

感潮河川における物質輸送の機構について (第1報)

上 嶋 英 機*・藤 原 建 紀**・早 川 典 生***

要 約 Estuary (感潮河川) の一つである吉井川において河口より上流 8 km 間, 7 断面において潮位, 潮流, 塩分の流軸方向および横断方向の分布と変動を明らかにし, 特に著者の一人が先に行った巴川での例と比較し, 潮差が平均水深に対して無視できない川での物質の輸送機構について検討した。潮差が無視できる場合の例として, 東京湾湾口での実測例と比較を行い, すでに Fischer (1972) が明らかにした速度シアの効果に比較して, 潮汐変動による断面変化の効果がどの程度であるかを明らかにした。また, Dyer (1974) が平均水深に対して潮差が無視できない場合での, 成層状態の異なる Estuary について実測例よりシア効果を見積っているが, 同様にして, 潮差が無視できない吉井川, 巴川と無視できる東京湾湾口について解析し, Dyer らの解析例と比較した。その結果, 吉井川における流軸方向の分散係数を求め, 横断方向での実測値を用いて計算した分散係数と比較し, 検討した。

1. ま え が き

宇野木^{1),2)}, 宇野木・上嶋・山下³⁾ らによる河川潮汐の研究として, 河川の横断面内の流れの分布はきわめて複雑で, 強い水平シアが存在し, このシアが流軸方向の物質の拡がりに大きな効果をもたらすことが明らかにされた。従来の研究では潮差が平均水深に比較して無視できる場合であったが, 日本の河川ではかならずしもそうではないため, 物質輸送や分散において水位変動による効果を シア効果とともに充分考える必要がある。

物質輸送や分散に寄与するシア効果についての議論はそれほど古くはなく, 同時に多くの断面で測定を行いシア効果について量的な検討をした例は少ない。現在までのシア効果に対する議論の経過をあげるならば, Bowden (1965)⁴⁾ は成層する Estuary における塩分収支でのシアの効果について, 塩分輸送量が潮汐周期における鉛直での塩分, 流速のプロファイルの変化によるものであるとし, Hansen (1965)⁵⁾ は Columbia River 河口での単位時間

当りの塩分輸送量を一つの断面平均値と, それからの偏差について考え, シア効果の他に断面変化による効果を考慮している。Fischer (1972)⁶⁾ は塩分輸送量のシア効果を鉛直および水平循環流とに分けて考察している。この場合, 断面変化による効果は無視して考えている。Dyer (1974)⁷⁾ は各種タイプの Estuary の資料に基づき, シア効果についてさらに吟味を重ね, Fischer が無視した断面変化による効果について新たに加味し, 弱混合型の Estuary でのシア分散に対する水平循環流の寄与は小さく, 緩混合型の Estuary では水平循環流と鉛直循環流の寄与は同程度としている。

本論文においては, 断面変化の著しい日本の感潮河川である, 1974 年に著者らが観測を行った吉井川の資料を中心に, 既報の巴川の資料⁸⁾, 断面変化による効果は無視できると考えられる東京湾湾口での資料⁹⁾ も用いて断面変化による効果を定量的に比較する。また, シア効果を水平シアと鉛直シアの効果に分け, その比重を議論する。その結果から, 各成分による分散係数を求め考察する。また, Hansen and Rattray (1966)⁹⁾ に従って, 成層循環図 (S-C ダイアグラム) により吉井川, 巴川の Estuary としての位置付けを行った。

吉井川 (図-1, 表-1) は児島湾湾口に河口を持つ川幅約 500 m の一級河川であり, 河口より上流 8.5 km に堰堤を持つ。河床勾配は極めて緩やかで, 大潮時の潮差は 1.6 m である。潮差と平均水深の比は吉井川, 巴川とも 0.5~1.0 の範囲にあり, 潮差は無視できない大きさである。一方, 東京湾湾口での値は 0.04 であり, 無視できるものであった。吉井川での観測は河口より約 7 km 間の感潮区域で 1 km ごとに 7 断面 (Se 1~Se 7) を取り, Se 1 および Se 3, 5 では断面内に測線をおのおの 5 および 4 本とり, 他は断面中央に 1 測線取った。測定水深は表層より 1 m 間隔であり, 測定項目は, 水位, 流れ, 塩分, 水温であり, 1974 年 9 月 16 日から 17 日 (大潮) では 1 時間ごとと 25 時間連続, 1974 年 9 月 23 日 (小潮) では 1 時間ごとと 13 時間連続観測を行った。

巴川の羽衣橋, 稚児橋での観測 (表-1) は, おのおの断面内で 5 測線とり, 測定水深は 0.5 m 間隔である。他の測定条件は吉井川と同様である。東京湾湾口では塩

* 正会員 工 修 通産省 中国工業技術試験所

** 理 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

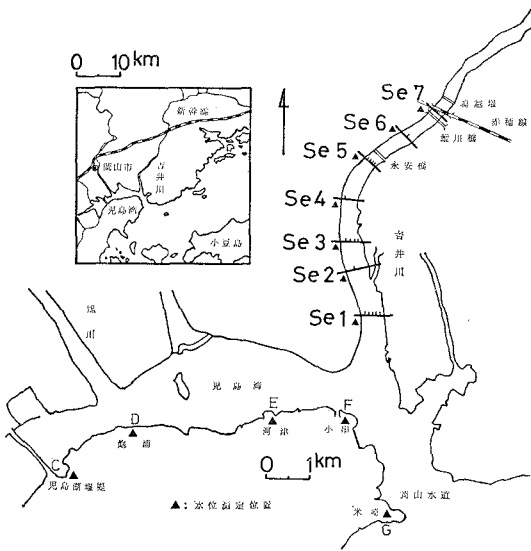


図-1 吉井川における観測位置図

分、流速を25時間連続観測した資料⁹⁾を使用した。

2. 潮汐波の変形について

児島湾より吉井川に侵入する潮汐波は、図-2に示すように上流に行くに従い波形の変形が表われ、山の部分がくずれ、谷が平になる河川潮汐の特徴的現象が見られる。断面積の変化はそれほど大きくなく、一様水深でせき止められた水路への長波の進入と考えられる。

潮汐の調和分解は1時間ごとの水位記録25個を使用し、定数項、 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_{12}$ の速度を与えて最

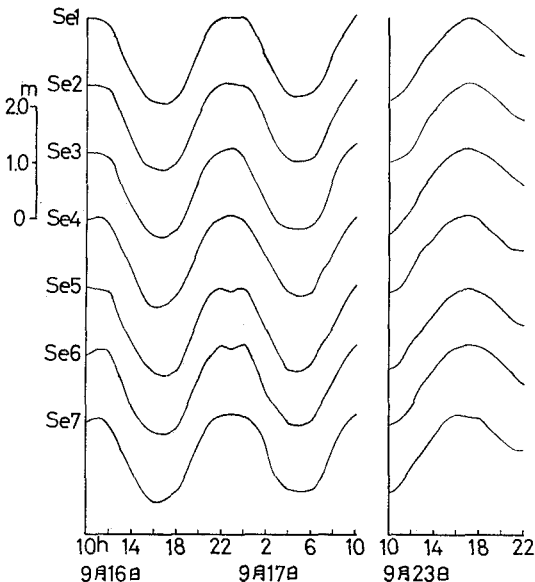


図-2 吉井川における潮位記録、大潮(左、1974年9月16、17日)小潮(右、1974年9月23日)

小二乗法を用いて調和分解を行った。図-3に1, 1/2, 1/4, 1/6日潮について振幅、位相をそれぞれ河口に対する比および差で示す。 M_2 潮が一次元、半無限、一様水

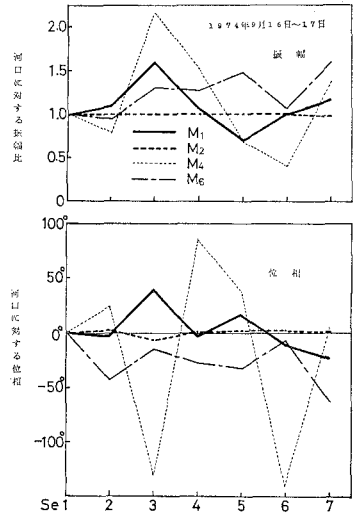


図-3 吉井川における潮位の調和分解結果、河口に対する振幅比(上)と位相おくれ(下)

深 h の摩擦のない水路に入って来た場合、水位変動 η に関して3次の項までとった方程式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = & -\frac{3g\sigma^2 a^2}{C^2} \cos 2\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{13g^2 \sigma^2 a^3}{8C^4} \cos \sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{9g^2 \sigma^3 a^3}{8C^5} x \sin \sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{45g^2 \sigma^2 a^3}{8C^4} \cos 3\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{81g^2 \sigma^3 a^3}{8C^5} x \sin 3\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 t は時間、 x は河口から上流方向への距離、 $C = \sqrt{gh}$ 、 g は重力加速度、 σ は M_2 潮の位相速度、 a は河口での M_2 潮の振幅である。式(1)の解は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \eta = & a \cos \sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) - \frac{3g\sigma a^2}{4C^3} x \sin 2\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{17g^2 \sigma a^3}{32C^5} x \sin \sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & - \frac{9g^2 \sigma^2 a^3}{32C^6} x^2 \cos \sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & + \frac{21g^2 \sigma a^3}{32C^5} x \sin 3\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \\ & - \frac{27g^2 \sigma^2 a^3}{32C^6} x^2 \cos 3\sigma \left(t - \frac{x}{C}\right) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

2倍潮 (M_4) および3倍潮 (M_6) の振幅は、それぞれ約 $3g\sigma a^2 x / 4C^3$ ¹⁰⁾、 $21g^2 \sigma a^3 x / 32C^5$ となり、 x を7kmとし

て吉井川に適用して見ると 3.0cm, 0.7cm となり, 入口よりの位相おくれは $21^\circ, 32^\circ$ となる。実測値, 図-3 では M_4 の振幅, 位相おくれは単調な増加ではない。 M_6 では, 河口に対する振幅, 位相おくれの増加は約 1.7cm, -65° であり, 計算値とは異なっている。これらは堰による反射, 底面摩擦, 断面変化などを考慮する必要性を示しているものと考えられる。

3. 流れと塩分の分布

図-4 に吉井川における流れと塩分の縦断面分布の例を示す。河口では常に緩混合型であり, 上流では弱混合の塩水くさび型である。中央部では満潮時に緩混合型を示し, 干潮時に弱混合型を示す。しかし, Se 7 では水深が深く凹になっているのと, 堰の影響のため海水の淀みを示し, 塩分濃度は高く, 時間的にも濃度変化は少ない。次に 図-5 に吉井川河口 (Se 1) の断面内における各点の平均流速と平均塩分の分布を示す。この分布は河床地形や, 河川のわずかな湾曲に対しても敏感に影響を受け, 海水の流入位置が断面によって異なっている。また断面内上層中央部には河川水による下流への最強流があり, 海水の侵入による上流への最強流は, 中層のほぼ中央に見られる。断面内の流れの分布は巴川⁹⁾と同様の傾向を示し, 上層は下流向きの時間帯が長く, 下層は上流向きの時間帯が長い。図-6 に, 半日周潮の水位に対する半日周潮流および塩分の位相差を, 各測線で相対水深が一

定な各点において求めた結果を示す。水位に対する潮流の位相差は, 潮汐成分の卓越する中層においてほぼ 90° であり, 定常波の性格を維持している。しかし, 縁辺部では 90° と異なっている。塩分の水位に対する位相差は, 河川水が流出する上層部と, 海水の侵入する下層部

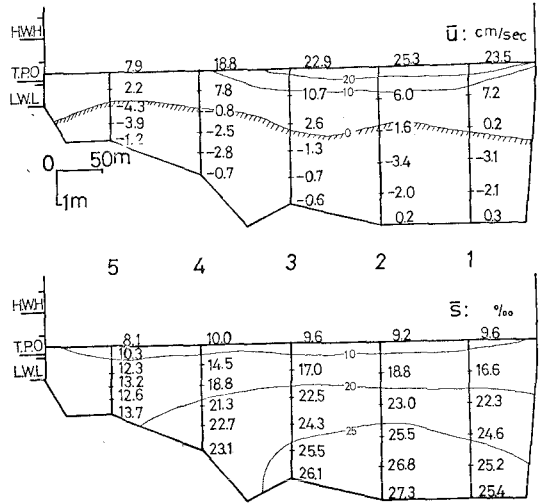


図-5 吉井川の河口横断面 (Se 1) における平均流速と平均塩分の分布, 1974年9月16, 17日

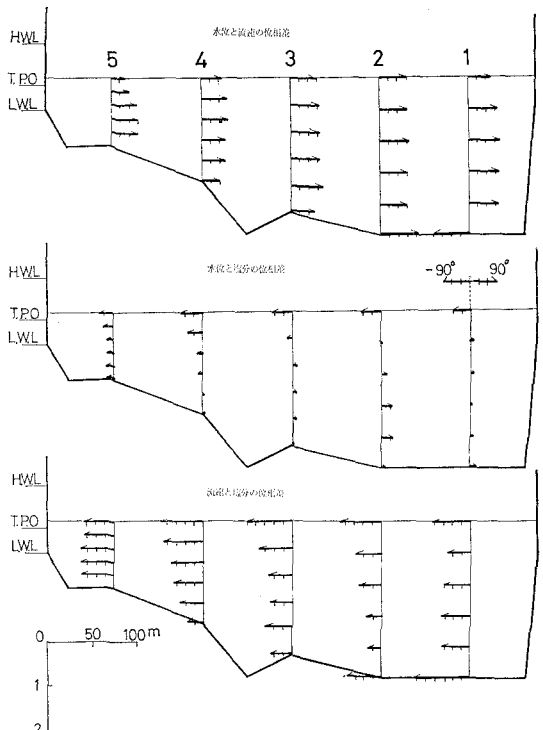


図-6 吉井川の河口 (Se 1) における流速の水位に対する位相おくれ (上), 塩分の水位に対する位相おくれ (中), 塩分の流速に対する位相おくれ (下), 1974年9月16, 17日

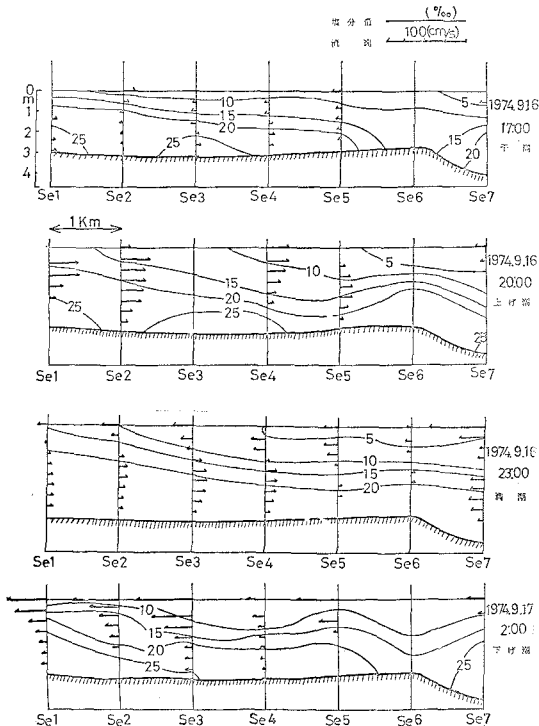


図-4 吉井川の縦断面における塩分分布と流速分布

で大きく違っている。塩分の流速に対する位相差は、ほぼ定常的な関係にあるが、図-5に対応して上層部と下層部では位相差が大きく異なる。

以上から、河川感潮域では鉛直方向および水平方向に著しいシアが存在し、お互の位相差は場所により異なっている。このことは巴川における羽衣橋、稚児橋の場合についても同様である。

4. 物質輸送の機構

ここで比較検討する各 Estuary の基本となる値を、表-1 に示す。なお潮差 (H) と平均水深 (h) の比から見れば、吉井川および巴川は Vellar および Mersey Estuary に匹敵する。これらの Estuary について物質輸送を考えるために、成層形態を知る必要がある。流速、塩分の観測値 u, s の時間平均を U, S とし、変動分を u', s' とするとこれらのプロファイルから成層のパターンを知ることができることを示す。

$$u = U + u', \quad s = S + s' \dots\dots\dots (3)$$

変動成分は、潮汐成分と乱流成分からなっている。変動流の大きさとして、標準偏差を用いる。吉井川における平均流と変動流および塩分の平均値と変動値の鉛直分布を 図-7 に示す。それぞれの値は相対水深で整理され、表面における値との比が示されている。緩混合型である河口部 (Se 1) では、流れについては平均流は上層から下層にかけて急激に減衰するが、変動流の大きさの減衰は緩やかであり、巴川におけるようにピークが中層に生じることはない⁹⁾。これは平均流の主体をなす軽い河川水は上層を流れ、変動流の主体をなす潮汐流は、上下一様であることと対応する。また塩分の場合は、平均塩分量は下層に行くに従い増加するが、変動量の大きさは、上下一様に近い。このことは巴川の河口である羽衣橋における結果 (図-8) と同じである。これは、表層では、下層よりも変動流の大きさが大きいことと、塩分の流軸方向の勾配が下層よりも小さいことが掛け合わさったため上下一様になると考えられる。

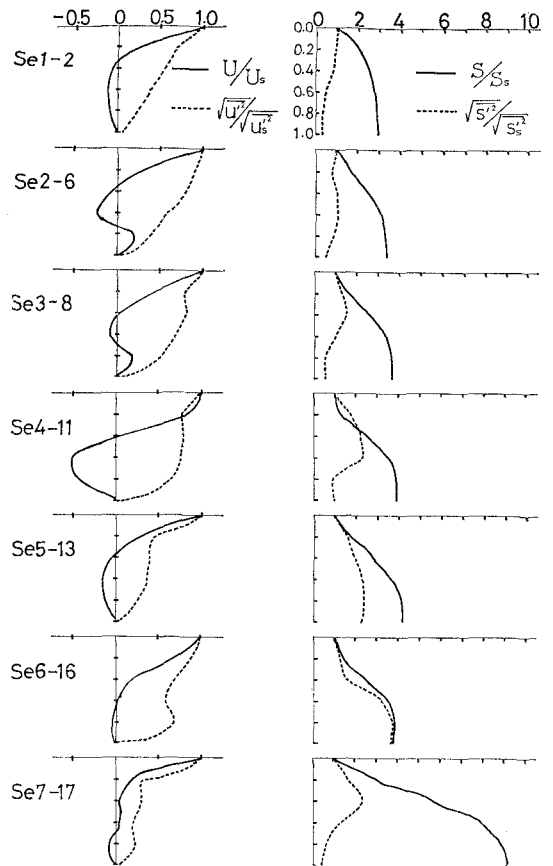


図-7 吉井川における平均流と変動流 (左) 塩分の平均値と変動値 (右) の鉛直分布 (実線は平均量、破線は変動量) 1974年9月16, 17日

弱混合型である上流部では、平均流と変動流の分布は接近し、平均流の下層に向う減少は緩やかになる。これは巴川の稚児橋における結果 (図-8) と同様である。

強混合型である東京湾湾口 (図-8) では、流速、塩分の平均量および、変動量はともに上下一様である。

以上より、流れと塩分の平均量と変動量から、Estuary での強、緩、弱混合型のパターンを分類できることが示

表-1 各 Estuary の基本となる値

Station		B (m)	h (m)	Q_r (m³/s)	H (m/s)	\bar{u} (cm/s)	H/h	\bar{A} (m²)	A_1 (m²)
Yoshiigawa	Okayama								
	Se 1	550	2.6	40	1.6	3.5	0.6	1 610	869
	Se 3	460	3.7	40	1.6	4.3	0.4	1 494	786
Se 5	400	2.5	40	1.6	4.1	0.6	1 015	628	
Tomoegawa	Shimizu								
	Hagoromo	60	2.0	5	1.8	2	0.9	184.5	83
Chigo	30	1.7	5	1.7	6	1.0	42.4	42	
Mouth of Tokyo Bay		6 000	40		1.6	3	0.04	185 269	10 000
Vellar Estuary	India	300	1.5	80~100	0.7	50	0.5		
Mersey Estuary	England	1 300	20	80~30	6.0~9.4	80	0.3~0.5		
Southampton Water	England	1 200	10	30~15	1.5~6.0	100	0.1~0.6		
James River	Virginia	1 500	8	100		35			
Colombia River	U.S.A.	8 000	20	15 000	2.3~4.0		0.1~0.2		

B 川幅 h 水深 Q_r 流量 H 潮差 \bar{u} 平均流速 \bar{A} 平均断面積 A_1 変動量

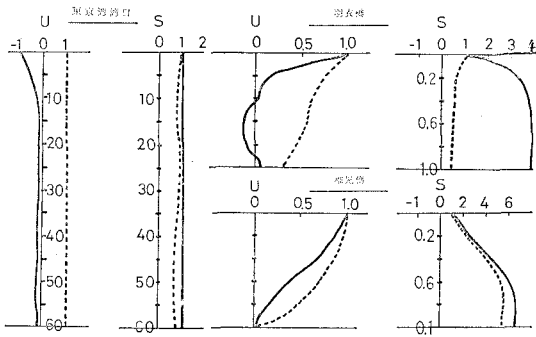


図-8 巴川の羽衣橋，稚児橋，東京湾河口における流れと塩分の平均量（実線），変動量（破線）

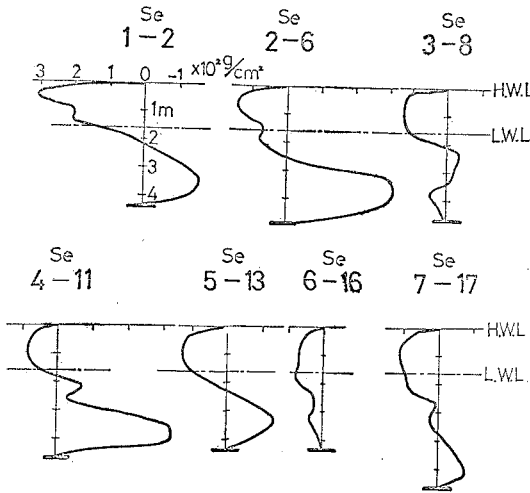


図-9 吉井川における塩分輸送量の鉛直分布，1974年9月16，17日

される。

次に、物質の輸送がどのように行われているか理解するため、一潮汐 (25 時間) の間に、空間に固定された単位面積を通っての塩分 S の輸送量 $\int_0^T S u dt$ を各断面の中央測線において求め、図-9 にこの量の鉛直分布を示す。これによると、HWL から LWL までの変動部分での輸送量は無視できない大きさを示している。ちなみに、水位変動のない場合は輸送量のピークは通常表層に表われるが、この場合には HWL で輸送量は 0 となり、輸送量のピークは HWL 面下に表われる。流軸方向の変化としては、河口近くの下層では上流に向う強い輸送量があるが、上流 (Se 6) では見られない。

(1) 断面変化による効果

断面変化による物質輸送への寄与を見積るため、Fischer (1972)⁶⁾、Hansen (1965)⁵⁾ および、Dyer (1974)⁷⁾ らの解析法により、実測値を用いて解析する。

流れ、塩分、河積を次のように分解する。

$$u(x, y, z, t) = \bar{u}_A(x) + U_A(x, t) + u_a(x, y, z, t) \dots \dots \dots (4)$$

$$s(x, y, z, t) = \bar{s}_A(x) + S_A(x, t) + s_a(x, y, z, t) \dots \dots \dots (5)$$

$$A(x, t) = \bar{A}(x) + A_1(x, t) \dots \dots \dots (6)$$

ここで x は流軸方向、 y は横断方向、 z は鉛直方向の距離を示し、添字 A は断面平均、横棒は時間平均を表わす。すなわち任意の物理量 G の横断面平均、潮汐周期 T の間の時間平均は、それぞれ次式で定義される。

$$G_A \equiv \frac{1}{A} \iint_{(A)} G dy dz, \quad G \equiv \frac{1}{T} \int_0^T G dt \dots (7)$$

また式 (4), (5) の U_A, S_A は、 $U_A = u_A - \bar{u}_A, S_A = s_A - \bar{s}_A$ で定義され、 u_a, s_a は断面平均値からの偏差を表わす。

Dyer (1974)⁷⁾ に倣って、平均塩分輸送量は次式で与えられる。

$$\bar{F} = \bar{A} \bar{u}_A \bar{s}_A + \bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{s}_A + \bar{A}_1 \bar{S}_A \bar{u}_A + \bar{A} \cdot \bar{U}_A \bar{S}_A + \bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{S}_A + \bar{A} \cdot \overline{(u_a s_a)_A} + \bar{A}_1 \overline{(U_a S_a)_A} \dots (8)$$

河川流量については

$$Q_T = \bar{A} \cdot \bar{u}_A = \bar{A} \cdot \bar{u}_A + \bar{A}_1 \bar{U}_A \dots \dots \dots (9)$$

であり、式 (8) の第 1 項と 2 項とに対応し、6, 7 項のシアについてまとめると、次式を得る。

$$\bar{F} = \bar{s}_A Q_T + \bar{A}_1 \bar{S}_A \bar{u}_A + \bar{A} \overline{U_a S_a} + \bar{A}_1 \overline{U_a S_a} + \bar{A} \cdot \overline{(u_a s_a)_A} \dots \dots \dots (10)$$

右辺第 1 項は河川流量による項、第 2 項と第 4 項は、断面が潮時により変動するために生じるものであり、これらは図-6 に示す関係から求まるものである。また、第 3 項は流れと塩分の断面の平均値の位相差に基づくもので、90 度の差なら 0 となる。第 5 項はシア効果を表わしている。Fischer (1972)⁶⁾ は、通常右辺第 1 項と最後の第 5 項以外は無視できると考え、断面変動による効果を無視している。

そこで吉井川での 3 断面における 2 回の観測資料と、巴川での羽衣橋 (河口) と、稚児橋 (上流 2.5 km 地点) での資料によってその効果の程度を計算した。結果を表-2 に示す。吉井川での 9 月 16 日、17 日での観測によるものでは、Se 1, 3, 5 は、ともに第 1 項の河川流量によるものと、第 5 項のシア効果および、第 3 項とでバランスしており、平均塩分輸送量は 3 断面とも海への流出を示している。

一方、断面変化による効果である第 2 項および第 4 項は、第 1 項、第 5 項に比較して 1% 以下であり、上流側断面ほど小さくなっており、ほとんど無視できる大きさであった。また第 3 項の値は、全体として大きく上流側断面ほど増加している。よって、塩分輸送の全体のバランスとしては第 1 項に対し、第 3 項と第 5 項とで釣り合

表-2 式(10)を用いた吉井川と巴川の塩分輸送量

Station	Date	\bar{F} (% m ² s ⁻¹)	$\bar{S}_A Q_r$	$\bar{A}_1 \bar{S}_A \bar{u}_A$	$\bar{A} \bar{U}_A \bar{S}_A$	$\bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{S}_A$	$\bar{A}(\bar{u}_A \bar{s}_A)$
Yoshiigawa	1974. 9.16-17						
	Se 1	16 953.0	147 723.0	1 264.3	-14 725.0	-1 163.3	-116 146.0
	Se 3	33 670.0	119 299.9	972.9	- 5 242.8	393.3	-817 753.4
Yoshiigawa	1974. 9.23						
	Se 1	- 7 108.5	47 368.9	- 394.5	5 141.3	2348.2	- 61 572.4
	Se 3	-13 186.0	61 376.5	168.5	1 703.3	424.1	- 76 859.3
Tomoegawa							
	Hagoromo	1972. 8.18-19	798.2	4 142.8	29.4	- 101.1	- 2 679.5
	Chigo	1970.11.13-14	808.6	1 389.4	256.2	184.7	- 952.7

表-3 式(8)を用いた Vellar, Southampton Water と Mersey の塩分輸送量

Station	$\bar{A} \bar{u}_A \bar{s}_A$ (1)	$\bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{s}_A$ (2)	$\bar{A}_1 \bar{S}_A \bar{u}_A$ (3)	$\bar{A} \bar{U}_A \bar{S}_A$ (4)	$\bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{S}_A$ (5)	$\bar{A} \cdot (\bar{u}_A \bar{s}_A)$ (6)
Vellar						
20.1.67						
5-7	351.4±102.8	-7.5±0.3	10.4±3.8	2.6±0.3	-0.0±0.0	-270.1±22.7
8-10	66.4±25.3	0.4±0.0	6.3±2.1	15.2±0.4	1.9±0.1	57.6±3.7
27.1.67						
5-7	87.8±245.2	-52.3±2.1	2.1±7.0	-31.1±0.9	3.7±0.1	-217.5±25.4
8-10	74.9±108.7	-12.6±0.7	4.3±6.3	-20.6±0.9	1.8±0.1	-70.7±13.9
9.2.67						
5-7	179.8±134.9	-46.9±1.5	3.8±3.8	-76.1±1.9	-2.2±0.1	-165.1±15.9
8-10	214.2±159.1	-35.3±1.1	4.3±3.2	-56.1±1.5	-1.2±0.1	-175.1±14.0
15.2.67						
5-7	76.6±245.6	58.1±2.5	2.9±9.1	-42.0±1.4	-5.9±0.2	- 66.8±19.7
8-10	68.7±133.9	45.2±1.4	2.4±7.4	-24.3±0.8	-6.5±0.2	- 34.3±7.7
Southampton Water						
A 1-4	-2 618.4±10 279.0	2 104.8±57.3	-1.8±7.1	-26.3±5.4	-6.3±0.2	288.5±15.1
B 1-4	-2 961.0± 9 128.8	-84.0±32.3	-1.7±4.8	- 2.1±12.1	-2.5±0.1	-461.4±28.4
Mersey Narrows						
C 1-3	2 774.7±1 3539.7	-10 045.5±316.7	-32.2±156.9	2 188.6±55.3	-136.1±5.9	-1 141.6±32.3

っており、むしろ断面変化による効果より、塩分と流速の断面平均値の位相による効果が、より重要な比重を占めていることになる。

表-3 での、種々の Estuary では、断面変化による効果は小さく、全体として河川流量とシアの効果および、流れと塩分の位相差に基づく効果がバランスしている。また巴川での羽衣橋、稚児橋では、断面変化による効果は全体として小さいが、しかし上流側の稚児橋では、シア効果に対して断面変動による効果は 26% と、羽衣橋に比較して大きく、無視できない値であり、河川流量によるものと、シア効果によるものとがバランスしている。

以上から、1) 潮差が水深に対して同程度か、無視できない Estuary での断面変化による効果は、緩混合型では小さく、誤差の範囲に止まるが、弱混合型の場合は、多少大きくなり、無視できない値を示す。2) 河川流量による効果(10式第1項)と、シア効果(第5項)の他に、塩分と流れの位相による効果(第3項)は大きく、重要視する必要がある。

(2) 鉛直シアと水平シアによる効果の比重

Fisher (1972)⁶⁾ により、シア効果を鉛直成分と水平成

分に分離して考える。すなわち、流速と塩分の断面平均値からの偏差 u_a, s_a を式(11)のように分離する。

$$u_a = \bar{u}_a + U_a, \quad s_a = \bar{s}_a + S_a \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 U_a, S_a はおのおの u_a, s_a の時間平均値からの偏差である。次に、 \bar{u}_a, U_a と \bar{s}_a, S_a を鉛直成分と水平成分に分ける。

$$\begin{aligned} \bar{u}_a &= \bar{u}_{at} + \bar{u}_{av}, & \bar{s}_a &= \bar{s}_{at} + \bar{s}_{av} \\ U_a &= U_i + U_v, & S_a &= S_i + S_v \end{aligned}$$

$\bar{u}_{at}, \bar{s}_{at}$ は、断面時間平均値 (\bar{u}_A, \bar{s}_A) と、各測線で水深方向に平均した値 (u_h, s_h) の時間平均値 (\bar{u}_h, \bar{s}_h) との偏差であり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{u}_{at} &= \bar{u}_h - \bar{u}_A, & \bar{s}_{at} &= \bar{s}_h - \bar{s}_A \\ G_h &= \frac{1}{h} \int_0^h G dz \dots\dots\dots(12-1) \end{aligned}$$

$\bar{u}_{av}, \bar{s}_{av}$ は、上記、水深平均の時間平均値 (\bar{u}_h, \bar{s}_h) と、各水深での時間平均値 (\bar{u}, \bar{s}) との偏差、すなわち

$$\bar{u}_{av} = \bar{u} - \bar{u}_h, \quad \bar{s}_{av} = \bar{s} - \bar{s}_h \dots\dots\dots(12-2)$$

となる。

一潮汐を通しての平均塩分輸送量は、次式で与えられる (Dyer (1974)⁷⁾。

$$\begin{aligned} \bar{F} = & \bar{A}_1 \bar{u}_A \bar{s}_A + \bar{A}_1 \bar{U}_A \cdot \bar{s}_A + \bar{A}_1 \bar{S}_A \cdot \bar{u}_A + \bar{A} \cdot \bar{U}_A \bar{S}_A \\ & + \bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{S}_A + \bar{A} \cdot (\bar{u}_{at} \cdot \bar{s}_{at})_A + \bar{A} (\bar{u}_{av} \cdot \bar{s}_{av})_A \\ & + \bar{A} (\bar{U}_t \bar{S}_t)_A + \bar{A} (\bar{U}_v \bar{S}_v)_A + \bar{A}_t (\bar{U}_t \bar{S}_t)_A \\ & + \bar{A}_v (\bar{U}_v \bar{S}_v)_A \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここで第1項から第5項までは、式(8)の第1項から第5項までと同様であり、第6項に、水平循環流による寄与、第7項は鉛直循環流による寄与、および、第8項と9項は水平シアおよび鉛直シアに寄与している項である。第10項と11項は潮汐変動による断面の変化と、水平、鉛直の oscillatory shear によるものである。

Fischer (1972)⁶⁾ は、断面変化の影響はないとして、式(13)の第2, 3, 5, 10, 11項を無視して解析したが同様に、水深に比較して潮差が無視できる東京湾湾口での観測資料に基づき計算を行った。その結果を表一4の

下段に示す。また、式(13)については、吉井川、巴川の場合について全項を計算し、第6, 7, 8, 9項についてのみ表一4の上段に示す。Dyer (1974)⁷⁾ が欧米での、タイプの異なる2, 3の Estuary について解析した例を表一5に示す。

結果として、強混合型の東京湾湾口においては、式(13)の、第6項の水平循環流による寄与は小さく、第7項による鉛直循環流による寄与が非常に大きい。1974年3月の場合、測定日が、大潮であったために、より強混合型となり、その値は、大きくなったと考えられる。

吉井川、巴川では逆に、第6項の水平循環流による寄与が大きく、第7項の鉛直循環による寄与は小さい。吉井川の9月16日, 17日の場合では、第6項の値は河口で大きく上流は小さい。第6項と第7項の比は逆に河口より上流側が大きく、鉛直循環流の寄与が少なくなっている。吉井川の9月23日では上記の逆で、第6項は河口より上流で大きく、第7項との比は、上流ほど小さい。巴川での水平循環流の寄与は、河口の羽衣橋で大きく、上流の稚児橋で小さい。しかし、第6項と項の比は上流

表一4 式13の6~9項, 吉井川, 巴川, 東京湾での解析

Station	Date	$\bar{A}(\bar{u}_{at}\bar{s}_{at})_A$ (6) (% m ² /s)	$\bar{A}(\bar{u}_{av}\bar{s}_{av})_A$ (7)	$\bar{A}(\bar{U}_t\bar{S}_t)_A$ (8)	$\bar{A}(\bar{U}_v\bar{S}_v)_A$ (9)
Yoshiigawa	1974.9.16,17				
	Se 1	25 976.1	5 653.6	2 646.6	-10 513.1
	Se 3	34 676.0	5 896.3	-1 316.5	- 3 321.3
Yoshiigawa	1974.9.23				
	Se 1	3 893.7	-1 008.6	708.8	- 2 376.7
	Se 3	15 006.9	-8 947.5	- 682.9	- 1 912.2
Tomoegaw					
	Se 5	2 3567.0	11 966.5	-3 223.6	- 7 282.6
	Hagoromo	1 972.8.18	778.9	219.9	- 77.9
Chigo	1 970.11.13	258.3	231.5	25.6	- 7.9
		$(\bar{u}_{at}\bar{s}_{at})_A$	$(\bar{u}_{av}\bar{s}_{av})_A$	$(\bar{U}_t\bar{S}_t)_A$	$(\bar{U}_v\bar{S}_v)_A$
Tokyo Bay	1974.2.10,11	-0.72	62.74	- 0.81	0.54
	1974.3.9,10	0.74	81.10	- 1.04	5.48

表一5 式13の6~9項, Dyer (1974) での解析

Station	$\bar{A}(\bar{u}_{at}\bar{s}_{at})_A$ (6)	$\bar{A}(\bar{u}_{av}\bar{s}_{av})_A$ (7)	$\bar{A}(\bar{U}_t\bar{S}_t)_A$ (8)	$\bar{A}(\bar{U}_v\bar{S}_v)_A$ (9)
(% m ² /s)				
Vellar				
20.1.67 5-7	-3.7±2.8	-256.9±19.2	0.6±0.0	-7.2±0.4
8-10	-0.7±0.3	-37.2±2.8	-3.5±0.1	-16.9±0.5
27.1.67 5-7	-6.1±3.1	-195.8±23.1	3.7±0.2	-20.0±0.7
8-10	-0.3±0.6	-66.1±13.4	-0.7±0.1	-4.6±0.3
9.2.67 5-7	-13.9±5.4	-105.7±7.4	-4.0±0.2	-41.9±0.9
8-10	-0.1±0.3	-141.0±13.1	0.2±0.0	-33.9±0.9
15.2.67 5-7	-15.9±8.7	-32.0±13.2	-2.2±0.1	-16.9±0.7
8-10	0.3±5.0	-25.1±8.6	-0.6±0.1	-9.5±0.2
Southampton Water				
A 1-4	258.3±57.1	102.5±48.9	-20.8±0.7	-51.9±4.1
B 1-4	-223.8±86.3	-198.0±67.7	-21.1±0.9	-12.4±0.6
Mersey Narrows				
C 1-3	-287.9±41.0	-344.2±47.5	-222.4±9.5	-282.3±9.3

で小さくなっており、吉井川の最初の観測結果と反対の傾向である。ちなみに表一5の Vellar Estuary においては、鉛直循環流が大きく、吉井川、巴川の場合とは、全く逆の結果であるが、Southampton water と Mersey Narrows については、第6項と第7項と同等であり、Vellar Estuary を除いては、潮差の大きい場所では水平循環流の寄与が大きいといえる。そして、吉井川では水平循環流の寄与が大きいという意味で、Fischer の解析と一致するが、第7項の鉛直循環流の寄与も無視できない。そして、平均水深に対し、潮差の無視できる強混合型の東京湾湾口では、鉛直循環流による寄与がほとんどであった。

式(13)の第8項、9項については、いずれの場合も6、項に比較して小さい値を示す傾向がある。

以上から、潮差の大きい Estuary の場合、水平循環の効果が大きく、鉛直循環の効果は小さいが、同程度である。そして潮差の変化および、河川流量、河床勾配の違いにより生じる密度成層の変動により、鉛直循環流と水平循環流の関係が異なる可能性がある。

(3) 分散係数について

縦断方向分散係数は、平均状態が定常のとき次式で定義される。

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

$\bar{F}=0$ として、式(10)を式(14)に代入すると K_x は次式で与えられる。

$$K_x = \frac{\bar{A}_1 \bar{S}_A \cdot \bar{u}_A + \bar{A} \cdot \bar{U}_A \bar{S}_A + \bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{S}_A + \bar{A} \cdot (\bar{u}_A \bar{s}_A)}{\bar{A} \cdot \partial \bar{s}_A / \partial x} \dots\dots\dots (15)$$

よって式(14)を用いて計算した値 K_2 と、式(14)の断面平均値の代りに各断面での中央測線のみでの値を使用し算出した K_1 と、式(15)を用いて計算した値 K_3 の値を表一6に示す。

Fischer (1972)⁶⁾ および Dyer (1974)⁷⁾ によれば、分散

表一6 吉井川での分散係数 No. 1 は 1974年9月16日、17日、No. 2: 1974年9月23日の測定による。

		分散係数 (10 ⁶ cm ² /sec)							
		K1	K2	K3	D0	D1	D2	D3	D4
Se 1	No. 1	3.72	3.10	2.75	0.68	0.76	0.16	0.07	-0.31
	No. 2	-1.08	5.31	6.10	0.16	0.70	-0.18	0.13	-0.49
Se 2	No. 1	7.38							
	No. 2	-0.86							
Se 3	No. 1	1.24	6.26	4.49	1.89	1.82	0.31	-0.07	-0.17
	No. 2	0.10	5.88	7.15	0.34	1.61	-1.00	-0.07	-0.20
Se 4	No. 1	1.76							
	No. 2	0.11							
Se 5	No. 1	4.31	4.48	3.32	1.39	1.26	0.08	0.09	-0.04
	No. 2	0.50	4.31	2.10	1.92	1.81	0.92	-0.25	-0.56
Se 6	No. 1	-6.54							
	No. 2	-0.29							
Se 7	No. 1	2.48							
	No. 2	0.42							

係数は式(13)の第6項から第9項までの値を用いて、すなわち、式(15)の分子の最後の項のみにより求めることができる。

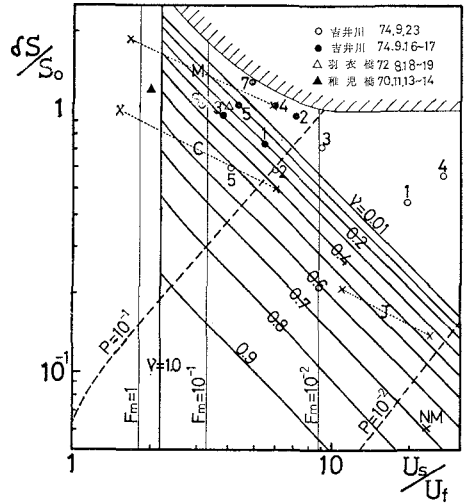
$$D_0 = \frac{(13) \text{ term } (6)+(7)+(8)+(9)}{\bar{A} \cdot \partial \bar{s}_A / \partial x} \dots\dots\dots (16)$$

$$D_0 \equiv D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

吉井川での式(13)の解析結果より式(16)各項を求め、表一6に示す。 $D_1 > D_2$ で、前項4.(2)での水平循環流の寄与の大きさと対応する。 D_0 と K_3 の相違は式(10)の第3項の効果と考えられる。 K_1 と K_2 との相違は塩分、流速の中央測線の平均値だけでは物質輸送は論じられないことを示している。

(4) S-C ダイアグラムによる位置付け

次に、吉井川、巴川の Estuary としての位置付けを行うため、Hansen—Rattray (1966)⁸⁾ の成層循環図



図一10 S-C ダイアグラム
M: Mississippi River, C: Columbia River, J: James River, NM: Narrows of the Mersey

(S-C ダイアグラム) に現地観測データを入れ ν , νR_a , M/ν を求めた。結果を図一10に、欧米での例とともに示す。吉井川では、 $\nu \approx 0.2 \sim 0.3$, $\nu R_a \approx 100 \sim 200$, $M/\nu \approx 0.5 \sim 1.0$ の範囲で緩混合型の典型といわれる James River に比べより弱混合領域にあり、C や M (Columbia River では、 $\nu = 0.9$, $\nu R_a = 30 \sim 250$, $M/\nu = 0.1 \sim 0.2$) とほぼ同位置にあることが解る。今後、これらの手法を、より吟味し、密度成層の異なる Estuary で、より詳細な検討を行い、力学的な裏付けを深める考えである。

謝辞: 本研究を行うに当たり、東京湾湾口の観測資料を心よく提供いただいた運輸省第二

港湾建設局横浜調査設計事務所の川島毅氏、巴川観測資料を提供していただき、資料整理に御協力いただいた東海大学海洋学部の山下皓一助手、御指導と励ましをいただいた理化学研究所の宇野木早苗先生、種々助言をいただいた京都大学理学部の国司秀明先生および同大学海洋物理研究室の方々、以上の方々には特にお世話になり、ここに謝意を表す。また吉井川観測資料整理に熱心に協力いただいた佐藤敏幸君をはじめとする中国工業技術協会の方々、資料解析に協力いただいた IHI 具情報システムセンターの中沢氏には大変お世話になった。

吉井川の調査は当所の福田保所長、沖野貢総務課長、井原潤水理第1研究室長らの尽力により可能になったものであり、その観測作業は三洋水器(株)の協力と水理研究室研究員の多数の参加を得てなされたものである。なおこの研究は、公害防止技術特別研究瀬戸内海環境保全に関する研究の一部としてなされたものであり、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 宇野木早苗 (1968): 河川潮汐の研究 (第1報), 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 226~235.
- 2) 宇野木早苗 (1968): 河川潮汐の研究 (第2報), 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 377~384.
- 3) 宇野木早苗・上嶋英機・山下皓一 (1973): 河川潮汐の研究 (第3報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 371~376.
- 4) Bowden, K.F. (1965): Horizontal mixing in the sea due to a shearing current, *Jour. Fluid Mech.*, **21**, pp. 83~95.
- 5) Hansen, D.V. (1965), Currents and mixing in the Columbia River Estuary, *Trans. 4th Conf. Ocean Sci. and Ocean Eng.*, pp. 943~955.
- 6) Fischer, H.B. (1972): Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, *Jour. Fluid Mech.*, **53**, pp. 671~687.
- 7) Dyer, K.R. (1974): The Salt Balance in Stratified Estuaries, *Estuarine and Coastal Marine Science*, **2**, pp. 273~281.
- 8) Hansen, D.V. and Rattray, M.Jr. (1966): New Dimensions in Estuary Classification, *Limnology and Oceanography*, **11**, No. 3, pp. 319~326.
- 9) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅 (1974): 海水交換に関する現地観測, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 291~296.
- 10) Lamb, H. (1932): *Hydrodynamics*, 6th edition, Cambridge, pp. 274.

- 1) 宇野木早苗 (1968): 河川潮汐の研究 (第1報),