

塩水楔型感潮域における懸濁粒子の輸送と turbidity maximum の形成機構*

伊藤喜代志**・杉本 隆成**

Transport of suspended sediment and formation of turbidity maximum in a highly stratified estuary*

Kiyoshi ITO** and Takashige SUGIMOTO**

Abstract

Longitudinal distributions of suspended sediment, salinity and current velocity, and temporal variations over one tidal cycle at two fixed stations were observed in a highly stratified estuary. Vertical and horizontal fluxes of the mass and suspended sediment were calculated and analyzed by the two-layer box model using these data.

The marked increase of suspended-sediment concentration was observed near the top of salt wedge, but decreased at the mouth. From the box model analysis it was concluded that this turbidity maximum in the lower layer was formed and maintained by the settling of suspended sediment through the upper layer. The settling flux in the turbidity maximum area was about four times greater than the horizontal transport of suspended sediment in the lower layer.

1. はじめに

河川を通じ感潮域に流入した有機物あるいは重金属などの陸起源物質は、感潮域ではイオン強度や化学成分の急変により懸濁粒子と会合しやすい(OLSEN *et al.*, 1982)。そしてこれら汚染物質の粒子化の過程及び汚染物質の集積や分散に関わる粒子の輸送・沈降・堆積といった物理的挙動の把握は、感潮域ばかりでなく沿岸域における水質や底質の汚染メカニズムを解明する上で重要な課題となっている(乗木・前田, 1983)。

感潮域における懸濁粒子の分布や輸送について POSTMA(1967)は、緩混合型感潮域では塩水侵入域先端付近の null point (底層の残差流が零となる所)に懸濁粒子の集積域いわゆる turbidity maximum が形成されることを示した。また SCHUBEL(1969)は Chesapeake Bay における観測から、感潮域の鉛直循環に伴う底層を

通しての下流から上流に向かう懸濁粒子の水平輸送が turbidity maximum の形成に重要な役割を果たしていることを明らかにした。一方 ODD and OWEN(1972)は懸濁粒子の水平輸送に加え、巻き上げや沈降といった懸濁粒子の鉛直輸送過程も turbidity maximum 形成の主要な要因の一つであることを指摘した。そしてこれら観測を主体とした研究に対し、FESTA and HANSEN(1978)は数値モデルを用いた研究から、懸濁粒子の沈降速度及び懸濁粒子の鉛直輸送に関わる鉛直混合や鉛直流の大きさが感潮域における懸濁粒子の分布や輸送を考える上で不可欠なものであることを数値的に明らかにした。

懸濁粒子の鉛直輸送過程のうち懸濁粒子の沈降過程については、主に水槽実験から flocculation のメカニズムや flocculation に伴う沈降速度の変化などについて多くの知見が得られている(SAKAMOTO, 1972; 古賀ほか, 1981)。しかし実際の感潮域では懸濁粒子の沈降速度は時空間的に大きく変化しており(KRANK, 1973; 松尾, 1980)、また流動の複雑な感潮域において鉛直混合・鉛

* 1987年11月27日受理

** 東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute,
University of Tokyo, Nakano-ku Tokyo, 164
Japan

直流の大きさそのものを実測することは難しく、懸濁粒子の鉛直輸送量を直接見積もることは極めて困難である。このため懸濁粒子の鉛直輸送過程が感潮域における懸濁粒子の一般的な分布や turbidity maximum の形成に対し、どのような役割を担っているのかについてはほとんど知られていない。

そこで本研究では現場における懸濁粒子の輸送の実態と turbidity maximum の形成に関わる懸濁粒子の水平及び鉛直輸送過程を定量的に明らかにするために、まず潮流による河川水と海水との鉛直混合が弱い塩水楔型感潮域を選び、現場観測とボックスモデルによる解析手法を用いて、懸濁粒子の水平輸送量及び躍層を通しての鉛直輸送量の見積もりを試みた。

2. 観測方法及び輸送量の見積もり方

塩水楔型感潮域としては仙台市北部の七北田川河口域を選んだ。七北田川は年平均流量 $2\sim 3\text{m}^3/\text{s}$ の二級河川で、潮位差が大潮時でも約 70cm と小さいことから平水時には河口から約 4.2km 上流にある塩水遡上止めの潜堰まで塩水楔が発達する (SUGIMOTO and TANIYA, 1978; HANAWA and SUGIMOTO, 1980)。Fig. 1 に七北田川における調査地点を、また Fig. 2 に St. 2 及び St. 6 の観測断面を示す。

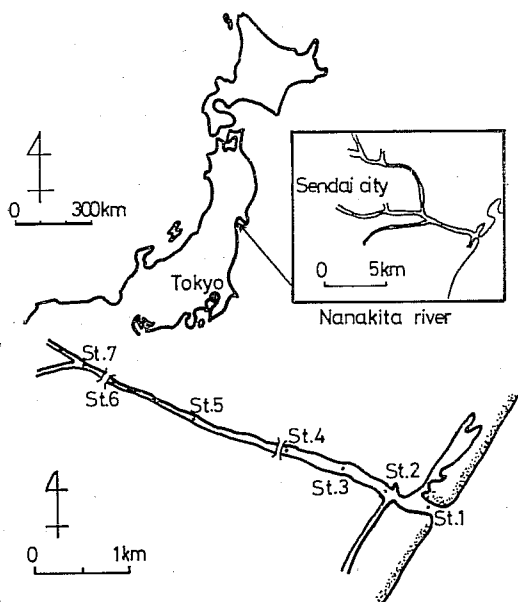


Fig. 1 Station map of the Nanakita river.

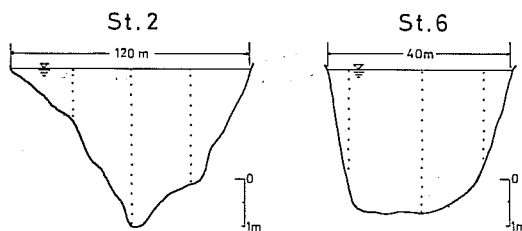


Fig. 2 Cross section and sampling points at St. 2 and St. 6.

(1) 観測方法

本研究では七北田川河口域を河口付近 (St. 2) と塩水侵入域先端付近 (St. 6) の二断面で区切り、各断面における濁度および流向・流速の観測結果から懸濁粒子の水平方向の輸送量を求めた。観測日は1982年8月9日・11日の二日間 (小潮) で、Fig. 2 に示す St.2 と St.6 の河川横断方向3測点において濁度・塩分・水温・流向・流速の13時間連続の毎時観測を行った。濁度・塩分・水温については表層から川底まで鉛直方向に 25cm 間隔で、また流向・流速については 50cm 間隔で表層から川底までそれぞれ測定した。濁度は赤外発光ダイオードを光源とする反射式濁度計 (北斗理研製) を用いて光学的手法により測定し、懸濁粒子濃度の指標とした。Fig. 3 は濁度計の値と懸濁粒子濃度との対応を表したもので、若干のばらつきが見られるもののほぼ良い相関を示していることがわかる。流動については流向と流速を同時に測定することのできるプロベラ式流速計 CM 2 (東邦電

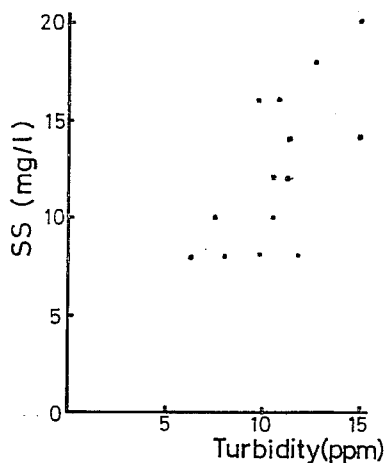


Fig. 3 Relation between turbidity and suspended sediment concentration.

探製)を、塩分・水温の測定にはポータブル ST 計をそれぞれ用いた。また定点における横断面観測と対応して、1982年8月8・10・12日の三日間にわたり、Fig. 1に示した St. 1~7 にかけて濁度・塩分・水温の縦断面観測も行った。

なお平水時の七北田川における縦断方向の塩分構造は、10~20‰の間で等値線が密になっており、この躍層を境として流速の鉛直分布も上層と下層とでは大きく異なっている(伊藤, 1987)。そこで本研究では塩水楔型感潮域における懸濁粒子の挙動を明らかにするにあたって、感潮域を上層(塩分10‰以下)・躍層(塩分10~20‰)・下層(塩分20‰以上)の3層に分け、それぞれの層毎に鉛直平均した値を用いて塩分・濁度・流速の時空間的变化を調べた。また躍層の安定度や entrainment の大小を評価する目安として上層及び躍層の厚さの変動に注目し、これらの時空間的变化についても検討した。

(2) 懸濁粒子の鉛直輸送量の見積もり方

懸濁粒子の鉛直方向の輸送量については鉛直流や鉛直混合を直接測定することが困難なため、二層ボックスモデルによる解析から求めた。二層ボックスモデルは観測によって得られた塩分分布から直接、移流及び混合による輸送量を求めることのできる有効な手段である。OFFICER (1980 a) はこの手法の感潮域での適用についてまとめているが、本研究では躍層を通しての懸濁粒子の輸送だけでなく、底面における巻き上げ及び堆積も考慮し計算を行った。Fig. 4 に二層ボックスモデルの模式図と移流及び鉛直混合による各ボックス間の輸送パラメーターを示す。 Q_m, Q'_m はボックス m における上層と下層の水平移流による輸送量を、 Q_{vm} は上下層間の境界面を通しての鉛直移流による輸送量を、また

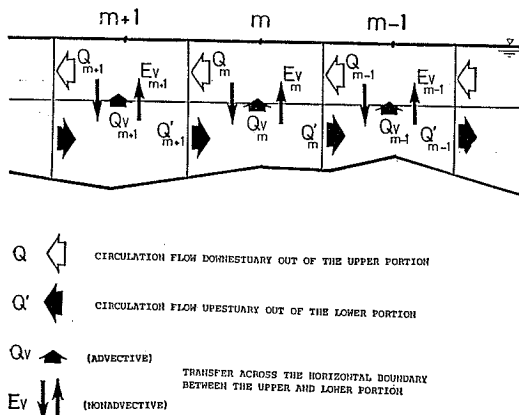


Fig. 4 Two-layer box model nomenclature.

E_{vm} は鉛直混合による上層 および 下層水の交換量をそれぞれ表している。 $Q_m, Q'_m, Q_{vm}, E_{vm}$ の輸送量の具体的な計算方法は OFFICER (1980 b) と同様である。ここでは上下層における懸濁粒子の保存式だけを示す。

$$C_{m-1}Q_{m-1} + C'_m Q_{vm} + C'_m E_{vm} = C_m Q_m + C_m E_{vm} + C_m A_m W_m$$

(上層における懸濁粒子の輸送バランス)

$$C'_{m+1} Q'_{m+1} + C_m E_{vm} + C_m A_m W_m = C'_m Q'_m + C'_m Q_{vm} + C'_m E_{vm} + K$$

(下層における懸濁粒子の輸送バランス)

ここで C_m, C'_m はボックス m における上層及び下層の懸濁粒子濃度を、 A_m は上・下層ボックス間の境界面の断面積を、そして W_m は懸濁粒子の沈降速度をそれぞれ表す。また K は底面における懸濁粒子の輸送量(+: 巻き上げ, -: 堆積)を表す。

ボックスモデルによる各輸送量の見積もりにあたっては感潮域を St. 3 及び St. 5 の2つの横断面により3区間に、また鉛直方向は躍層(塩分20‰)を境界面として二層に分割した。各ボックスの水平方向の長さは Box 1 (St. 1~St. 3) 1km, Box 2 (St. 3~St. 5) 2km, Box 3 (St. 5~St. 7) 1km である。

3. 結果

(1) 各層の厚さ及び鉛直平均した濁度・塩分の縦断方向の変化

Fig. 5 a, b はそれぞれ1982年8月8日の上げ潮・下げ潮時における各層の厚さ及び層毎に鉛直平均した濁度・塩分の縦断方向の変化を示したものである。七北田川では河川幅が塩水楔先端と河口とでは大きく異なるという地形的制約もあり、上層及び躍層の厚さは St. 5 を境として縦断方向に変化がみられる。上層の厚さは河口付近を除き1m程度で、塩分躍層は水深1m前後に形成されている。躍層の厚さは河川幅の減少する St. 5 より上流では上層の厚さと同様に急激に増加しているが、潮時による変化はほとんどみられない。これに対し St. 5 より下流では、河口付近を除き躍層の厚さはほぼ一定であるが、上げ潮時(平均厚さ約30cm)と下げ潮時(平均厚さ約20cm)とでは若干躍層の厚さが異なっている。

塩分の縦断方向の変化は、下層では上流に向かうにつれて減少し、躍層部では逆に上流から下流にかけて鉛直平均した塩分は減少する傾向がみられた。また上層の塩分は塩水楔先端から St. 5 までの区間では1%前後であるが、St. 5 から下流にかけて除々に増加しており河口

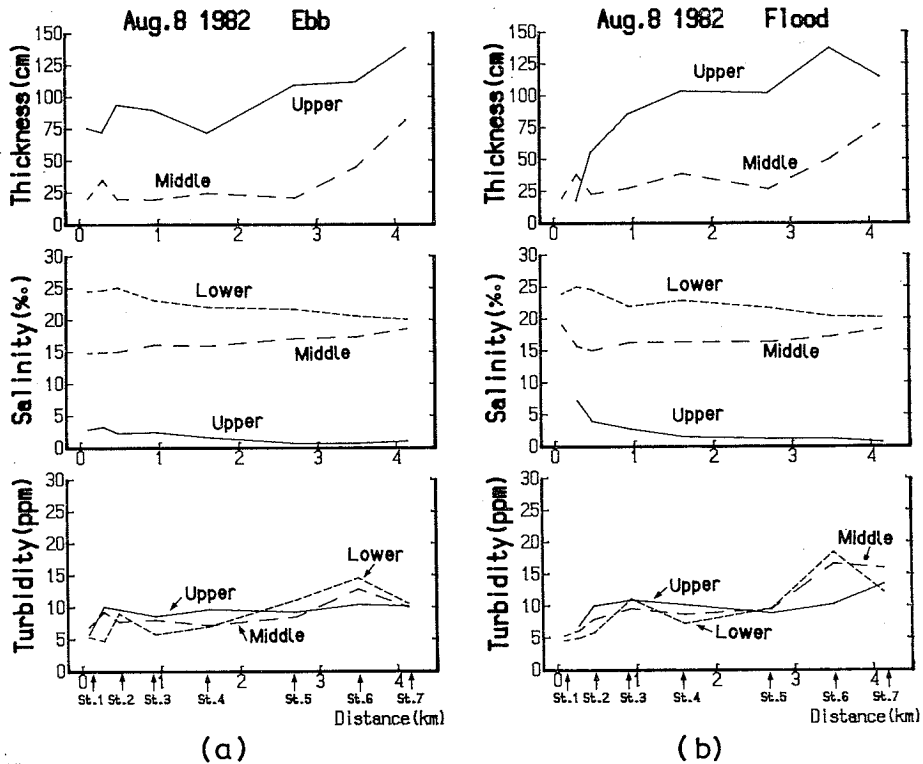


Fig. 5 Longitudinal distribution of the layer thickness (cm), salinity (%) and turbidity (ppm) on Aug. 8 1982.
 (a) Ebb (8:00—9:00) (b) Flood (15:30—17:00)

近くの St. 1~2 では 5% 程度まで増加している。
 一方、濁度の縦断方向の変化は各層とも一般に上流に向かって増加している。この傾向は躍層及び下層では St. 5 から上流にかけて特に著しく、塩水楔先端に近い St. 6 の躍層及び下層では約 15ppm と St. 1 (5ppm 前後) の 3 倍にもなり、この付近がいわゆる turbidity maximum の領域となっていることを示している。下層における濁度の極大はこの塩水楔先端付近と、値は小さいが河口付近の St. 2~St. 3 の区間にもう一つみられ、これらの領域には懸濁粒子が多数集積しているものと考えられる。躍層及び下層に対し上層の濁度は潮時により若干の変動はあるものの、急激な減少を示す河口付近を除き約 10ppm 前後と縦断方向にほとんど変化していない。代表的な地点として St. 1, St. 4 及び St. 7 を選びその地点における濁度 (黒丸) と塩分 (白丸) の鉛直分布を Fig. 6 a, b, c に示す。3 地点とも鉛直方向にそれぞれ特徴的な分布を示しているが、特に塩水楔先端付近にあたる St. 7 (Fig. 6 c) では躍層部に濁度の極

大値が認められ、この部分に懸濁粒子が多数滞留していることを示唆している。また河口に近い St. 1 (Fig. 6 a) では下層を低濁度の海水 (約 5 ppm) が占め、濁度は上層から下層に向かって減少する傾向がみられた。

(2) 各層の厚さ及び鉛直平均した濁度・塩分の時間的变化

縦断方向の空間的な変化に対し、定点における各層の厚さ及び濁度・塩分の潮時変化を Fig. 7 a, b に示す。Fig. 7 a, b は 1982 年 8 月 9 日に、それぞれ St. 2, 6 の河川中央部で測定した層厚及び層毎に鉛直平均した濁度・塩分の時間変化を表わす。

Fig. 7 上段に示す上層の厚さは St. 2 及び St. 6 とも下げ潮時はほぼ一定であるが上げ潮時には変化の様子が異なる。すなわち St. 2 においては上げ潮時に上層の厚さの急激な減少が認められるが、St. 6 では逆に上層の厚さは潮汐による水位変動とよく対応し、上げ潮時には厚さが増している。上層に対し躍層の厚さの時間変化は下げ潮時に大きく、下げ潮では entrainment が起こり

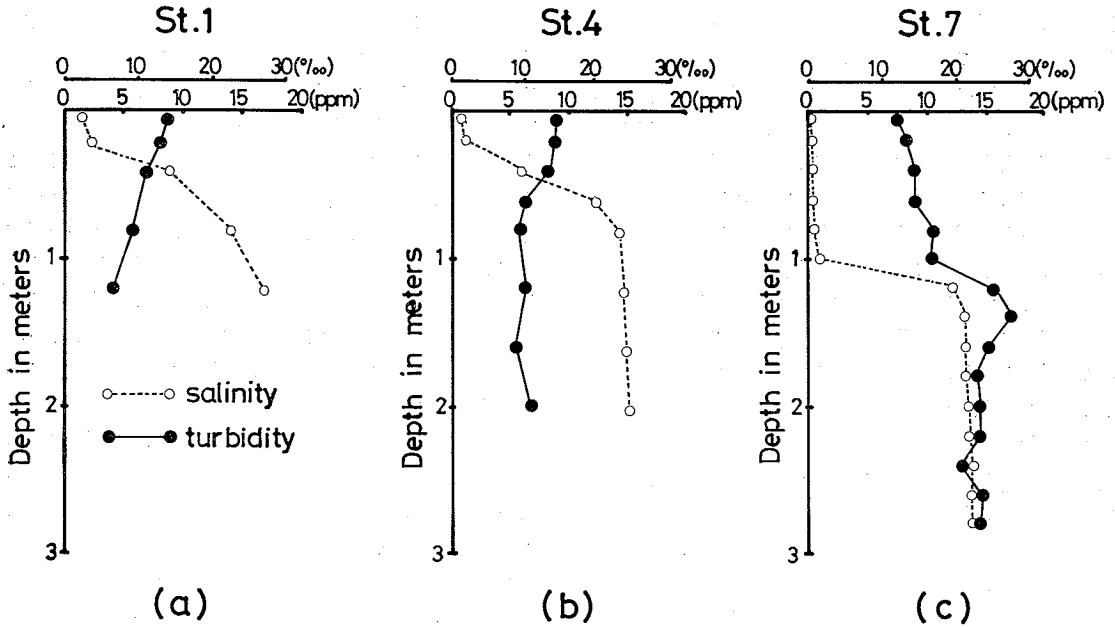


Fig. 6 Vertical profile of salinity and turbidity at three stations on Aug. 8 1982.
(a) St. 1 (b) St. 4 (c) St. 7

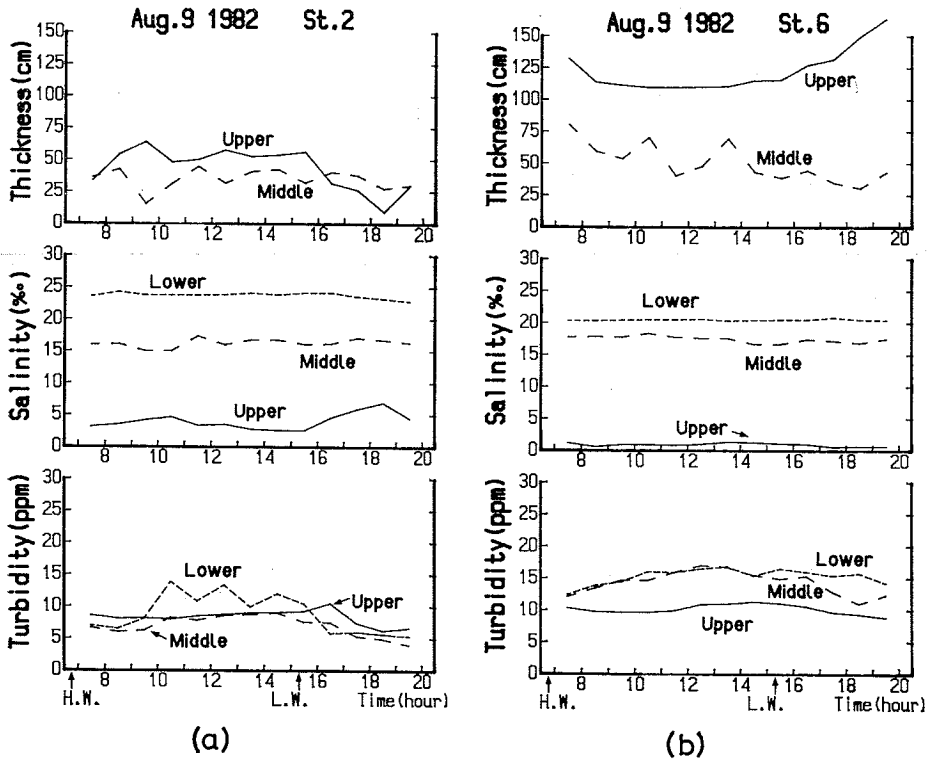


Fig. 7 Tidal cycle variation of the layer thickness (cm), salinity (‰) and turbidity (ppm) at two stations on Aug. 9 1982. (a) St. 2 (b) St. 6

やすいことを示唆している。また Fig. 7 中段の塩分の時間変化について見ると、St. 2 の上層では河川水の上流への押し上げに伴う鉛直混合の増大から、上げ潮時に塩分の増加が認められるが、躍層部と下層の塩分については両測点とも時間的にはほとんど変化しない。

一方、Fig. 7 下段に示した濁度についても一般に時間的変動は小さいが、両測点の各層において上げ潮時に減少、そして下げ潮時に増加という傾向がある。特に河口付近の St. 2 では下げ潮後期において下層濁度の増加が目立つが、この下げ潮後期は観測中濁度及び流速の測定値に変動がみられ、この期間はかなり乱れの大きな状態であると推定された。

(3) 七北田川における懸濁粒子の輸送収支

濁度や塩分の分布並びにその時間変動が各層によって特徴のあることが示されたが、懸濁粒子の輸送量も層毎にまた時空間的に大きく変化している。Fig. 8 a, b は St. 2 及び St. 6 の河川中央部における単位幅あたりの各層毎の水平方向の流量 (mass flux) と懸濁粒子輸送量 (SS flux) の潮時変化を示したものである。

まず Fig. 8 上図に示した St. 2 と St. 6 における各層の流量を比較すると、上層の流量については St. 6 で

下げ潮後期に急激な増加が認められるものの両測点ともほぼ同じオーダーであるが、躍層及び下層の流量は両者で大きく異なる。すなわち河口に近い St. 2 では躍層及び下層の流量が上層と同じオーダーで平均約 $0.05\text{m}^3/\text{s}$ となっているのに対し、塩水楔先端付近の St. 6 ではこの平均値より 1~2 桁小さく塩水楔内の海水はほとんど停滞しているものと考えられる。また両測点とも一潮汐間において下げ潮の期間が上げ潮の 2 倍近くもあり時間的に大きな非対称性がみられ、St. 2 では 3 層ともほぼ同じ位相で時間変化しているのに対し、St. 6 では上層と躍層及び下層における流量の時間変化は位相のズレが大きくなっている。

Fig. 8 下図の懸濁粒子の輸送量は Fig. 7 a, b に示したように各層の濁度が時間的にほとんど変化していないこともあって、両測点とも流量と同様な時間変化を示している。この St. 2 と St. 6 の断面における懸濁粒子の水平輸送量及び流量を各層毎に一潮汐周期 (12.5 時間) 積算したものが Table 1 である。なお表中の符号はプラスが下流から上流へ向かう輸送を、マイナスは上流から下流へ向かう輸送を表す。Table 1 に示した各層の流量から一潮汐間に St. 2 と St. 6 の横断面を通過する流量

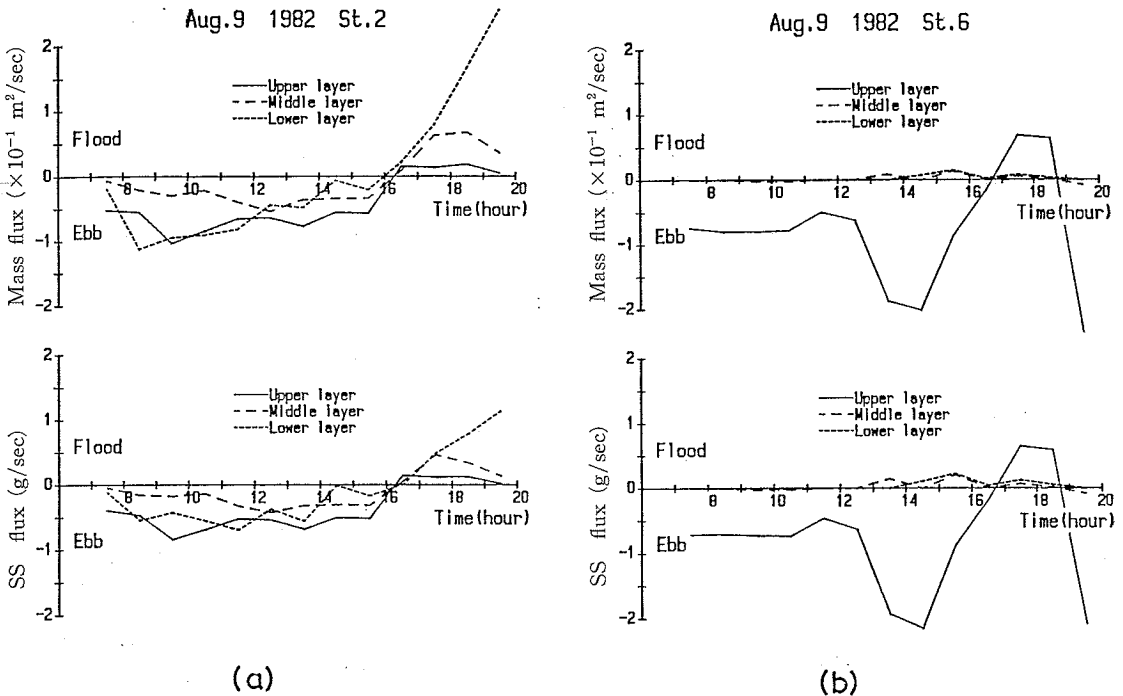


Fig. 8 Tidal cycle variation of mass and suspended sediment flux per unit width at two stations on Aug. 9 1982. (a) St. 2 (b) St. 6

Table 1 Mass and suspended sediment transport during one tidal cycle in the upper, middle and lower layer at St. 2 and St. 6. Q and SS show the mass and suspended sediment transport, respectively.

	upper layer (sal. < 10‰)	middle layer (10~20‰)	lower layer (sal. > 20‰)
St. 2	Q $-1.4 \times 10^5 \text{m}^3$ SS -1.2t	$-0.19 \times 10^5 \text{m}^3$ -0.23t	$+0.07 \times 10^5 \text{m}^3$ -0.12t
St. 6	Q $-1.1 \times 10^5 \text{m}^3$ SS -1.1t	$+0.03 \times 10^5 \text{m}^3$ $+0.04\text{t}$	$+0.05 \times 10^5 \text{m}^3$ $+0.06\text{t}$

は約 10^5m^3 で、河川幅及び上層の平均厚さを考慮すると河川流量は約 $2.4 \text{m}^3/\text{s}$ と推定される。一方、St. 2 と St. 6 の横断面を一潮汐間に通過する懸濁粒子の水平輸送量は、上層では両断面とも 1 トン程度である。これに対し躍層及び下層における懸濁粒子の一潮汐間の輸送量は上層を通過する懸濁粒子の水平輸送量の $1/5 \sim 1/25$ とかなり小さい。しかし一潮汐周期積算した St. 2~St. 6 区間内における懸濁粒子の正味の輸送量は、上層で 0.1 トン、躍層で 0.27 トン、下層では 0.18 トンの区間内からの流出（発散）となり、躍層及び下層における正味の水平輸送量の方が上層よりも大きいという結果になった。

水平輸送に対し鉛直方向の輸送量を求める二層ボックスモデルの解析には、Fig. 5 a, b に示した各層の濁度及び塩分の平均値を、また河川流量には横断面観測から推定した $2.4 \text{m}^3/\text{s}$ を用いた。Fig. 9 a, b に一潮汐平均した各ボックス間における流量 (mass flux) 及び懸濁粒子の輸送量 (SS flux) を示す。なお図中の白抜き矢印は移流（大矢印）・鉛直混合（小矢印）による海水及び懸濁粒子の輸送を、また黒矢印は懸濁粒子の沈降による輸送を表す。

Fig. 9 a の流量についてみると、上層における水平方向の流量は 10^5m^3 のオーダーで Box 3（上流）から Box 1（下流）にかけて徐々に増加している。これに対し下層における水平方向の流量は、河口部の Box 1 で 10^4m^3 のオーダー、塩水楔先端の Box 3 で 10^3m^3 のオーダーと上層に比べ 1~2 桁小さくなっている。またボックスモデルの上下層の境界面における鉛直方向の流量は各ボックスで上向きであり、その大きさは Box 1 で $10^3 \sim 10^4 \text{m}^3$ 、Box 3 で $10^2 \sim 10^3 \text{m}^3$ となり、下流に向かうにつれて増加している。一方、懸濁粒子の水平輸送はほぼ流量パターンを反映したものであるが、鉛直方向の懸濁粒子の輸送量は鉛直方向の流量同様、各ボックスで

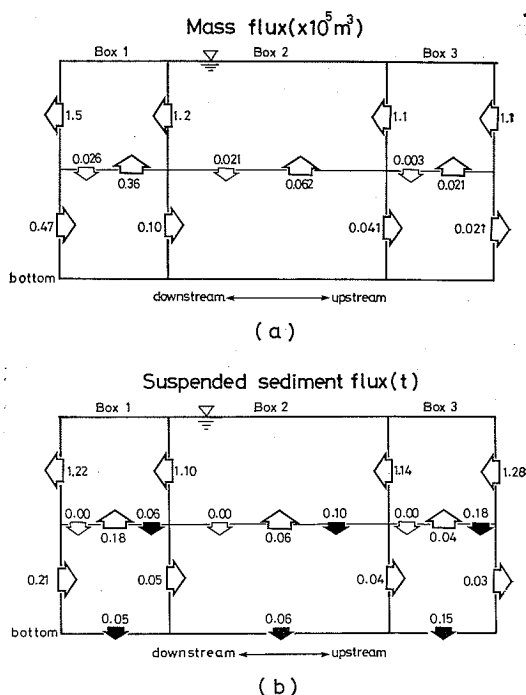


Fig. 9 Mass and suspended sediment transport during one tidal cycle in the box model. (a) mass flux (b) SS flux

異なる。すなわち Fig. 9b の黒矢印で示した各ボックスにおける懸濁粒子の沈降水量と上下層境界面の面積（平均河川幅 $80 \text{m} \times$ 各ボックスの長さ）から求めた単位面積あたりの懸濁粒子の沈降水量は Box 1: Box 2: Box 3 = 6: 5: 18 となり、Box 3 は多数の懸濁粒子が沈降・堆積する区間となっている。これに対し河口部の Box 1 では下層から上層へ運ばれる懸濁粒子の鉛直輸送量 (0.18 トン) が他の Box の約 4 倍と多く、また海測から下層を通り流入する懸濁粒子も多い (0.21 トン) が海測へ流出する懸濁粒子も多い海水交換の大きな区間と考えられた。

4. 考察

観測結果およびボックスモデルによる輸送収支の解析から、塩水楔型感潮域においては流動及び懸濁粒子の分布や輸送に多くの特徴があることが示された。その中で、塩水侵入域先端付近に形成される turbidity maximum は感潮域一般に見られる現象であり、感潮域における懸濁粒子の挙動を把握する上で重要な問題と考えられる。ここではこの turbidity maximum の形成・維持機構について、また塩水楔型感潮域特有の懸濁粒子

の輸送パターンについて、ボックスモデルの解析から得られた結果をもとに考察してみる。

懸濁粒子濃度の高い領域は Fig. 5a, b の濁度の縦断方向の分布から、St. 2～St. 3 及び St. 6～St. 7 の2つの区間に存在することが示された。後者が塩水楔先端付近の turbidity maximum といわれる領域である。そしてこれらの区間では底泥のシルト・クレイ含有率も他の地点と比べ非常に高く、水質ばかりでなく底質においても懸濁粒子の集積する地点となっている(伊藤ほか, 1985)。一般に懸濁粒子濃度の変動要因としては移流・拡散によるもの、流速の増加に伴う底泥の巻き上げによるもの及び懸濁粒子の沈降の3つがあげられるが、上述した両区間で形成された高濁度域についてはその成因が場所によって異なるものと考えられる。すなわち、St. 2～St. 3 の区間の濁度の増加については Fig. 7a と Fig. 8a に示した濁度及び流量の時間変化を比較すると、St. 2 における下層濁度の増加時期が下層流量の増大時とほぼ一致していることから、St. 2～St. 3 の区間に堆積した底泥の巻き上げがその原因ではないかと考えられる。これに対し St. 6～St. 7 の塩水楔先端付近の turbidity maximum については、Fig. 8b に示したように塩水楔内の海水がほとんど動かないこと、また Fig. 6c の濁度及び塩分の鉛直分布に示されるように、St. 6 の躍層付近には濁度の極大がみられることから、底泥の巻き上げによるというよりも上層からの懸濁粒子の沈降が大きな原因となっているものと推定された。実際、ボックスモデルによる解析から得られたこの区間における一潮汐間の懸濁粒子の輸送収支は、上層から下層へ沈降する懸濁粒子量 (0.18トン) が、下層を通り下流から上流へ運ばれる水平方向の懸濁粒子量 (0.04トン) より数倍も大きく、懸濁粒子の沈降が turbidity maximum の形成に関わっていることを裏付ける結果となった。

ボックスモデルによる解析から求めた流量及び懸濁粒子の水平輸送量を、定点観測によって得られた一潮汐周期にわたる St. 2 および St. 6 の各輸送量と比較すると、まず St. 5 にあたる Box 2 と Box 3 の境界面では、Fig. 9a に示したように下層における水平方向の流量が上層の約4%となり、Table 1 に示した St. 6 の上層と躍層を通過する流量とほぼ同じ割合となっている。これに対し Box 1 と Box 2 の境界面では下層の流量が上層の約9%と Table 1 に示した St. 2 の横断面における上・下層の流量の割合(約6%)より大きくなった。しかし流動の複雑な感潮域においては輸送量の見積もりに誤差の含まれる可能性が多く(DYER 1973)、

この程度の誤差はやむを得ないものと考えられる。これよりボックスモデルの解析から求めた水平方向の流量は横断面観測より得られた一潮汐周期の流量とほぼ一致しているといえる。またボックスモデル及び観測から見積もられた St. 2～St. 6 の区間の一潮汐周期積算した正味の懸濁粒子の水平輸送量は、両測定の河川横断面を通過する懸濁粒子の水平輸送量に比べ3層いずれも小さく、塩水楔型感潮域では水平輸送による懸濁粒子の集積あるいは分散効果は非常に小さいものと考えられる。

ボックスモデルから得られた鉛直方向の流量は、上下層における混合状況を知る上でよい指標になると考えられる。塩水楔先端の Box 3 では躍層にあたる境界面を通過する鉛直上向き流量は上層の水平流量の2%程度であるが、下流に向かうにつれて増加し河口部の Box 1 では上層を通過する水平方向の流量の約30%にあたる海水が下層から上層に運ばれ、この区間における上下層間の海水交換が大きいことを示している。このことは Fig. 5a に示した躍層の厚さが St. 1～St. 2 の区間で増加していることからもうかがえる。

流量に対し懸濁粒子の輸送状況は、各ボックス間の流量パターンを反映したものとなっている。Fig. 9b をみると、黒矢印で示した躍層を通り上層から下層へ沈降する懸濁粒子及び底面に沈降・堆積する懸濁粒子の量は、流れによる懸濁粒子の輸送量(白抜き矢印)と同程度かそれ以上に大きく、沈降による懸濁粒子の鉛直輸送が各ボックスにおける輸送収支に大きな影響を及ぼしていることがわかる。特に塩水楔先端にあたる Box 3 では、上層を通過する懸濁粒子の水平輸送量の約10%が下層へ移行し、この区間で沈降が卓越していることを示している。また Box 2 では Fig. 9b によると、上層のボックスの水平方向の輸送収支は0.04トンの流入であるが、横断面観測の結果からは約0.1トンの流出となっている。このような正味の輸送量に対する誤差は前述したように感潮域においては一般的には小さくないが、今回の観測では上層についていえば、懸濁粒子の収支は平衡状態に近く経日的な時間変化も小さい状態にあると考えられる。

5. おわりに

塩水楔型感潮域では躍層を境に上下層で濁度の分布や流動が大きく異なることを観測結果から示した。その中で塩水楔先端付近の turbidity maximum の形成・維持には、緩混合型感潮域における turbidity maximum の主要な要因である上流向きの懸濁粒子の水平輸送よりも、躍層を通しての鉛直輸送が重要な役割を果たしてい

ることを二層ボックスモデルによる解析などから明らかにした。しかし塩水楔型感潮域における懸濁粒子の挙動としては、塩水楔先端付近の turbidity maximum だけでなく、entrainment に伴う懸濁粒子の挙動や河口付近における低濁度の海水との混合過程も重要な問題と考えられる。この弱混合からより強混合へと移行する際の懸濁粒子の挙動については今後の課題としたい。

最後に本研究の遂行において御鞭達を賜った東海大学海洋学部平野敏行教授と観測等で御協力頂いた東北大学理学部の花輪公雄講師、東京大学海洋研究所の川崎康寛助手に心から感謝の意を表する。

文 献

- DYER, K. R. (1973) Estuaries: A physical introduction. John Wiley, London, 71-73pp.
- FESTA, J. F. and D. V. HANSEN (1978) Turbidity maxima in partially mixed estuaries, A two-dimensional numerical model. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, **7**, 347-359.
- HANAWA, K. and T. SUGIMOTO (1980) Effect of the variation of river discharge on flushing and recovery salt wedge (2). *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser. 5, *Geophys.*, **25**, 1-17.
- 伊藤喜代志・杉本隆成・平野敏行 (1985) 塩水楔型感潮河川における懸濁粒子の分布および輸送. 1985年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 316.
- 伊藤喜代志 (1987) 河口域における懸濁粒子の輸送. 水産海洋環境論, 杉本隆成ほか編, 恒星社厚生閣, 245-250.
- 古賀憲一・栗谷陽一・楠田啓也 (1981) 塩水中における微粒子の凝集沈降特性に関する基礎的研究. 第35回年次学術講演概要集第2部, 土木学会編, 11-385.
- KRANCK, K. (1973) Flocculation of suspended sediment in the sea. *Nature Lond.*, **246**, 348-350.
- 松尾 信 (1980) 岡山湾吉井川水系における懸濁粒子の分布と有機組成, *公害*, **15**(3), 41-50.
- 乗木新一郎・前田 勝 (1983) 無機汚染物質の粒子化とその後の運命. *環境科学研究報告集*, B179-S706, 15-19.
- ODD, N. V. M. and M. W. OWEN (1972) A two-layer model of mud transport in the Thames Estuary. *Proc. Inst. Civ. Eng. Suppl.*, **9**, 175-205.
- OFFICER, C. B. (1980a) Discussin of the turbidity maximum in partially mixed estuaries. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, **10**, 239-246.
- OFFICER, C. B. (1980b) Box models revisited. *In*, *Estuar. and Wetland Processes*, eds. P. HAMILTON and K. B. MACDONALD, 84-98.
- OLSEN, C. R., N. H. CUTSHALL and I. L. LARSEN (1982) Pollutant-particle assoc. and dynamics in coastal marine environments, a review, *Mar. Chem.*, **11**, 501-533.
- POSTMA, H. (1967) Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *In*, *Estuaries* ed. G. H. LAUFF, Amer. Ass. Adv. Sci., Publ. 83, Washington, 158-179.
- SAKAMOTO, W. (1972) Study on the process of river suspension from flocculation to accumulation in estuary. *Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo*, **5**, 1-46.
- SHUBEL, J. R. (1969) Distribution and transport of suspended sediment in upper Chesapeake Bay. *Tech. Rept. 60*. Ref. 69-13, Chesapeake Bay Inst., John Hopkins University, 1-29.
- SUGIMOTO, T., and M. TANIYA (1978) Effect of boundary geometries on the salt wedge (1)-Numerical experiments and field observations. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys.*, **25**, 71-82.