

強混合河川感潮部における物質輸送と水質変換に関する研究

二渡, 了

<https://doi.org/10.11501/3071401>

出版情報：九州大学, 1993, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

第4章 懸濁物質輸送の特性とモデル化

4.1 緒言

河川感潮部における懸濁物質は、それ自体懸濁粒子としてあるいは種々の汚染物質の輸送媒体として、感潮部での水質に様々な影響を及ぼし、さらに航路の埋没やガタ土堆積による河道断面の減少等の問題を引き起こす。懸濁物質は微細な粘土・シルトからなり、一般に凝集性を有する。このような懸濁物質は、河川感潮部ばかりでなく、沿岸域とくに内湾や湖沼等にも存在する。水域での水質の予測や水環境改善・保全のために、その挙動が明らかにされる必要がある。

懸濁物質の感潮部における挙動は、大きく鉛直輸送と水平輸送に分けられる。前者は懸濁物質と流体との相互作用により生じ、図4-1に示すように懸濁物質の沈降、浮泥・底泥の巻き上げ、浮泥・底泥の形成といった過程に分けることができる。浮泥は一般に上層水中の懸濁物質が沈降して形成されるが、底泥に波のような往復振動流が連続して作用することによりその表層の含水比が増大し、浮泥化することもある。底泥は、浮泥が堆積し、巻き上げられるまでの間に圧密を受けることによって形成されるほか、水中の懸濁物質がその粘着性によって底泥表面に直接付着し底泥を形成する。また、浮泥の巻き上げは、底泥のものと区別して連行 (entrainment) とか再浮上 (resuspension, redispersion) といわれることもある。懸濁物質は、潮汐作用による掃流力の時間的な変化に応じて一潮汐間にこれらの過程を繰り返しながら、河道方向あるいは横断面内で移動し、底泥の局所的な洗掘や堆積を引き起こす。しかし、この一潮汐間での懸濁物質の輸送を支配する量は一定ではなく、一潮汐間の平均的な流れや潮位の長期的な変化及び境界からの懸濁物質の流入出に対してその河道内での存在量が増減し、長期的な底泥の堆積量の変化が生じる。また、実際の感潮部では、潮汐流の振幅や位相が河道方向に変化するために、懸濁物質の鉛直輸送形態が空間的に異なり、河道方向への懸濁物質の輸送いわゆる物質輸送が生じる。

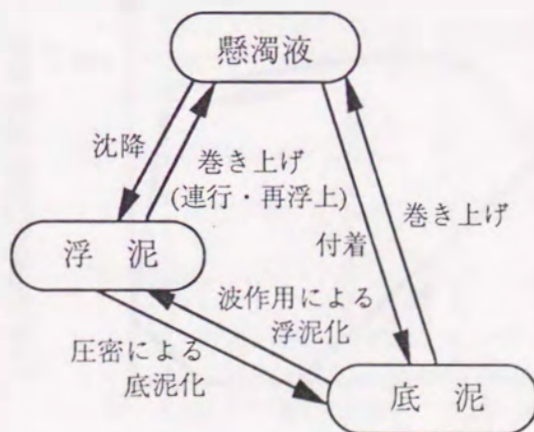


図4-1 感潮部における懸濁物質の挙動

本章では、まず4.2節で底泥の巻き上げ、懸濁物質の沈降、そして浮泥・底泥の形成の各過程について従来得られている知見を参考にして理論的・実験的に検討し、各過程の支配要因について整理する。続いて4.3節では、河道方向への懸濁物質の輸送機構について現地観測結果を基に検討する。さらに、これらの結果より、感潮部における物質輸送現象のモデル化を行い、懸濁物質濃度変動の数値シミュレーションを行う。この計算結果を基に、河道方向への懸濁物質の輸送機構を検討し、SS高濃度塊の形成について考察する。これらを4.4節として示す。

4.2 懸濁物質の輸送特性

4.2.1 はじめに

水底に堆積する底泥に大きな掃流力が作用すると、底泥は上層水中に巻き上げられ、懸濁状態となる。懸濁化した微細粒子は、流れにより輸送されつつ、流れが遅くなると徐々に底面上に沈積し、最終的に流れが静止すると全ての粒子が沈降する。

円形回転水路を用いた室内実験において水路底面に作用する底面剪断応力(掃流力)を周期的に変化させたときの主流部のSS濃度の変化は、図4-2のように模式的に示される¹⁾。底面剪断応力の増加にしたがって、底泥が巻き上げられるためにSS濃度が増加し、底面剪断応力が最大となった後、それが減少する間もしばらくはSS濃度が増加する。その後、底面剪断応力が徐々に小さくなるにしたがって、巻き上げられた粒子が沈降するために、SS濃度が減少する。このように底面剪断応力の周期的な変化に対して、SS濃度は同図で右回りのループを描くように変化する。ここでは、底面剪断応力とSS濃度の関係を説明するために次の4つの底面剪断応力が使われる。①巻き上げが始まる限界底面剪断応力(τ_{ce1})、②巻き上げが継続し得なくなる限界底面剪断応力(τ_{ce2})、③巻き上げられた懸濁粒子のうち最も粗い粒子(群)が沈

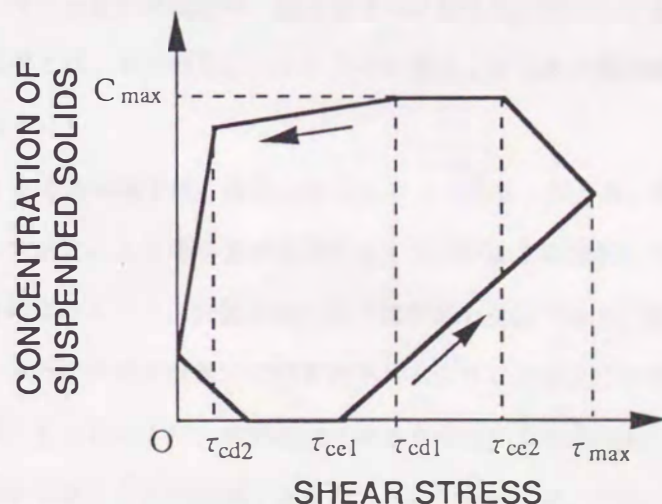


図4-2 底面剪断応力と懸濁物質濃度との関係(海田ら¹⁾による)

降を開始する最大の底面剪断応力 (τ_{cd1}), ④全ての粒子が沈降してしまうとみなせる最大の底面剪断応力 (τ_{cd2}), である。これらの値は懸濁物質の種類や性状によって異なるが, ある底面剪断応力の下で巻き上げられた懸濁粒子は, 剪断応力が同じであればほとんど沈降しない, すなわち $\tau_{cd1} < \tau_{cd2}$ であることが明らかにされており, 剪断応力が時間の経過とともに増加する間には沈降は起こらないと考えてよい。

図4-2では, 底面剪断応力が最大あるいは最小となったときにSS濃度がそれぞれ最大・最小となっておらず, SS濃度が最大・最小となるのは, いずれも底面剪断応力が最大・最小となった後である。すなわち, 周期的な底面剪断応力の変化に対してSS濃度の変化が遅れることが分かる。これは, 底面剪断応力が最大となった後に減少する間も底泥に作用する剪断応力が巻き上げ限界底面剪断応力を越えているためであり, 沈降の場合も同様である。このような遅れ効果が, 河川感潮部における懸濁物質の輸送に重要な役割を果たすことになる。また, 実際の感潮部では, 大潮・小潮のような長期的な潮相の変化にともなって一潮汐間での周期的な底面剪断応力の変動特性が変化する。すなわち, 一潮汐間での底面剪断応力の最大値は, 大潮時に極大となり, 小潮時には極小となる。SS濃度は一潮汐間での変化を繰り返しながら, その極大・極小値も長期的に変化する。しかしながら, 図3-13で見たように半月周期においてSS濃度が最大・最小となるのは, 各々大潮・小潮の数日後である。このように長期的に底面剪断応力が変化する場合においても, 底面剪断応力の変化に対するSS濃度変化の遅れ効果が生じている。

以下では, 底泥の巻き上げ過程及び懸濁物質の沈降過程についてこれまでに得られている知見を整理する。

1) 底泥の巻き上げ過程

流水中の底泥(浮泥も含む)の巻き上げは, 底泥表面に掃流力が作用することにより生じている。流水中での底泥の巻き上げ現象に関する研究はいくつか行われてきたものの, 未だ不明な点も多く残されているが, 底泥の巻き上げに関する主な特性値は, 巻き上げの限界底面剪断応力と巻き上げ速度であるといえる。ここで, 巻き上げ速度とは, 単位時間当たりに水中に巻き上げられた懸濁物質質量の増加分を単位面積当たりで表したものである。

底泥の巻き上げが始まる時の様子は, 底泥の状態によって異なってくる。海田ら²⁾は, 底泥の種類によって値は異なるものの含水比により巻き上げ形態を表4-1のように分類している。また, その様子を模式的に示すと図4-3のようになる。分類Aは, 含水比が低い場合であり, 流れと垂直方向に局所的に小さなひび割れが生じ, さらにそれが成長して引き剥されるように巻き上げが生じるときである。分類Bは, Aよりも含水比が高くなったときで, 底泥表面に流れと平行に長さ数cm, 幅数mm程度の筋が多数発生し, これらの筋の峰から巻き上げが開始するものである。分類Cは, 含水比が高く, 底泥の流動性が

表4-1 巻き上げ形態の分類 (海田ら²⁾による)

底泥名	巻き上げ形態を分類する含水比 w (%)		
	カオリン	$w < 180$	$180 < w < 480$
筑後川底泥	$w < 200$	$200 < w < 350$	$350 < w$
高松泥	$w < 230$	$230 < w < 350$	$350 < w$
巻き上げ形態	A	B	C

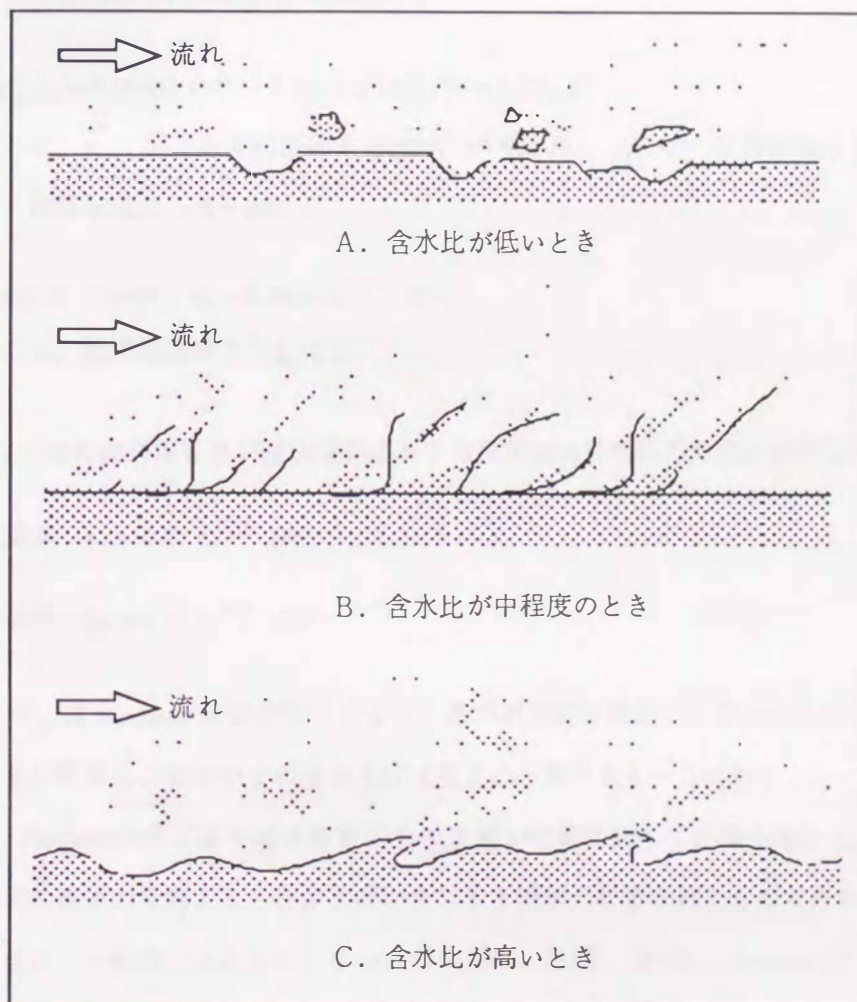


図4-3 含水比による巻き上げ形態の分類

大きい場合であり、ある底面剪断応力に達すると底泥表層に界面波が生じ、さらに剪断応力を増すと界面の碎波とともに巻き上げが生じるものである。また、大坪³⁾は種々の底泥試料を用いた実験より、底泥粒子が浮上し始める流送限界、底泥床面が破壊して大量の底泥が短時間に流送されてしまうような破壊限界を定義している。しかしながら、巻き上げの形態そのものが底泥の物性等によって変化するため、巻き上

げ限界底面剪断応力の厳密な定義や一般的な測定方法は定められていない。また、底泥が巻き上げられるときの力学的な条件についても明確には説明されていない。これは、砂粒のように非粘着性の粒子場合には1個の粒子に作用する力のつりあいから説明されるが、粘土・シルトのような粘着性を有する粒子(群)の場合にはそれらの凝集力が力のつりあいに大きな影響を及ぼしているからである。したがって、これまでの研究で使われてきた底泥の巻き上げ限界底面剪断応力(限界掃流力; τ_{cc})は、各研究者によってそれぞれ定義されたものである。

河村⁴⁾は、土の剪断強さとの関係に基づいて粘着性土砂(粘性土)に関する限界掃流力の式を紹介しているが、以下にその限界掃流力の式を示す。

$$\text{Dunn}; \tau_{cc} = 0.00488 (180 + 0.2048 \tau_s) \tan (30 + 1.73 I_p) \quad (4. 1)$$

ここで、 τ_{cc} ; 限界底面剪断応力 [$\text{kgf/m}^2 = 9.807 \text{ Pa}$], τ_s ; ベーン剪断強さ [kgf/m^2],

I_p ; 塑性指数 ($I_p = 5 \sim 16$).

$$\text{Smerdon \& Beasley}; \tau_{cc} = 0.1054 I_p^{0.82} \quad [\text{Pa}] \quad (4. 2)$$

ただし、適用範囲は $7 < I_p < 50$

また、大坪³⁾は上述の流送限界及び破壊限界に対する限界底面剪断応力の式を提案している。

$$\text{流送限界}; \tau_{cc} = 0.27 \tau_y^{0.56} \quad [\text{Pa}] \quad (4. 3)$$

$$\text{破壊限界}; \tau_{cc} = 0.79 \tau_y^{0.94} \quad [\text{Pa}] \quad (4. 4)$$

なお、ここでの τ_y はBinghamの降伏値ではなく、底泥が流動を開始する限界の剪断応力である。

次に、各研究者が提案した流水中での巻き上げ速度式の一覧を表4-2に示す。

式(4. 5)は、Partheniades⁵⁾により底面剪断応力の変動が時間に対して正規分布をし、表面の粒子に働く剪断応力が粒子の凝集力を越えると巻き上げが生じると仮定して導かれたものである。しかし、式中には多くの定数を含み、一般性のあるものとなっていない。式(4. 6)は、Christenses⁶⁾が流速の変動が時間に対して正規分布をすると仮定して、式(4. 5)を変形したものである。式(4. 7)は、巻き上げ速度が無次元底面剪断応力の1乗に比例するとしたAriathuraiら⁷⁾の実験式であり、係数に対するCEC, SAR, 水温の影響を検討している。Lambermontら⁸⁾は、Migniotの降伏値と巻き上げの限界底面剪断応力との実験式をもとに式(4. 8)の巻き上げ速度式を導いている。しかし、底泥の密度の初期鉛直分布が放物線分布の場合にしか適用できないまた、大坪⁹⁾は、底面剪断応力が正規分布をしているとき、底泥粒子の離脱時間と乱れの周期に基づく底面剪断応力の作用時間を考慮して式(4. 9)を導いている。式(4. 10)は、滝ら¹⁰⁾が次元解析より無次元量を求め、他の研究者の実験結果からべき数を決めて導いたものである。こ

表4-2 巻き上げ速度を表す式

$$F_c = a_1 \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a_2/\tau - a_3}^{a_2/\tau - a_3} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) dw \right\} \quad (4.5)$$

$$F_c = a_1 \left\{ 0.5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-6.1 + 6.18/\sqrt{a_4 \tau}} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) dw \right\} \quad (4.6)$$

$$F_c = a_5 \{ (\tau - \tau_{ce}) / \tau_{ce} \} \quad (4.7)$$

$$F_c = a_6 (\tau^{a_7} - \tau_{ce}^{a_7}) \tau^{0.5} \quad (4.8)$$

$$F_c = a_8 \{ \tau + a_9 \phi(y_c) / P_0 - \tau_{ce} \} \quad (4.9)$$

ただし, $y_c = 2(\tau / \tau_{ce} - 1)$, $\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)$, $P_0 = \int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy / \int_{-2}^{\infty} \phi(y) dy$

$$F_c = a_{10} \tau^{1.5} \text{ (掃流的現象)}, \quad F_c = a_{11} \tau^3 \text{ (密度流的現象)} \quad (4.10)$$

$$F_c = a_{12} (\tau^{0.5} - \tau_{ce}^{0.5})^{1.2-1.5} \quad (4.11)$$

$$F_c = a_{13} \exp \{ a_{14} (\tau - \tau_{ce}) / \tau_{ce} \} \quad (4.12)$$

$$F_c = a_{15} \exp \{ a_{16} (\tau - \tau_{ce})^{0.5} \} \quad (4.13)$$

これらの式は、大坪のものを除いて、比較的含水比が低く、初期状態として鉛直方向に試料の含水比分布が存在しない場合の実験結果から導かれている。

試料の含水比の鉛直分布が存在する場合の巻き上げ速度式には、式(4.11)~(4.13)がある。式(4.11)は村岡¹¹⁾が現地観測試料から得たものである。また、試料を堆積させ、1時間毎に底面剪断応力を変化させた実験より、Mehtaら¹²⁾が式(4.12)を、Trimbakら¹³⁾が式(4.13)を得ている。

以上のように、巻き上げ速度を規定する多くの式が提案されている。しかしながら、これらの式は巻き上げ速度が時間的に変化しないことを前提とした実験より導かれている。例えば、試料を実験装置内に入れ、その後ある時間間隔で底面剪断応力を徐々に大きくして、各々の底面剪断応力のもとで巻き上げ速度を算定するという方法では、ある底面剪断応力のときにそれまで試料が受けた履歴を考慮しておらず、試料の含水比分布が初期状態とかなり異なっている可能性がある。

2) 懸濁物質の沈降過程

河川感潮部において水中に浮遊する懸濁粒子は、凝集性を有するためにフロックを形成し、見かけの粒子径が大きくなるために沈降しやすくなる。水中における懸濁物質の沈降 (settling) とは、粒子(群)が重力によりある沈降速度 (settling velocity) をもって鉛直方向下方に移動することであり、個体としての粒子(群)の挙動を表す懸濁粒子の物性の一つである。懸濁物質の沈降によって懸濁物質が河床上に堆積し浮泥・底泥を形成することは沈殿とか沈積 (deposition, sedimentation, siltation) といわれるが、流水中では底面付近での乱れ等により河床に達してもそこに留まることができず、再び上層水中に運ばれることもある。すなわち、流水中では河床底面近傍での鉛直拡散によって上層水中のSS濃度の減少が生じていると考えられる。したがって、流水中における濃度減少に対して沈降という用語を用いることは必ずしも適切ではないけれども、国内では慣用的に使われることが多くなっている。このようなことから、現場水域では、日単位の単位面積あたりの堆積速度 (rate of deposition, siltation rate) が測定され、これと上層水の懸濁物質濃度より平均的な沈降速度が求められている¹⁴⁾。

水中における微細な懸濁物質の沈降特性は、懸濁粒子の種類や形状、濃度等によって影響されるほか、水中の塩分や流れの有無も重要な支配因子となる。静水中及び流水中での懸濁物質の沈降過程をまとめると次のようになる。

まず、静水中における懸濁粒子の沈降過程は、単粒子で沈降する場合と粒子群で沈降する場合に大きく分けられる。前者では、重力と抗力の平衡条件により単一粒子の沈降速度が決まり、粒子密度、粒径、形状、そして水温、塩分、粘性等が関係する。さらに、沈降筒で粒子の沈降速度を測定する際には、側壁等の周辺境界面の影響もある¹⁵⁾。粒子が球形でレイノルズ数が小さいときには、ストークスの式として次式により水中での沈降速度 w_s が与えられる。

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho_w}{\mu} g d^2 \quad (4.14)$$

ここで、 ρ_p , ρ_w ; 懸濁粒子及び水の密度, μ ; 水の粘性係数, d ; 粒子径, g ; 重力の加速度。

ここでは、抵抗係数 C_D を $C_D = 24/R_e$ として導かれたものであるが、この他、抵抗係数をレイノルズ数の関数として多数の実験式が提案されている。

一方、粒子群としての沈降は、粒子間の凝集に影響され、ゼータ電位や衝突合一確率等が関係する。微細粒子の表面に形成されている電気二重層の電気的な反発力がゼータ電位として表されるが、海水中の Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} のような陽イオンにより電氣的に中和され、粒子間引力 (ファン・デル・ワールス力) が勝るようになるために、粒子相互の集塊化が起こる。

実感潮域での懸濁物質の沈降速度測定結果より、平均懸濁物質沈降速度がSS濃度の関数となることが

示されている^{16), 17)}。SS濃度が数g/l以下の範囲では、濃度の増加に伴い粒子の衝突頻度が増加するために、粒子のフロック化が起りやすくなり、沈降速度が大きくなる。さらに濃度が高くなり干渉沈降が起こるようになると、粒子より下方にある流体が排水されにくくなるため、濃度の増加に対して見かけ沈降速度は小さくなる。これらの沈降速度と懸濁物質濃度の関係は指数関数的となり、次式で示される。

$$w_s = k_1 C_{ss}^{l_1} \quad (4.15)$$

$$w_s = w_0 (1 - k_2 C_{ss})^{l_2} \quad (4.16)$$

ここに、 C_{ss} ；SS濃度、 k_1 、 k_2 ；定数、 l_1 、 l_2 ；指数、 w_0 ；基準沈降速度。

なお、 k_1 、 k_2 、 l_1 及び l_2 は経験的に求められる値であるが、各水域の懸濁物質における l_1 の値として1.0～3.0が求められている。

界面沈降現象では、界面の高さの経時変化を示す沈降曲線が得られる。その沈降過程は、界面が一定の速度で降下する等速沈降区間とその後の界面沈降速度が徐々に低下する圧密区間とに分けられる。等速沈降区間での懸濁粒子の沈降速度は、粒子のある位置での粒子濃度のみにより決まるというKynchの理論が適用される。

一方、流水中での懸濁物質の沈降現象はかなり複雑であり、砂粒子に比べてもその研究が遅れている。これは、微細な懸濁粒子の沈降速度が非常に小さく、現象の時定数が大きくなるため、これに適した実験装置の開発が遅れたことや粒子の凝集・フロック化が起こるため条件をそろえることが難しいこと等があげられる。河川感潮部での懸濁物質は、流れとの相互作用により底泥の巻き上げと沈降を繰り返しているが、その沈降は満潮及び干潮の停潮時前後で生じている。懸濁物質のもつ沈降速度と水中のSS濃度から求めた沈降フラックスは、時間的・空間的に大きく変動し、種々の要因が影響する。

このような懸濁物質の沈降速度の測定は、種々の条件のもとで行われているが、測定目的、対象、方法等により測定値が大きくばらつく。細川ら¹⁴⁾は、海域において捕集筒を用い一定期間中(時間もしくは日単位)に容器内に沈降し捕集された懸濁物質質量より、平均的な沈降フラックスを求めている。しかし、この方法では捕集筒の形状や周囲の流れ等によって捕集効率が変わるために、かなり誤差を含んだものとなる。感潮域での沈降現象では懸濁物質のフロック化が重要な要因となるため、現地水域で形成されたフロックをそのまま採取し、その沈降速度を測定することのできるオーエン・チューブを初めとした種々の沈降管が開発されている¹⁶⁾。また、最近ではビデオカメラを水中に設置し、懸濁物質の沈降する様子を撮影し、それらの粒子径やフロック径、沈降速度等を求めている。しかし、微細粒子やフロックは、水中では非常に軽量であるために局所的な流れや乱れにより簡単に運ばれるので、正味の沈降速度を求めることは困難となっている。

以上ような凝集性を有する微細粒子からなる懸濁物質の水中における挙動に関する研究は比較的新しく、非粘着性の砂粒のような浮遊砂についての研究に比べかなり遅れている。その理由には、①現象を支配する要因に不確定なものが多いこと、②種々の時定数の現象が同時に起こること、③空間スケールの異なる現象が同時に起こること、等がある。まず、①に関して次のようなことがいえる。感潮部における懸濁物質の挙動に関する様々な現象は、懸濁物質と流体の相互作用により生じており、多くの支配要因が関係している。すなわち、懸濁物質の種類や濃度、含水比、懸濁液の塩分濃度、温度等の他にも渦のスケールや乱れ強度といった流体条件も重要な要因となる。しかしながら、現象を記述する際のパラメータには、力学的な理論解析による機構説明が難しいため、その影響が大きいもののみを対象として実験的に検討し、その他のものは実験によって得られる関係式の係数として表現されることが多くなっている。また、粘土粒子の2次構造が試料の前履歴として影響するために、同一試料を用いて同一条件の下で実験を行っても、再現性のある結果が得られにくいということもある。次に②では、個々の現象は比較的短時間であっても、それが連続して生じるために全体としての現象の継続時間が長くなることがある。例えば、浮遊物質の沈降現象では、その沈降速度がかなり小さいために流水中の沈降実験ではその流下距離が長くなる。したがって、このような場合の実験装置には十分な配慮が必要となってくる。③では、室内実験における相似則の適用が問題となる。すなわち、流体条件に相似則を用いても懸濁物質に適用することが困難である。したがって、室内実験で得られた実験式や定数等を用いて実際の水域を対象に解析する際には、それらの適用性について十分に検討し、必要に応じて修正を行わなければならない。

ここでは、底泥の巻き上げ過程、浮遊物質の沈降過程、そして浮泥・底泥の形成過程と流動特性について、種々の実験結果を基に検討する。

4. 2. 2 底泥の巻き上げ過程に関する実験

図4-4に示す円形回転水路¹⁸⁾を用いて種々の含水比の底泥に一定の底面剪断応力を作用させる巻き上げ実験を行った。この円形回転水路は、円形水路(アクリル樹脂製、外径220 cm^φ、内径180 cm^φ、深さ25 cm)とリング(発泡スチロール製、外径219 cm^φ、内径181 cm^φ、厚さ2 cm)からなり、両者を互いに逆方向に回転させて剪断流を発生させている。このように逆方向に回転させることにより、円形水路内の横断方向の2次流の影響を最小にすることができ、それぞれの回転速度を種々の底面剪断応力毎に定めている。一般に、粘土・シルトのような微細粒子からなる底泥の流送特性に関する実験では、現象の時定数が大きく、また主流部で形成されたフロックの特性が沈降速度に大きな影響を与えるので、ポンプを用いた循環型の直線水路ではポンプ内でフロックが破壊され、粒子の沈降速度が実際と異なることになり不適当である。この点、円形回転水路は無限長の水路と考えられ、ポンプのような外的要因によるフロックの破

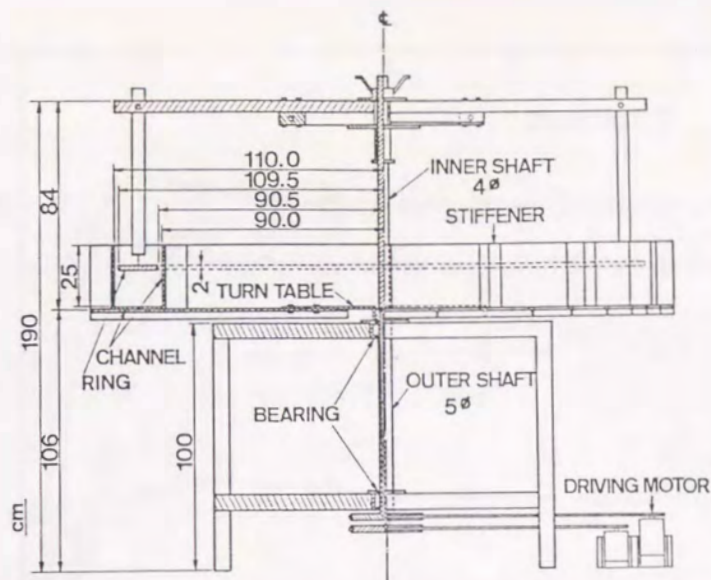
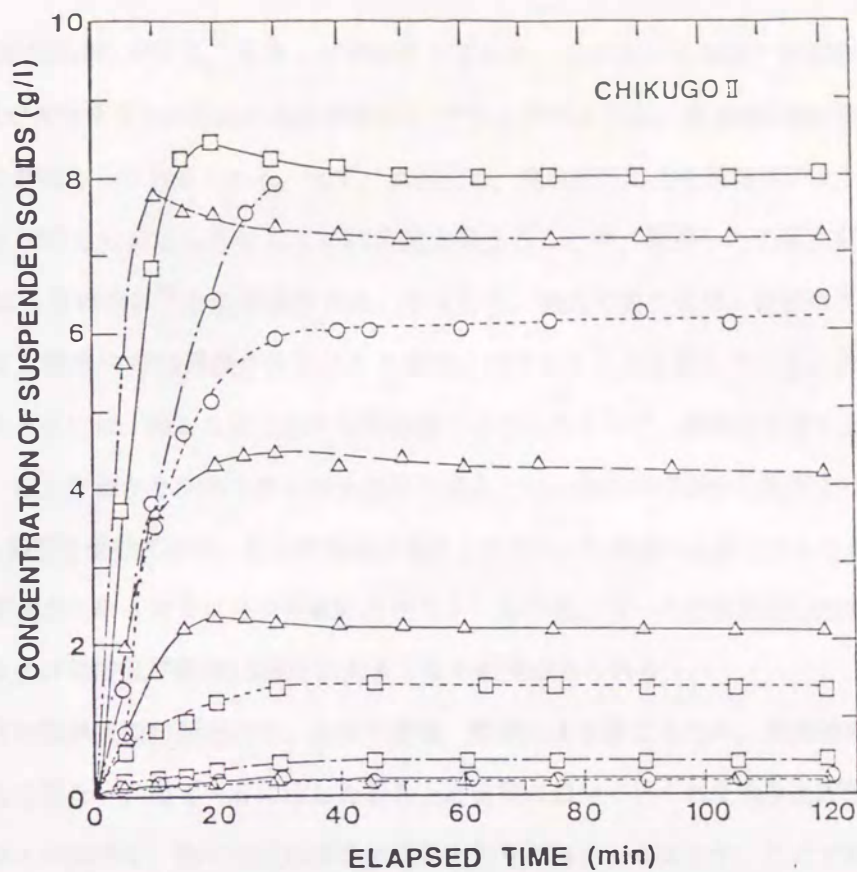


図 4 - 4 円形回転水路

壊も生じないので、底泥の剪断流下での流送特性に関する実験装置として有効なものである。水路の側壁に採水装置を取り付けており、底面から 8 cm のところで採水できるようになっている。なお、今回行った実験の水路回転速度の範囲では、水路内主流部は完全混合状態になっており、鉛直及び水平方向の濃度分布は見られないので、上層水中の SS 濃度の代表値として 1 点の採水点からの試料分析で十分である。SS 濃度の測定には孔径 0.1 μm のメンブランフィルターを用いた。

図 4 - 5 に筑後川底泥を用いた巻き上げ実験時の SS 濃度の経時変化を示す。ここでの実験は、所定の含水比の底泥を予め実験水路床に含水比が一樣になるように 2 cm の厚さに敷き、その上に水深 15 cm となるように密度 1,025 kg/m^3 の塩水を満たした後、一定の底面剪断応力を作用させて行ったものである。なお、実験に用いた筑後川底泥の土質工学的特性は表 4 - 3 に示すとおりであるが、同表には他の底泥のものも示す(図 4 - 5 に示した実験に用いた底泥は筑後川底泥 II である)。実験結果では、SS 濃度が実験開始後約 20 分ぐらいまでに急激に増加し、その後の濃度変化は小さくなり、巻き上げ速度が低下している。底面剪断応力 0.5 Pa、含水比 300 % の場合には、途中で実験水路床上の底泥が部分的になくなってきたため、30 分で実験を終了している。また、底面剪断応力 0.4 Pa、含水比 365 % 及び 400 % の場合には、実験開始後 10 ~ 20 分に濃度が極大となり、その後わずかに濃度が減少している。これは、底面剪断応力が大きいため、実験開始直後比較的粗い粒子を含んで底泥が巻き上げられ、その後その粗い粒子が沈降したためと考えられる。さらに、これらの場合には、含水比 365 % の方が含水比 400 % の場合に比べて最終 SS 濃度は高くなっている。これは、これらの場合に実験水路床上に残存する底泥が少なくなったためであり、底泥を用いた実験そのものの再現性にも問題があるためと思われる。

以上のように、水路床上に底泥が存在するにもかかわらず巻き上げ速度が低下するのは、一般に、①上層水中の懸濁物質の沈降と底泥の巻き上げが平衡状態になること、②相対的に微細な粒子が先に巻き上げら



	τ (Pa)	w (%)	τ_{ce} (Pa)
○—○	0.30	300	0.183
○- -○	0.40		
○· ··○	0.50		
□- -□	0.25	365	0.155
□· ··□	0.30		
□—□	0.40		
△- -△	0.20	400	0.115
△—△	0.25		
△—△	0.30		
△- -△	0.40		

図4-5 SS濃度経時変化

表4-3 底泥の土質工学的特性

底泥名	密度 (kg/m ³)	粒度組性 (%)			中央粒径 (μ m)	強熱減量 (%)	コンシステンシー限界 (%)		
		粘土分	シルト分	砂分			塑性限界	液性限界	塑性指数
筑後川底泥 I	2470	37	61	3	4.7	10.5	42	96	54
筑後川底泥 II	2520	25	74	1	7.0	12.0	41	99	58
カオリン	2660	100	0	0	0.64	2.3	36	65	29

れて amoring (粗粒化現象) が生じ、巻き上げが停止すること、③底泥が連続的に剪断応力を受けることにより粒子間構造が変化するため底泥の表層が硬化し(含水比が減少する)、限界底面剪断応力が増すこと、等が可能性のある原因として考えられる。まず、原因①は、底面剪断応力を段階的に大きくしたときと最初からその底面剪断応力に設定したときとでSS濃度が異なることや、懸濁した上層水を清水に入れ換えてもSS濃度が増加しないこと¹⁹⁾ から否定される。すなわち、底泥の場合には、砂粒のように巻き上げと沈降の平衡により上層水中のSS濃度が決定される機構とは異なることを示している。次に、底泥に粗いシルトが含まれるときには、細かな粘土分から先に巻き上げられるので、原因②が巻き上げ速度を低下させている。また、粘土や細かなシルトからなる底泥の場合には、底泥が表層から巻き上げられつつも、その下の層の底泥も剪断を受けており、粒子間構造が巻き上がりにくい構造へと変化することが考えられる。また、同一の初期含水比のものでは底面剪断応力が大きいもの程、同一の底面剪断応力では初期含水比が高いもの程、巻き上げ速度及び最終SS濃度が大きくなる傾向がみられる。

底泥の巻き上げの限界底面剪断応力は、底泥の種類・性状により異なるため、実水域の底泥を用いた実験により定めざるを得ない。図4-5に示した巻き上げ実験において得られた巻き上げ限界底面剪断応力と底泥の固体分率との関係を、他の底泥の場合の結果とともに図4-6に示す。ここでの巻き上げ限界底面剪断応力は、底面剪断応力を徐々に大きくしていったとき、底泥の表層部のほぼ全域で界面波あるいは筋が発生したときの底面剪断応力を巻き上げの限界底面剪断応力として、目視により求めている。両者は、両対数紙上で直線となり、次式の関係が得られる。

$$\tau_{cc} = \alpha_c (1 - \varepsilon)^m \quad [\text{Pa}] \quad (4.17)$$

ここで、 $1 - \varepsilon$ ；底泥の固体分率， α_c ；係数， m ；指数。

m の値は、各試料とも 1.5， α_c は、筑後川底泥 I で 6.3，筑後川底泥 II 及びカオリンで 4.3 となる。

次に、巻き上げ速度について検討する。ここで、巻き上げ速度は、巻き上げ実験開始後10~20分までのSS濃度が直線的の増加しているときのその直線の勾配から、初期巻き上げ速度として算定した。底泥は、一般にビンガム体としての応力-変形の流動特性を示すといわれており、底泥に作用する底面剪断応力には、実際に作用している底面剪断応力から巻き上げの限界底面剪断応力を差し引いた有効底面剪断応力を考えることができる。さらに、この有効底面剪断応力を限界底面剪断応力で無次元化し、この無次元化有効底面剪断応力 $(\tau - \tau_{cc}) / \tau_{cc}$ と初期巻き上げ速度との関係を各底泥について求めると図4-7のようになる。この図に示されているように、底泥の種類による違いはあるものの、両者の関係は次式となることが分かる。

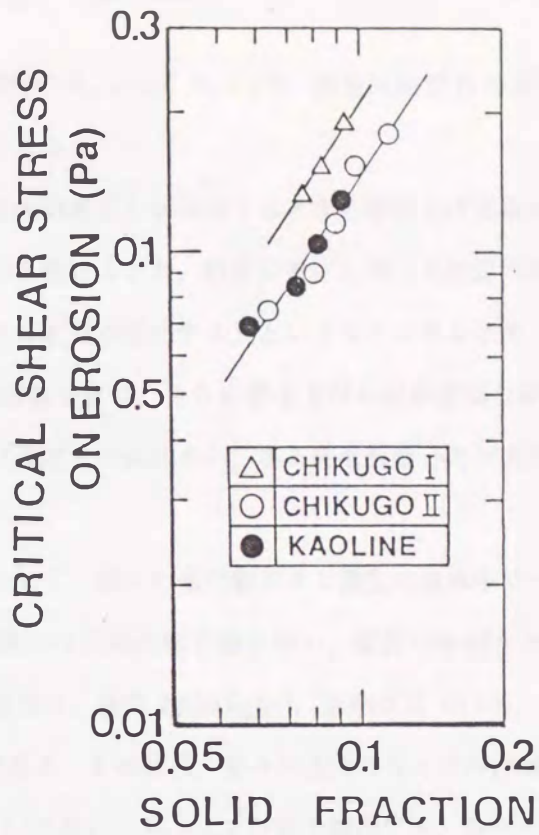


図 4-6 底泥の固体分率と巻き上げ限界底面剪断応力の関係

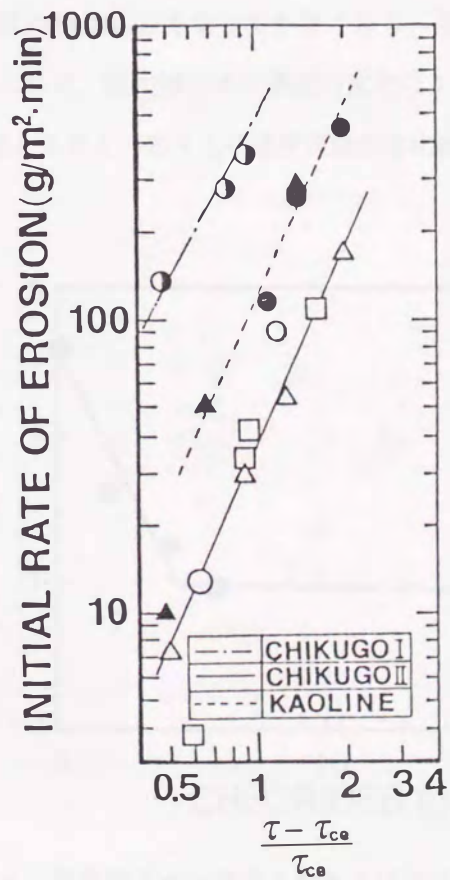


図 4-7 無次元化有効底面剪断応力と初期巻き上げ速度との関係

$$F_e = b_1 \left\{ (\tau - \tau_{cc}) / \tau_{cc} \right\}^{b_2} \quad [\text{g/m}^2 \text{min}] \quad (4.18)$$

それぞれ、筑後川底泥 I の場合、 $b_1 = 513$ 、 $b_2 = 1.9$ 、筑後川底泥 II の場合、 $b_1 = 37$ 、 $b_2 = 2.3$ 、カオリンの場合、 $b_1 = 120$ 、 $b_2 = 2.3$ となる。

これらのことから、一定の底面剪断応力が作用するときの巻き上げ現象は、次のように考えることができる。「底泥が剪断応力の作用を受けるとき、剪断歪量に比例した底泥の硬化が生じ、かつ、自重圧密によっても含水比が減少するために底泥が硬化する」というモデルのもとで、巻き上げの限界底面剪断応力が底泥の含水比(固体分率)の関数となり、さらに巻き上げの限界底面剪断応力を用いて無次元化した有効底面剪断応力と初期巻き上げ速度との関係から、ある底面剪断応力が底泥に作用したときの巻き上げ量を算定することができる。

さらに、六角川底泥を試料として、種々の塩化物イオン濃度の塩水中で一定の底面剪断応力を作用させる巻き上げ実験を行った。実験には円形回転水路を用い、底泥の初期含水比を 370%、底面剪断応力を 0.4 Pa とした。なお、六角川底泥は、密度 $2,530 \text{ kg/m}^3$ 、強熱減量 10.5%、粒度組成が砂分 42.2%、シルト分 18.3%、粘土分 39.5% である。その結果、各々の条件のもとでの SS 濃度の経時変化より得られる初期巻き上げ速度は、式(4.18)において $b_2 = 1.7$ の形で整理でき、各々の巻き上げ速度係数 (b_1) を求めると、図 4-8 に示すような塩化物イオン濃度と巻き上げ速度係数との関係が得られた。すなわち、巻き上げ速度係数は、塩化物イオン濃度の増加にともなって小さくなり、塩化物イオン濃度が 5 g/l より高いところではほぼ一定値となった。これは、塩化物イオン濃度の変化により水中の陽イオン量が変わり、底泥の凝集力が異なってくるためと考えられる。巻き上げ速度係数を塩化物イオン濃度 C_0 の関数で表すと、次式のようになる。

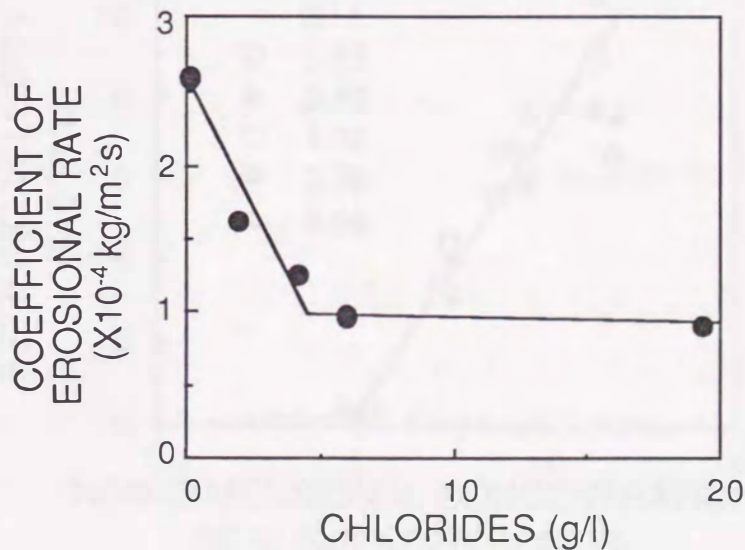


図 4-8 塩化物イオン濃度と巻き上げ速度係数の関係

$$C_{Cl} \leq 4.37 \text{ [g/l]} \text{ のとき} \quad b_1 = (-0.375 C_{Cl} + 2.609) \times 10^{-4} \text{ [kg/m}^2\text{s]} \quad (4.19)$$

$$C_{Cl} > 4.37 \text{ [g/l]} \text{ のとき} \quad b_1 = (-0.00438 C_{Cl} + 0.99) \times 10^{-4} \text{ [kg/m}^2\text{s]} \quad (4.20)$$

4.2.3 懸濁物質の沈降過程に関する実験

静水中の懸濁物質の沈降特性に及ぼす懸濁液初期SS濃度及び塩化物イオン濃度の影響を検討するために、高さ3m、断面0.1m×0.1mの亚克力樹脂製の沈降筒を用いた沈降実験を行った。試料には六角川六角橋地点で採取した懸濁物質(密度2,510 kg/m³、粒度組成砂分3.4%、シルト分37.2%、粘土分59.4%)を用いた。まず、所定のSS及び塩化物イオン濃度の懸濁液を沈降筒内に入れ十分攪拌した後に実験を開始し、沈降筒最下部に設置した受皿上に沈降堆積する懸濁物質の重量を経時的に測定するとともに、沈降筒側壁の鉛直方向に数箇所を設置した採水管を通して採水してSS濃度を求め、懸濁物質の沈降速度を算定した。図4-9に実験結果を示す。なお、同図の横軸は、今回の実験における最小のSS濃度(0.125 g/l)で無次元化している。SS濃度が低いとき(1 g/l以下)には塩化物イオン濃度による沈降速度の違いはほとんど見られないが、SS濃度が高くなるにつれて塩化物イオン濃度の低い方が沈降速度は大きくなっている。ここで、塩化物イオン濃度の影響は小さいとして沈降速度とSS濃度の関係を求めると、次式のようなになる。

$$C_{SS} \leq 0.125 \text{ [g/l]} \text{ のとき} \quad w_s = 0.0000357 \text{ [m/s]} \quad (4.21)$$

$$C_{SS} > 0.125 \text{ [g/l]} \text{ のとき} \quad w_s = \{7.407 \log(C_{SS}/C_0) + 0.357\} \times 10^{-4} \text{ [m/s]} \quad (4.22)$$

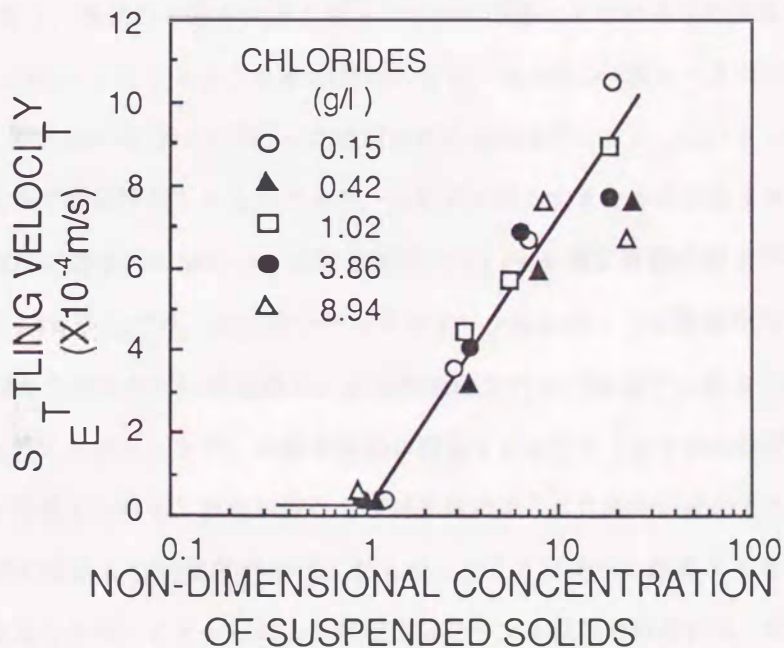


図4-9 沈降速度測定結果

次に、流水中における沈降過程について検討する。実験水路のように領域内での懸濁物質の総量が保たれている場での流水中における浮遊物質の濃度減少は、懸濁粒子(群)の底面への堆積により生じるが、静水中での沈降現象とはその機構が異なる。すなわち、静水中では充分干渉沈降が生じるようなSS濃度であっても、流水中では混合が生じるために界面が形成されにくく、界面を形成しないまま徐々に濃度が減少する。また、フロクの形成においても、流速が大きくなると形成されようとするフロクを破壊する作用が働くために、静水中に比べて粒子(群)の沈降速度が小さい。さらには、粒子(群)が沈降し底面付近に達しても、そこでの乱れによって再び主流部に戻されることがある。このように、流水中での懸濁物質の濃度減少過程は、静水中のものに比べかなり複雑である。

円形回転水路を用い、所定のSS濃度の懸濁液を水路内に入れ、一定の底面剪断応力を作用させる沈降実験を行った。底面剪断応力を0.025 Paから0.4 Paまでの6通りとしたが、このときのSS濃度の経時変化を図4-10に示す。ここでは、懸濁液初期SS濃度は2 g/lとし、試料には筑後川底泥(表4-3の筑後川底泥Ⅱ)を用いた。SS濃度は、いずれの場合も時間の経過につれて減少し、その減少率も時間の経過とともに徐々に小さくなり、最終的にある濃度に達するとほとんど変化しなくなっている。この最終的なSS濃度 C_{∞} は、底面剪断応力が大きいときほど高く、ある初期SS濃度に対してSS濃度が全く減少しないような底面剪断応力が存在することが分かる。これとは逆に、充分時間が経過すれば全ての浮遊物質が沈降する、すなわち $C_{\infty}=0$ となる底面剪断応力も考えられる。そこで、初期SS濃度 C_0 に対する最終的なSS濃度 C_{∞} の比 C_{∞}/C_0 と底面剪断応力との関係を求めると、図4-11のようになる。この図には他の底泥を用いた結果も示す。全ての懸濁物質が沈降するような底面剪断応力は、試料底泥の種類によらずほぼ0.025 Pa程度になり、各試料の最も微細な粒子が水中に浮遊しえないような底面剪断応力であることが分かる。一方、 $C_{\infty}/C_0=1$ となるような底面剪断応力は、カオリン(表4-3)の場合には0.1 Paであるが、筑後川底泥、博多泥の場合は今回行った底面剪断応力の範囲では $C_{\infty}/C_0=1$ とならなかった。これは、後者の試料は現地で直接採取したものであり、比較的粒径の大きなものが含まれているためである。さらに、筑後川底泥及び博多泥の場合は、底面剪断応力0.1 Paを境に直線の傾きが変化している。これは、底面剪断応力0.1 Pa以上では、粘土分からなるカオリン試料のように微細な粒子は沈降しえないために、比較的粒径の大きなものだけが沈降し、底面剪断応力が0.1 Pa以下になると微細な粒子も沈降するようになるためと考えられる。また、水路主流部に浮遊する粒子やフロクの粒度分布の測定結果²⁰⁾より、次のようなことが考えられる。筑後川底泥及び博多泥のように比較的粒径の大きなものを含む試料の場合には、充分時間が経過してSS濃度が変化しなくなったときに水中に浮遊する粒子の最大粒径は、底面剪断応力により決定される。カオリンのように粘土分からなる試料の場合には、充分時間が経過してもフロク径が最大20 μm になるものも存在しているが、水路主流部で形成されたフロクが底面近くに

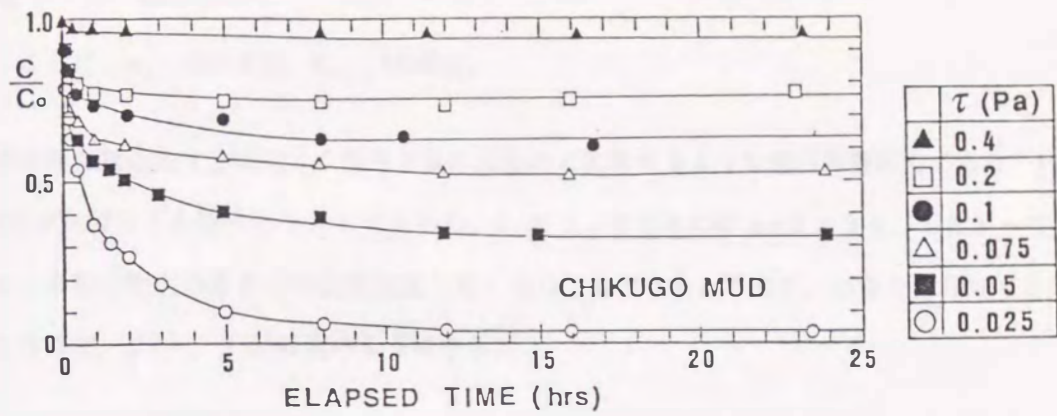


図4-10 SS濃度経時変化

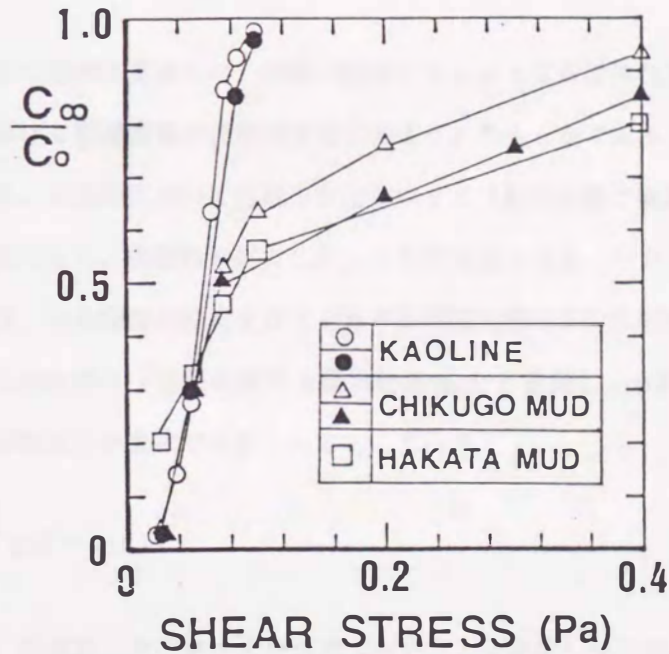


図4-11 底面剪断応力と C_{∞}/C_0 との関係

達し、いわゆる粘性底層で大きな剪断応力を受けフロックが破壊される。したがって、微細な粒子の流水中での濃度減少は、粘性底層での粒子及びフロックの挙動に支配されていると考えられる。

なお、同一の底面剪断応力が作用するときの初期SS濃度の影響は、楠田ら²¹⁾により検討されており、初期SS濃度が 10 g/l 程度までは初期SS濃度にかかわらず C_{∞}/C_0 の値がほぼ一定になることが示されている。それ以上の初期SS濃度では、凝集沈降の影響が現われるために C_{∞}/C_0 の値は小さくなる。

懸濁液が均一な懸濁物質からなる場合の定常な剪断流中での単位面積当たりの懸濁物質量 m の減少速度は、底面剪断応力 τ_b が限界底面剪断応力 τ_{cd} よりも小さいとき ($\tau_b < \tau_{cd}$) に次式で表される^{17), 22)}。

$$\frac{dm}{dt} = - \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) w_s C_{ss} \quad (4.23)$$

ここに、 w_s ；沈降速度、 C_{ss} ；SS濃度。

ここで、限界底面剪断応力 τ_{cd} は全ての懸濁物質が最終的に沈降するような底面剪断応力であり、 $1 - \tau_b / \tau_{cd}$ は懸濁物質が沈降しうる確率 p として考えられ、 $\tau_b \geq \tau_{cd}$ のときには $p = 0$ となる。したがって、 pw_s を流水中における懸濁物質のみかけの沈降速度と考えることもできる。さらに、水深 h を用いると $dm/dt = h dC/dt$ であるので、式(4.23)は次のようになる。

$$\frac{C_{ss}}{C_0} = \exp \left[- \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \frac{w_s}{h} t \right] \quad (4.24)$$

ここに、 C_0 は初期SS濃度である。

このように、流れの中での懸濁物質濃度は、時間の経過にともなって指数関数的に減少する。ここで問題となるのは、流水中における懸濁物質の沈降速度をどのように与えるかである。カオリンのように微細な粘土分からなるときには、主流部において形成されたフロックは粘性底層で破壊されるので、粒径やフロック径による影響は顕著でなく、底面剪断応力に応じた沈降速度となる。一方、筑後川底泥のようにシルト分が含まれるものでは、充分時間が経過するとそれぞれの底面剪断応力に応じた粒径より大きな粒子が沈降する。海田²³⁾は、この粒径を「沈降に関する限界粒径 d_c 」と定義し、水路床付近で粒子やフロックに揚力が働くとして、沈降速度が次式で与えられるとしている。

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho_w}{\mu} g (d^2 - d_c d) \quad (4.25)$$

さらに、この沈降速度を、懸濁粒子やフロックが球形でないことを考慮しつつ式(4.24)に代入し、粒径に関して積分すると、SS濃度の時間的な変化は次式で表される。

$$C(t) = C_\infty + \int_{d_c}^{\infty} C(d,0) \exp \left[- \frac{\alpha \beta}{h} (d^2 - d_c d) t \right] dd, \quad \beta = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho_w}{\mu} g \quad (4.26)$$

ここに、 C_∞ ；沈降しえない粒子群の濃度、 $C(d,0)$ ； $t=0$ における粒径 d の粒子群の濃度、 α ；粒子が球形でないための補正係数。

したがって、底泥の初期粒度分布が与えられると、SS濃度の時間的な変化は解析的に求められる。

いま、底泥の初期粒度分布が Rosin-Rammler 分布に従う場合を考える²³⁾。Rosin-Rammler 分布における通過重量割合 P は、

$$P = 1 - \exp(-b d^n) \quad (4.27)$$

ここで、 b 、 n は定数。

与えられ、実際の底泥の粒度分布より定数 b 、 n が求められる。したがって、各粒径毎の濃度分布は、

$$C(d,0) = C_0 (dP/dd) = C_0 b n d^{n-1} \exp(-b d^n) \quad (4.28)$$

となる。また、 C_∞ は粒径について 0 から d_c まで積分すれば良いので、次式で与えられる。

$$C_\infty = \int_0^{d_c} C_0 b n d^{n-1} \exp(-b d^n) dd = C_0 \{1 - \exp(-b d_c^n)\} \quad (4.28)$$

以上より、流水中での懸濁物質の沈降による懸濁液の濃度の時間変化は、最終的に次のようになる。

$$C(t) = C_\infty + \int_{d_c}^{\infty} C_0 b n d^{n-1} \exp\left[-\left\{b d^n + \frac{\alpha \beta}{H} (d^2 - d_c d) t\right\}\right] dd \quad (4.29)$$

図4-10に示した筑後泥の場合、 $b = 167.3$ 、 $n = 0.86$ となる²³⁾。また、補正係数 α は、粒子形状による影響を示す係数であり、球形粒子の沈降速度に対する実際の粒子の沈降速度の比を示す。この α については、種々の関係式が与えられており²⁴⁾、筑後泥の場合 $\alpha = 0.74$ が得られている²³⁾。これらの係数を与え、式(4.29)により図4-10に示した実験結果について計算を行うと、図4-12のようになる。底面剪断応力が小さいときには実験結果と計算結果には若干の不一致があるものの、概ね計算結果は実験結果を良く再現しているといえる。

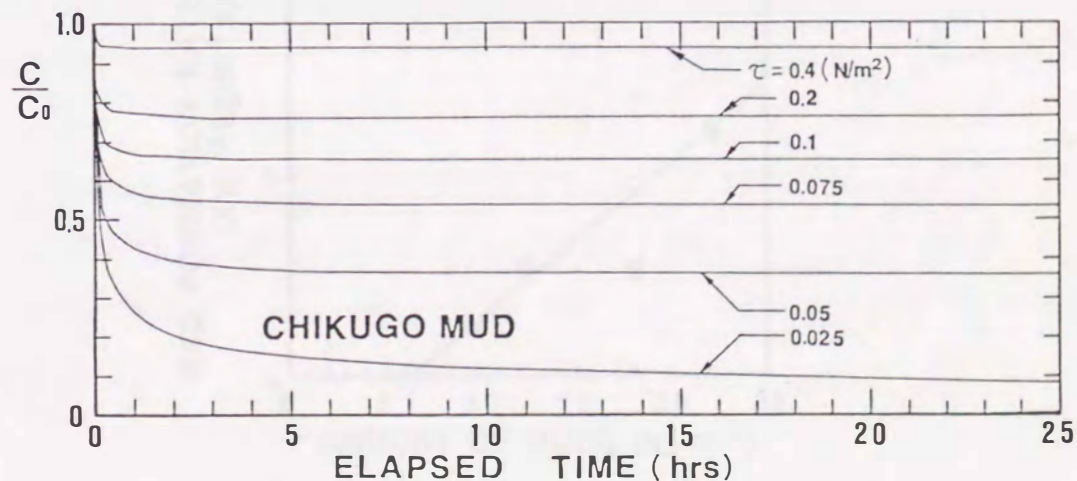


図4-12 SS濃度経時変化の計算結果

4. 2. 4 浮泥・底泥の形成過程と流動特性

河川感潮部では水中の懸濁物質が停潮時に沈降し、河床近くに高濃度層を形成する。この高濃度層は、一般に浮泥層 (fluid mud layer) といわれるが、Kirby²⁵⁾ や Odd²⁶⁾ が示すようにSS濃度が 10 g/l を越え、懸濁物質が非常に多い感潮部では数 m の厚さになることもある。この浮泥層は十分に圧密されていないために流れが作用すると再び上層水中に巻き上げられるが、その一部は次に巻き上げられるまでの間に自重圧密によって底泥化する。ここで、底泥化とは浮泥のSS濃度・密度が増加し、流動性がなくなることである。また、底泥に波浪が連続して作用すると底泥表層の構造が変化し、含水比が増すために、底泥が浮泥化することもある。

以下では、浮泥の底泥化、浮泥・底泥の流動特性、そして浮泥流による物質輸送について検討する。

1) 浮泥の底泥化

Odd²⁶⁾ は、SS濃度 70 g/l の浮泥が $4 \text{ g/m}^2\text{s}$ の速度で底泥化しているが、浮泥の底泥化に関する研究例は少ない。そこで、浮泥の底泥化速度を求めるために、高さ 2 m の沈降筒を用いた沈降圧密実験を行った。実験では、所定のSS濃度の懸濁液 (塩化物イオン濃度は 5 g/l) を 30 分間沈降させ、沈降して形成された底泥を層状に採取して、底泥の含水比の鉛直分布を測定した。現地堆積底泥の含水比鉛直分布の測定結果²⁷⁾ によると、含水比 200~250% を境界に大きく含水比分布が変化しており、ここでは含水比 200% 以下のものが底泥化したものとして、その質量を求め、底泥化速度を算定した。なお、試料には六角川底泥 (巻き上げ実験に用いたものと同じ) を用いた。ここで、実感潮部での沈降現象は停潮時の数10分間しか起こっておらず、実験の沈降時間として30分を採用した。

単位面積当りの懸濁物質量と底泥化速度との関係は、図 4-13 のようになる。浮泥の自重圧密はかな

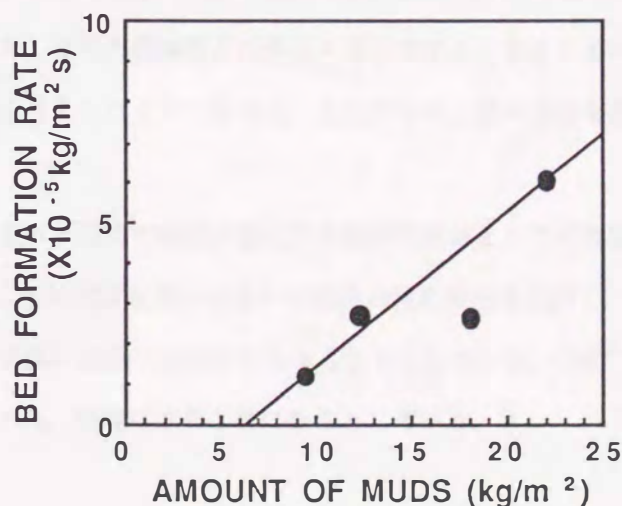


図 4-13 単位面積当りの懸濁物質量と底泥化速度との関係

り早く、速やかに平衡状態に達する。平衡状態に達すると、ある含水比の層より上方には常に一定の質量の浮泥が存在することになる。したがって、単位面積当たりの懸濁物質量 M が 6.4 kg/m^2 より大きいときに底泥化速度 F_b は次式で表される。

$$F_b = 0.00004 (M - 6.4) \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (4.30)$$

2) 浮泥・底泥の流動特性

懸濁液の流動特性に関する理論的研究は、Einstein の流体力学的研究にはじまり、その後多くの理論・半理論式が提案されている²⁸⁾。しかし、懸濁液の流動の力学的機構は、濃度、温度、粒径、粒度分布、粒子形状、粒子密度、有機物含有量、凝集性等の多数の因子によって支配されており、その複雑さのために実験結果の相互比較や体系的整理が困難となっている。

浮泥・底泥の流動特性は、「剪断応力とずり速度の関係を示す流動曲線の特徴」として定義され²⁹⁾、ずり速度は歪み速度、剪断速度ともいわれる。この流動曲線より粘度と降伏剪断応力が得られる。さらに、一定の歪み速度を作用させたとき、剪断時間の経過とともに構造の破壊・再形成が起こり、チクソトロピー軟化やレオペクシー硬化といった時間依存性を示す^{30), 31)}。したがって、試料の前履歴も測定結果に影響を及ぼす。

流動特性の測定には毛細管型粘度計や同心円筒回転型粘度計、水平管路等が使われ、種々の条件のもとで測定が行なわれているが、装置特性への配慮も必要となる。例えば、回転粘度計の場合には実験条件として歪み制御なのか応力制御なのか、あるいは歪み速度が可変の場合には、その時間的な変化をどう設定するかで測定結果が異なる。また、浮泥のような高濃度懸濁液の流動特性を回転粘度計を用いて測定する場合には、容器壁面と試料懸濁液との境界で懸濁粒子濃度が減少し、極端な場合には粒子の存在しない媒体のみの薄層が形成され、壁面と懸濁液との間にスリップが存在することになる。このときには、測定粘度は現実の粘度より低く与えられることになる。したがって、歪み速度を直接測定する方法が有効である³²⁾。

浮泥は、一般に剪断歪みと応力の変化する擬塑性流体としての流動特性を示すといわれている。大坪²⁹⁾は、二重円筒式回転粘度計を用いて種々の底泥の流動特性を検討し、粘度及び降伏値が、同一含水比の場合、液性限界値が高い底泥ほど大きくなることを示している。Odd²⁶⁾は、SS濃度 75 g/l の浮泥に対して、降伏剪断応力 0.1 Pa 、粘度は水の2倍になるとしている。

3) 浮泥流による物質輸送

浮泥流に関する研究は、従来より行われている下層密度流に関するもののほか、貯水池における濁水密度流についての解析³³⁾が行われている。しかし、微細で凝集性を有する懸濁物質からなる浮泥流が、粒子の沈降・巻き上げを伴う場合の解析モデルは確立されておらず、ここでは、2層密度流における解析法³⁴⁾を応用する。

浮泥流を上層の主流層と下層の浮泥層とに分け、層平均化して考える。上層・下層の連続の式及び運動方程式は、Aを各層の流水断面積、Qを層平均流量とし、Bを水面及び浮泥層の幅、Rを径深、hを層厚、 ρ を密度として、上層に関する水理量に添字1、下層に関するものに添字2を付すと、次のように表せる。

$$\frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{\partial Q_1}{\partial x} = E_{ei} B_2 - E_{s1} B_1 + E_{e1} \left(\frac{A_1 + A_2}{R} - \frac{A_2}{R_2} \right) \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{\partial Q_2}{\partial x} = -E_{ei} B_2 + E_{s1} B_1 + E_{e2} \frac{A_2}{R_2} - E_{s2} B_2 \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{gA_1} \frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{1}{gA_1} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_1^2}{A_1} \right) + \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{1}{\rho_1 g A_1} \left\{ B_2 \tau_i + \left(\frac{A_1 + A_2}{R} - \frac{A_2}{R_2} \right) \tau_{b1} \right\} - \frac{1}{\rho_1 g A_1} \left\{ \rho_2 E_{ei} B_2 \frac{Q_2}{A_2} - \rho_1 E_{s1} B_1 \frac{Q_1}{A_1} \right\} = 0 \quad (4.33)$$

$$\frac{1}{gA_2} \frac{\partial Q_2}{\partial t} + \frac{1}{gA_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_2^2}{A_2} \right) + \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \left(\frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{1}{\rho_2 g A_2} \left(\frac{A_2}{R_2} \tau_{b2} - B_2 \tau_i \right) - \frac{1}{\rho_2 g A_2} \left\{ -\rho_2 (E_{ei} + E_{s2}) B_2 \frac{Q_2}{A_2} + \rho_1 E_{s1} B_1 \frac{Q_1}{A_1} \right\} = 0 \quad (4.34)$$

ここに、Eは各層間の連行・巻き上げ・沈降・底泥化による単位面積当たりの水塊としてのフラックス

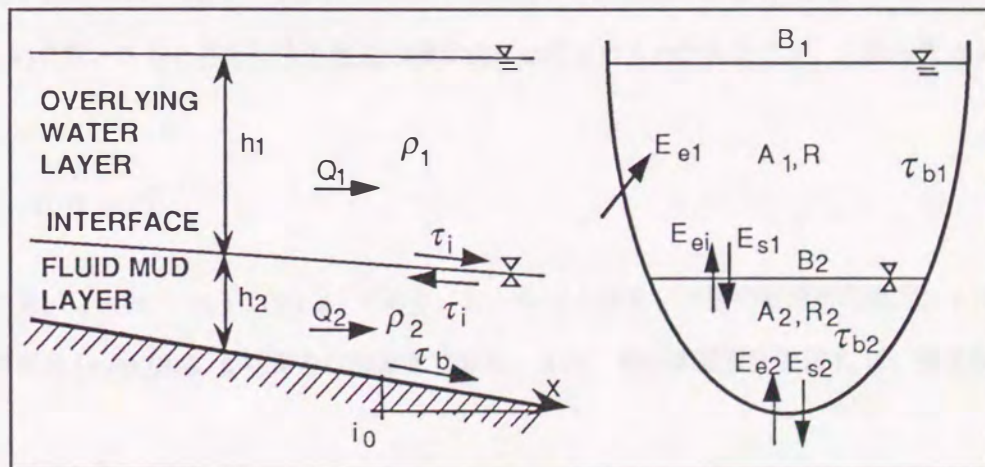


図4-14 浮泥流の模式図

(添字 e は連行あるいは巻き上げを, s は沈降あるいは底泥化を示す), i_0 は河床勾配, τ_i は界面抵抗, τ_b は底面摩擦抵抗である。ここで, 浮泥流の流れは主流に比して遅いので, 流れは定常であり, 空間的加速度が無視できるほど小さく, プシネスク近似が成立するものとし, また, 連行・巻き上げ・沈降及び底泥化による運動量輸送を無視し, τ_i, τ_b が各々次式で表されるとする。

$$\tau_i = \frac{f_i}{2} \rho_1 \left| \frac{Q_1}{A_1} - \frac{Q_2}{A_2} \right| \left(\frac{Q_1}{A_1} - \frac{Q_2}{A_2} \right) \quad (4.35)$$

$$\tau_{b1} = \frac{f_{b1}}{2} \rho_1 \left| \frac{Q_1}{A_1} \right| \frac{Q_1}{A_1} \quad (4.36)$$

$$\tau_{b2} = \frac{f_{b2}}{2} \rho_2 \left| \frac{Q_2}{A_2} \right| \frac{Q_2}{A_2} \quad (4.37)$$

ここに, f_i は界面抵抗係数, f_{b1}, f_{b2} は上層及び下層の底面摩擦損失係数である。さらに, 全層の断面積 $A = A_1 + A_2$, 平均流量 $Q = (Q_1 A_1 + Q_2 A_2) / A$ より

$$\frac{Q_1}{A_1} - \frac{Q_2}{A_2} = \frac{1}{A_1^2} \left(A Q - \frac{A_1^2 + A_2^2}{A_2} Q_2 \right) \quad (4.38)$$

となるので, 上式及び式(4.35), (4.36), (4.37)を式(4.34)に代入すると,

$$\left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \right) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 + \frac{B_2 f_i}{2g A_1^4 A_2} \left| A Q - \frac{A_1^2 + A_2^2}{A_2} Q_2 \right| \left(A Q - \frac{A_1^2 + A_2^2}{A_2} Q_2 \right) + \frac{f_{b2}}{2g A_2^2 R_2} |Q_2| Q_2 = 0 \quad (4.39)$$

となる。ただし, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ である。したがって, 主流部の計算によって A 及び Q が与えられると Q_2 が求められる。以下では, 式(4.39)で示された方程式より浮泥流の流量 Q_2 を求める方法を述べる。

式(4.35)で用いられた界面抵抗係数 f_i の表示式には種々のものがある³⁵⁾が, 古本ら³⁶⁾は次式を示している。

$$f_i = 0.07 \Psi^{-1/3} \quad (4.40)$$

ただし, $\Psi = R_e F_d^2 = (u_1 - u_2)^3 / (v \varepsilon g)$ であり, u_1, u_2 は上層及び下層の断面平均流速, v は動粘性係数, ε は相対密度 ($= \Delta \rho / \rho_1$), g は重力の加速度である。また, 底面摩擦損失係数 f_b は, 粗度係数 n を用いて

$$f_b = \frac{2g n^2}{h_2^{1/3}} \quad (4.41)$$

で示される。これらの係数を式(4.39)に代入すると、次式が得られる。

$$X|Q_2|Q_2 + Y_1(Q_2 - Y_2Q) + Z = 0 \quad (4.42)$$

$$\text{ただし, } X = \frac{n^2}{h_2^{1/3} A_2^2 R_2}, \quad Y_1 = \frac{0.035 (v \varepsilon g)^{1/3} B_2 (A_1^2 + A_2^2)}{g A_1^2 A_2^2}, \quad Y_2 = \frac{A_2 A}{A_1^2 + A_2^2}$$

$$Z = \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_2}\right) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0$$

したがって、 $Q_2 \geq 0$ のとき、 $XQ_2^2 + Y_1Q_2 - (Y_1Y_2Q - Z) = 0$ より

$$Q_2 = \frac{-Y_1 + \sqrt{Y_1^2 + 4X(Y_1Y_2Q - Z)}}{2X} \quad (4.43)$$

$Q_2 < 0$ のとき、 $XQ_2^2 - Y_1Q_2 + (Y_1Y_2Q - Z) = 0$ より

$$Q_2 = \frac{Y_1 - \sqrt{Y_1^2 - 4X(Y_1Y_2Q - Z)}}{2X} \quad (4.44)$$

となる。なお、式(4.43)及び(4.44)では、本来2個の解が得られるが、それぞれ $Q_2 \geq 0$ 及び $Q_2 < 0$ を満足する解のみを選択する。

河床材料が粘着性を有する微細な粒子からなる場合の粗度係数 n に関する十分な研究成果は示されていないが、その値は一般の固定床の場合に比べ大きくなることが考えられる。以上のことから、浮泥流による物質輸送量の算定は、主流部の計算によって A 及び Q が与えられ、浮泥の含水比を所定の値に設定し、浮泥量が与えられると断面データを用いて A_1, A_2 が算定でき、結局 Q_2 が求められる。

なお、ここで述べた浮泥流による物質輸送についての解析方法は、本章4.4で扱う河川感潮部での懸濁物質輸送現象のシミュレーションにおいて用い、浮泥流による効果について検討する。

4. 3 河川感潮部における物質輸送機構

4. 3. 1 はじめに

河川感潮部における懸濁物質の河道方向への輸送³⁷⁾は、潮汐作用や残差流、懸濁粒子の流送特性等に支配されており、混合形態や潮汐作用の規模によってその機構が異なる。また、高濃度の懸濁物質を含む水塊 (Turbidity maxima) が潮汐に応じて上下流方向に移動することが知られているが、その形成過程や維持機構について十分に明らかにされていない。Festaら³⁸⁾は、鉛直二次元モデルを用いて緩混合型の感潮部での高濃度水塊の形成過程について検討し、海域あるいは河川からの懸濁物質の流入量によって高濃度水塊の大きさが変化すること、懸濁粒子の沈降速度により高濃度が出現する位置が変化することなどを明らかにしている。Fisher³⁹⁾や上嶋ら⁴⁰⁾は一潮汐間の横断面内での流れや物質濃度の詳細な調査を行い、重力循環流や流れと物質濃度変化との位相差による輸送、シア効果による輸送量などを算定している。しかし、感潮部では潮汐作用の大きさが周期的に変化しており、一潮汐間での輸送量を算定し、それをもとに長期的な輸送量を求めることは、輸送量そのものが大潮～小潮といった潮位の周期変動に応じて変化するために不正確なものとなる。一方、Unclesら⁴¹⁾は現地観測結果に基づいた大潮～小潮周期での検討を行い、巻き上げ量の変化が高濃度水塊の出現に影響を与えていることを見いだしている。

ここでは、まず、一般的な輸送形式についてまとめる。続いて、一潮汐間において横断方向に5断面に分割して行った調査結果をもとに、シア効果や断面積変化が物質輸送や分散に及ぼす影響を検討する。従来の感潮部における物質輸送機構に関する研究は、塩分について取り扱ったものがほとんどであったが、対象とする六角川感潮部ではSS濃度が高いので懸濁物質の輸送特性について検討する。なお、大潮～小潮周期における物質輸送機構の検討は、流速等の連続観測が困難であったために、次節で述べる半月周期での数値計算結果をもとに検討することとし、次節に記す。

4. 3. 2 感潮部における物質輸送

河川感潮部における河道方向への物質輸送は、様々な要因により生じている。ここでの物質輸送とは、感潮部のある断面において一定期間中に物質が上流あるいは下流のどちらの方向へ輸送されたかを意味している。したがって、対象とする期間の大きさにより支配的な輸送形式は異なる。すなわち、年単位のような比較的長期間の場合には、出水回数の多寡によっても輸送量が変化する。ここでは、主に潮汐作用による物質輸送への影響を検討することとし、一潮汐間及び大潮～小潮周期における物質輸送を検討する。それらの期間における一般的な輸送形式³⁷⁾をまとめると表4-4のようになる。

表4-4 感潮部における物質の輸送形式

輸送形式		主な要因・特徴
潮汐作用	①潮汐波	干潮時刻が上流ほど遅れることにより潮流の非対称性が生じるため 上げ潮・下げ潮の最大流速が出現する時刻が両者とも満潮時の方へずれる
	②ストークス・ドリフト	上げ潮と下げ潮で同じ流速のとき、流水断面積は上げ潮の方が大
	③タイダル・トラッピング	上げ潮時の大きな流速
	④タイダル・ポンピング	流水断面積、流速、物質濃度変化の位相差
残差流	⑤地形の影響 重力循環流	高水位のときは、低水位に比べ同じ水位変化でも流量が大 一潮汐で平均したときの流れ 0となるところにSS高濃度塊が形成される 大潮～小潮周期で変化する
流送特性	巻き上げと沈降	流れと懸濁物質の相互作用 流れの変化に対して懸濁物質濃度の変化が遅れる フロックの形成・破壊による浮遊物質の粒径の変化

物質輸送機構は、流水断面積、流速、物質濃度の観測値を整理することにより検討される。Fischer³⁹⁾やUnclesら⁴¹⁾は、一潮汐間における断面内の各点での観測値を用い、以下のように整理している。まず、断面面積 A 、流速 u 、濃度 c を次のように分割する。

$$A = A_0 + A_1 \quad (4.45)$$

$$u = u_0 + u_1 + u_2 = U + u_2 \quad (4.46)$$

$$c = c_0 + c_1 + c_2 = C + c_2 \quad (4.47)$$

ただし、添字は、0が断面平均値の一潮時平均を、1が断面平均値の一潮時平均からの偏差、2が断面平均値からの偏差を示し、 U 、 C は流速及び濃度の断面平均値である。また、流量についても同様に、

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad (4.48)$$

とでき、さらに、断面面積及び断面平均流速を用いると、

$$Q = A U = (A_0 + A_1)(u_0 + u_1) = A_0 u_0 + A_0 u_1 + A_1 u_0 + A_1 u_1 \quad (4.49)$$

となる。したがって、

$$Q_0 = A_0 u_0 + \langle A_1 u_1 \rangle, \quad Q_1 = Q - Q_0 = A_0 u_1 + A_1 u_0 + A_1 u_1 - \langle A_1 u_1 \rangle \quad (4.50)$$

ただし、ここで $\langle \rangle$ は一潮時平均を示す。流速について次のような流れを算定できる。

$$U_E = u_0 \quad (4.51)$$

$$U_S = \langle A_1 u_1 \rangle / A_0 \quad (4.52)$$

$$U_L = Q_0 / A_0 = u_0 + \langle A_1 u_1 \rangle / A_0 = U_E + U_S \quad (4.53)$$

ここで、 U_E 、 U_S 、 U_L はそれぞれオイラー流、ストークス流、ラグランジュ流といわれる。また、輸送量 F は、

$$\begin{aligned} F &= \int_A u c \, dA = U C A + \int_A u_2 c_2 \, dA \\ &= (Q_0 + Q_1) (c_0 + c_1) + \int_A u_2 c_2 \, dA \\ &= Q_0 c_0 + Q_0 c_1 + Q_1 c_0 + Q_1 c_1 + \int_A u_2 c_2 \, dA \end{aligned} \quad (4.54)$$

となる。上式の右辺第4項は、 $Q_1 c_1 = A_0 u_1 c_1 + A_1 u_0 c_1 + (A_1 u_1 - \langle A_1 u_1 \rangle) c_1$ である。したがって、式 (4.54) は、

$$F = \underbrace{Q_0 c_0}_{T_1} + \underbrace{Q_0 c_1}_{T_2} + \underbrace{Q_1 c_0}_{T_3} + \underbrace{A_0 u_1 c_1}_{T_4} + \underbrace{A_1 u_0 c_1}_{T_5} + \underbrace{(A_1 u_1 - \langle A_1 u_1 \rangle) c_1}_{T_6} + \underbrace{\int_A u_2 c_2 \, dA}_{T_7} \quad (4.54')$$

となる。この輸送量の一潮汐間の時間平均をとると次のようになる。

$$\langle F \rangle = \underbrace{Q_0 c_0}_{①} + \underbrace{A_0 \langle u_1 c_1 \rangle}_{②} + \underbrace{\langle A_1 c_1 \rangle u_0}_{③} + \underbrace{\langle A_1 u_1 c_1 \rangle}_{④} + \underbrace{\left\langle \int_A u_2 c_2 \, dA \right\rangle}_{⑤} \quad (4.55)$$

この式の右辺の各項については、第1項が固有流によるラグランジュ輸送、第2項が流速と濃度の位相差によるタイダル・ポンピング輸送、第3・4項が断面積変化による輸送、第5項がシア効果による輸送である。さらに、シア効果による輸送は、次式のように鉛直シアと水平シアとに分けて表すことができる(次式の右辺第1項が鉛直シア、第2項が水平シア)。

$$\left\langle \int_A u_2 c_2 \, dA \right\rangle = \left\langle \int_A \left(u_2 c_2 - \frac{1}{h} \int_A u_2 c_2 \, dh \right) dA \right\rangle + \left\langle \int_A \left(\frac{1}{h} \int_A u_2 c_2 \, dh \right) dA \right\rangle \quad (4.56)$$

ただし、 h は水深である。

Unclesら^{41), 42), 43)} は、大潮～小潮周期において実施した現地観測結果をもとに、流れや懸濁物質輸送、SS高濃度塊の形成機構について検討し、次のような結果を得ている。流れでは、オイラー流が常に下流

向きで、ストークス流は上流向きとなっており、それらの大きさが大潮～小潮周期で変化するため、それらの和としてのラグランジュ流は小潮から大潮にかけては上流へ、大潮から小潮にかけては下流へ向かっている。また、SS高濃度塊の形成では、懸濁物質の巻き上げ量の大潮～小潮周期における大きな変化が寄与しており、大潮時にはタイダル・ポンピングのよる輸送がシア効果による輸送を大きく上回り、感潮部上流域では上流向きに、下流域では下流向きになること、小潮時には懸濁物質は水塊と同じ挙動を示すこと、鉛直シアによる影響は懸濁物質の場合には小さく、塩分では大きいことを明らかにしている。

4. 3. 3 一潮汐間における物質輸送

六角川六角橋地点において横断方向に5断面に分割して行った調査結果をもとに、一潮汐間における物質輸送機構について検討する。調査は、1985年7月18～19日(第1回調査)と同年12月24日(第2回調査)に行ったが、第1回調査では干潮から次の干潮まで、第2回調査では満潮から次の満潮までとした。なお、調査開始時と終了時の水位が一致しなかったため、以後の計算では水位が等しくなった18:30～6:00(第1回調査)、9:00～20:30(第2回調査)をそれぞれ一潮時として解析を行った。

断面内の流速、塩化物イオン濃度、SS濃度の各分布では、3.4節図3-18に示したとおり、流速分布での水平シア、SS濃度分布での鉛直シアが見られた。なお、密度流的な現象を確認するために、水塊の挙動を密度換算して把握することにする。塩化物イオン、浮遊物質が混合した懸濁液の密度は次のようにして求めた。まず、塩分 S (‰)と塩化物イオン濃度 C_{Cl} (mg/l)の関係は、試料水の密度を ρ_w (kg/m³)とすると、次式で表される。

$$S = 1.80655 \times C_{Cl} / \rho_w \quad (4.57)$$

塩分混合液の密度は、 $S = 35$ (‰)で $\rho_w = 1,025$ (kg/m³)とすると、 $\rho_w = 1000 + (1025 - 1000) S / 35$ となり、さらに、

$$\rho_w = 1000 + 1.29 C_{Cl} / \rho_w \quad (4.58)$$

となる。したがって、 C_{Cl} が与えられると ρ_w が求められる。また、懸濁物質が混合した懸濁液の密度 ρ_M (kg/m³)は、SS濃度を C_{SS} (mg/l)とし、SS粒子の密度を $2,600$ kg/m³とすると、

$$\rho_M = \rho_w (1000 - 0.384 \times 10^{-3} C_{SS}) + C_{SS} \times 10^{-3} \quad (4.59)$$

となる。なお、海水の密度は水温によっても変化するが、ここでは調査時に測定された水温の変化が小さかったため、水温の影響はないものとする。密度に関する各輸送項の算定は、各式の濃度を密度として求

めた。

1) 物質輸送の特性

図4-15に各時刻の測定値の断面内総和として求めた流量、塩化物イオン、SSの輸送フラックスの時間変化を示す。ここでは、正值が下流方向への、負値が上流方向へのフラックスを示す。塩化物イオンフラックスは、満潮時の前後で大きくなっている。上げ潮時のSSフラックスの極値は、流量の極値が出現する時刻とほぼ一致しているが、下げ潮時にはSSフラックスの極値は、流量のものより少し遅れて出現している。

次に、断面積、流速、塩化物イオン濃度、SS濃度、そして密度の断面平均値の時間偏差の変化を図4-16に示す。なお、各項目の断面時間平均値は表4-5に示すとおりである。これらの図より、次のようなことがいえる。流速の一潮時平均値はほぼ零となっているが、偏差が零となるのは断面積が極値をとる時刻に対して遅れる。密度と塩化物イオン、SS濃度との関係は、第1回調査時ではSS濃度が低いため密度と塩化物イオン濃度がほぼ同じ変化をしているが、第2回調査時にはSS濃度が高く、密度はSS濃度の影響も受けている。SS濃度は、流速が極値をとるときに高くなる傾向があり、底泥の巻き上げが生じていることが分かる。

表4-5 断面積、流速、塩化物イオン濃度、SS濃度、密度の断面時間平均値

Date	July 18-19, 1985	Dec. 24, 1985
Cross-sectional area (A_0 ; m^2)	226.2	162.6
Current velocity (u_0 ; m/s)	0.094	0.041
Chlorides ($c_0(Cl)$; g/l)	0.477	1.408
Concentration of SS ($c_0(SS)$; g/l)	0.400	1.948
Density (ρ_0 ; kg/m^3)	1,001	1,003

式(4.54')における各項の時間変化を図4-17, 18に示す。第1回調査の塩化物イオン濃度では、 T_3 , T_4 , T_6 の変化が大きい。一方、SS濃度では T_3 , T_4 は大きい、 T_6 は小さい。 T_3 は平均濃度が流量変動によって輸送される項であり、塩化物イオンとSSとで大きな違いはない。 T_6 は各断面平均値の位相差によって生じる輸送であり、SSの方が小さいことが分かる。これら各項の総和は、図4-15に示した輸送フラックスと一致する。図4-15における塩化物イオン、SSの輸送フラックスの違いは、 T_4 , T_6 によるところが大きい。密度では断面平均値の一潮時平均に対する一潮時平均からの偏差の変化が小さいため、 T_3 が他の項に比べ3~4桁大きい。その他の項の変化は、SS濃度が低くその影響が小さかったため、塩化物イオンのものとはほぼ等しくなっている。

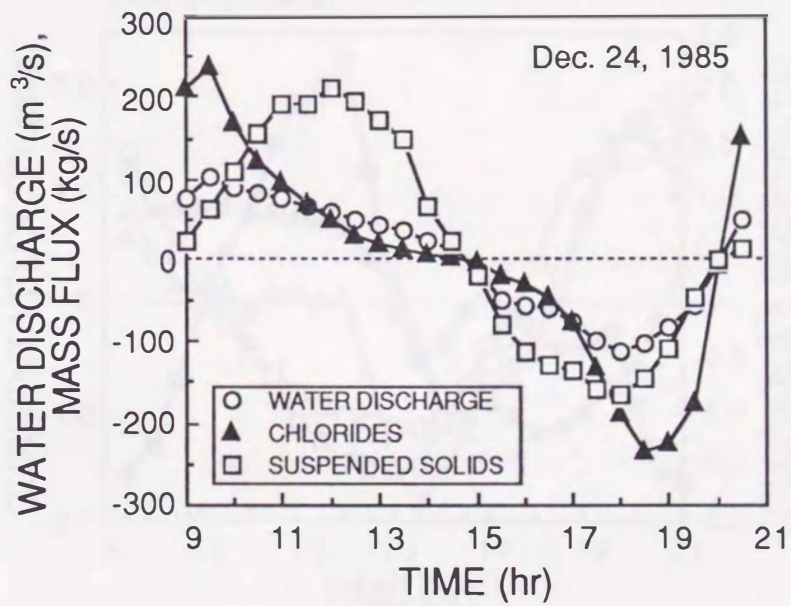
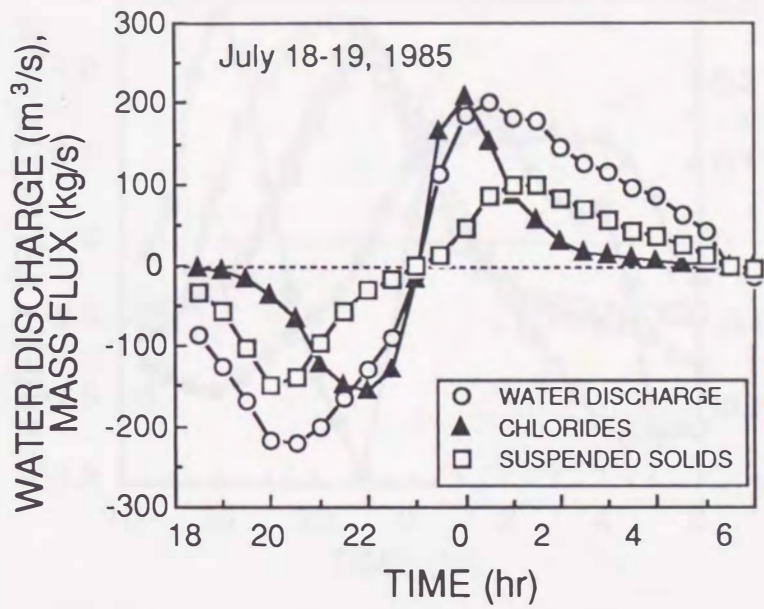


図4-15 流量，塩化物イオン，SSの輸送フラックスの経時変化
(上；1985年7月18～19日，下；1985年12月24日)

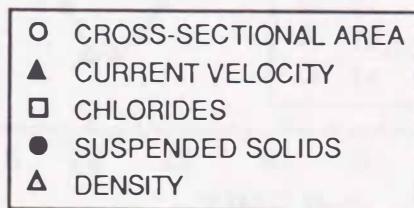
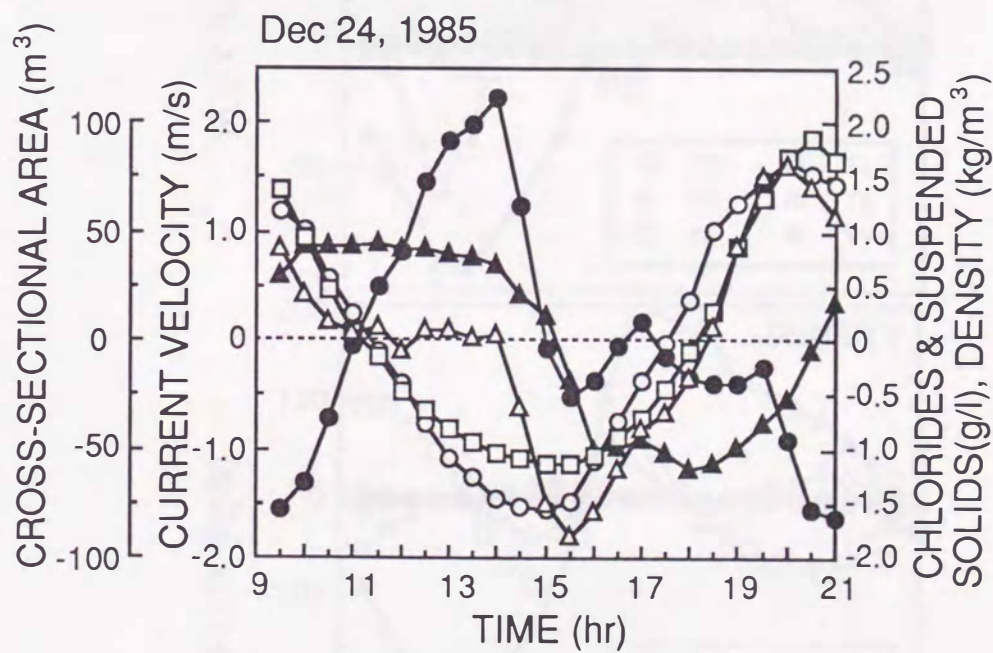
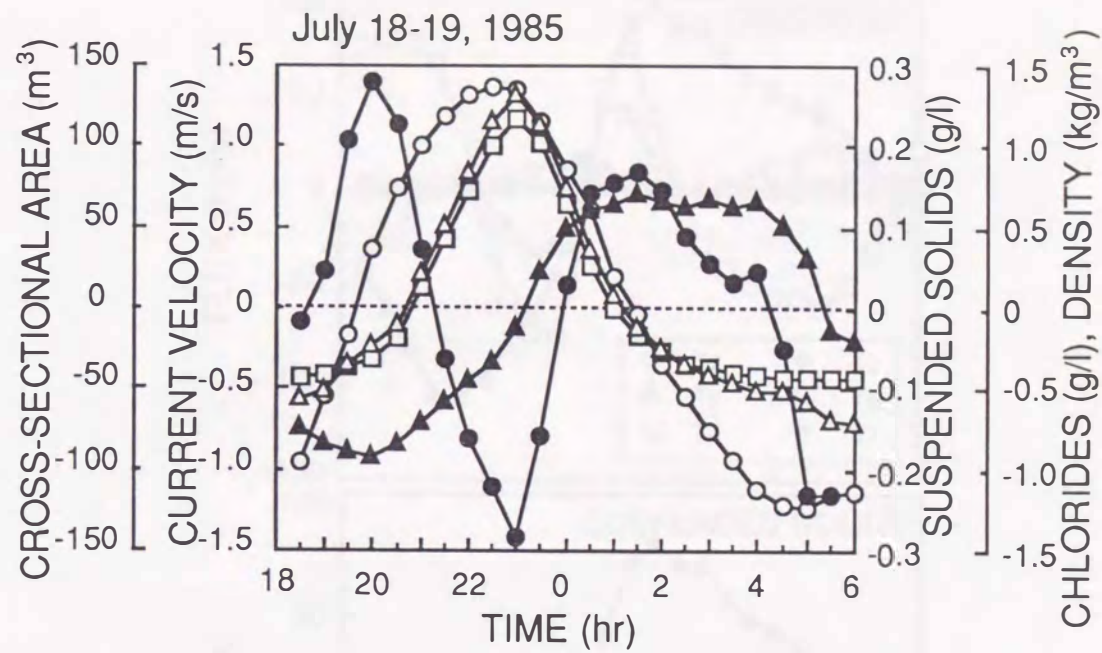


図4-16 断面平均値の時間偏差
(上; 1985年7月18~19日, 下; 1985年12月24日)

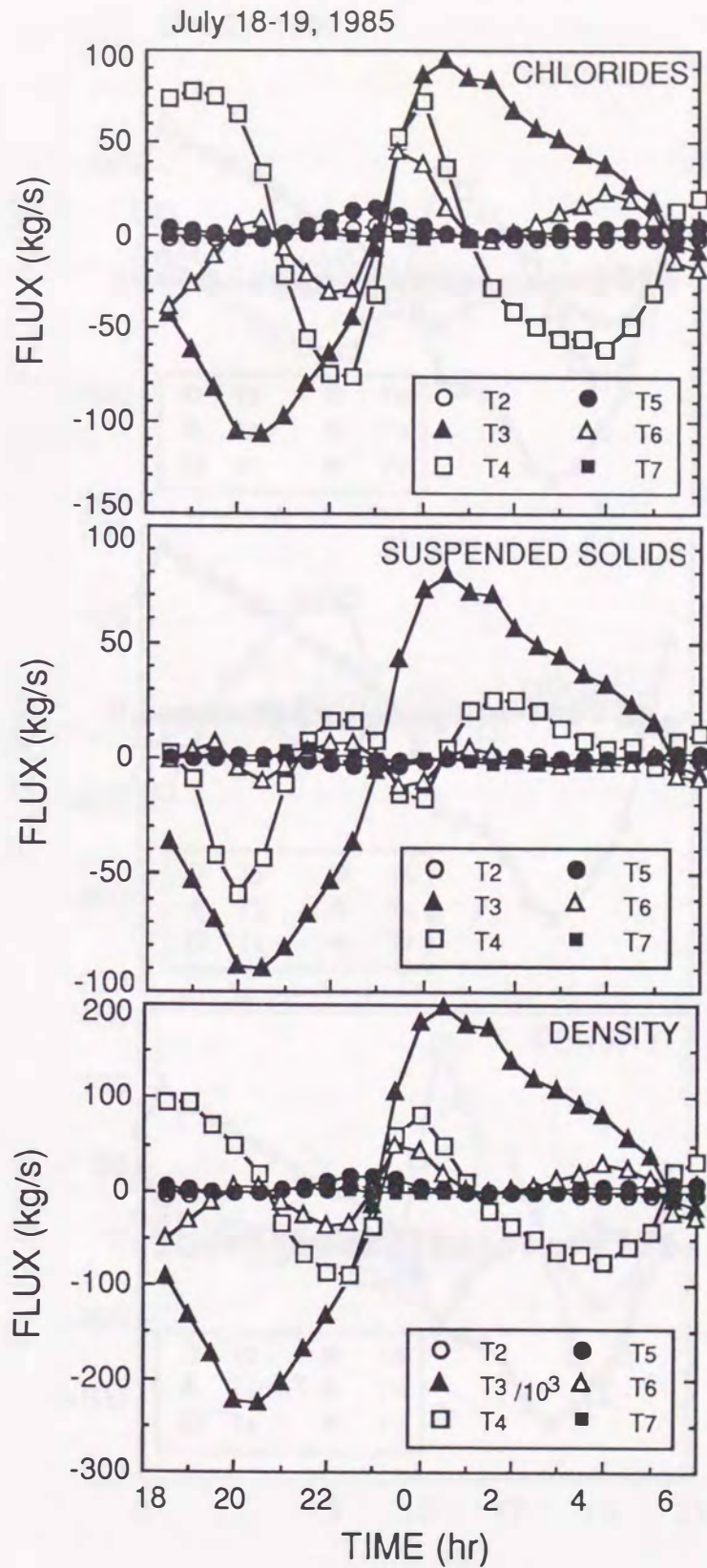


図4-17 各輸送項の経時変化
 (上; 塩化物イオン, 中; S S, 下; 密度, 1985年7月18~19日)

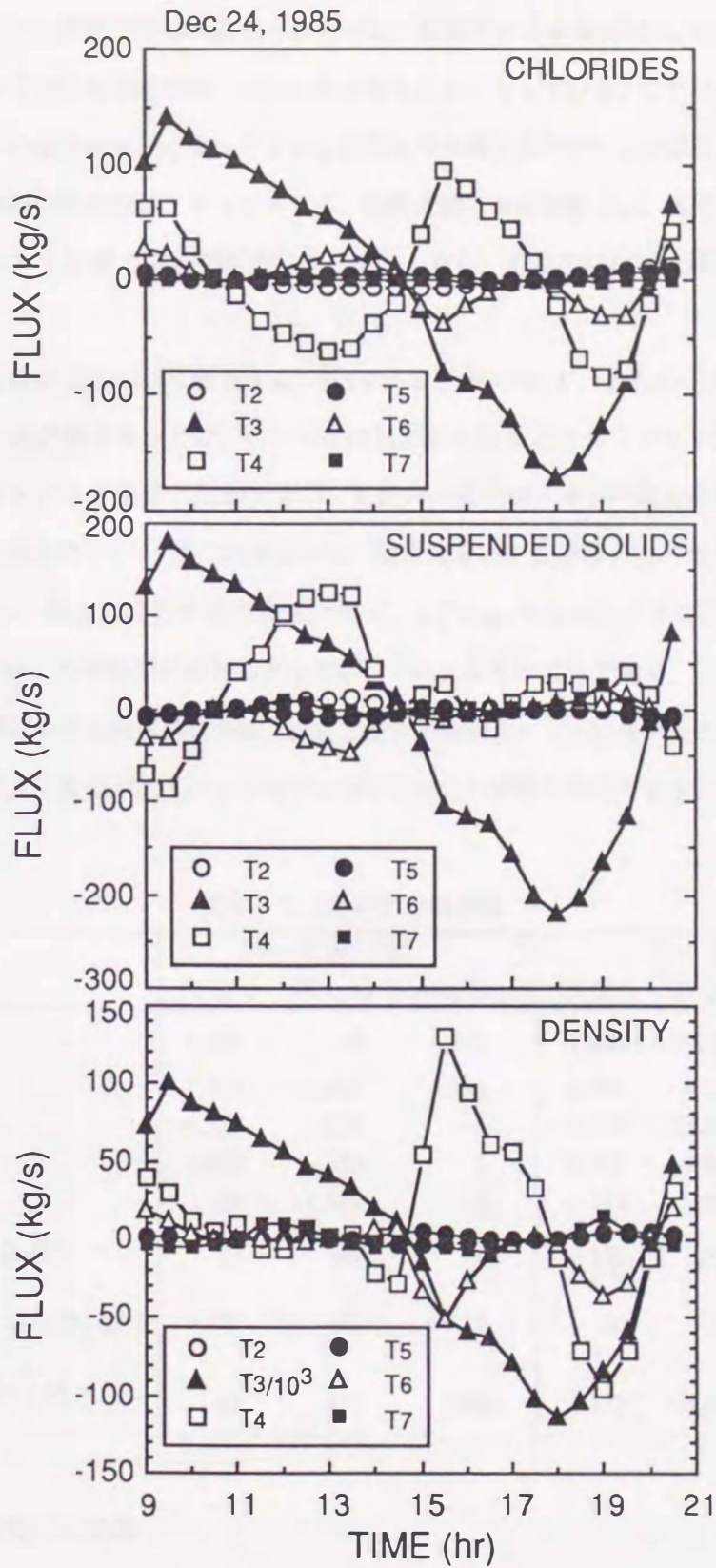


図4-18 各輸送項の経時変化
(上; 塩化物イオン, 中; S S, 下; 密度, 1985年12月24日)

第2回調査では、塩化物イオンは第1回調査のものと同様の傾向を示している。SS濃度では、下げ潮の後半(12:00~13:30)にSS濃度がかなり高かったために、位相差による輸送項 T_4 が大きくなっている。また、密度では、 T_4 が干潮反転後(15:00~16:00)にかなり大きくなっている。これは、干潮のために密度が低くなり一潮時からの偏差が大きくなったことと反転後の流速が大きいことが重なったためである。

以上のように、各時刻の物質輸送フラックスでは、流量変動による影響(T_3)、流速と濃度の断面平均値の時間変動の位相差による影響(T_4)が相対的に大きい。しかし、 T_3 は次に示す一潮汐間の輸送量では零となる。

次に、一潮時の平均輸送量について考察する。式(4.55)及び式(4.56)の各項について得られた値を表4-6に示す。塩化物イオンでは、河川固有流量による効果(①)やトラップ効果による上流への輸送(②)、断面積の変化による効果(③)が大きい。断面内の塩化物イオンの濃度差は小さかったので、シア効果による輸送量は小さい。一方、SS濃度では、固有流量による影響(①)の他に断面積変化による効果(③、④)が大きい。第2回調査ではSS濃度が高く、 c_1 と u_1 の位相差による影響(②)やシア効果(⑤)による影響も大きい。シア効果のほとんどは水平シアによるもの(⑦)である。

このように、感潮部における物質輸送では、流速と濃度の位相差による効果が大きいほかに、本感潮部のように水深に比べて水位変動が大きいところでは断面積変化の影響を無視できないことが分かる。

表4-6 時間平均輸送量

Date	July 18-19, 1985			Dec. 24, 1985		
	Cl (g/s)	SS (g/s)	Density (kg/s)	Cl (g/s)	SS (g/s)	Density (kg/s)
<F>	1,705	13	4,170	1,986	19,262	2,075
① $Q_0 c_0$	1,988	1,667	4,171	2,903	4,014	2,067
② $A_0 \langle u_1 c_1 \rangle$	-4,329	-126	-6	-2,788	23,415	11
③ $\langle A_1 c_1 \rangle u_0$	4,053	-338	5	2,202	-1,807	2
④ $\langle A_1 u_1 c_1 \rangle$	44	-1,539	-1	-173	-9,855	-6
⑤ $\langle \int_A u_2 c_2 dA \rangle = \text{⑥} + \text{⑦}$	-52	349	0	-159	3,764	2
⑥ $\langle \int_A \left\{ u_2 c_2 - \frac{1}{h} \int_A u_2 c_2 dh \right\} dA \rangle$	-112	-62	-0.18	-26	-273	-0.20
⑦ $\langle \int_A \left\{ \frac{1}{h} \int_A u_2 c_2 dh \right\} dA \rangle$	60	411	0.33	-113	4,037	2.31

2) 成層形態と物質輸送の関係

河川感潮部における塩分侵入の形態は、弱混合、緩混合、強混合の3つの型に分類される。Fisher³⁹⁾は、次式で表される Ri_E (Estuarine Richardson 数), F (Froude 数) を提案し、感潮部における成層の程度が Ri_E に、鉛直循環の強さが F に依存するとしている。

$$Ri_E = \Delta\rho g Q_f / \rho b U^3 \quad (4.60)$$

$$F = Q_f / b d (g d \Delta\rho / \rho)^{1/2} \quad (4.61)$$

ここに、 $\Delta\rho$ ：海水と河川水の密度差、 Q_f ：河川固有流量、 b ：河幅、 U ：潮流の自乗平均流速、 d ：水深、である。

本感潮部において得られた Ri_E 、 F は表4-7に示すとおりである。Mersey Estuary と吉井川での値も示す。ここでは、 $\Delta\rho$ は観測された密度の最大値と最小値の差としている。また、塩化物イオンの表層と底層の濃度差 δS を求め、 $\delta S/S$ と Ri_E の関係をプロットしたのが図4-19である。この図では、 Ri_E が小さいほど鉛直混合が大きく、上下層の濃度差が小さくなることを示しているが、 Ri_E に対する $\delta S/S$ の値では第2回調査のものに比べ第1回調査の方が大きい。これは、第1回調査の前日に降雨があり、流域規模の小さな本感潮部では、水塊の中で準定常的な濃度分布にあった塩分分布が一旦壊された後、流れは速やかに元に戻るが、塩分分布が元に戻るにはこれ以上の時間を必要とし、この時間差によって Ri_E に対して大きな $\delta S/S$ になったものと思われる。一方、鉛直循環の強さを示す F は、第1回調査(大潮)の方が第2回調査(中潮)より大きい。これは、表4-7の第1回調査の鉛直シアによる項(⑥)が第2回調査のものより大きいことから分かる。これより、鉛直循環による輸送は F に依存し、大潮ほど大きいことがいえる。

表4-7 六角川感潮部における諸値

Estuary	Rokkaku River		Mersey Estuary ³⁹⁾	Yoshii River ⁴⁰⁾
	July 18-19,1985	Dec. 24,1985		
Maximum depth (D ; m)	8.25	6.49	19.5	-
Averaged depth (D ₀ ; m)	3.69	3.04	-	2.6
Tidal range (H ; m)	4.10	2.89	6	1.6
Width (B ; m)	61.3	53.4	1,300	550
Averaged cross-sectional area (A ₀ ; m ²)	226.2	162.6	19,000	1,610
Fresh-water discharge (Q _f ; m ³ /s)	4.17	2.06	80	40
Fresh-water discharge velocity (U _f ; m/s)	0.0184	0.0127	0.0042	0.025
R.m.s. tidal velocity (U ; m/s)	0.62	0.39	0.8	0.035
Vertical salinity variation ($\delta S/S$)	0.359	0.106	0.042	-
Estuarine Richardson number (Ri _E)	0.00576	0.0217	0.03	-
Froude number (F)	0.0682	0.0398	0.0011	-

次に、六角川感潮部のエスチュアリーとしての位置づけを行うために、Hansen-Rattray⁴⁴⁾の成層循環図に本感潮部で得られた結果をプロットした(図4-20)。この図からも、本感潮部が強混合型となっていることが分かる。

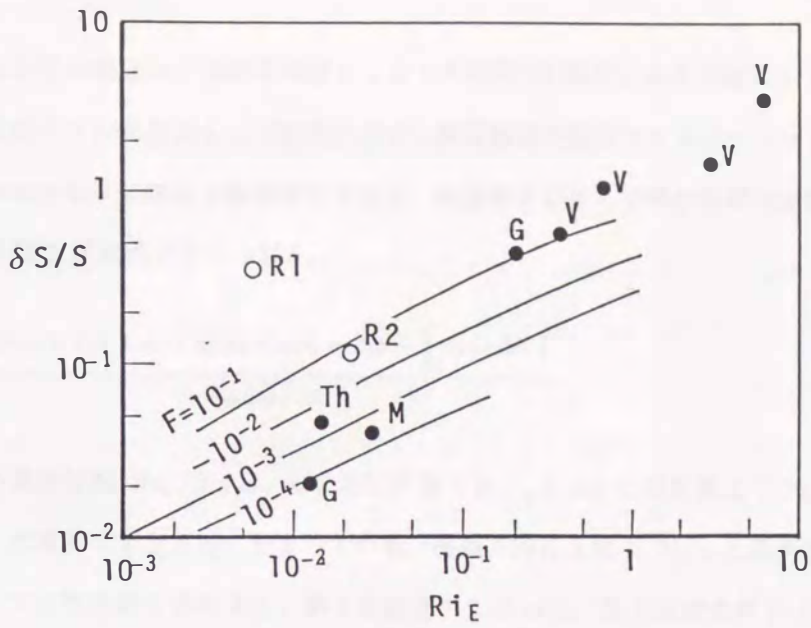


図4-19 Ri_E と $\delta S/S$ の関係

R1: 六角川第1回調査, R2: 六角川第2回調査, G: Gironde Estuary,
Th: Thames Estuary, M: Mersey Estuary, V: Vellar Estuary

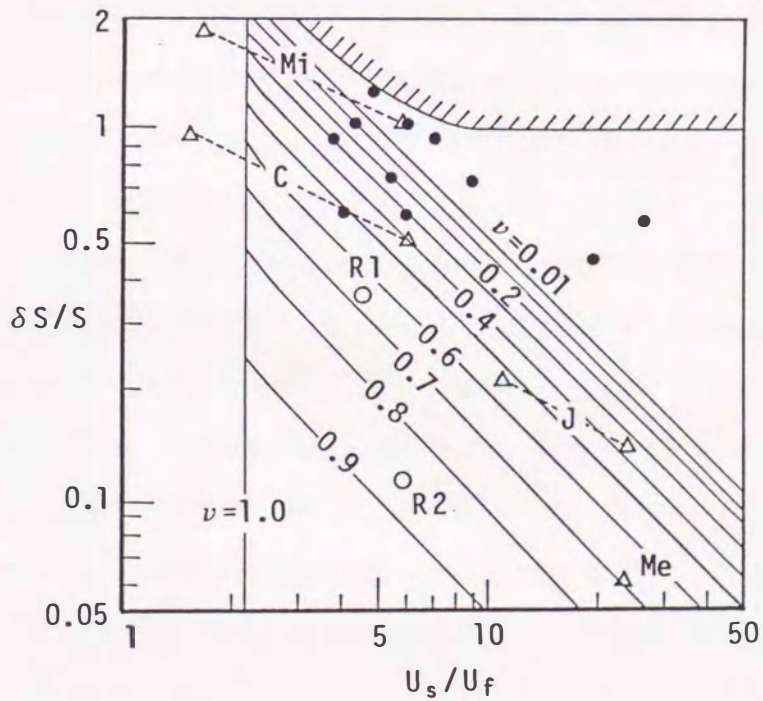


図4-20 U_s/U_f と $\delta S/S$ の関係

R1: 六角川第1回調査, R2: 六角川第2回調査, Mi: Mississippi River,
C: Columbia River, J: James River, M: Mersey Estuary, .: 吉井川

3) 分散係数

感潮部における物質の輸送は、河川固有流によるもの(移流)と潮汐による分散によって生じている。分散係数は、感潮部のシアの程度によって変化するが、物質輸送の数値シミュレーションを行う際に必要となる。本感潮部は塩分分布に関して強混合型であり、物質輸送に対して潮汐作用の影響が卓越する。したがって、縦分散係数 E は次式で与えられる。

$$E = \frac{-[A_0 \langle u_1 c_1 \rangle + \langle A_1 u_1 \rangle c_0 + \langle A_1 u_1 c_1 \rangle + \int_A u_2 c_2 dA]}{A_0 \partial c_0 / \partial x} \quad (4.62)$$

ここで、縦方向の濃度勾配 $\partial c_0 / \partial x$ は、 x を累加水量 $V (= \int_x A dx)$ に置き換えて $\partial c_0 / \partial x = A \partial c_0 / \partial V$ として考えると、水塊内で準定常的に定まっている。河道方向に5地点で行った調査結果より得られた $A \partial c_0 / \partial V$ を用いて分散係数を求めると、第1回調査が $2.45 \text{ m}^2/\text{s}$ 、第2回調査が $11.0 \text{ m}^2/\text{s}$ となった。この値は、上嶋らが吉井川において求めた値より1桁小さい。これは、強混合型の感潮部であるために密度勾配の混合現象に及ぼす影響が小さくなったものと考えられる。

4. 4 懸濁物質輸送現象のモデル化とシミュレーション

4. 4. 1 はじめに

河川感潮部での流れや物質濃度変動のモデル化や計算方法には種々のものがある⁴⁵⁾が、そのモデルの選択にあたっては、実際の対象水域における水理的・物理的な特徴を取り入れ、現象解析の目的に応じてモデルの選択がなされなければならない。従来より行われてきた河川感潮部での物質濃度変動に関する数値計算は数潮汐間のものにとどまっている。これは、物質収支式いわゆる移流分散方程式を固定座標系で差分化すると移流項によって本質的に数値拡散(疑似分散)が生じる⁴⁶⁾ために、数値拡散による輸送が流れによる輸送と同程度となり、長期的な物質輸送現象を扱うのが困難になっているからである。この数値拡散の影響を減少させるために、種々の離散化スキームや数値拡散係数(疑似分散係数)を用いて計算が行われている^{47), 48)}が、本来の分散係数とは別に疑似分散係数を得るための検討も必要となり、十分な計算結果が得られるまでには至っていない。しかし、感潮部では大潮・小潮といった潮位の周期変動による長期的な物質輸送が生じているものと考えられ、長期的な懸濁物質の濃度変動に関する計算手法を確立することが望まれている。

ここでは、潮汐作用による影響の大きい強混合型の六角川感潮部を対象に、懸濁物質の巻き上げ・沈降を考慮した懸濁物質濃度変動のシミュレーションモデルを作成し、河道方向への懸濁物質輸送について検討する。対象とした六角川感潮部は強混合型であり、上げ潮・下げ潮時には流れに及ぼす成層や密度流の効果は小さく、河道方向への物質輸送が卓越している。第3章で述べた現地観測結果では、感潮部上流域において下げ潮の河川固有流出時に浮泥流によるSS高濃度が観測されていた。この浮泥流は、満潮時に懸濁物質が沈降してできた流動性をもつ浮泥が密度流として流下してきたものである。感潮部上流域では水深が浅いために、浮泥流が顕著に現われていたが、感潮部全域でも浮泥流が生じているものと考えられる。したがって、懸濁物質の輸送モデルを上層主流部の流れに下層浮泥流を組み合わせた次元不定流二層モデルとして考えることにする。つまり、主流部の計算では、下層浮泥流の流れが主流部に比べて十分小さいことから、主流部の流れを浮泥流を無視してまず求め、それに浮泥流を重畳することとする。さらに、長期的な懸濁物質濃度の計算では、基礎式を累加水量を基準にしたラグランジェ的な移動座標系での表現に改めることにより数値拡散による輸送を減少させるようにする。そして、長期的な懸濁物質濃度変動の計算結果に基づいて、感潮部における懸濁物質輸送機構について検討する。

4. 4. 2 水理モデル

1) 対象河川のモデル化

河川感潮部での物質輸送現象は、感潮部全域を対象とする必要があり、六角川本川に支川牛津川を加え

た六角川水系を数値計算の対象とした。さらに、下流側境界は、満潮時に河口より上流側にある河川水が干潮時に対象領域から流出し得ない十分な空間容積をもたせるために、有明海域の六角川の滞筋に添って仮想的な河道を延長することにし、河口より7 km 下流地点を計算対象領域の下流端とした。計算の対象領域を図4-21に示す。

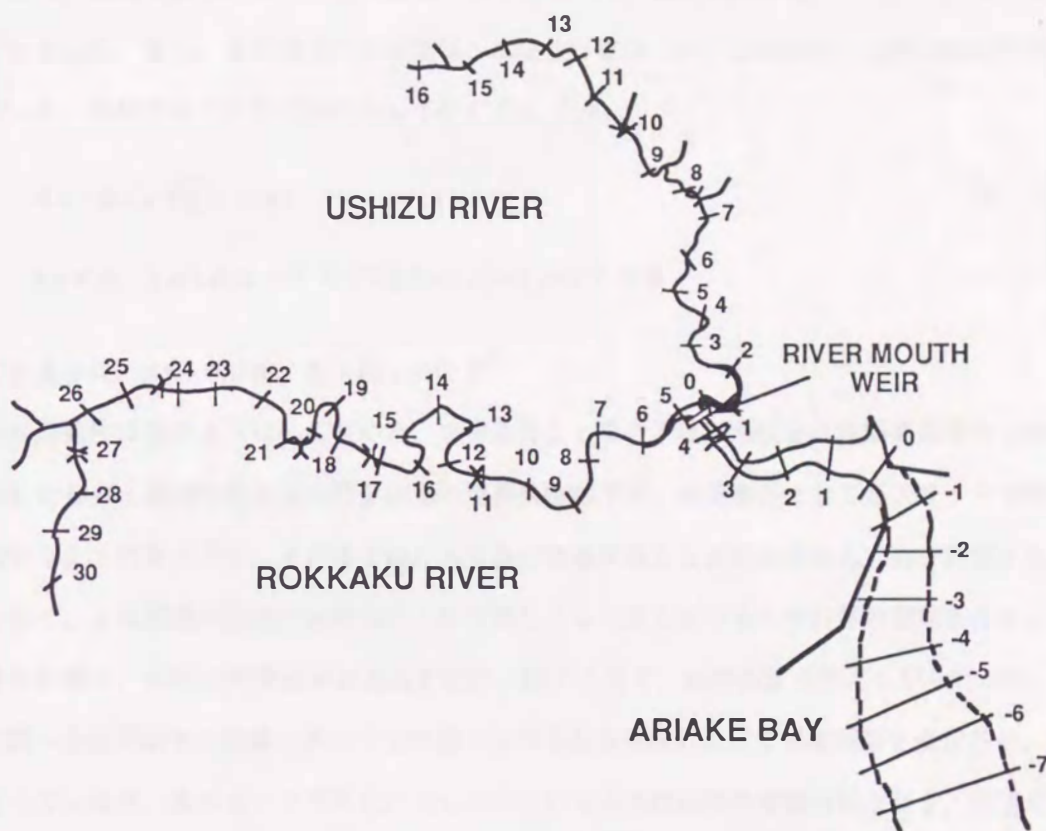


図4-21 計算対象領域

図中の数字は、河口(六角川)及び合流点(牛津川)からの距離

2) 基礎式と計算方法

水理モデルでは、一次元不定流モデルにおいて流水断面積と流量を変数として、水位の計算値が実測値と一致するように、粗度係数を調整パラメータとして差分法により計算を行う。まず、一次元不定流モデルにおける距離基準の固定座標系での連続の式及び運動方程式は、流水断面積 A と流量 Q を変数として次のように表される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4.63)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |Q| Q}{R^{4/3} A^2} = 0 \quad (4.64)$$

ここに、 q は主流方向に直角な方向から流入するとした単位長さ単位時間当たりの横流入量、 H は水位、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 g は重力の加速度である。流出がある場合には、 $q < 0$ ととり、式の左辺に qQ/gA^2 を加える必要がある。

計算には、リーブ・フロッグ法を用い、上流端で流量を、下流端で水位を境界条件として与えた。上流端での流量は、降雨の影響のないときにはほとんど変化せず、基底流量に相当する六角川 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、牛津川 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。また、分合流点での計算は、水位及び流量に対する条件式と運動方程式を連立させて解いて行った。差分方程式の安定条件としての C.F.L. 条件

$$\Delta x / \Delta t \geq \sqrt{gh} + |u| \quad (4.65)$$

$$h = 4 \text{ m}, u = 1 \text{ m/s} \text{ とすると } \sqrt{gh} + |u| = 7 \text{ m/s} \text{ となる}$$

を満足するように、 $\Delta x = 600 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 60 \text{ s}$ とした。

計算の初期条件は次のようにして定めた。境界条件としての下流端水位を計算期間最初の 1 周期分とそれを反転したもの 1 周期分を加えた計 2 周期の境界条件の下で、初期条件として各グリッドで満潮位及び零の流量を与えて計算を行い、その終了時の水位及び流量を新たな初期条件として再び計算する。これを数回繰り返し、2 周期後の結果が初期条件とほぼ等しくなったときのものを計算の初期条件とした。

水理量の計算は、水位の計算結果が実測水位に一致するまで、粗度係数を変えながら行った。Wallis⁴⁹⁾ は、大潮～小潮周期での計算において上げ潮・下げ潮及び水位によって粗度係数を変化させ、詳細な最適化を行っているが、本計算では簡単化のために水位による粗度係数の調整は行わず、河道形状のみを考慮して数区間に分け、各区分毎に上げ潮と下げ潮で粗度係数を変えることにした。

3) 計算結果

計算期間は、現地調査を行った 1988 年 11 月 27 日から 12 月 16 日までの 20 日間 (27,540 分) とした。

図 4-22 に水位変動の実測値 (1 時間間隔) と計算値を示す。ただし、樋門・樋管への水の流入出いゆる横流入量は、河川流量に比べ小さいとして無視した。なお、-7 km 地点の水位は、実測値を内挿して境界条件として与えたものである。この図より、各地点とも計算結果が長期的な水位変化を良く再現していることが分かる。感潮部上流域の 24.2 km 地点では、河床高が高くなっているために下げ潮後半及び干潮時には河川固有流が出現し、全期間を通してほぼ一定の水位となっている。一方、中流域では満潮位・干潮位とも周期的に変化している。また、日潮不等の影響は干潮位に顕著に現われている。

表 4-8 に最終的に設定された粗度係数を示す。下げ潮のときは河道形状の影響を受けやすいため、図 4-21 に示されるように河道の湾曲の大きい 11.0~20.6 km の区間で粗度係数が最大となっている。上

げ潮では河床勾配の変化に応じて上流側ほど大きくなっている。このように、粗度係数を河道形状や流向に応じて与えることにより、感潮部での流れをうまく再現することができた。

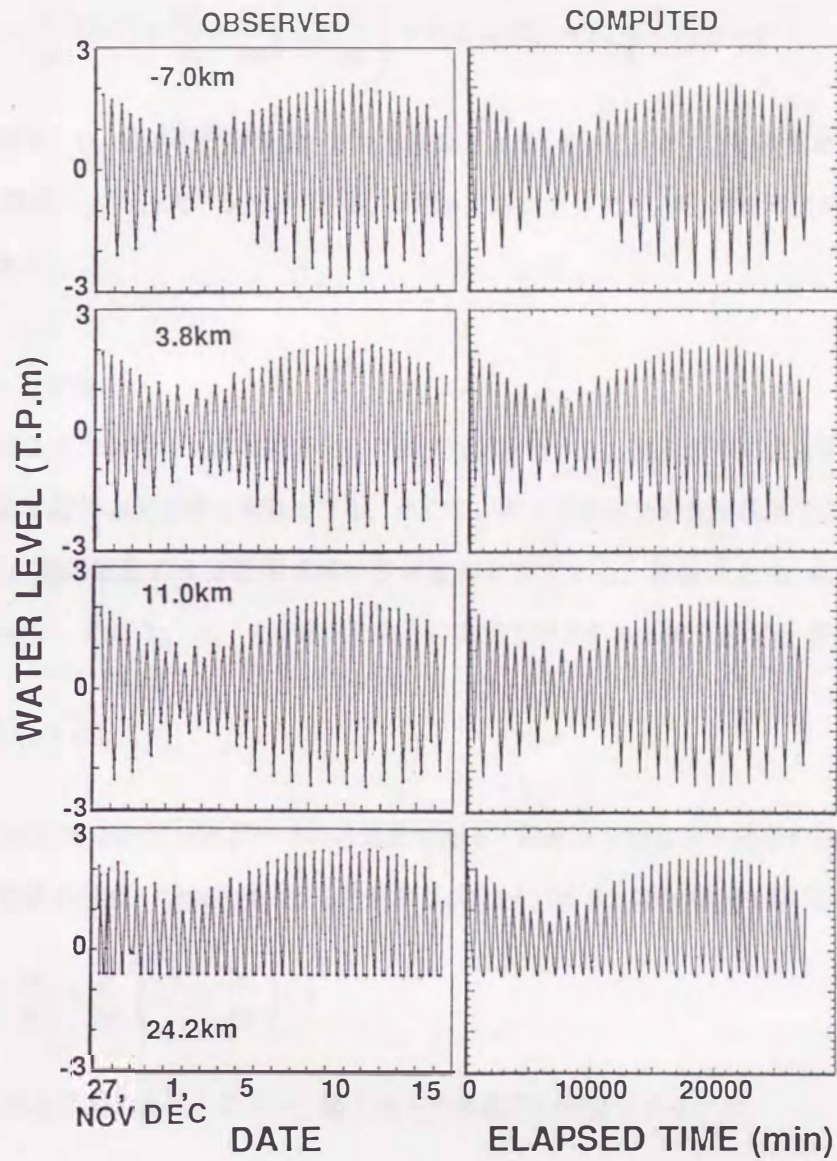


図4-22 水位変動

表4-8 粗度係数

六角川			牛津川		
区間 (km)	上げ潮	下げ潮	区間 (km)	上げ潮	下げ潮
-7.0~0.2	0.020	0.017	0.6~7.8	0.020	0.020
0.2~11.0	0.020	0.020	7.8~10.2	0.028	0.025
11.0~20.6	0.032	0.024	10.2~16.2	0.028	0.025
20.6~24.2	0.030	0.028			
24.2~29.0	0.028	0.038			

4. 4. 3 物質輸送モデル

1) 基礎式と計算方法

懸濁物質の巻き上げ・沈降を考慮した物質収支式は次式のようになる。

$$\frac{\partial(A C)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Q C) + \frac{\partial F_s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + A \sum S_j(C_j) + F_e \frac{A}{R} + F_d B + q' \quad (4. 66)$$

ここに、 C は物質濃度、 D_L は移流分散係数、 B は水面幅であり、 $S_j(C_j)$ は j なる物質から SS への内部交換速度、 F_s はシア効果による付加フラックス、 F_e は巻き上げフラックス、 F_d が沈降フラックス、 q' は横流入フラックスである。

(a) 移動座標系への変換

固定座標系で表現された物質収支式を差分化して濃度計算を行うと、数値拡散による見かけの物質輸送が生じるため、長期に渡る濃度計算が困難となる。そこで、物質収支式を移動座標系での表現に改めて移流項を消去すると、数値拡散による影響を減少させることができる。座標系を (x, t) から移動座標系 (V, t) に変換するために、前章 3. 5. 4 で述べたように次式で示される累加水量 V を用いる。

$$V = \int^x A(x, t) dx \quad (4. 67)$$

累加水量 V は感潮部上流端から x 地点までの貯留量である。簡単のためにシア効果を見捨てる、右辺第 2 項以下をまとめて物質の生成・消滅速度 r として表すと、式(4. 66)は次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + Q_f \frac{\partial C}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} \left(A^2 D_L \frac{\partial C}{\partial V} \right) + r \quad (4. 68)$$

ただし、 Q_f は河川固有流量である。ここで、隣り合った水塊間の交換フラックス

$$j = -A^2 D_L \frac{\partial C}{\partial V} \quad (4. 69)$$

が、両水塊間の交換水量 Q_e を用いて次式で表しえんとする。

$$j = -Q_e \Delta C \quad (4. 70)$$

ここに、 ΔC は隣り合った水塊間の濃度差である。 $D_L = \alpha u \cdot h$ (u は底面摩擦速度、 h は平均水深、 α は係数)とし、式(4. 69)に代入後差分化して式(4. 70)と等しいとおくと、交換水量 Q_e は、

$$Q_e = \alpha u \cdot h A^2 / \Delta V = \alpha u \cdot A h / \Delta L \quad (4.71)$$

となる。ただし、 $\Delta L = \Delta V / A$ である。 $h / \Delta L$ は、 ΔV が一定のとき、水塊が移動すると、たとえば下流に水塊が移動すると、 h は大きく、 ΔL は小さくなり、 $h / \Delta L$ は刻々変化する。ここでは、一潮時平均を考え、 $\alpha' = \alpha h / \Delta L$ として一定とする。ただし、計算時には ΔV はいくつかの値をとるので、それに応じて α' を変化させることにする。したがって、交換水量 Q_e は、

$$Q_e = \alpha' u \cdot A \quad (4.71')$$

で表現できる。この係数 α' は、対象とする感潮部での諸条件(潮汐の規模、河川固有流、地形等)の影響を受けるので、塩分のような保存物質を用いて、実測値と計算値が一致するように決定することができる。

(b) 鉛直輸送フラックス

河川感潮部における懸濁物質の鉛直輸送は懸濁物質の沈降と底泥の巻き上げとに分けられる。剪断流下における懸濁物質の沈降フラックス F_d は、底面摩擦速度 u_b により区分され、次のように表される。

$$u_b \leq u_{*d} \text{ のとき } F_d = -w_s C_{ss} \quad (4.72)$$

$$u_b > u_{*d} \text{ のとき } F_d = 0 \quad (4.73)$$

ここに、 u_{*d} は全沈降限界底面摩擦速度、 w_s は懸濁粒子の沈降速度、 C_{ss} は懸濁物質濃度である。全沈降限界底面摩擦速度は、本章 4.2.3 で示した全ての粒子が沈降する限界底面剪断応力 τ_{cd} とは $\tau_{cd} = \rho u_{*d}^2$ (ρ は河川水の密度) の関係があり、底面摩擦速度がこの値以下になると懸濁する全ての粒子が沈降するという底面摩擦速度である。また、巻き上げフラックス F_e も同様に、

$$u_b < u_{*e} \text{ のとき } F_e = 0 \quad (4.74)$$

$$u_b \geq u_{*e} \text{ のとき } F_e = \beta_e (u_b^2 / u_{*e}^2 - 1)^m \quad (4.75)$$

となる。ここで、 u_{*e} は巻き上げ限界底面摩擦速度、 β_e は巻き上げ速度係数、 m は指数である。巻き上げ限界底面摩擦速度は、本章 4.2.2 で示した巻き上げの限界底面剪断応力 τ_{ce} とは $\tau_{ce} = \rho u_{*e}^2$ の関係がある。感潮部では底面摩擦速度が周期的に変化し、それにもなって沈降と巻き上げが繰り返されているが、凝集性を有する懸濁物質の場合には、海田ら¹⁾が説明するように、 $u_{*d} < u_{*e}$ の関係がある。これらの沈降と巻き上げの限界底面摩擦速度及び沈降・巻き上げフラックスの式における定数は、底泥の性状が河川により異なるために、本章 4.2 節に示した現地試料を用いた室内実験による結果を用いた。

懸濁物質が沈降して形成された浮泥は、次に巻き上げられるまでの間に自重圧密によってその一部が底泥化する。現地堆積底泥の含水比の鉛直分布測定結果²⁷⁾からも、含水比 200% 程度を境界に大きく含水比分布が変化しており、含水比 200% 以上のものが通常の流れにより巻き上げ・沈降を繰り返しているものと考えられる。ここでは、本章 4. 2. 4 で示したように底泥化速度 F_b が単位面積当りの懸濁物質質量 M の関数となり、次式で表されるものとする。

$$F_b = \gamma (M - \delta) \quad (4. 76)$$

ここで、 γ 、 δ は定数であり、 δ はある含水比の層より上方にある浮泥量に相当する。

(c) 浮泥流による物質輸送

浮泥流に関する解析方法は、本章 4. 2. 4 で述べたとおりである。ここでは、 $n = 0.2$ として計算した。また、浮泥の含水比は、現地観測の平均的な値として 300% を設定した。さらに、河道断面測量結果を用いて各断面の最深部の河床高を連ねたものをもとに、局所的な凹凸を無視して、平均的な河床勾配を設定した。すなわち、六角川 -7.0~12.8 km で 0.0001, 12.8~17.0 km で 0.00014, 17.0~26.0 km で 0.00036, 26.0~29.6 km で 0.0008, 牛津川 0~10.8 km で 0.0001, 10.8~16.8 km で 0.00023 とした。

(d) 計算方法

固定座標系での水理量計算結果を基に、上流端からの固有流の流入及び合流部での分合流を考慮しつつ、所定の水量に分割して、それらの境界の各時刻(120 s 間隔)における位置を定めた。すなわち、全計算期間を通じた分割水量の境界線の走時曲線が得られる。なお、分割水量を全領域で同一にすると、1 個の分割水量に対する固定座標上での距離が、上流部では大きく、下流部では小さくなるので、ここでは 3 種類の水量(ΔV_1 , ΔV_2 , ΔV_3)で分割することにした。また、上流端からの固有流の流入に関しては、流入分を一時的に貯溜させ、それが 1 個の分割水量 (ΔV_1) に達したところで分割水量の個数を増やし、さらに、増えた分割水量の個数分の水量が次の分割水量 (ΔV_2) に等しくなった時点で、その分割水量 (ΔV_1) の下流側から ΔV_2 になるまで累積し、それを次の分割水量 (ΔV_2) としてその個数を 1 個増やすようにした(図 4-23 参照)。この操作を $\Delta V_2 \sim \Delta V_3$ についても同様に行った。ここでの分割水量は、 $\Delta V_1 = 10,000 \text{ m}^3$, $\Delta V_2 = 100,000 \text{ m}^3$, $\Delta V_3 = 1,000,000 \text{ m}^3$ とし、これらの最初の個数はそれぞれ 10 個とした。したがって、一つの分割水量の個数が 20 個となるとその分割水量 10 個と次の分割水量 1 個となる。一方、合流部では、支川下流端での流速及び流水断面積より流入出する流量を求め、その分を本川側の分割水量に加減する。

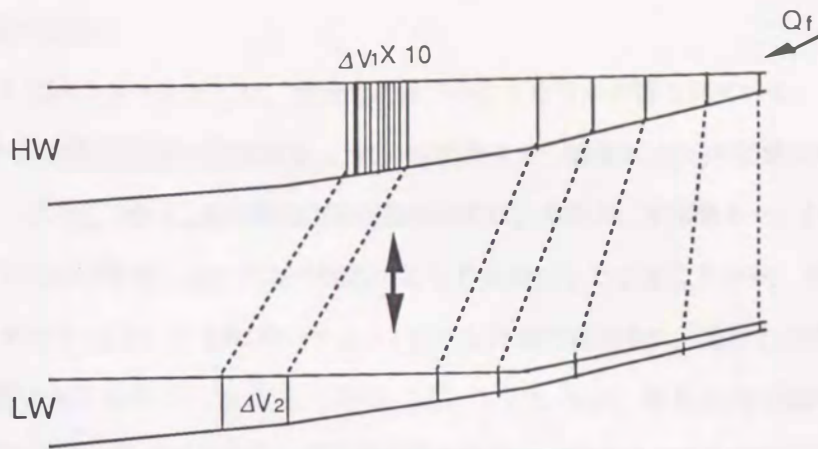


図4-23 分割水量の変化

このようにすると、支川上流端からの固有流流入分だけ水量が増加するので、本川側の分割水量が最初の水量の2倍となったときに2個の分割水量に分けるようにした。ただし、所定の分割水量よりも水量が減少したときは、そのまま減少した水量を分割水量とした。

次に、式(4.68)で表された移動座標系での物質収支式の差分化の際には、同式左辺第2項の河川固有流の流入による移流効果の影響は、所定の水量に分割するときに考慮しているので、その項を省略することができる。なお、 $\Delta t = 120 \text{ s}$ とする。まず、SS濃度の計算に先立ち、分割水量(水塊)間の交換水量 Q_e に関する係数 α' を定めるために、塩化物イオン濃度の計算を計算値が実測値に一致するように行う。

このようにして定められた係数 α' を用いてSS濃度の計算を行う。すなわち、交換水量は流れによる特性値であり、輸送される物質の種類にはよらないものとする。SS濃度の計算では、浮泥と底泥とに分けた堆積底泥について、これらの巻き上げ限界底面摩擦速度が異なり、浮泥が全て巻き上げられ、底面摩擦速度が下層底泥の限界値を越えたときに底泥の巻き上げが生じるようにした。さらに、このような堆積底泥が掃流力を受けると、底泥が巻き上げられながらその表層が剪断歪みを受けることにより硬化するため、巻き上げが停止することがある。ここでは、この現象を巻き上げ継続時間を設定することにより表現した。

なお、粒径変化の影響は無視し、底泥を含む懸濁物質の諸特性が全計算領域において同一であるものとした。また、鉛直輸送フラックスは、固定座標軸上(1,200 m 間隔)で求めたものを物質収支が成立するように移動座標系でのものに配分して算定した。したがって、浮泥量及び底泥量は固定座標上で計算される。

本支川合流部では、支川下流端での流速及び流水断面積と上げ潮時には本川側の分割水量の濃度、下げ潮時には支川最下流部の分割水量の濃度を用いて流入出するSS量を算定し、合流部に位置する本川、支川の分割水量のSS量を加減した。

(e) パラメータ値の設定

鉛直輸送に関する各パラメータ値には、実験的に以下のようなものが得られている。

まず、式(4.72)の懸濁物質の沈降速度 w_s は、塩化物イオン濃度によらずSS濃度のみの関数とした(式(4.21), (4.22))。また、全沈降限界底面摩擦速度は、本章4.2節図4-11に示したように、全ての粒子が沈降する底面剪断応力が底泥の種類によらず0.025 Paとなることから、0.005 m/sとした。

巻き上げフラックスは式(4.75)において $m=1.7$ とした形で整理され、巻き上げ速度係数 β_s が塩化物イオン濃度の関数となるものとした(式(4.16), (4.17))。なお、巻き上げの限界底面摩擦速度は、一潮汐間の数値計算におけるSS濃度変化の検討結果⁵⁰⁾を参考に、浮泥のものを0.025 m/s、底泥のものを0.03 m/sとした。これらの値は、本章4.2.2で示した室内実験による値(巻き上げの限界底面剪断応力を0.1 Paとすると、限界底面摩擦速度は0.01 m/sとなる)に比べると大きい。これは、室内実験と現地感潮部とでは現象を支配する条件が異なるためと考えられる。楠田ら²⁷⁾は、同一底泥を用いた攪乱・不攪乱状態での巻き上げ実験を行い、不攪乱試料の方が攪乱試料に比べて巻き上げ限界底面摩擦速度は大きく、初期巻き上げ速度及び最終巻き上げ量は小さいことを示している。また、水理量の計算結果より底面摩擦速度を算定する($u_*^2 = g n^2 u^2 / R^{1/3}$)と、底面摩擦速度の一潮汐間での最大値は、空間的に異なるものの大潮時に0.035 m/s ~ 0.055 m/s、小潮時に0.024 m/s ~ 0.037 m/sとなっている。したがって、今回設定した底面摩擦速度は、SS濃度の長期的な変化を再現するのに妥当なものといえる。巻き上げ継続時間は、浮泥についてのみ考え、60分とした。なお、これらの鉛直輸送に関するパラメータがSS濃度変化に及ぼす影響については後で検討する。

次に、浮泥の底泥化は、上層水中の単位面積当りの懸濁物質量 M が 6.4 kg/m^2 以下のときは生じず、 M が 6.4 kg/m^2 より大きくなったときに式(4.76)の底泥化速度 F_b ($\text{kg/m}^2\text{s}$) が $\gamma = 0.00004$ 、 $\delta = 6.4$ で与えられるものとした。

実際の感潮部において日常的に巻き上げられている底泥は、停潮時に懸濁粒子が沈降して形成されたものであり、含水比がかなり高く、非常に軟弱なものと考えられる。また、穏やかな剪断流下における懸濁粒子の沈降は、粒子間の凝集が促進されるため、静水中での沈降より沈降速度が大きくなることが考えられる。一潮汐間の数値計算におけるSS濃度変化の検討結果⁵¹⁾によると、巻き上げ速度を実験値の10倍、沈降速度を同じく実験値の2倍にしたときの結果が実測値を最も良く再現しており、本計算でもそれらの値を用いることにした。

2) 計算結果

(a) 塩化物イオン濃度計算結果

水理量計算結果を基に所定の水量に分割し、いわゆる移動座標系で表現された物質収支式を用いて塩化物イオン濃度の計算を行った。強混合河川感潮部における水塊中の塩化物イオン濃度分布は潮相によらず定常的に定まっており、ここでは、初期条件として与えた実測の濃度分布が計算期間を通して維持されるように交換水量係数 α' を変えながら計算を行った。すなわち、塩化物イオンのような保存物質の水塊中の濃度分布は、式(4.68)の左辺第2項の固有流の流入による移流と右辺第1項の拡散による輸送とが釣り合うことにより決定されている。塩化物イオン濃度の計算結果を図4-24に示す。第3章図3-12の実測値と比較しても両者はほぼ一致しており、長期的な塩化物イオン濃度の変化を良く再現している。なお、このときの係数 α' の値は、分割水量 ΔV_1 , ΔV_2 , ΔV_3 に対してそれぞれ六角川の場合 10, 2.5, 1.5, 牛津川の場合 10, 5, 1であった。ここで、移流分散係数 D_L は式(4.69), (4.70), (4.71')より係数 α' を用いて

$$D_L = \frac{\alpha' u \cdot \Delta V}{A} \quad (4.77)$$

と表され、実際の ΔV , A の値を用いて D_L を求めると、 $10 \sim 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーとなる。この値は、上嶋ら⁴⁰⁾が吉井川において現地調査より求めた値と一致する。

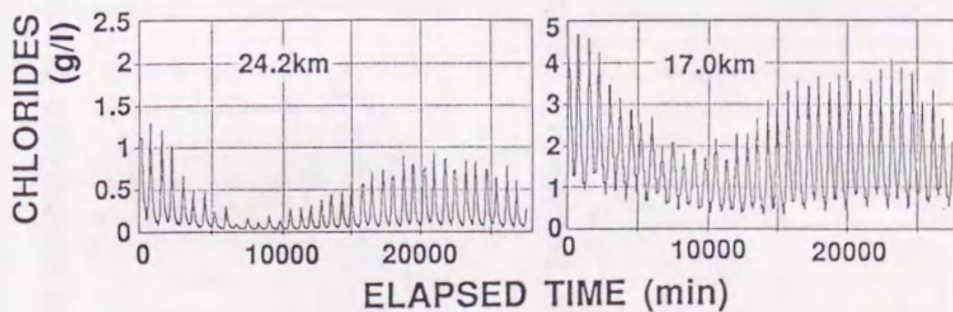


図4-24 塩化物イオン濃度計算結果

(b) SS濃度計算結果

SS濃度の計算では、まず初期堆積底泥量として浮泥のみを各区間に 10^6 kg ずつ与え、現地調査より得られた河道方向の濃度分布を初期条件として計算を行った。これに引き続き、第1回目の計算終了時点の堆積底泥量及び濃度分布を初期条件として第2回目の計算を行った。この第1回目と第2回目のSS濃度の経時変化を図4-25に示す。一潮汐間のSS濃度の極大値は、大潮から小潮にかけて減少し、小潮から大潮にかけて増加している。ここで、第3章図3-13に示した実測値と比較すると、計算値の方が低

くなっている。これは、計算値が断面平均濃度であるのに対して、実測値は断面内1点からの採水試料によって求めたものであることによる。さらに、採水口の位置を河床近くに設置したために、停潮時に懸濁粒子が沈降して河床付近に高濃度層を形成し、そのSS濃度がかなり高くなった部分を採水したことによるものと考えられる。一潮汐間における水深方向に数点から採水して行った詳細な調査結果によると、大潮時の断面平均濃度は最大で10 g/l程度であった(第3章図3-8)。したがって、今回の計算結果はこれに比べやや低いものの、ほぼ実測値を再現しているものといえる。また、小潮時のように濃度が低いときには、断面内の濃度全体が低く、しかも断面内の濃度差も小さくなっているため、このときの実測濃度は断面平均濃度とほぼ等しいものと考えられ、計算結果も実測値と同程度になっている。なお、小潮時にSS濃度が低いのは、底泥が存在しないのではなく、底泥の巻き上げに関わる底面摩擦速度が小さいために巻き上げ量が少なくなることによるものである。以上のことより、今回の計算結果は、断面平均濃度の長期的な変化を概ね再現しているものといえる。

次に、第1回目と第2回目との濃度変化を比較すると、大潮時のSS濃度は第2回目の結果の方が低くなっている。これは、1回目の計算によって堆積底泥の移動いわゆる懸濁物質の輸送が生じたために、流

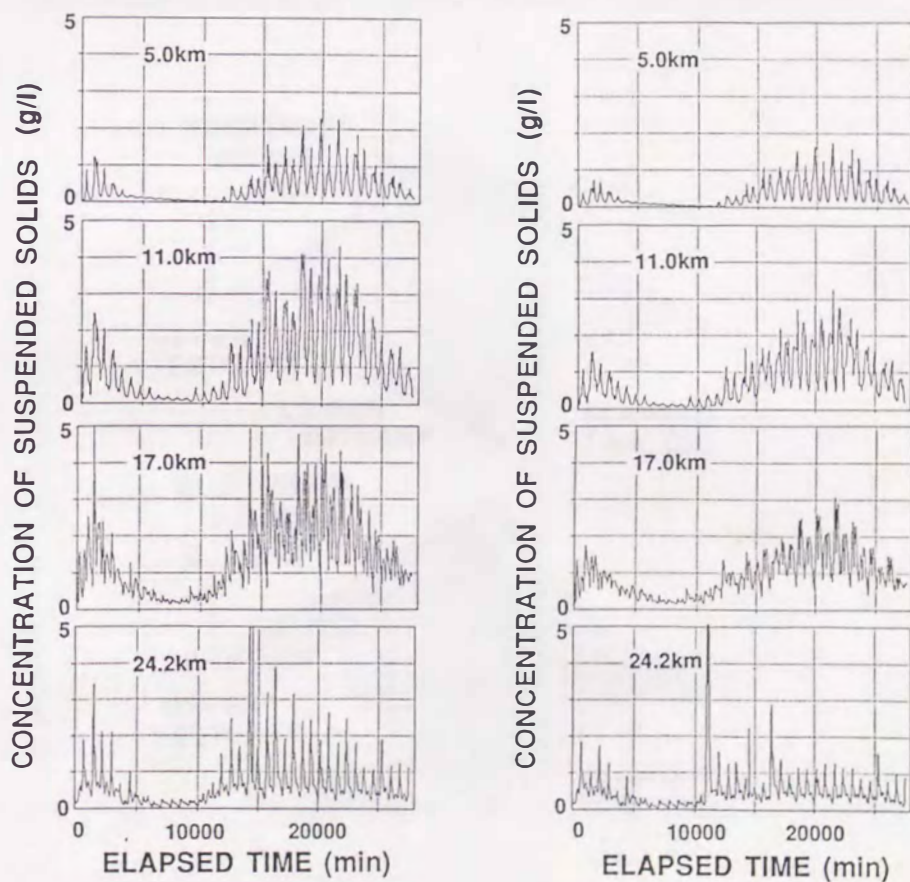


図4-25 SS濃度経時変化(左:第1回目,右:第2回目)

れの条件が同じであるにもかかわらず巻き上げられる底泥が存在しないからである。したがって、このような計算を繰り返すと、いいかえれば自然状態がこのような条件を保ち続けるならば、各断面の流況特性に応じて、巻き上げられ易いところにある底泥はその底泥がなくなるまで常に巻き上げられ、流れの緩やかなところへ輸送されて沈降・堆積するようになる。このため、SS濃度の長期的な変化は定常的なものになり、懸濁物質の河道方向への輸送もSS濃度の長期変動に伴うものだけになるものと考えられる。

3) 懸濁物質輸送に関する検討

河川感潮部では、SS高濃度水塊が形成され、SS濃度は大潮～小潮周期においても大きく変化する。したがって、感潮部における懸濁物質の輸送機構を明らかにするためには、大潮～小潮周期における懸濁物質の輸送特性を検討する必要がある。ここでは、SS高濃度水塊の形成と懸濁物質輸送の関係について、種々の条件の下で行った計算結果を基に検討する。

(a) SS高濃度水塊の挙動と底泥の堆積

まず、図4-25に示した計算の際のSS濃度縦断分布の経時変化を図4-26に示す。この図は、第1回目計算時の10,002～11,000分の間(小潮)と20,002～21,000分の間(大潮)のものである。いずれの場

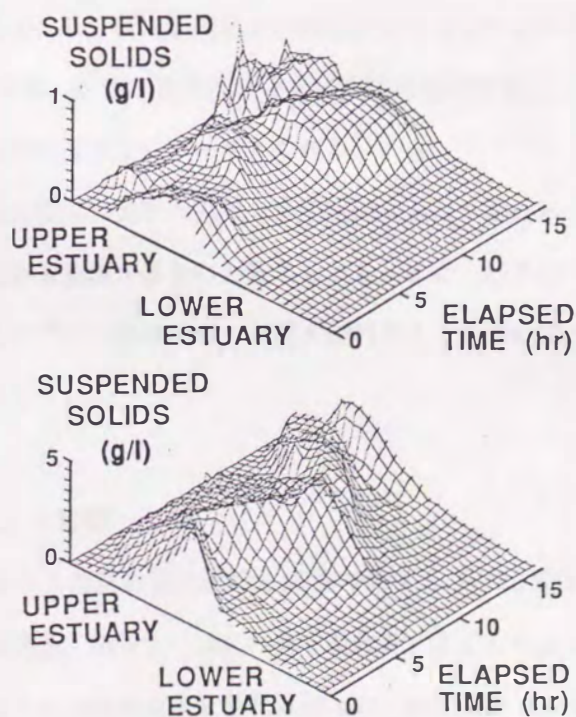


図4-26 SS濃度縦断分布の経時変化
(上; 10,002～11,000分 [小潮], 下; 20,002～21,000分 [大潮])

合も、SS高濃度水塊が、懸濁物質の沈降と巻き上げを繰り返しながら、流れに応じて上下流方向に移動している。高濃度水塊が現われるのは、上流域から中流域にかけてであり、下流域ではSS濃度の増加はほとんど見られない。これは、下流域では河道断面が上・中流域に比べ大きいので、流速及び底面摩擦速度が大きくならないので底泥の巻き上げがあまり生じないからである。

次に、同じく第1回目計算時の浮泥及び底泥の縦断分布の経時変化を図4-27に示す。六角川の浮泥量の変化を見ると、大潮から小潮にかけての前半では上流域から中流域への移動が生じているのが分かる。小潮から大潮にかけては、一旦上流域から中流域に運ばれたものが再び上流域に移動している。一方、下流域では浮泥量の増加が見られるところと減少するところとに分かれてきている。この下流域で浮泥量が増加するところは、河道断面が大きいので流速が大きくなりえず、底面摩擦速度が巻き上げの限界値を越えないからである。このことは、実際の感潮部において、河道維持のために河道拡幅を行った地点への底泥の堆積が顕著になることから理解される。なお、下流域において浮泥が存在するにもかかわらず底泥化が起こっていないのは、河道断面が大きいので、浮泥が底泥化を起こすのに必要な厚さを持たないからである。このように、大潮～小潮周期を通して堆積底泥の河道方向への輸送が生じ、各断面の流況特性に応じた堆積量となることが分かる。すなわち、巻き上げの生じやすい中流域の底泥が、上流域あるいは下流域に移流により輸送され、そこで沈降・堆積する。

さらに、第2回目の計算時のものを図4-28に示すが、第1回目ほどの大きな堆積量の変化は見られない。これは、計算の初期条件として既に懸濁物質の輸送が生じたものを与えたためであり、前にも述べたように、SS濃度変化及び浮泥・底泥の堆積量の分布に定常状態が存在し、大潮のような強い流れを一度受けることにより、その状態に達するものと考えられる。

以上のことから、実際の感潮部では通常の大潮～小潮周期において輸送される懸濁物質の量は少なく、流況特性に応じた堆積量の分布を形成するものと考えられる。また、出水後のように堆積底泥の分布が、平時の流況特性に対応したものでない場合には、一度大潮時のような強い流れを受けることにより、安定した底泥分布となることが考えられる。

(b) 鉛直輸送フラックスによる影響

懸濁物質の鉛直輸送、すなわち懸濁物質の沈降と底泥の巻き上げがSS濃度変化に及ぼす影響は、それらの限界底面摩擦速度や沈降速度、巻き上げ速度の値を変化させることによって検討することができる。

図4-29に巻き上げの限界底面摩擦速度を浮泥 0.03 m/s、底泥 0.04 m/s としたもの(図中 a)、及び巻き上げ限界底面摩擦速度はそのまま沈降の限界底面摩擦速度を 0.003 m/s としたとき(同 b)のSS濃度の経時変化を示す。なお、ここでの計算は、初期堆積底泥量によるSS濃度変化に及ぼす影響もあるので、

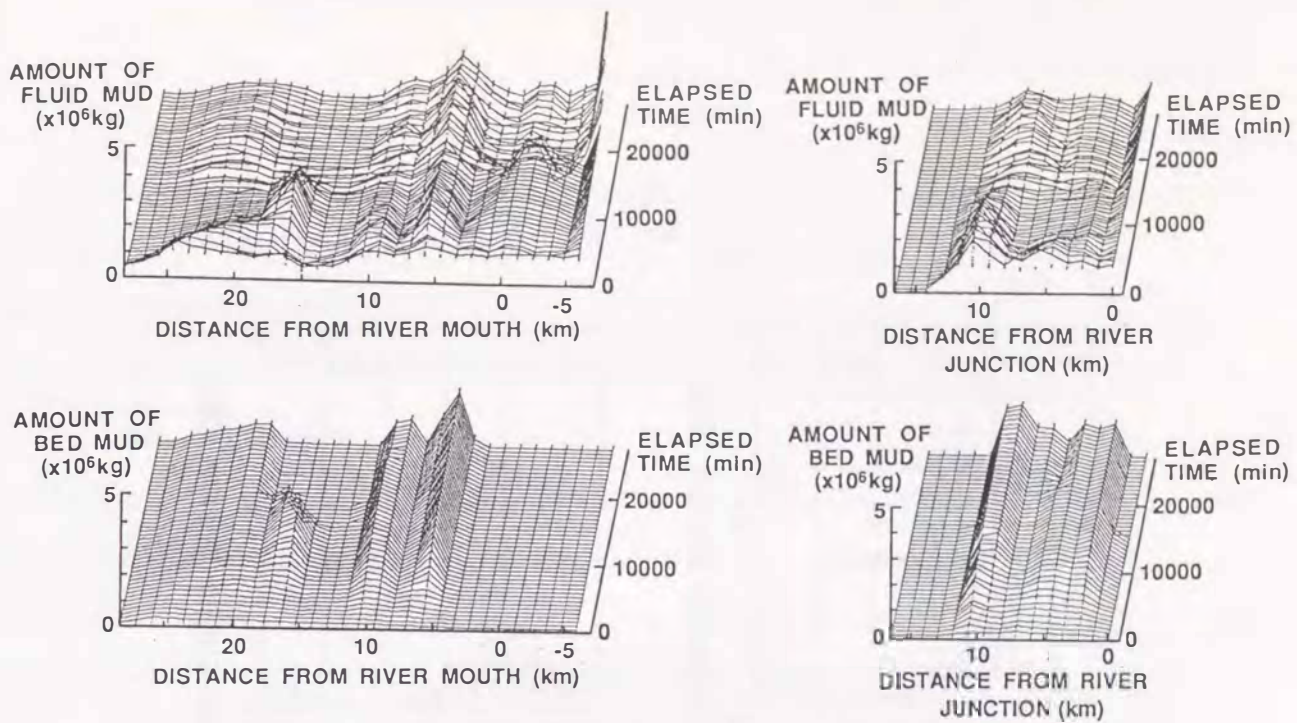


図4-27 浮泥及び底泥の縦断分布の経時変化
(第1回目計算時, 左; 六角川, 右; 牛津川)

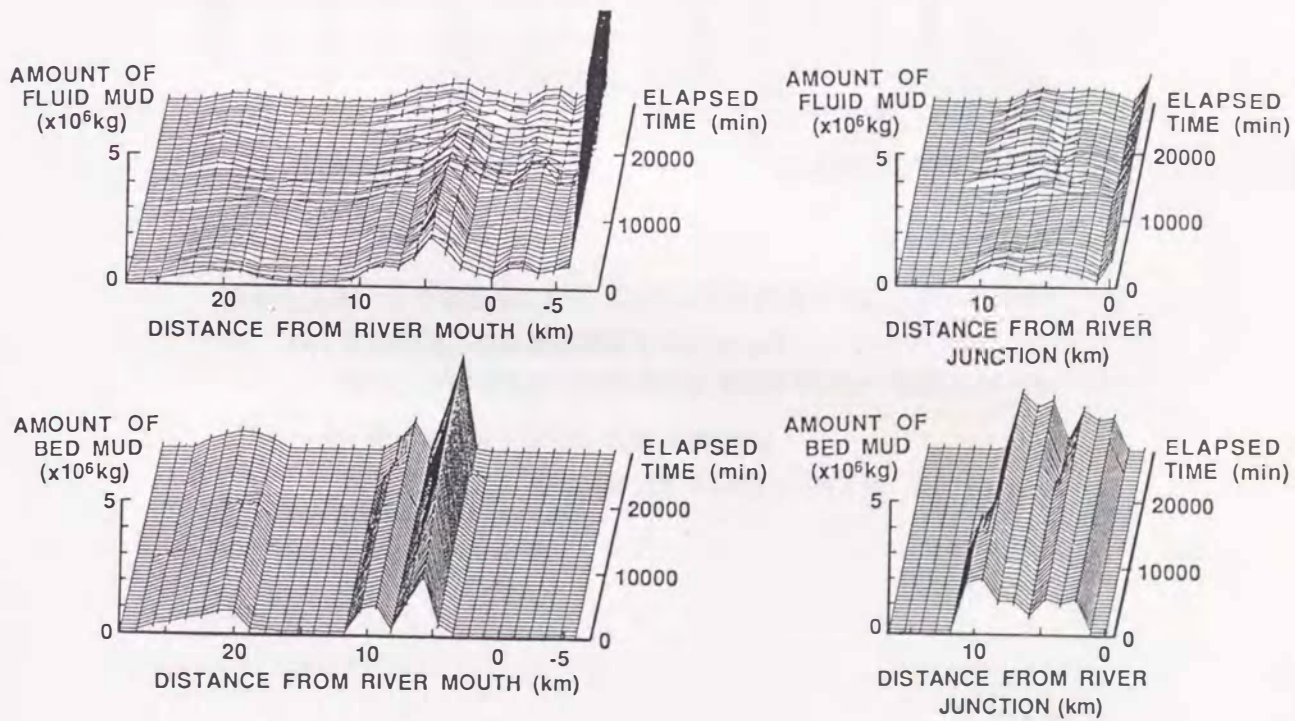
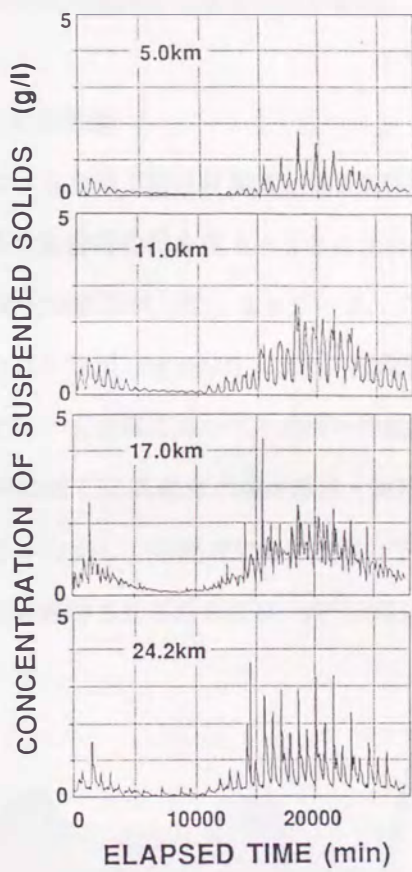
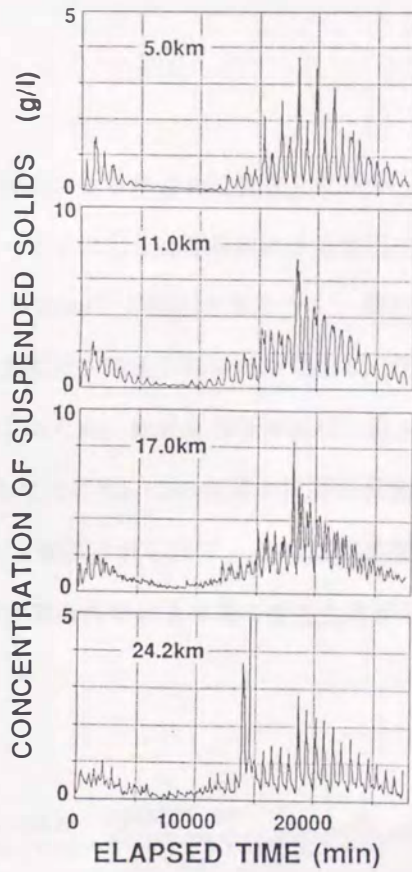


図4-28 浮泥及び底泥の縦断分布の経時変化
(第2回目計算時, 左; 六角川, 右; 牛津川)



(a)



(b)

図 4 - 2 9 SS濃度経時変化 (限界底面摩擦速度を変化させた場合)

(a) 沈降の限界底面摩擦速度を 0.0025 m/s

巻き上げの限界底面摩擦速度を浮泥 0.03 m/s, 底泥 0.04 m/s

(b) 沈降の限界底面摩擦速度を 0.003 m/s

巻き上げの限界底面摩擦速度を浮泥 0.025 m/s, 底泥 0.03 m/s

浮泥を全区間に 10^6 kg ずつ与えたものを初期条件として行った。まず、巻き上げの限界底面摩擦速度を大きくしたときには、当然巻き上げ量が減少し、図4-25に示した場合に比べ、いずれの地点においてもSS濃度が1/2程度になっている。一方、沈降の限界底面摩擦速度を小さくしたときには、中流域でのSS濃度が高くなる傾向が見られる。これは、懸濁物質の沈降が限られた断面でしか生じなくなり、水中に浮遊する懸濁物質の量が多くなるからである。

(c) 浮泥流による効果

図4-25に示した第1回目計算時と同じ条件で、浮泥流による輸送の計算を入れなかったときの浮泥及び底泥の縦断分布経時変化を図4-30に示す。図4-27に示した浮泥流による輸送を考慮した場合に比べ、上流域への輸送が大きくなっている。これは、Postma²²⁾が説明するように、潮汐流と懸濁物質の流送特性との遅れ作用 (lag effect) により、懸濁物質が上流側へ輸送されるためである。浮泥流を考慮した計算の場合では、上流域において下流側への輸送が生じるため、底泥を再び中流域に運ぶ作用が働く。したがって、中流域でSS高濃度水塊が形成・保持されるためには、この効果が重要な役割を果たしていることが分かる。しかし、中流域にある底泥は下流側へも輸送されるので、このSS高濃度水塊が中流域において継続的に維持されるためには、河口のSS濃度が気象条件等により高くなる必要がある。

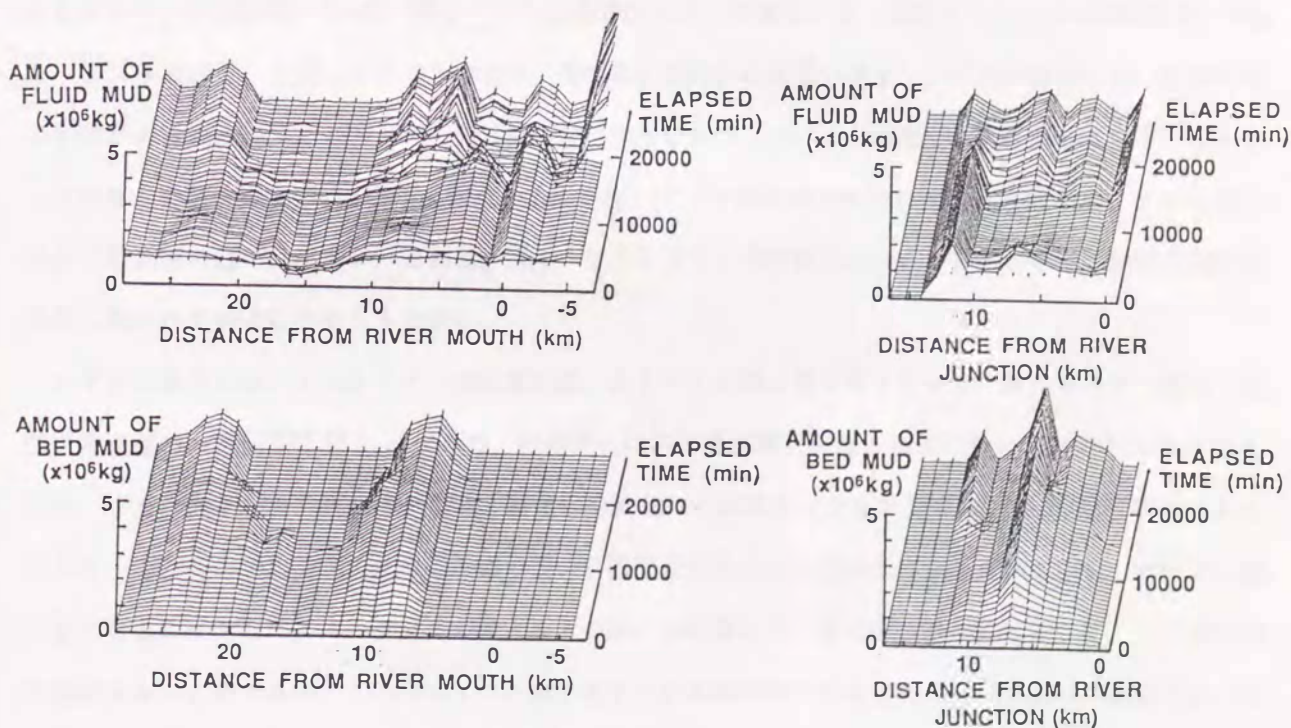


図4-30 浮泥及び底泥の縦断分布の経時変化
(浮泥流なしの場合, 左; 六角川, 右; 牛津川)

4. 4. 4 長期的な物質輸送機構

強混合河川感潮部では、潮相により流況やSS濃度が大きく変化するために、そこでの物質輸送機構について長期間にわたり連続して検討する必要がある。すなわち、感潮部では日潮不等により1日2回の満干潮位が等しくならなないために、一潮汐の取り方によって計算される物質輸送量が大きく異なる。しかし、そこでの流速等の連続観測資料を得にくいので、現地観測結果に基づいた検討を行うことができない。ここでは、半月周期での数値計算結果を用いて河川感潮部における長期的な物質輸送機構の検討を行うこととする。解析方法は、前節4. 3に示したとおりであるが、一潮汐間の時間平均の輸送量により検討する。なお、水理量及び濃度の計算は一次元モデルを用いているため、流速、濃度等の変数は断面平均値で与えられており、シア効果による輸送量は直接算定できない。したがって、各時刻での輸送フラックスより求めた一潮汐間の平均輸送量と式(4. 55)右辺第1項から第4項までの和との差をシア効果による輸送量(式(4. 55)右辺第5項)とした。なお、輸送量算定に用いる各変数の時間間隔は10分とした。計算開始後7,000分が小潮、同じく18,000分が大潮である。

1) 一潮時平均流速及び流量の変化

まず、図4-31, 32にオイラー流、ストークス流、ラグランジュ流として定義される流速(式(4. 51), (4. 52), (4. 53))の時間変化を示す。なお、図4-31は干潮から次の干潮までを一潮汐としたもの(干潮基準)であり、図4-32は満潮から次の満潮までを一潮汐としたもの(満潮基準)である。これらの図で、正值は下流向きの流速、負値は上流向きの流速を表す。いずれの場合にも、日潮不等の影響があるために、それぞれの一潮汐間の値が交互に変化している。満潮から次の満潮までを一潮汐として計算した場合の方が、24.8 km地点のものを除いて、干潮基準のものに比べて日潮不等による1日2回の平均流速の違いは小さい。これは、図4-22に示した水位変化において日潮不等の影響が干潮位に顕著に現われていることから分かる。

いずれの地点においてもオイラー流は常に正、ストークス流は常に負となっている。オイラー流は、断面平均流速の一潮時平均値(u_0)であり、相対的には河川感潮部における流速変化の非対称性の大きさを示す。また、ストークス流は、断面積と断面平均流速の一潮時平均からの偏差(A_1, u_1)の位相差により生じる一潮汐間の平均流速であり、一潮汐間の断面積変化も含めた潮汐流の非対称性を示す。オイラー流が正となるのに対してストークス流が負となるのは、上げ潮と下げ潮で断面積が同じときに、上げ潮時の流速が大きいためである。これらオイラー流とストークス流の和であるラグランジュ流は、潮汐作用の非対称性による影響がない場合には、河川固有流による流速に相当する。河川固有流の影響が相対的に大きい24.8 km地点では、ラグランジュ流も常に正となっている。ラグランジュ流が相対的に上流側で大きく、

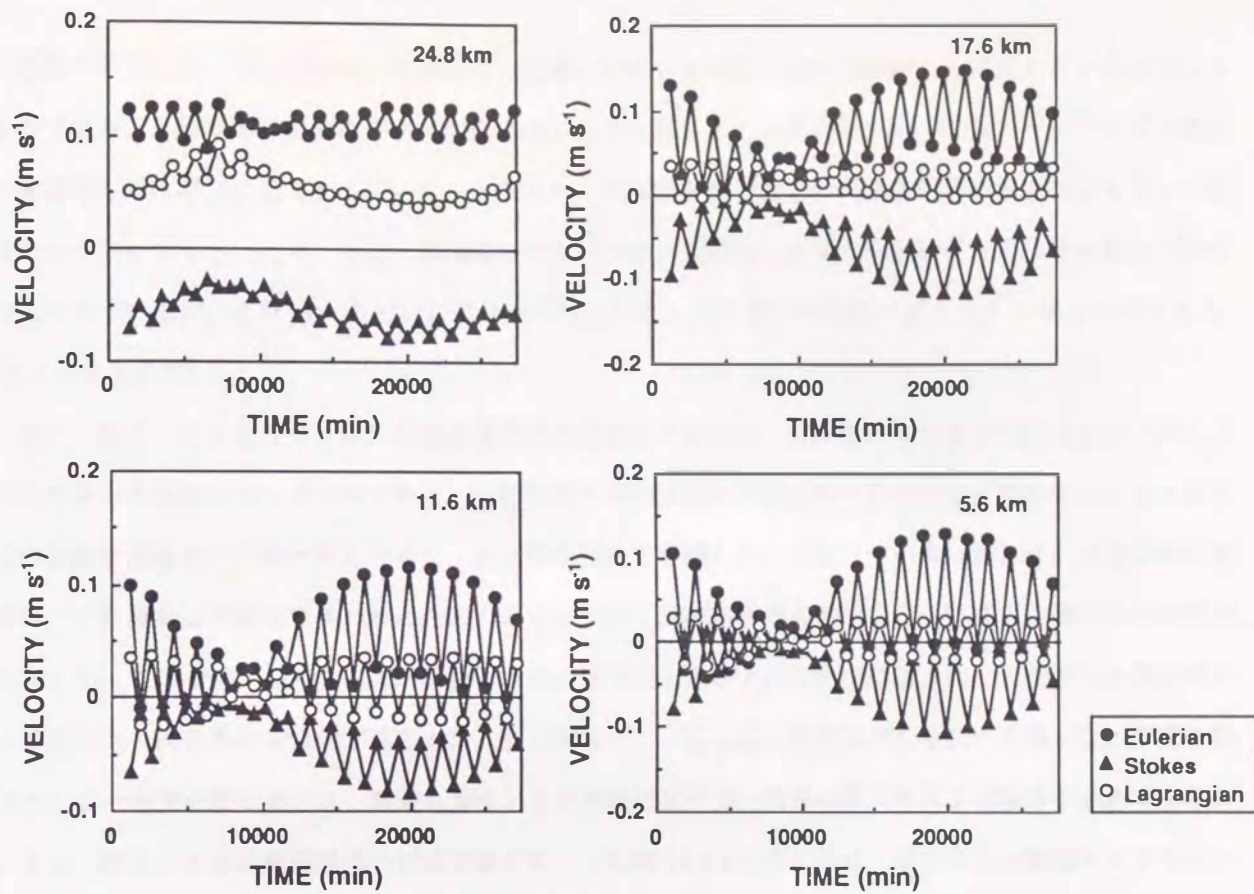


図 4 - 3 1 一潮時平均流速の時間変化 (干潮基準)

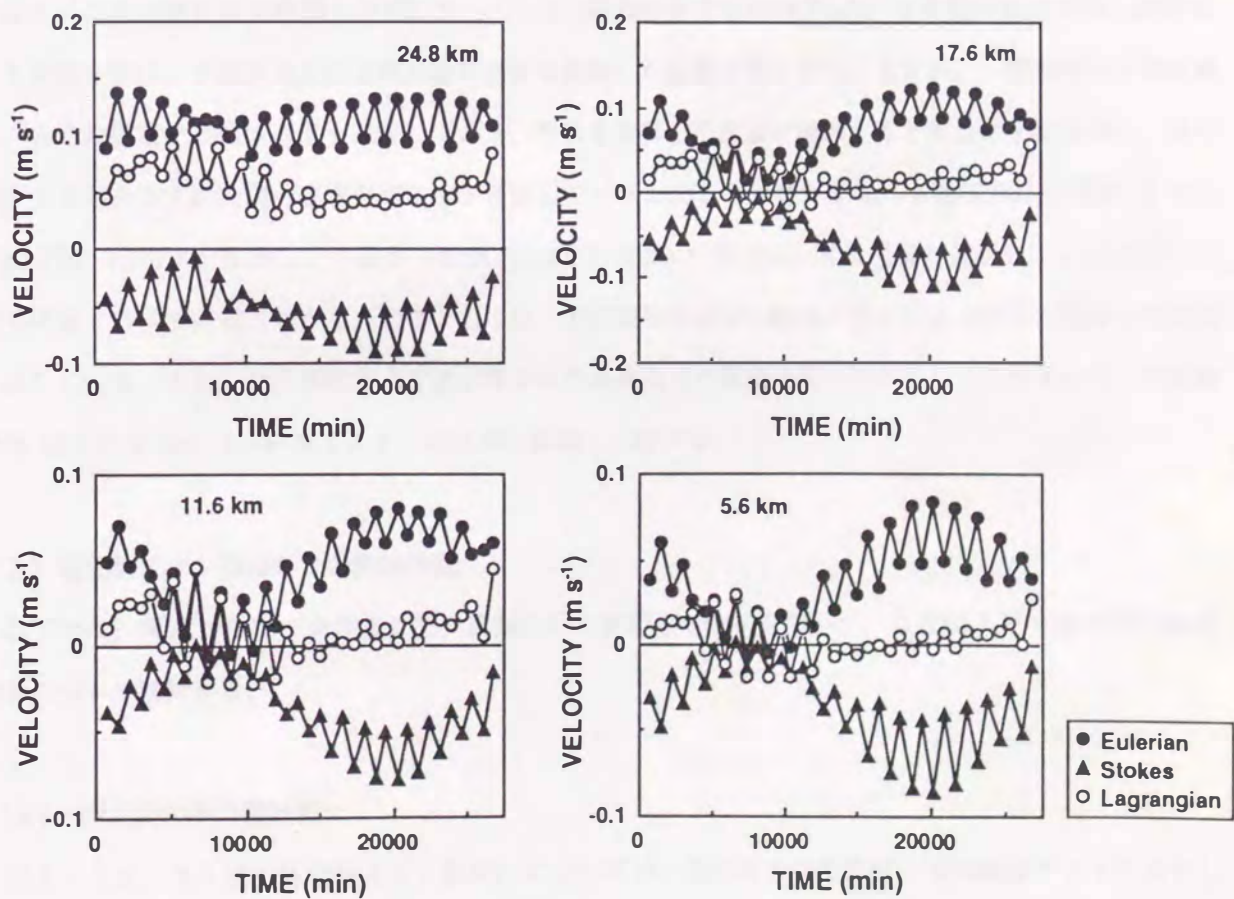


図 4 - 3 2 一潮時平均流速の時間変化 (満潮基準)

下流側で小さくなっているのは、各地点での流速に対する河川固有流の影響が上流側程大きいことによるものである。日潮不等の影響の小さい満潮基準のものを見ると、大潮(20,000分)前後のラグランジュ流は下流側のものほど0に近くなっている。すなわち、河川固有流の影響が河道断面積の増大にともなって相対的に小さくなるといえる。なお、満潮基準のものでは、大潮時に比べて小潮時に日潮不等の影響が顕著に現われているが、これは、小潮時には日潮不等による1日2回の満潮位の差も大きくなるためである(図4-22参照)。

次に、図4-33及び34は、干潮基準及び満潮基準で求めた一潮汐間の平均流量の経時変化と同じく平均流量の累積値を示したものである。一潮汐間の平均流量の干潮基準のものでは日潮不等による1日2回の変動が正負交互に現われるために、長期的な傾向を把握しにくくなっている。これは、日潮不等の影響が、下流域では干潮位に現われるためである。一方、満潮基準のものでは、小潮時に日潮不等の影響が大きくなっているが、長期的には小潮から大潮の間で河川水が上流方向へ輸送され、大潮から小潮の間では下流方向へ輸送される傾向が見られる。したがって、一潮汐間の物質収支を検討する際には、干潮を基準として一潮汐を取る方法は、満潮を基準とする方法に比べて一潮汐の取り方による誤差が大きくなるといえる。図4-32の満潮基準の累積流量では、上流部24.8 kmのものは、潮汐による影響をあまり受けず、直線的に増加している。数値計算における境界条件として上流端での河川流量を常に $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ としており、この流量をほぼ積算した形になっている(10,000分で $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3$)。その他の地点では、潮汐による影響を受け、下流側地点ほど河川固有流量を積算した直線からのずれが大きい。一潮汐間の平均流量は、各潮汐周期での残差流量を意味しており、それを積算した流量が増加するときには下流方向へ、逆に減少するときは上流方向へ感潮部河川水が移動していると見ることができる。小潮(7,000分程度)までは下流方向へ河川水が移動し、小潮から大潮(18,000分程度)の間では、累積流量が減少し、上流方向への残差流量となっている。しかし、全体としては、河川固有流量分の輸送に潮汐による流量が重なった変化を示している。また、計算開始時点で差がなかった各地点での累積流量が再び等しくなるのは、計算開始後24,000分(16.7日)程度であり、ほぼ半月周期に一致する。

2) 塩化物イオン及びSSの輸送特性

以下では、満潮から次の満潮までを一周期として解析した結果を用いて、塩化物イオン及びSSの輸送特性について検討する。

(a) 一潮汐間の平均輸送量

図4-35、36は、塩化物イオン及びSSについての一潮汐間の平均濃度、平均輸送フラックスそし

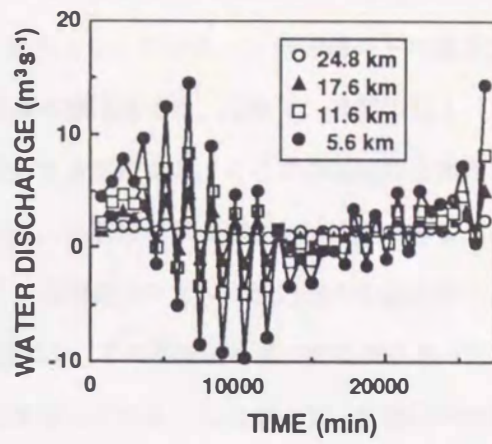
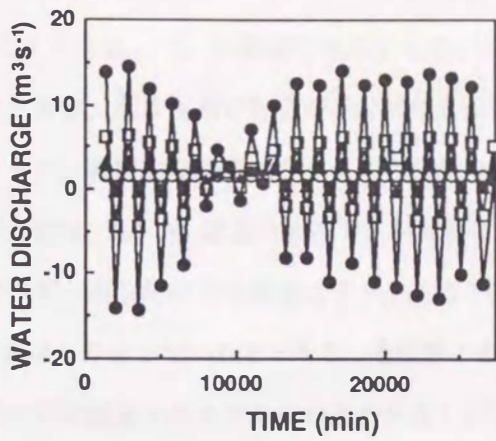


図 4 - 3 3 一潮汐間の平均流量の経時変化 (左：干潮基準，右：満潮基準)

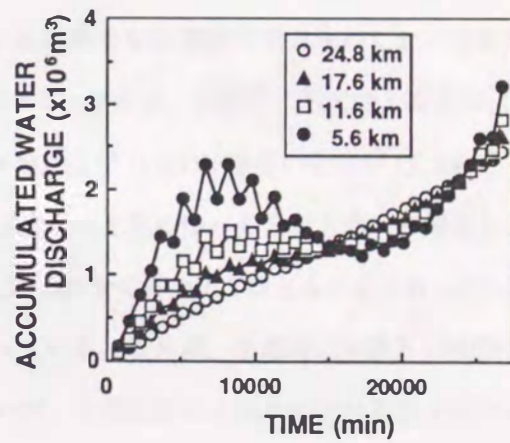
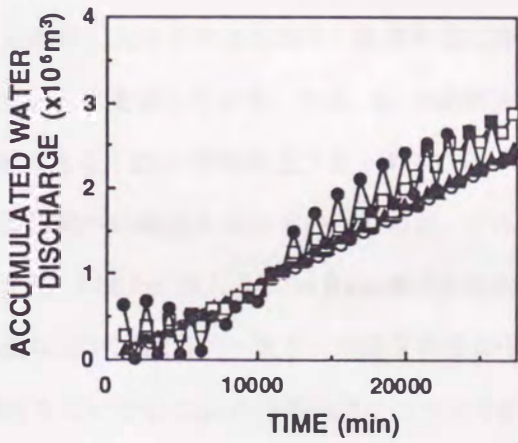


図 4 - 3 4 一潮汐間の平均流量の累積値 (左：干潮基準，右：満潮基準)

て累積輸送フラックスの経時変化を示したものである。

塩化物イオンの一潮汐間の平均濃度の変化は、各地点で半月周期における周期的な変化を示し、5.6 km 地点のものを除いて、小潮時に最小となり、大潮時に最大となっている。一潮汐間の平均輸送フラックスの大きさは、潮汐作用の影響が相対的に大きい強混合型の感潮部では、本章4.3節の図4-15に示したように、瞬間的な輸送フラックスの変化の非対称性の大きさによる。ここでの瞬間的な輸送フラックスの極大値は、5.6 km 地点のもので、小潮時に1,000 kg/s、大潮時には4,000 kg/s程度である。これらの値に比べて一潮汐間の平均輸送フラックスは1桁小さく、各周期での上・下流方向への塩化物イオンの輸送量はほぼつり合っていると見える。塩化物イオンの場合には、その長期的な濃度変化が小さいために、一潮汐間の平均輸送フラックスは前述の流量と同様の変化を示している。したがって、日潮不等の影響が大きい小潮時に、一潮汐間の平均輸送フラックスが大きくなっている。また、累積した輸送フラックスでは、上流側24.8 km 地点の濃度が他の地点に比べて低いために、累積輸送フラックスも小さい。累積輸送フラックスは、計算開始時から比べると半月周期後(24,000分程度)に零となっておらず、正の値となっている。これは、厳密には感潮部水塊内での塩化物イオン濃度分布が長期的な定常状態になっていないことを示しており、断面平均濃度の変化を見ても分かるように、大潮時(18,000分)の濃度が計算開始時の濃度よりやや低いことによるものと考えられる。

次に、SSの輸送特性について検討する。一潮汐間の平均濃度は、いずれの地点でも、小潮時に低く、大潮時に高くなっている。また、大潮時の濃度は、上流側ほど高い。平均輸送フラックスは、小潮時に小さく、大潮時に大きくなっており、流量や塩化物イオンとは異なりSS濃度の半月周期における変化の影響が大きいことを示している。なお、SSの瞬間的な輸送フラックスは、大潮時に最大で上流方向に400~600 kg/sである。SSの累積輸送フラックスでは、5.6 km 地点及び11.6 km 地点のものが15,000分ぐらいまで下流方向への輸送となっていたものが、それ以後SS濃度の上昇に伴って上流方向への輸送となっている。また、17.6 km 地点及び24.8 km 地点のものでは、15,000分ぐらいまでほとんど0であったものが、それ以後はSSが上流方向へ大きく輸送されるようになっていく。これは、小潮時には流れの変動が小さくSS濃度も低いためにSSの平均輸送フラックスは小さいが、大潮前後には流れの非対称性が相対的に大きくなるとともにSS濃度も高くなるためと考えられる。このように半月周期においてSSが上流方向へ輸送されるのは、流量や塩化物イオンが下流方向へ輸送されていたのに対して特徴的である。このSS特有の輸送機構により、感潮部においてSS高濃度塊が形成されているものと考えられる。

(b) 各輸送項についての検討

続いて、式(4.55)に基づいて算定した一潮時平均の輸送量の各項の変化について検討する。図4-

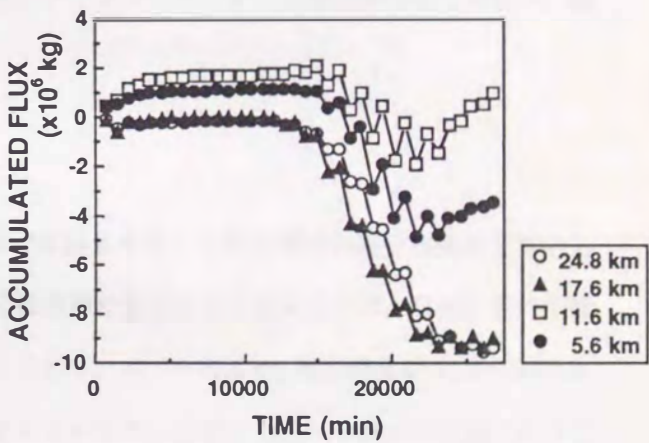
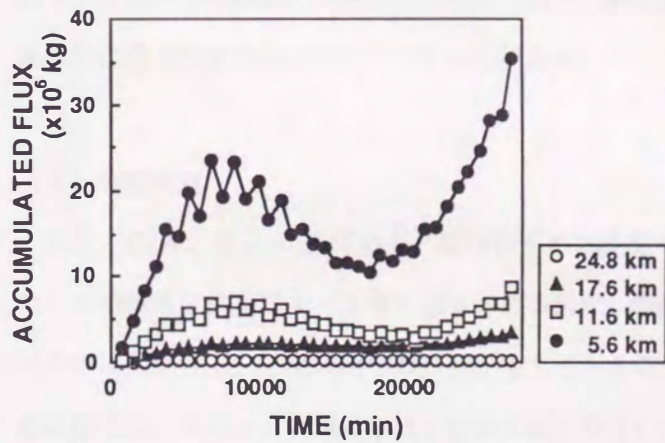
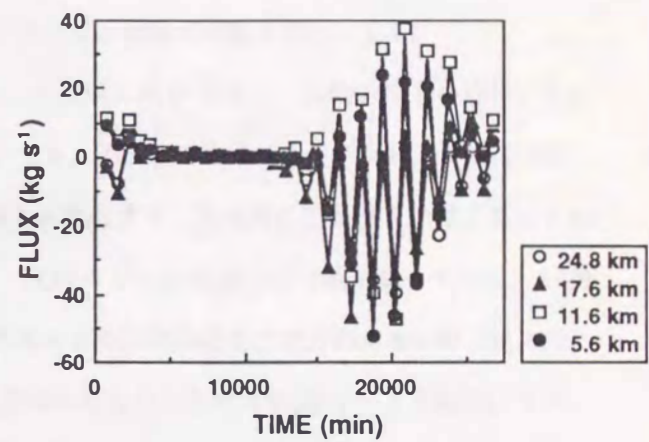
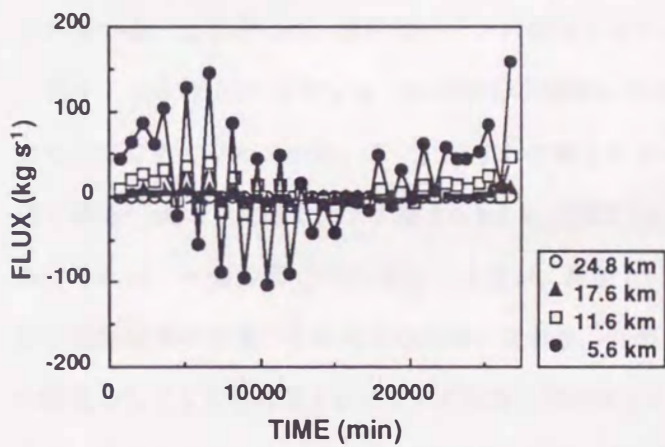
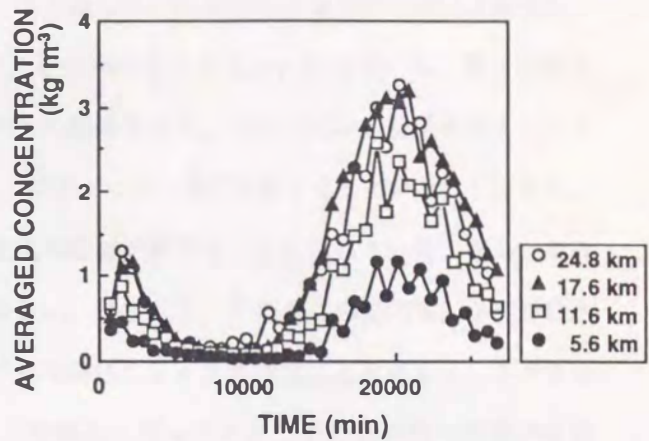
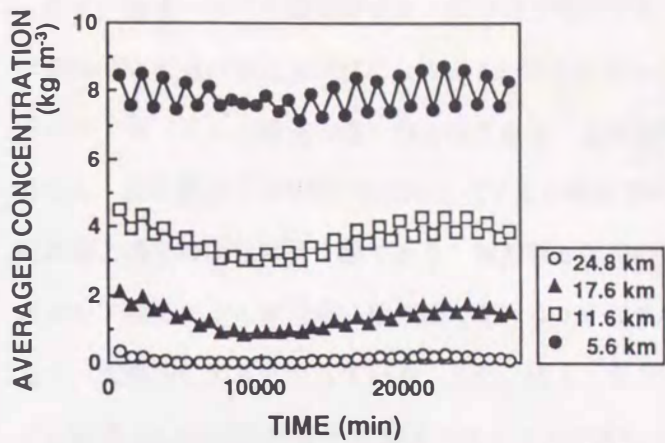


図4-35 塩化物イオンの一潮汐間の平均濃度(上), 平均輸送フラックス(中), 累積輸送フラックス(下)の経時変化

図4-36 SSの一潮汐間の平均濃度(上), 平均輸送フラックス(中), 累積輸送フラックス(下)の経時変化

— 37, 38 は、各地点における塩化物イオン及びSSの各輸送項の時間変化を示したものである。

まず、図4-37の塩化物イオンについて検討する。第1項の河川固有流によるラグランジュ輸送は、一潮時平均流量の変化と同様に、24.8 km 地点を除いて、小潮時の変化が大きくなっている。第2項のタイダル・ポンピング輸送の項は負の値であり、上流方向への輸送を示し、トラッピング効果のあることが分かる。第3項及び第4項の断面積変化による輸送では、前者が正で、後者が負となっている。すなわち、断面積と濃度の変化は同位相であり、断面積と流速の変化の位相が異なることを示している。なお、第5項のシア効果による輸送は、他の項に比べるとかなり小さい。第2, 3, 4の各項の変化は、小潮時に小さく、大潮時に大きくなっている。また、図4-33の平均輸送フラックスの変化と比べると、ラグランジュ輸送 ($Q_0 c_0$) の変化が平均輸送フラックスの変化とはほぼ等しくなっており、その他の項の影響が相殺されている。したがって、塩化物イオンの輸送ではラグランジュ輸送が卓越するといえる。

図4-38のSSの場合では、SS濃度が小潮時に低く、大潮時に高いために、各輸送項も小潮時にはほとんど零に近くなっている。また、いずれの地点においても、第2項のタイダル・ポンピング輸送項が、他の輸送に比べて大きく、下流側 5.6 km 地点及び 11.6 km 地点では、大潮時に正負交互の値になっている。これは、一潮汐間でのSS濃度の変化が、巻き上げ・沈降のために流速の絶対値に従って生じ、SS濃度の変動周期が流速のものの半分になっており、日潮不等による非対称性が上流方向あるいは下流方向への輸送としてどちらに偏るかによって正負の値が交互に現われたものと思われる(図4-16参照)。また、図4-36の平均輸送フラックスの変化と比べ、第2項のタイダル・ポンピング輸送が卓越しており、流速変化に伴う濃度変化が生じているためである。

3) 分散係数

次に、式(4.62)に基づいて、塩化物イオン濃度の計算結果を用い各地点間での縦分散係数を算定した。その経時変化を図4-39に示す。この図で、縦分散係数が負値となっているのは、日潮不等の影響のために見かけ上、下流方向への分散が生じていることを示す。17.6~11.6 km 地点間及び 11.6~5.6 km 地点間では、小潮から大潮にかけて正負の値が交互になっているが、全体としては小潮から大潮にかけては正の値、大潮から小潮では負の値と見ることができる。

図4-40は、塩化物イオンについての一潮汐間の平均輸送フラックスと縦分散係数との関係を示したものであるが、各地点で両者の間に相関が見られる。平均輸送フラックスが見かけ上零となるときを一潮汐間で上下流方向への物質輸送の収支がとれたときと考え、そのときの分散係数は、同図の切片より、上流側地点からそれぞれ $11.1 \text{ m}^2/\text{s}$, $33.6 \text{ m}^2/\text{s}$, $27.3 \text{ m}^2/\text{s}$ となる。これらの値は、前に一潮汐間の現地調査結果を用いて求められた数値とオーダーが一致する。

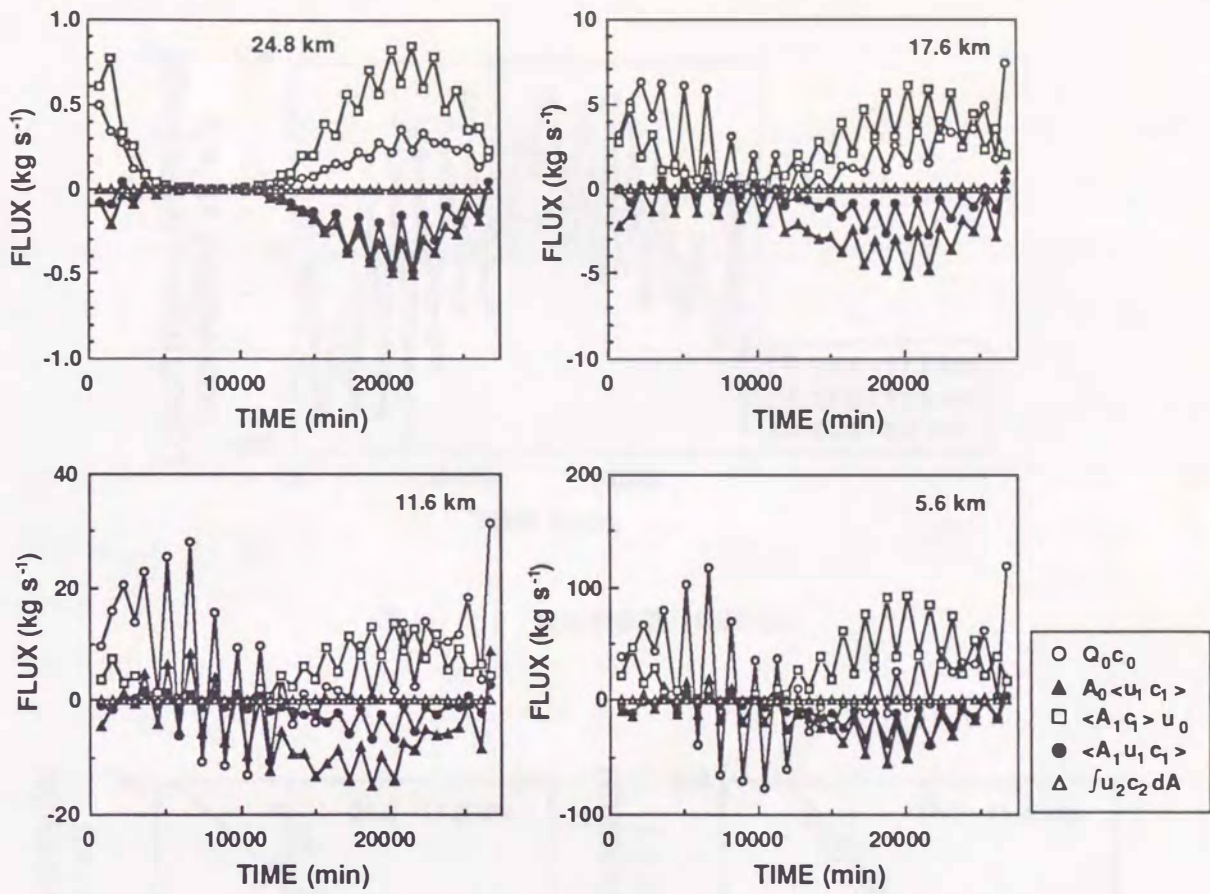


図 4-37 塩化物イオンの各輸送項の時間変化

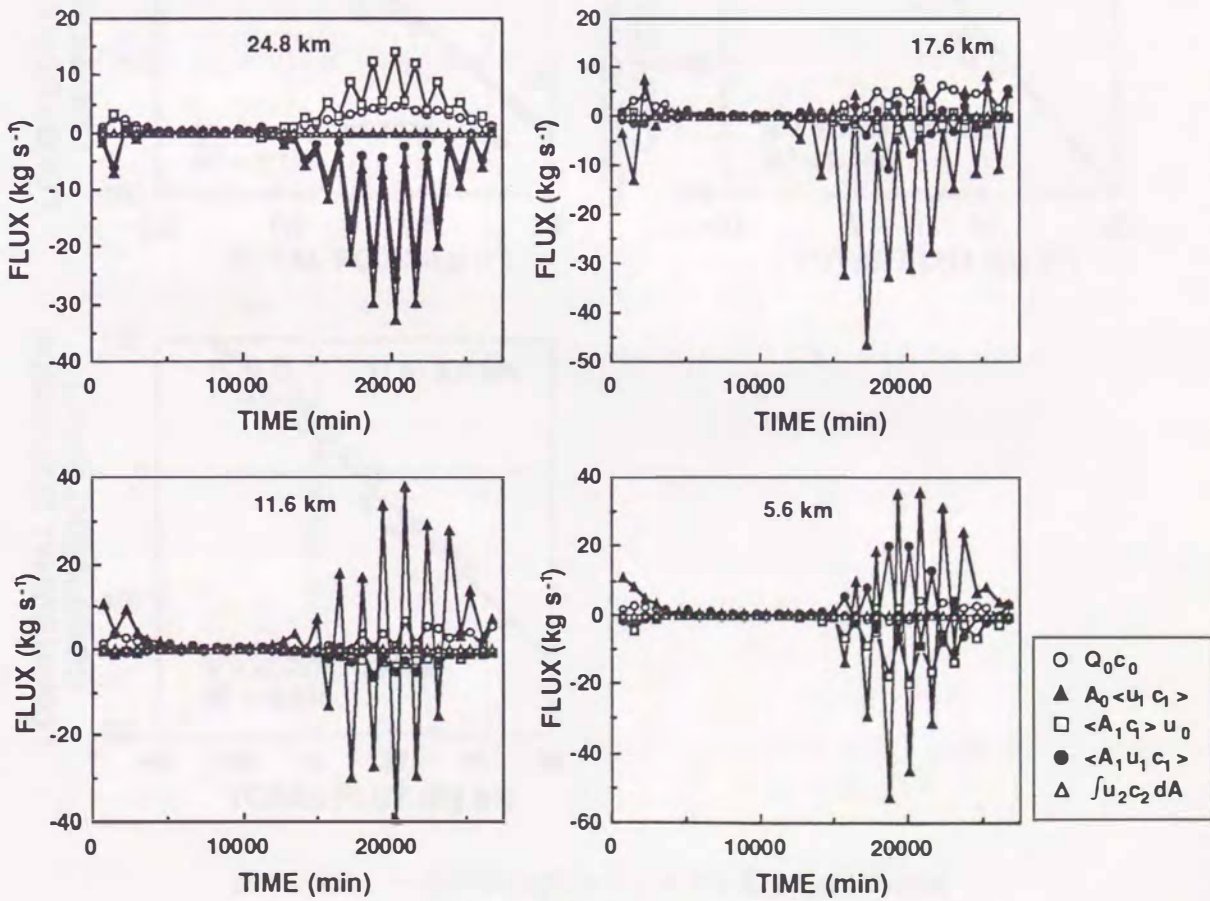


図 4-38 SSの各輸送項の時間変化

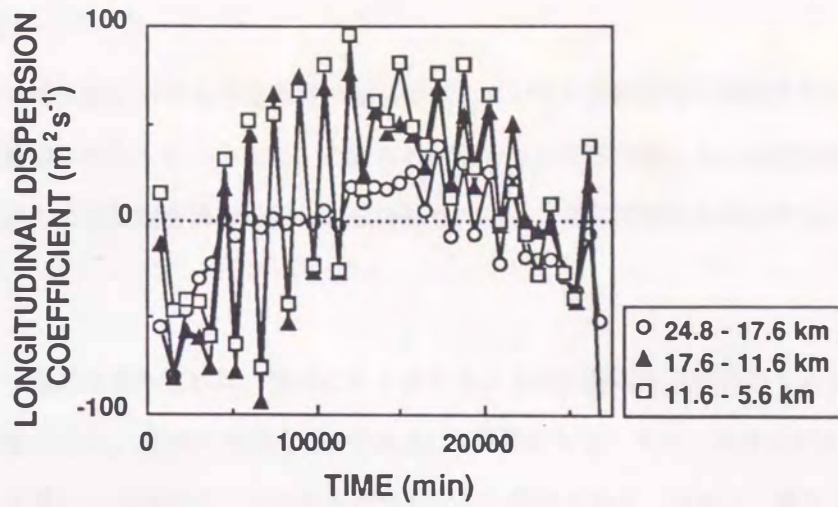


図 4 - 3 9 縦分散係数の時間変化

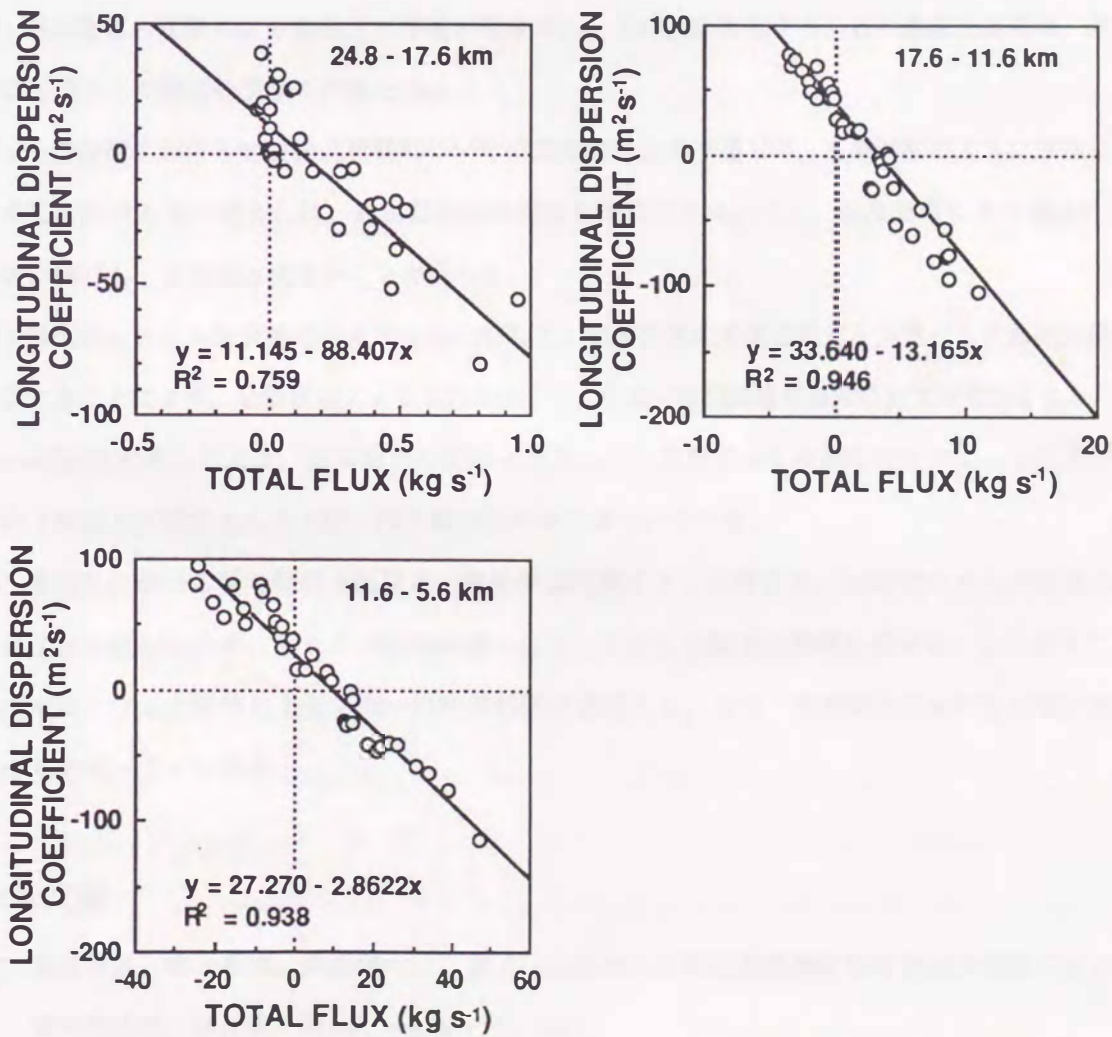


図 4 - 4 0 一潮時平均輸送フラックスと縦分散係数の関係

4. 5 結語

本章では、河川感潮部における懸濁物質の輸送特性についての実験結果を整理するとともに、現地調査により物質輸送機構を検討した。さらに、これらの結果をもとに感潮部における物質輸送現象のモデル化を行い、半月周期での懸濁物質濃度変動の数値計算を行った。ここで得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 流水中での底泥の巻き上げは、底泥にある値を越える底面剪断応力が作用するときを生じる。この限界底面剪断応力は、底泥の固体分率(含水比)の関数となる。また、巻き上げ速度は、この限界底面剪断応力を用いて無次元化した有効底面剪断応力の関数となる。さらに、巻き上げ速度係数は、塩化物イオン濃度の影響を受ける。
- (2) 懸濁物質の静水中での沈降速度は、懸濁液の塩化物イオン濃度にはよらず、SS濃度の関数で表現できる。また、流水中では、SS濃度が時間の経過とともに指数関数的に減少する。
- (3) 懸濁物質の沈降により底面上に浮泥が形成され、さらに底泥化する。この底泥化速度は、浮泥の単位面積当りの懸濁物質量の関数となる。
- (4) 一潮汐間における物質輸送機構についての現地調査結果を通して、本感潮部のように水深に比べて水位変動が大きい場合には、断面積変化の影響を無視できないこと、鉛直循環による輸送は Froude 数に依存し、大潮ほど大きいことが分った。
- (5) 感潮部における物質輸送のモデル化に際して、物質収支式を累加水量を基準とした移動座標系で表現することにより、数値拡散による誤差が減少し、長期的な懸濁物質濃度の計算が可能となる。また、SS高濃度水塊の形成は、懸濁物質の沈降と巻き上げの限界底面摩擦速度の差によって感潮部上流へ向う輸送と浮泥流として下流へ向う輸送の平衡に基づいている。
- (6) 感潮部における懸濁物質の輸送は、流量や塩化物イオンと異なり、SS濃度の変化が流速の絶対値に従って生じるため、それらの位相の違いによって生じる輸送の影響を受ける。したがって、SS濃度が高くなる大潮時に上流方向への物質輸送が卓越する。なお、本感潮部における分散係数は、 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーである。

参考文献

- 1) 海田輝之, 楠田哲也, 粟谷陽一, 二渡了, 古賀憲一; 河口感潮部におけるSSの挙動について, 水質汚濁研究, 第10巻, 第1号, pp.48~55, 1987.
- 2) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 粟谷陽一; 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論

文集, 第393号/II-9, pp.33~42, 1988.5.

- 3) 大坪国順; 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所報告, 第42号, pp.125~146, 1983.3.
- 4) 河村三郎; 土砂水理学 1, 森北出版, pp.79~93, 1982.12.
- 5) Partheniades, E; Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. of ASCE, Vol.91, No.HY1, pp.105~139, 1965.
- 6) Christensen, B. A.; Discussion of erosion and deposition of cohesive soils (by E. Partheniades), Proc. of ASCE, Vol.91, No.HY5, pp.301~308, 1965.
- 7) Ariathurai, R., Arulanandan, K.; Erosion rates of cohesive soils, Proc. of ASCE, Vol.104, No.HY2, pp.279~283, 1978.
- 8) Lambermont, J., Lebon G.; Erosion of cohesive soils, J. of Hydraulic Research, Vol.16, No.1, pp.27~44, 1978.
- 9) 前出 3) に同じ, pp.147~174.
- 10) 滝和夫, 岡正義; 河川底泥の巻き上がり現象に関する基礎的研究, 土木学会衛生工学論文集, 第20巻, pp.41~50, 1984.
- 11) 村岡浩爾; 流れによる底泥浮上と水質との関連, 土木学会第18回水理講演会論文集, pp.181~186, 1974.
- 12) Mehta, A. J., Parchure, T.M., Cixit, J.G., Ariathurai, R.; Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, Estuarine comparisons (V.S. Kennedy ed.), Academic Press, pp.591~609, 1982.
- 13) Trimbak, M. P., Mehta, A. J.; Erosion of soft cohesive sediment deposits, Proc. of ASCE, Vol.111, No.HY10, pp.1308~1326, 1985.
- 14) 細川恭史, 堀江毅, 三好英一, 加藤道康; 沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について—数種の測定法の比較—, 港湾技研資料, No.433, 運輸省港湾技術研究所, 1982.
- 15) 前出 3) に同じ, pp.17~39.
- 16) Van Leussen, W.; Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs a review, Physical processes in estuaries (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.347~403, 1988.
- 17) Mehta, A. J.; Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, Estuarine cohesive sediment dynamics, Lecture Note on Coastal and Estuarine Studies (A. J. Mehta ed.), Springer-Verlag, pp.290~325, 1986.
- 18) 二渡了, 海田輝之, 楠田哲也, 粟谷陽一; 円形回転水路とその流況特性, 九州大学工学集報, 第57

- 卷, 第4号, pp.431~435, 1984.
- 19) 海田輝之; 底泥の巻き上げと懸濁物質の沈降に関する研究, 九州大学学位論文, p.84, 1989.
 - 20) 前出 19) に同じ, pp.27~36.
 - 21) 楠田哲也, 海田輝之, 粟谷陽一, 石原達弘; 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究 (II), 土木学会第18回衛生工学研究討論会研究論文集, pp.152~157, 1982.
 - 22) Mehta, A. J.; Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion, *Physical processes in estuaries* (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.427~445, 1988.
 - 23) 前出 19) に同じ, pp.37~59.
 - 24) 前出 4) に同じ, pp.23~27.
 - 25) Kirby, R.; High concentration suspension (fluid mud) layers in estuaries, *Physical processes in estuaries* (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.463~487, 1988.
 - 26) Odd, N. V. M.; Mathematical modelling of mud transport in estuaries, *Physical processes in estuaries* (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.503~531, 1988.
 - 27) 楠田哲也, 山西博幸, 吉見博之, 二渡了; 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 土木学会海岸工学論文集, 第36巻, pp.314~318, 1989.
 - 28) 平井英二; 化学技術者のためのレオロジー, 科学技術社, pp.45~71, 1978.
 - 29) 前出 3) に同じ, pp.79~103.
 - 30) 佐藤敦久, 陳鴻霞; 上水汚泥の流動特性に関する研究 (I), 水道協会雑誌, 第51巻, 第10号, pp.33~39, 1982.
 - 31) 佐藤敦久, 陳鴻霞; 上水汚泥の流動特性に関する研究 (II), 水道協会雑誌, 第52巻, 第5号, pp.30~41, 1983.
 - 32) 楠田哲也, 二渡了, 古賀憲一, 粟谷陽一; 改良型同心円筒回転型粘度計による粘土懸濁液の流動特性の測定, 土木学会衛生工学論文集, 第21巻, pp.91~98, 1985.
 - 33) 芦田和男, 江頭進治; 泥水密度流に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第237号, pp.37~50, 1975.
 - 34) 玉井信行; 密度流の水理, 新体系土木工学22 (土木学会編), 技報堂出版, pp.127~149, 1980.
 - 35) 土木学会; 水理公式集, 土木学会, pp.60~62, 1985.
 - 36) 古本勝弘, 武政剛弘, 薦田廣章; 二成層閉鎖水域の風に対する内部静振応答, 土木学会論文集, No.429/II-15, pp.37~46, 1991.
 - 37) Dyer, K. R.; Fine sediment particle transport in estuaries, *Physical Processes in Estuaries* (J. Dronkers,

- W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.295~310, 1988.
- 38) Festa, J. F. , Hansen, D. V. ; Turbidity maxima in partially mixed estuaries: a two-dimensional numerical model, *Estuarine and Coastal Marine Sci.*, 7, pp.347~359, 1978.
 - 39) Fischer, H. B. ; Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, *J. Fluid Mech.*, Vol.53, Part 4, pp.671~687, 1972.
 - 40) 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.
 - 41) Uncles, R. J., Elliot, R. C. A. , Weston, S. A. ; Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary, *Estuaries*, Vol.8, No.3, pp.256~269, 1985.
 - 42) Uncles, R. J., Jordan, M. B. ; A one-dimensional representation of residual currents in the Severn Estuary and associated observation, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 10, pp.39~60, 1980.
 - 43) Uncles, R. J., Elliot, R. C. A., Weston, S. A. ; Observation of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 20, pp.147~167, 1985.
 - 44) Hansen, D. V., Rattray, Jr. M. ; New dimensions in estuary classification, *Limnology and Oceanography*, Vol.11, No.3, pp.319~326, 1966.
 - 45) Hinwood, J. B., Wallis, I. G. ; Classification of models of tidal waters, *J. Hydraul. Eng. Div., Proc. of ASCE*, Vol.101, pp.1315~1331, 1975.
 - 46) Bella, D. A., Dobbins, W. E. ; Difference modeling of stream pollution, *J. Sanit. Eng. Div., Proc. of ASCE*, Vol.94, pp.995~1016, 1968.
 - 47) 村上健 ; 拡散方程式の数値計算方法の紹介, *下水道協会誌*, Vol.9, No.100, pp.43~48, 1972.
 - 48) 村岡浩爾, 中辻啓二 ; 河川流の非定常拡散解析における数値誤差の評価, *土木学会論文報告集*, 第319号, pp.77~85, 1982.
 - 49) Wallis, S. G., Knight, D. W. ; Calibration studies concerning a one-dimensional numerical tidal model with particular reference to resistance coefficients, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 19, pp.541~562, 1985.
 - 50) 二渡了, 楠田哲也, 野正博之, 粟谷陽一 ; 感潮河川における懸濁物質の輸送過程のシミュレーション, *九大工学集報*, 第58巻, 第1号, pp.33~40, 1985.
 - 51) 二渡了, 楠田哲也, 野正博之, 古賀憲一, 荒木宏之, 古本勝弘 ; 感潮河川における懸濁物質輸送輸送現象のモデル化に関する研究, *土木学会衛生工学研究論文集*, 第24巻, pp.139~148, 1988.
 - 52) Postma, H. ; Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, *Estuaries* (G.H.Lauff ed.), Amer. Assoc. Adv. Sci. Pub. No.83, pp.158~179, 1967.