

沿岸海域の海水交換と汚染

Water Exchange and Pollution in the Coastal Sea

柳 哲雄

Tetsuo YANAGI

1. はじめに

沿岸海域の水質はその場に存在する物質質量によって決まる。そしてある海域の物質質量はその海域に流入する物質質量と流出する物質質量との収支関係によって決っている。

沿岸海域には陸から様々な物質が流入してくる。海域に流入して物質は物理的な移流拡散作用により海域に拡がりながら、化学・生物作用により溶存態・懸濁態という形態変化を伴ってその振舞いを変えて、ある物は外洋域へ流出し、ある物は沿岸海域の海底に堆積する。

このような陸からの流入物質の沿岸海域における挙動を正確に追跡し、水質を予測するためには3次元の数値生態モデルを用いた数値シミュレーションを行えば良いわけであるが、調査予算や既往の情報量（数値実験が行えるほどデータがそろっていない）などの事情により、数値実験を行うことが常に可能、あるいは最善とは限らないことも多い。

また問題によっては、数値実験のような微分的なものの見方より、大略の見通しを得るために積分的なものの見方が必要とされる場合もままある。

ここではそのような積分的なものの見方をする場合に必要となる沿岸海域の海水交換という概念、その実態と汚染との関連について瀬戸内海の大阪湾における研究例をもとにして具体的に述べていきたい。

2. 海峡近傍の海水交換率

ある内湾の湾口を通じて湾内水と湾外水がどの程度交換するかを表すパラメータを海水交換率という。海水交換率には大きく分けて2種類のものがある。ひとつは湾口を通じて1潮汐周期の間に湾口付近の湾内水と湾外水がどれほど交換するかを表すもので、いまひとつは湾口を通じて数十潮汐周期の間に湾内水全体と湾外水がどれほど交換するかを表すものである。

前者の海水交換率の定義はたとえば

柏井（1984）によれば次のようである。

図1に示すような湾と海峡が存在し、ある干潮時にその直前の下げ潮流で湾内から流出した水塊を（ $P_1 + P_3$ ）とする。 P_1 は次の上げ潮流で湾内の戻る海水、 P_3 は次の上げ潮流で湾内に戻らない海水を表す。次の上げ潮流で湾内に入る海水は（ $P_1 + P_2$ ）である。ここで P_2 は次の上げ潮流で初めて湾内に入る海水を表す。また目を湾内に転じれば、ある満潮時に直前の上げ潮流で湾外から流入した水塊（ $P_4 + P_5$ ）が定義出来る。 P_4 は次の下げ潮流で湾外へ流出する海水、

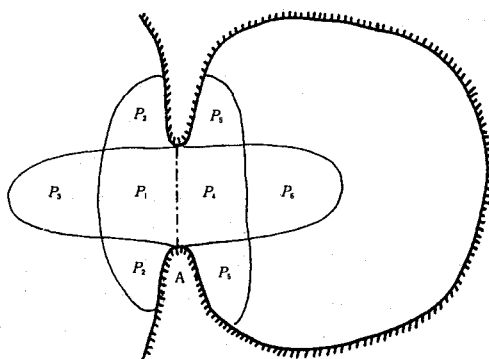


図1 海峡の検査断面Aと流出水塊（ P_1 、 P_3 、 P_4 、 P_5 ）
流入水塊（ P_4 、 P_5 、 P_1 、 P_2 ）

P_5 は次の下げ潮流で湾外に流出しない海水を表す。次の下げ潮流で湾外に流出する水塊は $(P_4 + P_5)$ であり、ここで P_5 は次の下げ潮流で初めて湾外へ流出する海水を表す。

上げ潮流による海水流入量を V_F 、下げ潮流による海水流出量を V_E とすれば、

$$V_F = P_1 + P_2 = P_4 + P_5, \quad V_E = P_4 + P_5 = P_1 + P_3 \quad (2.1)$$

となる。この時、2種類の海水交換率 r_F 、 r_E が定義できる。

$$r_F = \frac{P_2}{P_1 + P_2}, \quad r_E = \frac{P_5}{P_4 + P_5} \quad (2.2)$$

r_F は上げ潮流による海水流入量のうち初めて湾内に流入する海水の占める割合、 r_E は下げ潮流による海水流出量のうち初めて湾外に流出する割合を表す。計算機の中で数値計算を行う場合には、海水のそれぞれの粒子にマークをつけることが可能なので、 P_1 や P_2 の判別は容易に行える。しかしそのような判別法が不可能な現場観測においては、 P_1 、 P_2 、 P_4 、 P_5 水塊の判別には通常塩分が用いられる。

海峡にある検査断面Aを設け、湾内から流出した水塊 $(P_1 + P_3)$ の塩分は検査断面で得られる下げ潮流期間の平均塩分 S_E に等しいと仮定し、湾外水の塩分を S_0 とする。すなわち

$$\begin{aligned} S(P_1) &= S(P_3) = S_E \\ S(P_2) &= S_0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

また上げ潮流で流入する水塊 $(P_1 + P_2)$ の平均塩分を S_F とすれば、(2.1)(2.2)の関係をを用いて、

$$V_F S_F = P_1 S_E + P_2 S_0 = (1 - r_F) V_F S_E + r_F V_F S_0 \quad (2.4)$$

となる。したがって海水交換率 r_F は

$$r_F = \frac{S_F - S_E}{S_0 - S_E} \quad (2.5)$$

と表せる。同様にして、湾内水の代表塩分を S_0 、すなわち $S(P_5) = S_0$ とすれば、 r_E は

$$r_E = \frac{S_F - S_E}{S_F - S_0} \quad (2.6)$$

となる。

このような海水交換率 r_F 、 r_E を決めているものは湾口付近の流動構造であり、湾全体の流動構造はこの種の海水交換率には関与してこない。逆に言えば、この種の海水交換率は海峡周辺の海水の交換、流動構造を表すパラメータにはなりえても、湾全体の海水がどのように交換するかを表すパラメータにはなりえない。

3. 湾内水全体の海水交換率

何潮汐周期もの間に湾内水全体と湾外水がどのように交換するかを表す海水交換率は保存物質である塩分の収支関係から推定できる(柳・柴木・武岡、1985)。まず毎月の塩分の観測値からある湾の平均塩分の経月変動が明らかになっているとしよう(図2、3)。

湾内の平均塩分変動は河川水流入による塩分低下、蒸発・降水による塩分変動、海水交換による塩分変動の3者の結果決っている。河川水流入による塩分低下は流入する河川水により湾内水が押し出されるとして求めることができる。河川水の流入量は1級河川については建設省の流量年表から、その他の中小河川については1級河川に対する流域面積比から推定することが可能である。また蒸発、降水による塩分変動は降水量、風速、蒸気圧、海面水温データから次式で推定できる。

$$R = P - kW(e_w - e_a) \quad (3.1)$$

ここで R は正味の月間降水量(mm)、 P は月間降水量(mm)、 k は蒸発係数($=2.4 \times 10^{-9}$)、 W は月平均風速(m/sec)、 e_w は月平均海面水温に対する飽和蒸気圧(mb)、 e_a は月平均大気蒸気圧(mb)を表す。 R が正の場合、この R に湾内の平均塩分を乗じた分だけ塩分は減少する。

したがって毎月の塩分変動から河川水流入による変動、蒸発、降水による変動を差し引けば、海水交換に

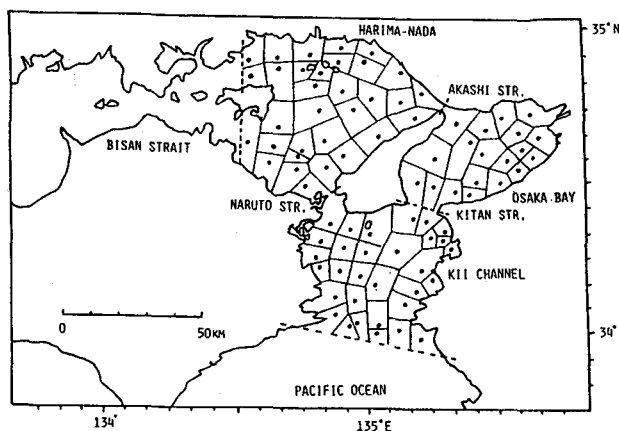


図2 播磨灘、大阪湾、紀伊水道の塩分観測点と各点の代表面積

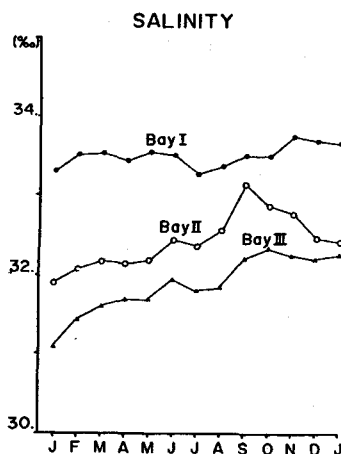


図3 紀伊水道 (BayI)、大阪湾 (BayII)、播磨灘 (BayIII) の
1977年1月-1978年1月の平均塩分の変動

よる塩分変動量が求まることになる。

図3に示した大阪湾の塩分変動は河川水流入による塩分低下、蒸発・降水による塩分変動、海水交換による塩分変動の結果決っているはずであるから、前2者を観測データから求め(図4)、実際の塩分変動を再現出来る海水交換量を最小2乗法により推定しようというわけである。

海水交換による塩分フラックス Φ (ton/month)

は次の形で表されるとする。

$$\Phi = \alpha \cdot \Delta S \cdot Q \quad (3.2)$$

α は海水交換率、 ΔS は隣接する湾との平均塩分差、 Q は隣接する湾との1カ月間の海水交換量(普通海峡における M_2 潮流の積算流量を用いる、 $m^3/month$)を表す。

(3.2)式の左辺は実際の塩分変動から河川水流入による変動分、正味の降水量による変動分を差し引くことによって得られるから、毎月の塩分収支をもとにして、次のような行列が得られる。

$$\Phi_i = \begin{vmatrix} \Delta S_{OH} & \Delta S_{KO} \end{vmatrix}_i \begin{vmatrix} \alpha_1 Q_1 \\ \alpha_2 Q_2 \end{vmatrix}_i \quad (3.3)$$

ここで添字 i は各月、 O は大阪湾、 H は播磨灘、 K は紀伊水道、1は明石海峡、2は紀淡海峡を表す。ふたつの未知数 α_1 、 α_2 に対して、各月の塩分収支式から12個の方程式があるので、(3.3)式を最小自乗法で解けば、海水交換率が推定できることになる。

1977年の大阪湾の場合は $\alpha_1 = 3.8\%$ 、 $\alpha_2 = 1.3\%$ という値が得られた。

海水交換率が季節によって変化すると仮定した場合はより長い年月の観測データを用いて、多くの方程式を作れば、同じ方法で海水交換率の季節変動が推定できる(柳、1986)。

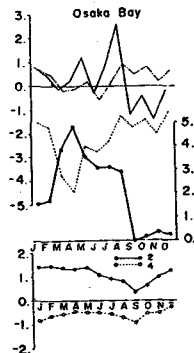


図4 大阪湾の毎月の塩分変動(細い実線)
流入河川水による塩分低下(破線)
蒸発・降水による塩分変動(1点鎖線)
海水交換による塩分変動(太い実線)
紀伊水道との平均塩分差(2)
播磨灘との平均塩分差(4)

4. 海水交換と汚染の尺度

海水交換によって沿岸海域の汚染物質は外洋へ流出していく。もし沿岸海域の海水が河川のように一方に流れ続けていれば、海水の交換時間を定義することはやさしい。すなわち問題とする海域の海水の体積を通過流量で割り算してやれば、交換時間が容易に推定できる。このような海水交換時間が明らかに出来れば、ある海水汚染問題の浄化対策を考える場合、どのような対策を立てればどの位の時間で効果が出てくるかも容易に予測出来る。

しかし先述したように一般に沿岸海域で卓越する流動は往復流である潮流なので、ある海域の海水交換は徐々に進行し、ある時その海域に存在した汚染物質が海水交換によって完全に外洋に流出するためには無限の時間を必要とする。

今仮想的なAとBという湾を考え、ある時この湾に存在した汚染物質を1とし、それが時間の経過と共に海水交換により次第に減少していく様子が図5のように表されたとする。この時A湾とB湾はどちらが海水交換が良い、汚染から回復しやすい湾であると言えるだろう。たとえば汚染物質が半分の量になる時間から見ると、A湾の方が速く半減するので、A湾の方が海水交換が良く、汚染から回復しやすい湾であると言える。しかし汚染物質が1割まで減少する時間から見ると、B湾の方が速く1割まで減少するので、B湾の方が海水交換が良く、汚染から回復しやすい湾ということになる。

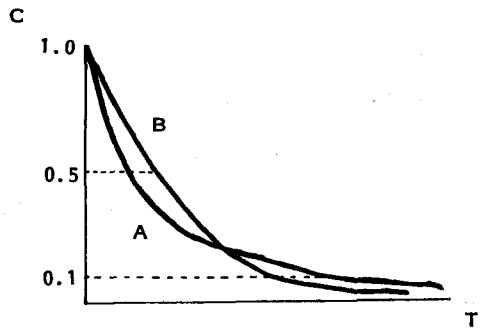


図5 仮想的な湾AとBにおける汚染物質の減少の様子

このように考えてみると、汚染に関連して海水交換の大きさを適切に表現するということはそう容易ではないことがわかる。それでは海水交換の大きさを適切に表現するパラメータとしてはどのようなものがあるのだろうか。それが次節で述べる平均滞留時間という概念である。

5. 平均滞留時間

図6に示したような仮想的な湾を考え、湾内のある物質粒子を考えよう。このとき、この物質粒子が湾内に流入してから時間 $t = \tau$ 、この物質粒子が今から湾を出ていくまでの時間 $t = \xi$ が定義できる。 τ はこの物質粒子の年齢 (age), ξ はこの物質粒子の滞留時間 (residence time) と呼ばれる。 $\tau + \xi$ は通過時間 (transit time) と呼ばれる (Takeoka, 1984)。

湾内の総ての物質粒子に関してその年齢分布関数 $\phi(\tau)$ と滞留時間分布関数 $\phi^*(\xi)$ が定義でき、

$$\int_0^{\infty} \phi(\tau) d\tau = 1, \quad \int_0^{\infty} \phi^*(\xi) d\xi = 1 \quad (5.1)$$

となる。また湾内のすべての物質粒子に関する年齢と滞留時間の平均をとれば、

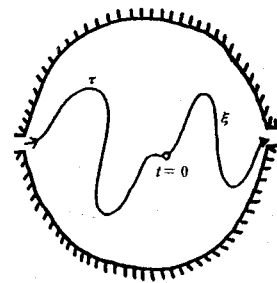


図6 仮想的な湾と物質粒子の年齢 (τ) と滞留時間 (ξ)

$$\tau_a = \int_0^{\infty} \tau \phi(\tau) d\tau, \tau_r = \int_0^{\infty} \xi \phi'(\xi) d\xi \quad (5.2)$$

として平均年齢 τ_a と平均滞留時間 τ_r が定義できる。湾内の物質分布が定常の場合は $\tau_a = \tau_r$ である。

また湾内への物質流入率を F_0 、湾内の物質存在量を M_0 とすれば、

$$M_0 = F_0 \cdot \tau_a = F_0 \cdot \tau_r \quad (5.3)$$

の関係が成り立つ。すなわち τ_a または τ_r がわかっていれば、 F_0 から湾内の物質存在量がわかり、それを湾の体積で割れば、平均濃度が推定できることになる。

今の瞬間湾内に流入する物質群を考えれば、それらの年齢は0であり、それらの物質の滞留時間分布関数 $\phi'(\xi)$ が定義できて、湾内に流入する物質群の平均滞留時間も定義できる。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \xi \psi'(\xi) d\xi \quad (5.4)$$

この平均滞留時間が平均通過時間と等しいことは自明である。また今の瞬間湾から出ていく物質群を考えれば、それらの滞留時間は0であり、それらの物質の年齢分布関数 $\phi(\tau)$ が定義できて、湾から流出していく物質群の平均年齢も定義できる。

$$\tau_a = \int_0^{\infty} \tau \psi(\tau) d\tau \quad (5.5)$$

実際にはある湾内で河川起源の物質、外洋起源の物質など様々な物質の年齢と滞留時間の分布関数が定義できるわけである。

実際に平均滞留時間を求める場合には、湾内にある物質を瞬間投入して、その物質の湾内存在量の時間変化 $r(t)$ がわかれば平均滞留時間は計算できる。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (5.6)$$

この $r(t)$ を残余関数 (remnant function) と呼ぶ(武岡、1984)。湾内の物質分散過程が線形であれば、様々な周期を持って時間的に変動する流入物質に対する滞留時間も、 $r(t)$ の重ね合わせたものを積分すれば推定可能である。

$r(t)$ を推定するにはある湾内に瞬間的に物質を投入し、その物質の湾内存在量の時間変化を明らかにすれば良い。現場海域の流動が再現されている数値模型実験や水理模型実験を行えば $r(t)$ は容易に明らかにできるが(Takeoka, 1986)、現場海域でそのような実験を直接行うことは通常不可能なので、次の節で述べるような方法で $r(t)$ 、 τ_r を推定する。

6. 残余関数、平均滞留時間の推定法

実際の湾内では陸起源物質の汚染が問題にされることが多い。汚染物質は通常河川水と共に流入してくるので、この問題は河川水の残余関数、平均滞留時間、または平均年齢を求めることになる。河川から流入してきた淡水のある湾での残余関数、平均滞留時間は次のようにして推定できる。

まず湾内の淡水存在量 F を次式で求める。

$$F = \frac{V \cdot (S_0 - S)}{S_0} \quad (6.1)$$

ここで V は湾の体積、 S_0 は湾外水の代表塩分、 S は湾内水の平均塩分を表す。(6.1)を用いて各月の湾内の淡水存在量の時間変動を求め、平均値と標準偏差で規格化して、淡水存在量の時間変動 $y(t)$ を求める。同様にして規格化した湾への淡水供給量の時間変動 $x(t)$ も求める。

このようにして求めた大阪湾の1976—1980年の淡水供給量と淡水存在量の変動を図7に示す。

湾への淡水供給量 $x(t)$ のたたみこみ積分で淡水存在量 $y(t)$ が与えられるとすれば両者の関係は次のようになる。

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t-\tau) h(\tau) d\tau \quad (6.2)$$

ここで $h(\tau)$ は単位応答関数でこの場合は残余関数を示す。 $h(\tau)$ を求める方法は種々あるが、ここでは比較的簡単で精度の良い「相関法」により $h(\tau)$ を推定する。淡水流入量と淡水存在量の相互相関係数 $C_{xy}(\tau)$ と淡水流入量の自己相関係数 $C_{xx}(\tau)$ は次の関係にある。

$$C_{xy}(\tau) = \int_0^T C_{xx}(\tau-\eta) h(\eta) d\eta \quad (6.3)$$

上式で T は観測期間を表す。普通観測値は月毎のように離散的なので上式を離散化する。

$$\begin{Bmatrix} C_{xy}(0) \\ C_{xy}(1) \\ \vdots \\ C_{xy}(m) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{xx}(0) & C_{xx}(1) & \cdots & C_{xx}(m) \\ C_{xx}(1) & C_{xx}(2) & \cdots & C_{xx}(m-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{xx}(m) & C_{xx}(m-1) & \cdots & C_{xx}(0) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(m) \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

上式で m は相互相関係数が正の相関を持っている月数を表す。データ解析より得られる $C_{xy}(\tau)$ と $C_{xx}(\tau)$ を用いて式 (6.4) を最小自乗法で解くことにより、 $h(\tau)$ が求められる。結果として得られる $h(\tau)$ は図8に棒線示すような離散的なものである。

この $h(\tau)$ が瞬間的に湾内に投入された単位物質の湾内存在量の時間変化を表している。各周波数帯の淡水流入量変動と淡水存在量変動の関係を表す周波数応答関数は $h(\tau)$ をフーリエ変換すれば求められるが、離散的な関数をフーリエ変換することは非常に難しい。そこで図8に示した離散的な $h(\tau)$ を非線形な最小二乗法の一つである近似マルカート法により、指数関数で近似する。

$$h(\tau) = a \cdot e^{-b\tau} \quad (6.5)$$

(6.5) 式をフーリエ変換すると周波数応答関数 $H(\omega)$ が求められる。

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \int_0^{\infty} a e^{-b\tau} e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{ab}{\omega^2 + b^2} - i \frac{\omega a}{\omega^2 + b^2} \\ &= H_R(\omega) + i H_I(\omega) \end{aligned} \quad (6.6)$$

$H(\omega)$ の絶対値 $|H(\omega)|$ が淡水流入量と淡水存在量の振幅比、偏角 $\phi(\omega)$ が両者の位相差を表す。

$$\begin{aligned} |H(\omega)| &= \{H_R^2(\omega) + H_I^2(\omega)\}^{1/2} \\ \phi(\omega) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \right\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

大阪湾で得られた周波数応答関数を図9に示す(柳・高橋, 1988)。図中の破線は大阪湾を閉鎖された池と考えた場合の振幅比と位相差を示していて、実線と破線の差が大阪湾の海水交換能力を表している。図中の

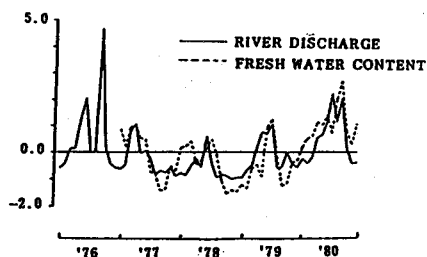


図7 規格化した大阪湾の淡水供給量と淡水存在量の時間変動

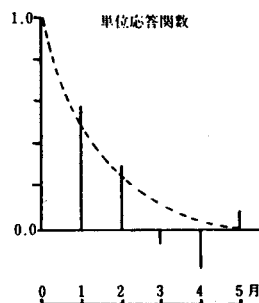


図8 大阪湾の淡水流入に対する離散的な単位応答関数(実線)と指数関数で近似した単位応答関数(破線)

左端は定常的な淡水流入に対する淡水存在の応答関係、すなわち平均滞留時間を示していて、この図によれば大阪湾の淡水の平均滞留時間は約1.5カ月であることがわかる。また同じ図より大阪湾で卓越している1年周期の淡水流入量の変動に対して淡水存在量は振幅比1.5カ月（淡水存在量の季節変動の振幅は淡水流入量を1.5カ月倍したもの）、位相差約0.2カ月で応答することがわかる。

ちなみに瀬戸内海の海水全体の平均滞留時間は約1.5年である（Takeoka, 1986）

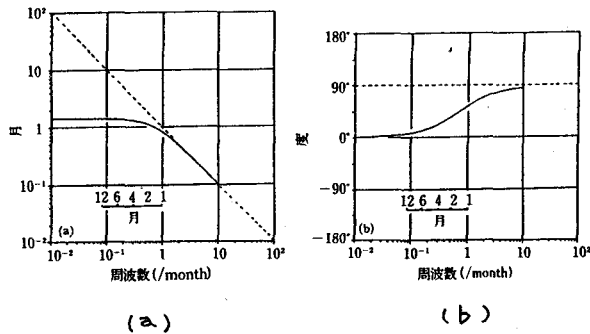


図9 振幅応答 (a) と位相差 (b) を表す大阪湾の淡水流入に対する周波数応答関数

7. 化学・生物作用

塩分のような保存物質と窒素、リンなど栄養塩のような非保存物質の沿岸海域における物質輸送機構が最も異なる点は、後者は沿岸海域において化学・生物作用により“粒子化”し、海域の移流・分散作用を受ける他に、自ら沈降速度を持ち、海水とは挙動を共にしないということである。

たとえば陸上から無機・溶存態の形で海域に流入した窒素やリンは、光合成により植物プランクトンの体内に取り込まれ、有機・懸濁態の粒子になる。植物プランクトンはさらに動物プランクトン、魚類と食物連鎖を通じてより高位の摂食者、捕食者に取り込まれることによりその粒子の大きさを変えていく。粒子は枯れ死したり、糞として生体内から排出された場合はデトリタス (detritus) となる。この場合それぞれの粒子がその挙動を海水と共にするならば、非保存物質の輸送機構を特に問題にする必要はない。しかし通常、海水中の粒子は海水より重いために海水とは同じ挙動をせず、海水に対して相対的な沈降速度を持つ。

デトリタスはバクテリアにより分解され、再び無機・溶存態の形に回歸する。したがって溶存、懸濁の形態を繰り返してとる栄養塩など非保存物質の輸送機構を明らかにするためには物質輸送の基礎方程式中に無機・溶存態の有機・懸濁態化、懸濁粒子の沈降、有機・懸濁態の無機・溶存化といった過程を定量的に評価して、取り込んでやる必要がある。

その第一歩として、ここでは化学・生物作用を最も簡単化して、粒子の運動が沿岸海域の物質輸送にどのような影響を及ぼすか考えてみよう。図10のようなモデルを考える (Takeoka and Hashimoto, 1988)。x は水平軸で、x=0 が湾奥、x=L が湾口である。鉛直的には2層を考え、それぞれの層厚をHとする。u₁, u₂ は上層、下層の流速、w は上下層間の鉛直流速、K_h, K_v は水平、鉛直拡散係数を表す。基本的な流動場は河口域の重力循環流を考えているので、u₁ は正、u₂ は負、w は正（上向き）となる。いまwは湾奥で最大、湾口まで直線的に減少し0になると仮定すれば、

$$w(x) = w(0) \frac{L-x}{L} \quad (7.1)$$

となる。河川水の流入による直接的な流量を無視すれば、 u_1, u_2, w の間には次の関係がある。

$$u_1 = -u_2 = \frac{w(0)(2-x/L)x}{2H} \quad (7.2)$$

したがって上層の平均流速 U は

$$U = \frac{1}{L} \int_0^L u_1 dx = \frac{2}{3} u_1(L) \quad (7.3)$$

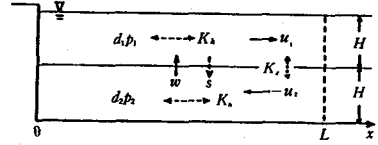


図10 モデル

となる。このような輸送場における窒素、リンなど栄養塩の各層での溶存態、懸濁態の濃度を支配する方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} H \frac{\partial D_1}{\partial t} &= HK_b \frac{\partial^2 D_1}{\partial x^2} - H u_1 \frac{\partial D_1}{\partial x} - K_z \frac{D_1 - D_2}{H} + w D_2 - H p D_1 + H d D_1 \\ H \frac{\partial D_2}{\partial t} &= HK_b \frac{\partial^2 D_2}{\partial x^2} - H u_2 \frac{\partial D_2}{\partial x} - K_z \frac{D_2 - D_1}{H} - w D_2 + H d P_2 \\ H \frac{\partial P_1}{\partial t} &= HK_b \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} - H u_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} - K_z \frac{P_1 - P_2}{H} + w P_2 - s P_1 + H p D_1 - H d P_1 \\ H \frac{\partial P_2}{\partial t} &= HK_b \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} - H u_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} - K_z \frac{P_2 - P_1}{H} - w P_2 + s P_1 - H d P_2 \end{aligned} \quad (7.4)$$

ここで t は時間、 $D_1(x, t)$ 、 $D_2(x, t)$ は上層、下層の溶存物質濃度、 $P_1(x, t)$ 、 $P_2(x, t)$ は上層、下層の懸濁物質濃度、 s は粒子の沈降速度、 p は基礎生産速度、 d は分解速度である。基礎生産は上層でのみ起こり、分解は上、下層、両方で起こると仮定している。したがって、このモデルでは化学・生物作用は s, p, d の3つのパラメータに要約されていることになる。

このモデルを用いて湾奥の上層に投入された溶存態栄養塩の湾内における平均滞留時間を求めてみよう。

初期条件は

$$D_1(x, 0) = \delta(x), D_2(x, 0) = P_1(x, 0) = P_2(x, 0) = 0 \quad (7.5)$$

ここに δ はディラックのデルタ関数である。境界条件は

$$\frac{\partial D_1}{\partial x} = \frac{\partial D_2}{\partial x} = \frac{\partial P_1}{\partial x} = \frac{\partial P_2}{\partial x} = 0, \quad \text{at } x=0 \quad (7.6)$$

$$D_1 = D_2 = P_1 = P_2 = 0, \quad \text{at } x=L \quad (7.7)$$

この初期条件、境界条件のもと(7.4)式を解く。そうするとその解から溶存態と懸濁態の物質を合わせた全物質の湾内での滞留量の時間変化がもとまる。

$$r(t) = \int_0^L (D_1 + D_2 + P_1 + P_2) H dx \quad (7.8)$$

$r(t)$ は残余関数と呼ばれる。 $r(t)$ を時間積分すれば

$$T_r = \int_0^\infty r(t) dt \quad (7.9)$$

により投入された物質の湾内における平均滞留時間 T_r が得られる。

表1に示したような各パラメータ（瀬戸内海の大阪湾を想定している）を用い、数値計算により得られた物質の残余関数を図11に示す。図中にはs, p, dが0すなわち塩分のような保存物質の残余関数も示してある。この図から非保存物質の方が湾内における物質量の減少は遅く、保存物質よりも長く湾内に留まることがわかる。これらの残余関数を積分して得られる平均滞留時間は栄養物質が64日、保存物質が39日であり、両者の比は1.6となった。

柳・高橋（1988）は実際の大阪湾のデータ解析から淀川から流入する保存物質である淡水（塩分）の平均滞留時間は1.5カ月で、非保存物質である窒素の平均滞留時間は2.5カ月であることを明らかにしているが、この計算結果は現実の両者の平均滞留時間の違いをうまく説明できる。

以上の考察の結果、窒素、リンなどの栄養物質のように化学、生物作用を受けて溶存、懸濁態と形態変化を行って、海水に対して相対的な沈降速度を持つような懸濁態に変化する物質は、溶存態のままの物質と比較して、より長く沿岸海域に滞留することがわかった。

8. おわりに

以上沿岸海域の海水交換率、平均滞留時間の概念とそれらの推定法に関して述べてきた。沿岸海域のこのようなバルクのパラメータを決めているものは基本的には潮流、潮汐残差流、吹送流、密度流といった流動の素過程であることは言うまでもない。このような流動の素過程と海水交換率、平均滞留時間との関連については別著（柳、1989）を参照して頂ければ幸いである。

参考文献

- 柏井 誠（1984）：海水交換概念と海水交換率。日本海洋学会誌、40、135-147。
 武岡英隆（1984）：沿岸海域の海水交換。沿岸海洋研究ノート、21、169-182。
 Takeoka, H. (1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. Continental Shelf Research, 3, 311-326.
 Takeoka, H. (1986): The frequency response of the Seto Inland Sea to several time-varying inputs. Continental Shelf Research, 6, 627-638.
 Takeoka, H. and T. Hashimoto (1988): Average residence time of matter in coastal waters in a transport system including biochemical processes. Continental Shelf Research, 8, 1247-1256.
 柳 哲雄・柴木秀之・武岡英隆（1985）：播磨灘・大阪湾の塩分、窒素、栄養塩収支。沿岸海洋研究ノート 22、159-164。
 柳 哲雄（1986）：大阪湾の海水交換率の季節変動。沿岸海洋研究ノート、24、72-77。
 柳 哲雄・高橋 暁（1988）：大阪湾の淡水応答特性。海と空、64、63-70。
 柳 哲雄（1989）：沿岸海洋学－海の中でのものはどう動くか。恒星社厚生閣、東京、154p。

表1 計算に用いたパラメータの値

L (km)	H (m)	U (cm/s)	K _s (cm^2/s)	K _r (cm^2/s)	s (cm/day)	P (/day)	D (/day)
40	10	1.5	10 ⁴	0.5	200	0.3	0.4

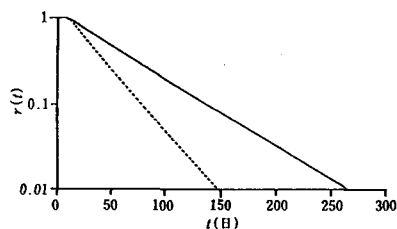


図11 保存物質（破線）と非保存物質（実線）の残余関数