数に含んだ型で表示せざるをえなくなる。ここに水理因子の重要性が生ずる別の理由がある。この水質挙動のマクロな表示法は水質の解析法とも密接な關係にあり、流れを解析可能なように平均化する過程と同様に、水質挙動についても水質値が解析可能なように簡略化されて表示される必要がある。水質の分散現象の取り扱いもその代表的な例であり、その詳細を省略するが、Elderらによるすぐれた研究⁴⁾も上記の意味でその価値は高い。もし、流速分布、水質の濃度分布を流れにそって完全に追跡しうる計測法、解析法を手にしている場合、水質の伝播現象は乱流拡散係数のみで記述しうる。平均濃度にかかわる分散係数の表示はその必要性が少ない。しかし、水質の追跡技術の現状から判断すれば分散係数こそが実用上多用され、乱流拡散係数を活用しうる場はむしろ少ない。分散係数は総括的な表示である故に、水深、摩擦速度あるいは損失水頭など重要な水理因子を包含している。このように現象の平均化に關連するマクロな水質水理は技術の發展とともにその価値を大きく変化するかもしれないが、現状ではきわめてその重要度は高く、かなり大胆な総括的表示でもその開發が急がれている。

3-2) 平均水質の挙動と境界面での物質収支

流路における水質濃度の保存則は以下のように展開される⁵⁾。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{c} + \nabla \cdot (\bar{c}' \mathbf{V}') = 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

ここで上ツキバー記号は時間平均を表わし、 $\mathbf{V}$ および $\mathbf{V}'$ は流速ベクトルとその時間変動量を表わす。上式からある一定の流下距離にわたる体積平均水質が流下とともにいかに変化するか求めればつぎのようになる。上式を次式のように体積 δV にわたって積分し、平均化する。

$$\int \delta V \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dV + \int \delta V \bar{V} \cdot \nabla \bar{c} dV + \int \delta V \nabla \cdot (\bar{c}' \mathbf{V}') dV = 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

グリーン・ガウス公式を用いて展開すれば一次元式として例えば次式の表現をとることもできる⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} \int^A \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dA + \frac{\partial}{\partial x} \int^A \bar{c} \bar{u} dA &= - \frac{\partial}{\partial x} \int^A \bar{c}' u' dA - S - B \\ S &= \left\{ \int h_1 h_3 \bar{c} \frac{\partial h}{\partial t} dz + \int [(\bar{c}' u') \cos(x, n) + (\bar{c}' v') \cos(y, n) + (\bar{c}' w') \cos(z, n)] h_1 h_3 dz \right\}_s \\ B &= \left\{ \int h_1 \bar{c} q_n dS + \int [(\bar{c}' u') \cos(x, n) + (\bar{c}' v') \cos(y, n) + (\bar{c}' w') \cos(z, n)] h_1 dS \right\}_b \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

ここで q_n は水底からの流出入水量, h は水深で, n は面の法線方向, サフィックス s は水面での値, b は底面での値を表わす。また h_1, h_3 は計量テンソルといわれ, 座標形の取り方に依存する量である。詳細は省略するが, 境界面での物質収支に関する S, B をいかに表示するかが重要である。いま, $K = (S + B)$ とし, さらに左辺第二項に空間的な変動を考慮したレイノルズ操作をおこなえばつぎの一次元分散式を得ることができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (cA) + \frac{\partial}{\partial x} (cuA) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} A \right) - K \quad \dots\dots\dots (32)$$

ただし, c は一定流下距離の体積平均水質, A は流路断面積, D は分散係数。

式(29)から(32)への過程は, ある程度厳密に現象に注目すれば, 水面や底面で形状維持と水理因子の u', v', w' などが相互に関係し, 水質物質が流体中に流出入する可能性を示すものと解釈することもできる。ただ, 平均水質に注目して, 平均水質を式(32)のように表示する場合は, 複雑な諸現象を式(32)中の K のように総括的あるいは平均的に表示して平均水質の解析を可能にするのが一般的であることを表わしている。この K が水理因子の影響を受けることは上の過程からも容易に類推することができる。たとえば, 沈殿, まき上げ, 酸素の水中への混入さらには淡塩水境界面での物質移動量などを上式中の K として水理因子をも考慮しつついかに表示すればよいかという問題が重要となる。

水質を解析する場合, 式(32)の場所的な平均水質をさらに全流下方向にも平均化し, 全体の平均水質を問題にすることも少なくない。すなわち, A を一定とみなした場合, 次式に注目することができる。

$$\int^V \frac{\partial c}{\partial t} dV + \int^V \frac{\partial uc}{\partial x} dV = \int^V \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) dV - \int^V (K/A) dV \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここで V は対象とする全流体体積である。

改めて $\bar{c} = (1/V) \int^V c dV$ を定義して, 再度グリーン・ガウスの公式を用いて次式をえる。

$$\left. \begin{aligned} V \frac{d\bar{c}}{dt} &= Q(c_i - c_0) - f \cdot V \\ \text{ただし, } f \cdot V &= \int^V K/A dV, \quad Q = uA = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (34)$$

c_i, c_0 は流入, 流出点の濃度で, $c_0 = \bar{c}$ とみなすとき, いわゆる完全混合の式で, 底面への沈降量や吸着量などを先の K に包含させる場合など, 上式の $f \cdot V$ をいかに表示するかが問題となる。この場合重要なことは, 式(34)自体が現象をきわめて総括的に表示し, かつ可変パラメータを f のみに集

約している点である。したがって実用上は f がいかなる現象を表示しているかという議論以前に、 f をいかなる値にすれば実際の水質変動をうまく表示しうるかという議論に終始することさえある。いかえれば、平均水質の挙動を追跡する場合、関与する現象を極力厳密に表示するということが平均水質値を正確に再現するということが必ずしも同じ意味とはならないことが少なくない。その原因は関与する現象の多様性にあり、卓越現象をある程度うまく表示できかつ平均水質値の再現にも好都合な総括的なモデルが要求される原因がここにある。さらに表現を変えれば、「平均水質からみて」というみかけの現象をうまく表示することも重要となってくる。このように、関与する現象を総括的に表示すればする程、水理因子が重要に関与してくることはすでに記した通りである。

3-3) 水質挙動の平均的表示

a. 境界面物質移動量の平均的表示

2-4) に示したように境界面で j なる物質移動量があるとき、これを式(32)の K や式(34)の $f \cdot V$ として表示する必要があるとき、式中の水質値を平均値として場所的に一定値とみなすので、濃度勾配に起因する拡散現象を定義に従って表示することができなくなる。

いま境界面で図-4 中の実線のように濃度勾配がある場合について考えてみる。上記の理由でこれを破線のように表示せざるをえなくなることがある。このとき $\bar{c}_1$ から $\bar{c}_2$ への物質移動量は拡散現象を拡大解釈してつぎのように表示せざるをえない。

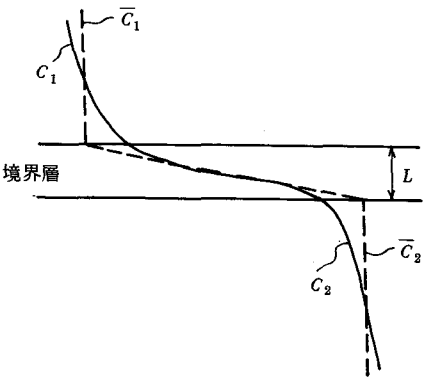


図-4 境界面における濃度分布とその近似

$$m = -jA = -D_m \frac{\partial c}{\partial y} A \cong D_m \frac{\Delta c}{\Delta y} A \cong D_m A \frac{(\bar{c}_1 - \bar{c}_2)}{L} \dots\dots\dots (35)$$

この m が体積 V の $\bar{c}_2$ を変化することになるので、次式をえる。

$$V \frac{d \bar{c}_2}{dt} = m = \frac{D_m A}{L} (\bar{c}_1 - \bar{c}_2) \dots\dots\dots (36)$$

したがって、式(34)の f としては次式のように表示すれば好都合であろう。

$$\frac{d \bar{c}_2}{dt} = \frac{m}{V} = k_L \cdot a (\bar{c}_1 - \bar{c}_2), \quad k_L \cdot a = \frac{D_m}{L} \left(\frac{A}{V} \right) \dots\dots\dots (37)$$

この $k_L \cdot a$ は後に記す総括移動容量係数 (Overall Transfer Coefficient) $K_L \cdot A$ と同意義の係数である。 $K_L \cdot A$ は化学工学分野で多用され、基本的に現象の厳密な表示を目的とするものではなく、物質収支のバランスを説明するためのみかけの移動量を表示するための係数となっている。当然、式(37)の $k_L \cdot a$ は境界面厚さ L や (A/V) が直接水理因子の影響を受けるので、水理因子との関連で記述することが重要である。

一例として水面上の気相と乱流との境界面における気体の移動について考えてみる。³⁾ 境界面に限りなく近い水中 ($0 < y < \delta$) では乱れは規制され、分子拡散が卓越し、ある程度離れた点での物質移動は乱流拡散に支配され、つぎの二式をえる。ただし、気相の濃度を c_s とする。

$$j = -D_m \frac{dc}{dy} \cong -D_m \frac{(c_\delta - c_s)}{\delta}, \quad \delta > y > 0 \dots\dots\dots (38)$$

$$j = -D_t \frac{dc_y}{dy} \quad d > y > \delta \quad \dots\dots\dots (39)$$

ここで、境界面で乱れが規制される範囲を L と表わせば、 $D_t = 0.4 y^2 u_* / L$ と表わされるので、³⁾
 $d > y > \delta$ の間の濃度は上の D_t と式(39)および $y = \delta$ で $c_y = c_\delta$ の条件より c_y はつぎのように求まる。

$$c_y = c_\delta + (j L / 0.4 u_*) \{1/y - (1/\delta)\} \quad \dots\dots\dots (40)$$

$y = d$ で流体中の平均濃度 c_0 に達するものとした上で、式(38)を用いて c_δ を消去すれば次式をえる。

$$j = \frac{(D_m / \delta) (c_s - c_0)}{[1 + (D_m L / 0.4 u_* \delta^2) - (D_m L / 0.4 u_* \delta d)]} \quad \dots\dots\dots (41)$$

別途流体力学として求められている $\delta = (\nu \sigma / 0.4 \rho u_*^3)^{1/2}$ 、 $d = (\nu L / 0.4 u_*)^{1/2}$ の値を上式に代入すれば、近似的に次式をえる。

$$j \cong \frac{D_m}{2 \delta} (c_s - c_0) \quad \dots\dots\dots (42)$$

式(37)の k_L で表示すれば次式をえる。

$$k_L = \frac{D_m}{2 \delta V} = \frac{D_m}{2 V} \left(\frac{0.4 \rho u_*^3}{\nu \sigma} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (43)$$

ここで、 σ は水の表面張力を表わし、水質の移動量にかかわる係数が u_* などの水理因子に支配されることがわかる。

b. 平均水質のみかけの反応恒数

浮遊粒子表面での反応などある反応面で一次反応が成立し、その反応面への物質移動が分子拡散による律速状態にあるとき次式が成立する。

$$j = -D_m \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = k c_1 \cdot \delta_r \quad \dots\dots\dots (44)$$

ここで y は境界層に囲まれた反応面からの距離、 c_1 は反応面での濃度、 δ_r は反応深さ、 k は一次反応恒数。

境界層外部の平均濃度 c_0 と境界層厚さ δ を考慮し、次式が成立するものとすれば式(46)をえる。ただし、 $\delta_0 \cong \delta$

$$-\frac{\partial c}{\partial y} \cong \frac{c_0}{\delta_0} \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$m = j \cdot A = D_m \cdot \frac{c_0}{\delta_0} A = k c_1 \delta_r A = \left(\frac{k c_1 \delta_r A}{c_0} \right) c_0 = \hat{k} c_0 V \quad \dots\dots\dots (46)$$

A を粒子の総表面積とし、移動物質質量 m はすべて反応してしまうので、これを体積 V の c_0 に対するみかけの反応恒数 $\hat{k}$ で表わせば、上式の最終項をえる。

Levich によれば、反応量と拡散移動量の比率 λ について次式が与えられている。¹⁾

$$\lambda = \frac{k \delta}{D_m} \cdot \frac{\delta_0}{\delta} = \frac{k \delta}{D_m} f(R_e, P_r), \quad R_e = \frac{U \ell}{\nu}, \quad P_r = \frac{\nu}{D_m} \quad \dots\dots\dots (47)$$

ここで δ は境界層の厚さ、 δ_0 は δ 中の濃度勾配にかかわる長さのスケール、 U は代表流速、 $f(\quad)$ は

関数形を表わす。

式(46)を k で割れば、真の反応恒数とみかけの反応恒数の間につきの関係があることがわかる。

$$\frac{\hat{k}}{k} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{A}{V} \right) = \frac{D_m}{k\ell} \left(\frac{A}{V} \right) \cdot \frac{1}{f(R_e, P_r)} \quad \dots\dots\dots(48)$$

すなわち、みかけの反応恒数がレイノルズ数にも関係することも考えられる。

また、式(23)で示される移動量で、拡散された物質が全て反応してしまう場合、粒子数を N として同様に k の表示が可能である。

$$\hat{k} = 7.98 D_m^{2/3} U^{1/3} a^{1/3} (N/V) \quad \dots\dots\dots(49)$$

$\hat{k}$ は U すなわち沈降速度と粒径 a に支配されることになる。

なお、乱流拡散が律速となる場合についてはあまり研究が進んでいないので実用上この種の検討がいかによ効かは未だ明確でない。今後の検討が必要であろう。

c. 平均水質のみかけの沈降速度

乱れが卓越した場での沈降による底面への移動物質質量 j を主流の平均濃度 c_0 からみて次式のようにみかけの沈降速度 $\hat{\omega}_0$ を定義することもできる。

$$\hat{\omega}_0 c_0 = j \quad \dots\dots\dots(50)$$

現象としては、沈降速度 ω_0 に基づく移動量と乱流拡散に基づく移動量が次のように重なる場合もあるので、そのとき $y=d$ で $c=c_0$ とみなして次式をえる。

$$j = -D_t \frac{dc}{dy} + \omega_0 c \cong -\beta u_* y \frac{dc}{dy} \Big|_{y=\delta} + \omega_0 c_0 = \beta u_* c_0 + \omega_0 c_0 \quad \dots\dots\dots(51)$$

$$\therefore \hat{\omega}_0 = \beta u_* + \omega_0 \quad \dots\dots\dots(52)$$

ところで、ここでの沈降速度 ω_0 は現象としても乱れの影響を受けることがある。その影響量は一般に上下方向に相殺されるものとみなすが、たとえば粒子の抵抗係数が乱れの影響を受けるという報告もないわけではない。⁷⁾ この場合上記のみかけ速度はさらに水理因子の影響を受けることになる。

3-4) 河川中の溶存酸素に関する O'conner らの研究⁸⁾

河川中の溶存酸素 c は Streeter らにより、飽和値 c_s からの不足量 ($D=c_s-c$) として次式で表わされることが示されている。⁹⁾

$$\frac{dD}{dt} = k_1 B - k_2 D \quad \dots\dots\dots(53)$$

ここで B は BOD など酸素要求量、 k_1 は脱酸素恒数、 k_2 は再ばっ気係数。

式(36)の係数 ($D_m A/L$) を $K_L A$ と表わし、 $\bar{c}_1 = c_s = \text{const.}$ 、 $\bar{c}_2 = c$ と表わせれば次式をえる。

$$\frac{dD}{dt} = - \left(\frac{K_L A}{V} \right) D \quad \dots\dots\dots(54)$$

上の二式の対比と、 $V=AH$ 、(H は水深) の関係から次式をえる。

$$k_2 = K_L \left(\frac{A}{V} \right) = K_L / H \quad \dots\dots\dots(55)$$

さて、 K_L は気液境膜における酸素の拡散移動量と境膜の更新頻度 r から次式で表わされるものとして次式を採用している。³⁾

$$K_L = \sqrt{D_m \cdot r} \quad \dots\dots\dots (56)$$

r を水面の表面更新率として、水面での鉛直方向の乱れ速度 v' と混合距離 ℓ から次式で表わされるものとする。

$$r = |v'|/\ell, \quad \text{ただし, } |v'| = \ell \cdot (du/dy) \quad \dots\dots\dots (57)$$

水面近傍でも流速の対数則が成立しているものとして、次式をえる。

$$du/dy = u_* / \kappa y \quad \dots\dots\dots (58)$$

ただし、 κ はカルマン定数、 $u_* = \sqrt{gHI}$ 、 I は水面勾配。

以上の結果、 $y = H$ としてつぎの結果をえる。

$$k_2 = \sqrt{\frac{D_m g}{0.4}} \cdot \frac{I^{1/4}}{H^{5/4}} \quad \dots\dots\dots (59)$$

また簡単には水面近傍でも等方性の乱れとみなし、 $\ell \cong 0.1H$ 、 $|v'| \cong 0.1u$ 、 $r = u/H$ とみなし次式を示している。

$$k_2 = \sqrt{D_m} \cdot \frac{u^{1/2}}{H^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (60)$$

実測によって k_2 値が小さい範囲では式(60)が、大きい範囲では式(59)がよく理論と実測値が合致することを確認している。

なお、先の式(43)の k_L と式(55)から k_2 を求めるとつぎのようになる。ただし、 $V \cdot k_L = K_L$ 。

$$k_2 = \frac{D_m}{2H} \left(\frac{0.4 \rho u_*^8}{\nu \sigma} \right)^{1/2} = \left(\frac{D_m g^{3/4}}{2} \sqrt{\frac{0.4 \rho}{\nu \sigma}} \right) \cdot \frac{I^{3/4}}{H^{1/4}} \quad \dots\dots\dots (61)$$

4 水質水理に関する事例研究

以上に関する筆者らの研究結果を一部以下に紹介し、観点をさらに明確にするとともに水質水理の重要性を例示したい。

4-1) 乱れ場における反応¹⁰⁾

図-5 のような二層流に c_1 としてヨードデンプン液を、 c_2 としてチオ硫酸ナトリウム液(ハイポ)を流下させ、その界面での反応がいかに流体の乱れに支配されるかを実測した。 $c = c_1 + c_2$ としてその断面平均濃度 $\bar{c}$ に関する一次元式として次式をえる。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - \hat{k} \bar{c} \quad \dots\dots\dots (62)$$

ここで、 $\hat{k}$ は平均濃度に関するみかけの反応恒数である。

断面 I (SE-I) から断面 II (SE-II) までの長さ L の距

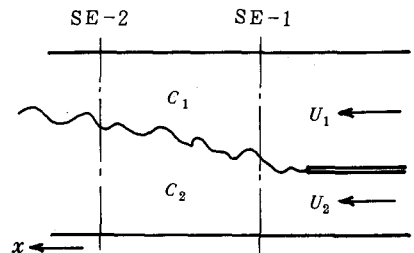


図-5 反応実験の様子

離について上式を平均化し次式をえる。

$$c_{II} = c_I \cdot \exp \{-\hat{k} T\}, \quad T = L / \bar{u} \quad \dots\dots\dots (63)$$

上式に従がって $\hat{k}$ を定量化し、断面ⅠとⅡでの平均乱れ強度 $\bar{u}'$ と $\hat{k}$ の関係を示したのが図-6である。またここでは図示することを省略するが、両断面での水質スペクトルから0.1 Hg程度の低周波の乱れがみかけの反応に大きく寄与していることを明らかにしている。

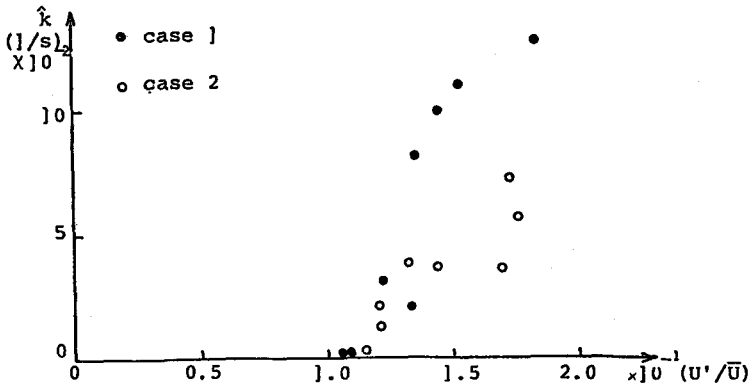


図-6 みかけの反応恒数と乱れ強度との関係

従来の現象に主眼を置いた研究方法から判断すれば、上記の取り扱いはいまにも総括的に過ぎ、横方向拡散係数を考慮した上で界面上での反応量と乱れ強度の関係を調べるべきという意見が当然出てくる。しかし、実際の汚濁解析に多用される反応恒数は図-6のような現象をも局部的に含んだ総括的な値であることを強調するためにあえて以上のようなまとめ方をしている。

一方、式(44)のように界面での反応としてとらえた場合、以下のような展開となる。

$$j = -D_y \frac{dc}{dy} \cong D_y \frac{\bar{c}_1 - 0}{\ell} \cong \hat{k}_0 \cdot \bar{c}_1 \cdot \ell \quad \dots\dots\dots (64)$$

ここで D_y は横方向乱流拡散係数で、界面上の y 方向距離 ℓ で濃度 $\bar{c}_1$ が濃度0に反応してしまうものと考えている。この場合、先の $\hat{k}$ と違ったみかけの反応恒数 $\hat{k}_0$ を定義して次式をえる。

$$\hat{k}_0 = D_y / \ell^2 \cong \left(\frac{\alpha_0}{\ell} \right) \cdot u' \quad \dots\dots\dots (65)$$

ただし、 α_0 は比例定数で、 $D_y \sim v' \cdot \ell$ 、 $u' \sim v'$ とみなしている。 $\hat{k} \sim \hat{k}_0$ と考えられるので、 ℓ が一定のとき式(65)は図-6の結果で検証されているものとも解釈できる。

4-2) 二層境界面での物質移動¹¹⁾

境界面での物質移動は式(56)などで表わされ、 r は式(57)のように表わすのが有力な方法であるが、境界面に注目してみると内部波など波が発生していることが多い。そこで以下のように波のエネルギー E_w およびそこでのエネルギー消費量 ε について考察してみた。

$$\varepsilon \sim E_w \sim a^2 \sim \overline{\eta'^2} \quad \dots\dots\dots (66)$$

ここでの a は微小振幅波の振幅で、 $\overline{\eta'^2}$ は水面変動の二剰平均を表わす。さて、Dobbinsは $r \sim \varepsilon^{3/4}$ の関係を示している¹²⁾ので、以下の関係をえることがわかる。

$$K_L \sim r^{1/2} \sim \varepsilon^{3/8} \sim \eta'^{3/4} \quad \dots\dots\dots (67)$$

波動面からの酸素の混入量に関する実験結果を示したのが図-7で、図中縦軸および横軸はそれぞれ K_L 、 η'^2 に補正係数がかけられているが、式(67)の関係が成立することを示している。

4-3) フロックの破壊

粒状水質物質の例として、浄水場において成長したフロックがいかなる流体力で破壊されるかを調べてみた。¹³⁾ 最大限に成長したフロック(最大安定フロック径) d_{max} が人工原水および実際池原水について図-8、図-9に示すように、エネルギー消費量とつぎの関係にあることが明らかとなった。ただし、 $\bar{G} = \sqrt{\varepsilon/\mu}$

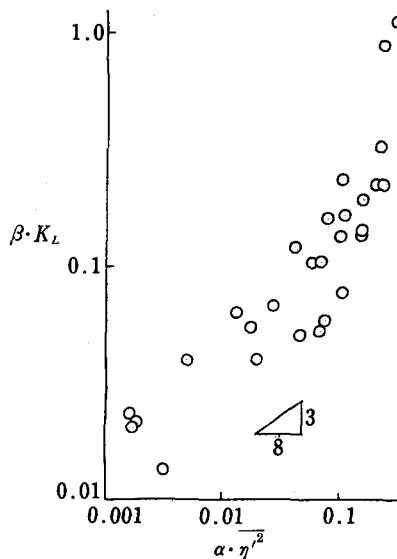


図-7 K_L と η'^2 の相対的關係(α, β は定数)

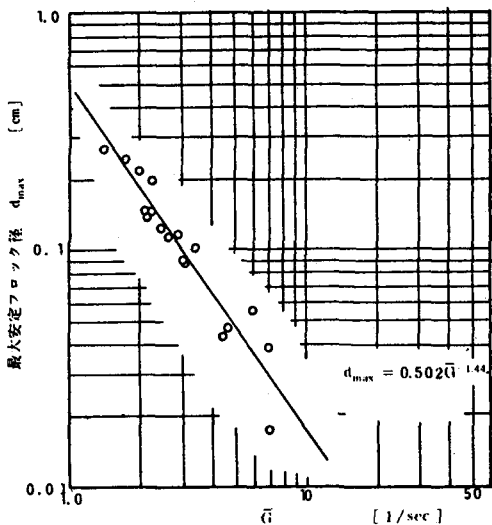


図-8 最大安定フロック径とエネルギー消費量の関係(人工原水)

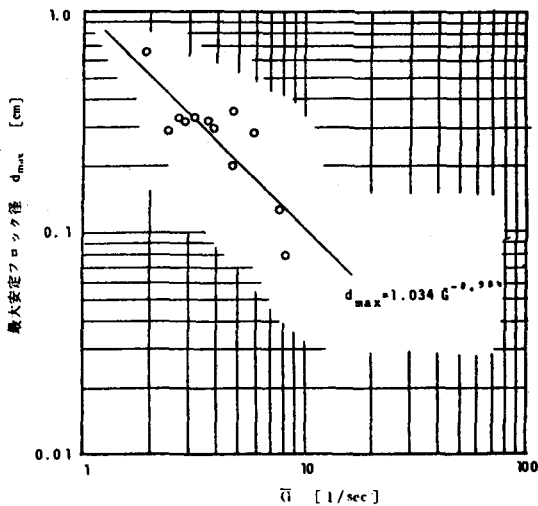


図-9 最大安定フロック系とエネルギー消費量の関係(実際池原水)

$$d_{max} \sim \varepsilon^{-0.72}, \quad \text{ただし, } n = 1.10, \quad (\text{人工原水}) \quad \dots\dots\dots (68)$$

$$d_{max} \sim \varepsilon^{-0.49}, \quad \text{ただし, } n = 1.24, \quad (\text{実際池原水}) \quad \dots\dots\dots (69)$$

ただし、フロックの有効密度 $\rho_e (= \rho_p - \rho) = d^{-n}$ 、 ρ_p 、 ρ はフロックおよび水の密度。ここで丹保らの研究¹⁴⁾にならって、フロックの破壊に対する強度 FB をフロックの密度関数に係わる係数 n を用いて次式のように表わした上でフロックに働く種々の力について検討してみた。ただし、 d はフロックの径。

$$FB \sim d^{(2-2n/3)} \dots\dots\dots (70)$$

たとえば d が乱れ渦のマイクロスケールより大きいとき、乱れ渦がブロック表面を引っ張るその抵抗力は式(66)からつぎのように表わされる。

$$k_f \rho S u^2 \sim \frac{(\rho_p - \rho) V_p (\epsilon d / \rho)^{2/3}}{[(\rho_p - \rho) + \rho(1 + c_u) V_p + k_f \rho S d]} \sim \frac{d^{2/3} (\epsilon / \rho)^{2/3}}{d^{-n} + (1 + c_u + k_f) \rho} \dots\dots\dots (71)$$

上式の最終項で、表面の粗滑特性 $k_f \rho$ が有効密度特性 d^{-n} に卓越するとき、上式をつぎのように簡略化できる。

$$k_f \rho S u^2 \sim d^{2/3} \epsilon^{2/3} \dots\dots\dots (72)$$

d_{max} で上の力と FB が均衡しているものと考えれば次式をえる。

$$d_{max}^{2/3} \epsilon^{2/3} \sim d_{max}^{(2-2n/3)} \dots\dots\dots (73)$$

この場合つぎの関係を類推しうる。

$$d_{max} \sim \epsilon^{-1/(1+n)} \dots\dots\dots (74)$$

上式の n に式(68)、式(69)中の n の実測値を代入すれば、 d_{max} と ϵ の関係を検証することができる。このように、ブロックに働く力としてさらに慣性力、乱れ渦のもたらす動圧など同様に検討してみた。結局、ブロックが比較的小さいときは乱れ渦が粒子表面に及ぼす表面引張力が、またブロックが大きいときは粒子表面に働く動圧がブロックの破壊を支配していることを明らかにした。

4-4) 汚濁源の探知¹⁵⁾

未知な流入汚濁量 $q(x, t)$ が流入する河川での水質伝播式はつぎのように表わされる。

$$\frac{\partial c A}{\partial t} + \frac{\partial c Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D A \frac{\partial c}{\partial x} \right) - k c A + q(x, t) A \dots\dots\dots (75)$$

上式を変数変換して、上流 ($x=0$) から下流 ($x=L$) まで積分すれば次式をえる。

$$c(L, t) = \int_0^t d\tau \left\{ c(0, t-\tau) \frac{Q/A}{\sqrt{4\pi D\tau}} \exp \left[-\frac{(L-Q\tau/A)^2}{4D\tau} - k\tau \right] \right\} \\ + \int_0^L d\xi \int_0^t d\tau \left\{ q(\xi, \tau) \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t-\tau)}} \exp \left[-\frac{(x-\xi-Q(t-\tau)/A)^2}{4D(t-\tau)} - k(t-\tau) \right] \right\} \dots\dots\dots (76)$$

ここで、 $q(\xi, \tau) = F(\xi) G(\tau)$ として、たとえば汚水の放流時間変動パターン $G(\tau)$ をあらかじめ設定することができれば、上流水質 $c(0, t-\tau)$ と下流水質 $c(L, t)$ をモニターステーションなどで検知すれば、上式を解くことによって中流区間での汚濁源の位置と汚濁量を知ることができる。

そこで京都の汚濁河川である西高瀬川について水質指標として BOD_5 を用いて本法を適用してみた。分散係数 D としてフィッシャーの式¹⁴⁾に基づく次式を採用し、 $k=0$ とみなした。

$$D = \frac{0.075 \beta B^2 \bar{u}}{H \sqrt{124.5 n^2 / H^{1/2}}} \quad , \quad \beta = 0.09, \quad n = 0.025 \dots\dots\dots (77)$$

実測事項は上流と下流の5分間隔の BOD_5 値と他は D を求めるに要する水力因子の実測で、 $D=48.1$ m^3/s を得た。詳細を省略するが、図-10の実測値から図-11の解を得た。実際は図中棒グラフで示すような流入汚濁量があったことを別途確かめていたので、本結果は汚濁源を比較的うまく探知しえた例といえる。

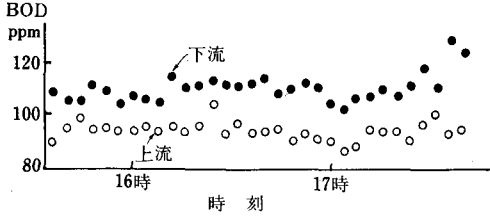


図-10 BOD実測値の例

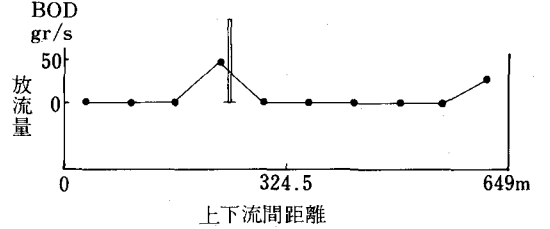


図-11 汚濁源探知の解一例(図-9のデータより)

4-5) びわ湖における重金属濃度の解析¹⁷⁾

びわ湖南湖における水中および底泥における水銀濃度を継続的に実測した結果、水中の水銀濃度は浮遊粒子濃度(SS)と密接な関係にあり、このSSは湖流速に影響を受けさらに湖流は風に強く支配されるという推論をえるに至った。そこでこれら一連の現象を総合的に有限要素法によって解析した。

南湖を2次元流とみなした上で、141の三角形で区分し、そこでの流体の運動、連続および水質の式を連立して解くことになる。風の影響を考慮した流動に関する式についてはここでは省略し、水質に関する式を記せば以下の通りである。ここで水中に溶解している成分を c_1 、浮遊物質に吸着されている成分を c_2 、ただし吸着平衡の式として $c_2 = k c_1^{1/n}$ 、底泥に吸着されている成分を c_3 、浮遊物濃度を S 、泥の厚さを h_d として以下の式をえる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{r w_0}{h} (S - S_s) c_{2,3} \\ \frac{\partial}{\partial t} (h_d c_3 (1 - \lambda)) &= r w_0 (S - S_s) c_{2,3} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} &= \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) - \frac{r w_0}{h} (S - S_s) \\ \frac{\partial}{\partial t} h_d (1 - \lambda) &= r w_0 (S - S_s) \end{aligned} \right\} \quad \dots (78)$$

ただし、 U 、 V は別途解いた x 、 y 方向流速、 D_x 、 D_y は x 、 y 方向拡散係数、 h は水深、 w_0 は沈降速度、 S_s は平衡時の S 。また各記号は以下の通りである。

$$C = (c_2^{n-1} / k^n + S) c_2, \quad c_{2,3} = c_2 (S > S_s \text{ のとき}), \quad c_3 (S < S_s \text{ のとき})$$

$$r = \frac{S_s|_{z=a}}{S_s} \cong \frac{15 w_0}{u_*} \cdot \frac{1}{(1 - \exp(-15 w_0 / u_*))}$$

$$S_s|_{z=a} = \frac{\alpha}{2} (u_* / w_0) \exp \{ -(w_0 / u_*)^2 \}$$

$$u_* \cong \frac{1}{\rho} (\tau_b + \tau_s \exp(-h/h_0)), \quad \tau_b = \frac{\rho \gamma_b^2}{h} \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_s = \delta \rho_a \gamma_s^2 Q_y |Q|$$

$$|Q| = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$$

ただし, Q_x , Q_y は x , y 方向風速成分, τ_b , τ_s は摩擦係数, ρ_a は空気の密度, δ , α , k , n は定数, w_0 は実測粒径値の 11.48μ のストークス沈降速度。

以上を, 形状関数として 1 次多項式を用い, 要素内未知変数値を節点値より 1 次近似で内挿し, 基礎式を常微分方程式にかえて後これを解く。結果の一例を図-12 に示すが, 計算値と実測値によい一致を見, 冒頭の推論がある程度実証されたものと考えるに至った。

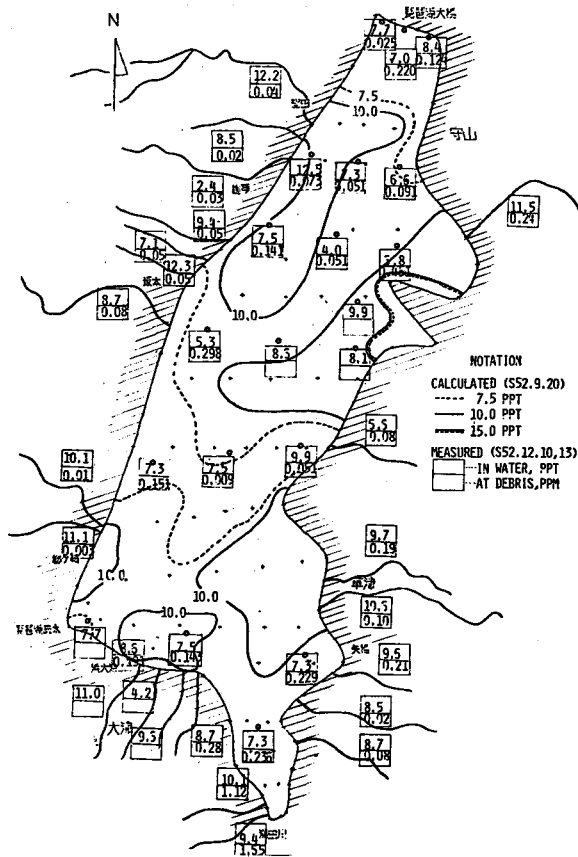


図-12 びわ湖南湖における水銀濃度の実測値と解析結果の例

5. おわりに

未だ定着した用語とはいえない水質水理についてかなり独断的な記述となり、いろいろの分野の方々からお叱りを受けるのではと案じている。ただ日ごろ水質汚濁の解析などに従事し、水理学に関する知識をいろいろの型で導入することがきわめて重要と実感している一人として、日ごろ考えていることをそのままとめてみた。そういった意味では Levich の *Physicochemical Hydrodynamics* などばかりきわめて貴重な参考書であるが、その後、現象の特異性もさることながらむしろ 3. に記したような水質流の慣例的あるいは実用的な取り扱い法と関連して、水理因子を包含した型でのモデル表示が重要であることも痛感するようになった。そこで筆者らの研究グループでは 4. に示すような研究にも重点を置いてきたけれども、必らずしも十分その研究意図が理解されない場合もあった。これはひとえに水質挙動のモデル表示法が定着していないことに主たる原因があるようである。考えてみれば、流れ場での複雑な水質物質の挙動を厳密に記述すればする程水質物質の収支式としての基礎式の精度になじまなくなるのは当然で、少なくとも解析を前提とする以上、正確さもさることながら適切なモデル表示という考え方も不可欠である。そういった意味で、今後、平均化された基礎式で要求される現象表示モデルの精度、さらには現象の平均化と水理因子の関与の程度などを着実に定量化していくことがきわめて重要と考えている。したがって本文では、水質挙動のマクロなモデル表示の必要性和そのモデルがマクロであればある程水理因子の考察が重要となることを水質水理の一つの側面として強調したものである。

最後に、本文をまとめるに当り種々御教示頂いた京都大学岩佐義朗教授に感謝を申し上げる。また、日ごろ毛色のかわったこの分野の研究で直面する種々の困難打開に当り、時にはこれは科学とは言えないといいつも種々奔走してくれる共同研究者の松岡 譲氏にこの際謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) V.G. Levich : *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, 1962
- 2) S.L. Soo : *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, Blaisdell Publishing Co., 1967
- 3) J. T. Davies : *Turbulence Phenomena*, Academic Press, 1972
- 4) J. W. Elder : The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, *J. Fluid Mech.*, 5, 1959
- 5) Y. Iwasa : Mathematical Aspect of One-dimensional Equations of Unsteady Flow in Open Channels, *Proc. Int. Sympo. on Unsteady Flows in Open Channels*, Newcastle-Upon-Tyne, BHRA, 1976
- 6) Y. Iwasa : *Lecture Notes on Hydrodynamic Aspects of One-Dimensional Method in Hydraulic Analysis*, Hydraulics Laboratory, Kyoto Univ., 1965
- 7) H. Kada, T. J. Hanratty : Effects of Solids on Turbulence in a Fluid, *A. I. Ch. E. Journal*, Dec., 1960
- 8) D. J. O'conner, W. E. Dobbins, The Mechanism of Reaeration in Natural Streams, *Trans.*, ASCE, 123, 1958
- 9) 合田 健 : 水質工学 基礎編, 丸善, 昭50年
- 10) 岩井重久, 住友 恒, 戸田泰和 : 河川における水質反応に関する実験研究, 第11回水質汚濁シンポ, 日本水質汚濁研究会, 1977

- 11) 細井由彦, 住友 恒, 岩井重久; 波動水面からの酸素吸収に関する研究, 土木学会, 第13回衛生工学研究討論会論文集, 1977
- 12) W. E. Dobbins ; BOD and Oxygen Relationships in Streams, Proc. ASCE, SA3, 1964
- 13) 住友 恒; 乱流場における粒状水質物質の破壊とまき上げ機構に関する研究, 昭52年度, 文部省科学研究費報告書, 昭53年
- 14) 丹保憲仁, 他; フロックの強度に関する研究, 水道協会誌, 427号, 昭45年4月
- 15) 松岡 譲, 住友 恒, 岩井重久; 下流水質による汚濁源の解析, 土木学会, 第13回衛生工学研究討論会論文集, 1977
- 16) H. B. Fisher ; The Mechanics of Dispersion in Natural Streams, Proc. ASCE, HY-6, 1967
- 17) 松岡 譲, 住友 恒, 岩井重久, 他; びわ湖における底泥の重金属汚染の有限要素法による解析, 第12回水質汚濁シンポ, 日本水質汚濁研究会, 1978