

感潮河川における物質輸送の機構について (第2報)

上嶋英機*・早川典生**・国司秀明***

1. はじめに

物質輸送及び、拡散における速度 shear の果す役割については、Hansen¹⁾ (1965), Fischer²⁾ (1972) らにより理論的に示されたが、実測値からの具体的な計算例は乏しく、特に断面変動の著しい、感潮河川内での算定方法においては未検討である。前報³⁾では、潮汐変動に伴って断面変動の大きな、感潮河川における多断面、多測点での詳細な観測資料を用いて物質輸送を算出し、特に断面変動の効果については無視出来るものであるとの結論を得た。また、鉛直方向と水平方向の shear 効果による物質輸送への寄与及び分散について論じた。

本報では、前報と同様な断面変動の著しい感潮河川横断面の鉛直2次元に於ける物質輸送について、計算方法の吟味を主体として行うものである。

ところで、感潮河川断面での塩分、流速各要素の実測は、表層を基準に下層へ一定間隔で測定されていることが通例である。従って固定された座標ではなく、鉛直方向の測定数は時間的に増減する。このような断面内で測定された各要素の値は、その測点を代表する個々の面積(代表面積)が変動するため、物質輸送の各項を計算するに当っては、これらの点を充分考慮しなければならない。

そこで本報ではこの点に注目して計算方法の吟味を行い前報の結果を見直そうとするものである。まず観測値から固定座標における値を求め、各要素の分解された成分の時間平均、断面平均の手順とそれによる合理的な計算方法を確立する。次に分解された成分より成る全項目について有効な項の選定を行いその結果得られた輸送量について考察し shear 効果を検討するものである。

2. 計算方法の検討

2.1 各要素の分解と定義

観測では図-1に示すように表層から深さ方向に一定間隔で測定しているが(○)、潮汐に伴い水位が変動するため、毎時測点数と位置および代表する面積要素が変る。

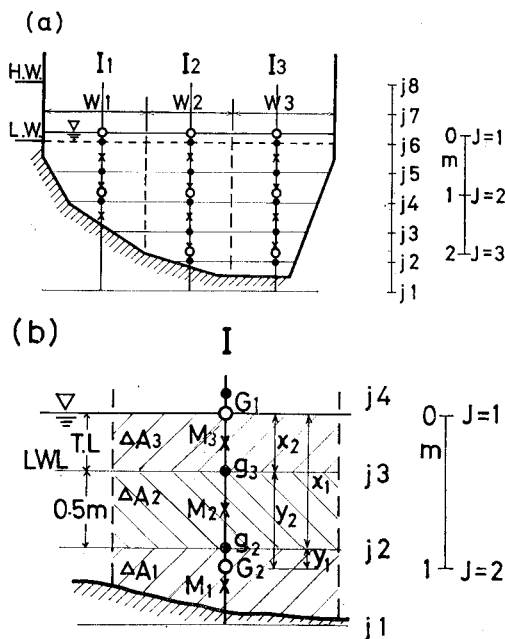


図-1 固定座標要素位置図

そこで、L.W.L.を基準に、深さ方向に実測間隔の1/2の深さで固定点(●)を設け、各固定点での流速、塩分値を実測値(○)から内挿して求める。次に固定間の面積要素を考え、それを代表する値を、上下の固定点での値から平均して求めた。従って、塩分輸送量を定める流速(u)、塩分(s)、及び面積要素(ΔA)は、 x を流軸方向、 y を横断方向、 z は鉛直方向の距離、 t を時間として断面内の面積要素中心点 y_i, z_j (×)に於て $u_{ij}^k = u(x, y_i, z_j, t_k)$, $s_{ij}^k = s(x, y_i, z_j, t_k)$, $\Delta A_{ij}^k = \Delta A(x, y_i, z_j, t_k)$, $H(x, y_i, t_k) = h(x, y_i) + \eta(t_k)$, ($\eta(t_k)$ は水位変動量)で得られる。各測定点時刻 t_k の断面積 A_k および、断面平均流速 $\bar{u}_A^k$ は次のようにして求めた。

$$A_k = A(t_k) = \sum_{ij} \Delta A_{ij}^k \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\bar{u}_A^k = \bar{u}_A(x, t_k) = \frac{1}{A_k} \sum_{ij} u_{ij}^k \cdot \Delta A_{ij}^k \quad \dots \dots \dots (2)$$

また、断面時間平均流速 $\bar{u}_A$ は次のようにして求めた。

$$\bar{u}_A = \frac{1}{NT} \sum_k \bar{u}_A^k \quad (NT = \sum_k t_k) \quad \dots \dots \dots (3)$$

* 正会員 工 修 通産省中国工業技術試験所

** 正会員 Ph. D 通産省中国工業技術試験所

*** 理 博 京都大学教授 理学部地球物理学教室

となり、その時間平均、及び断面平均は消去できない。 U_0 についても、B 系列では $(U_0)_B \neq 0$ であり、A 系列の手順と結果は異なる。 U_i についても得られた値は異なる。以上から各項の計算を進める上で、A 系列による手順の結果を使用する。

2.3 塩分輸送量に寄与する各項の計算方法

(4), (5), (6) 式を使用し、平均輸送量 $\bar{F}$ について下式が得られる。

$$\bar{F} = Q_r \bar{s}_A + \overline{A_1 S_A} \cdot \bar{u}_A + \bar{A} \cdot \overline{U_A S_A} + \overline{A_1 U_A S_A} + \overline{A(u_a s_a)_A} \dots \dots \dots (10)$$

第5項の shear 効果による項を、(11) 式に分解すると

$$\overline{A(u_a s_a)_A} = \bar{A}(\bar{u}_a \bar{s}_a)_A + \overline{A_1(u_a s_a)_A} \dots \dots \dots (11)$$

(11) 式はまた、(7) 式を使用し分解すると、

$$\overline{A(u_a s_a)_A} = \bar{A}[(\bar{u}_a + U_a)(\bar{s}_a + S_a)]_A = \bar{A}(\bar{u}_a \bar{s}_a)_A + \bar{A}(\bar{u}_a S_a)_A + \bar{A}(U_a \bar{s}_a)_A + \overline{A(U_a S_a)_A} \dots \dots \dots (12)$$

(12) 式の第2, 第3項は

$$\bar{A} \cdot (\bar{U}_a \bar{s}_a)_A = \sum_k \sum_{ij} U_{a,ij}^k \bar{s}_{a,ij} A_{a,ij}^k$$

であり手順を変え時間での和を先に行うことにより $(\bar{s}_a)$ は一定値 $\bar{U}_a^T = 0$ の結果よりこの項は消える。第2項も同様である。

同様の分解を表—1をもとに、(12) 式の第1, 第4項について行うことができる。

以上を整理し $\bar{F} = \bar{u} \bar{s} \bar{A}$ を構成する項としては下記のものとなる。

$$\bar{F} = Q_r \bar{s}_A + \overline{A_1 S_A} \cdot \bar{u}_A + \bar{A} \cdot \overline{U_A S_A} + \overline{A_1 U_A S_A} + \bar{A}(\bar{u}_{at} \cdot \bar{s}_{at})_A + \bar{A}(\bar{u}_{av} \cdot \bar{s}_{av})_A + \bar{A}(\bar{U}_i \bar{S}_i)_A + \overline{A(U_0 S_0)_A} + \overline{A_1(U_0 S_0)_A} + \overline{A_1(U_0 S_0)_A} \dots (13)$$

i) $\bar{F}$ については、 $\bar{F}_1 = \bar{u} \bar{s} \bar{A}$, $F_2 = T_1 + \sim T_5$, $F_3 = T_1 + \sim T_4 + T_7 + \sim T_{12}$ として比較した。

ii) T_7 と T_8 項では $T_7 = \sum_i \bar{u}_{at,i} \cdot \bar{s}_{at,i} \bar{A}_{i,j}$ として計算した。

iii) T_9, T_{10} 項では $T_9 = \bar{A} \cdot (\sum_k (\sum_i U_{i,i}^k S_{i,i}^k \sum_j A_{i,j}^k) / A_k)$ として計算した。

3. 計算結果の考察

この方法により前報³⁾で報告した吉井川、巴川での資料を使用して計算した。その結果を表—2に示す。 F_1 と F_2 とはよい一致を示し各断面とも $\bar{F} \neq 0$ である。shear 効果である T_3 の値は $T_L + T_R$ と全く一致し、 T_7 から T_{12} の和とほとんど差はない。

また、 F_2 は F_1 に一致するが、 F_3 はよく一致しない例もある。時間平均と断面平均値との偏差が、複雑に関連しているからであると思われる。

表—2 吉井川、巴川での塩分輸送量計算結果

		Yoshiigawa (1974)			Tomoegawa(1970,1972)		Tomoegawa (1976)	
	%m ³ /sec	Sec 1	Sec 3	Sec 5	Hagoromo	Chigo	Hagoromo	Chigo
$\bar{F}_1$	$\frac{1}{T} \int \int \int \text{Aus}$	40.8	367.3	231.4	-6.8	6.8	5.8	9.9
F_2	$T_1 + \sim T_5$	41.3	367.3	231.3	-6.9	6.7	5.9	9.9
F_3	$T_1 \sim T_4, T_7 \sim T_{12}$	49.3	334.0	218.4	-5.0	6.5	3.2	10.4
T_1	$Q_r \bar{s}_A$	688.9	886.8	467.8	23.4	10.8	17.7	11.4
T_2	$\overline{A_1 S_A} \cdot \bar{u}_A$	8.0	7.5	2.7	0.1	1.1	0.1	2.6
T_3	$\bar{A} \overline{U_A S_A}$	-99.6	-69.6	74.4	-7.4	0.01	0.5	0.6
T_4	$\overline{A_1 U_A S_A}$	-7.0	3.3	-4.3	0.7	-0.4	-0.1	0.6
(T_5)	$\bar{A} \cdot (\bar{u}_a \bar{s}_a)_A$	-549.0	-460.1	-309.3	-23.7	-4.8	-12.3	-5.3
(T_L)	$\bar{A} \cdot (\bar{u}_a \bar{s}_a)_A$	-520.0	-448.3	-282.0	-24.9	-4.1	-13.1	-4.2
T_7	$\bar{A}(\bar{u}_{at} \cdot \bar{s}_{at})_A$	37.3	-10.2	5.0	-1.9	0.05	-0.01	0.1
T_8	$\bar{A}(\bar{u}_{av} \cdot \bar{s}_{av})_A$	-426.0	-352.5	-253.0	-12.5	-3.1	-6.6	-4.0
T_9	$\bar{A}(\bar{U}_i \cdot \bar{S}_i)_A$	-47.2	-33.6	-37.2	-1.6	-0.6	-0.1	-0.6
T_{10}	$\bar{A}(\bar{U}_v \cdot \bar{S}_v)_A$	-122.8	-108.0	-56.3	-11.1	-1.7	-5.8	-1.4
(T_R)	$\bar{A}(\bar{u}_a \bar{s}_a)_A$	-28.5	-11.3	-27.2	1.2	-0.7	0.8	-1.1
T_{11}	$\bar{A}_1(\bar{U}_i \bar{S}_i)_A$	0.1	5.6	2.3	0.5	-0.01	0.1	0.2
T_{12}	$\bar{A}_1(\bar{U}_v \bar{S}_v)_A$	7.5	5.3	4.8	0.4	-0.2	0.0	0.3
$T_L = T_7 + \sim T_{10}$		-558.7	-504.3	-341.5	-27.1	-5.3	-12.5	-5.9
$\bar{U}_A$	cm/sec	2.1	3.7	3.5	0.9	4.6	0.77	4.9
$\bar{S}_A$	‰	20.86	17.25	13.3	15.62	4.59	12.54	7.01
$\bar{A}$	m ²	1606	1392	1012	172	55.8	184	39.8

座標系の設定では、固定座標系が最も合理的ではあるが、以前に行った相対水深法の T_3 及びその分解項の値は、固定座標系と大差ない。

以上の各項の計算に於て各項を構成する個々の成分については、表-1 に示す検討を行い、計算上の矛盾と誤りがないことを確認した。

3.1 物質輸送に寄与する項の評価

shear 効果の寄与する項の中で全断面とも T_8 の鉛直循環流による寄与が他項より 1 オーダ大きい。

吉井川に於ては T_{10} の鉛直方向の shear による項の寄与も大きく、 T_8 と T_7 の水平循環流の項は下流ほど大きく潮流流の大きさと対応している。 T_9 は T_7 より大きい 3 断面での変化は少ない。 $\bar{F}$, T_1 , T_3 , T_5 の項と $T_7 \sim T_{10}$ の各項の関係を 図-3 に示す。

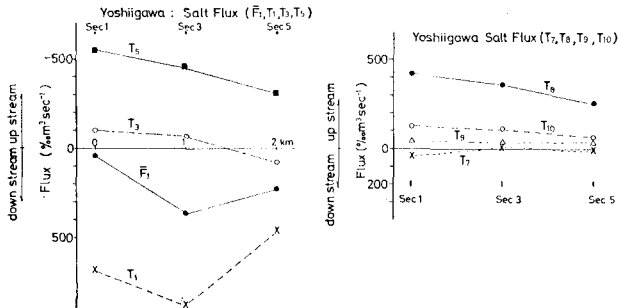


図-3 各項の輸送量 (Salt Flux)

$\bar{F}_1$ の値は大局的には、 T_1 と T_5 のバランスによるが、河口より上流断面で河川流の影響が大きく示される。また、 T_3 項の値は大きく Fischer (1976)⁴⁾ が示すところの“Trapping”と呼ばれる寄与である。なお、断面積の変動 (A_1) により生じる寄与 T_2 , T_4 の項は、無視出来る値であった。

3.2 分散係数の算定

さて $\bar{F}$ が一般的に 0 ではあり得ず、鉛直 2 次元を通しての物質輸送の中で $\bar{F}$ に寄与する項としては前述のごとく、 T_1 の河川流量の項、 T_3 の潮流流の位相に伴う項、そして T_5 の shear 及び循環流の項である。特に感潮河川内では鉛直循環流の効果が大きく分散に寄与している。

縦断方向の分散係数は平均状態が定常の時、次式で定義される。

$$K_x = Q_T \bar{s}_A / \bar{A} \frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x} \quad (14)$$

(14) 式より表-2 の $Q_T \bar{s}_A (T_1)$ の結果を使用し K_x を算出 K_1 とした。また、(14) 式の $Q_T \bar{s}_A$ の代りに $TT = -(T_2 + T_3 + T_4 + T_5)$ において K_x を算出し K_2 とした。

さらに、Fischer にならって shear 分散の項について

求めた。

$$D_0 = - \left(\frac{T_7 + T_8 + T_9 + T_{10}}{\bar{A} \frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x}} \right) \quad (15)$$

$$D_0 = -(D_1 + D_2 + D_3 + D_4)$$

ところで表-2 の結果より一般的に、 $F \neq 0$ であるため非定常な場合の分散係数の算出方法を検討した。すなわち、 $\partial \bar{s}_A / \partial t \neq 0$ での一次元分散の方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{A} \bar{s}_A) + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{A} \bar{u}_A \bar{s}_A) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \bar{A} K_x \frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x} \right\} \quad (16)$$

を考える。一方平均塩分輸送量 $\bar{F}$ を用いて表せば

$$\frac{\partial \bar{A} \bar{s}_A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{F}) = 0 \quad (17)$$

である。(17) 式に (16) 式を代入すれば

$$-\frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{A} \bar{u}_A \bar{s}_A) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{A} K_x \frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x} \right) \quad (18)$$

を得る (16) 式より断面間での分散係数 K_A を求めれば次式となる

$$K_A = \frac{[\bar{A} \bar{u}_A \bar{s}_A]_i^2 - [\bar{F}]_i^2}{\left[\bar{A} \frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x} \right]_i^2} \quad (19)$$

吉井川の Sec 1, 3, 5 の 3 断面の値を用いて (19) 式の K_A を求めた。以上の結果を表-3 に示す。shear 分散項の中では D_2 の鉛直循環流による項

表-3 分散係数 (吉井川 3 断面に於ける値)

	Sec1	Sec3	Sec5
$\bar{A}$ m ²	1606	1392	1012
$\bar{s}_A$ ‰	20.86	17.25	13.3
dx m	2000	2000	
D_0 (T_5)	47.4×10^4	43.9×10^4	38.7×10^4
D_1 (T_7)	-3.2	1.0	-0.7
D_2 (T_8)	36.7	34.0	31.6
D_3 (T_9)	4.1	3.1	4.7
D_4 (T_{10})	10.6	10.7	7.0
K_1	2.4×10^6 cm ² sec ⁻¹	3.4×10^6	2.3×10^6
K_2	2.2×10^6	1.7×10^6	1.2×10^6
K_A	8.7×10^5 cm ² sec ⁻¹		

が最も大きく全体の shear の中で支配的である。 $\bar{F} \neq 0$ として断面間で求めた Sec 3 での分散係数 (K_A) は K_1 より合理的ではあるが、(19) 式の分母の算出の精度の点で K_2 より低目に出る。なお D_0 , $D_1 \sim D_4$ について関係を 図-4 に示す。

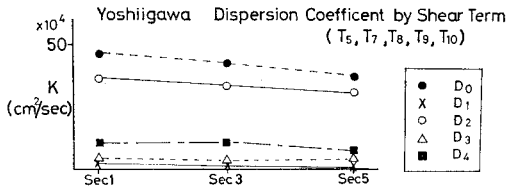


図-4 Shear 項の分散係数分布図

4. おわりに

以上、断面変動のある場合の計算方法について、各要素の成分、項について検討し、面積要素を考慮した平均値の計算法を確立し、その妥当性を確かめ、この方法により新たに吉井川、巴川の観測資料を基に塩分輸送量を計算し、非定常な場合での断面間での分散について一例を示したが、今後この点について検討していきたい。

本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究「瀬戸内海全域の汚濁予測に関する研究」の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) Hansen, D. V.: Currents and mixing in the Columbia River Estuary, Trans. 4th Conf. Ocean Sci. and Ocean Eng., pp. 943-955, 1965.
- 2) Fischer, H. B.: Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, Jour. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 671-687, 1972.
- 3) 上嶋英機・藤原建紀・早川典生: 感潮河川における物質輸送の機構について(第1報), 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 239-247, 1975.
- 4) Fischer, H. B.: Mixing and dispersion in estuaries, Annual Review of Fluid Mech., Vol. 8, pp. 107-133, 1976.