

底泥の輸送現象と水質に及ぼす影響

楠 田 哲 也

I. はじめに

河川、湖沼、河口部や沿岸部にもたらされている凝集性微粒子は、依然として増え続け、社会問題、環境問題を引き起こしている。

図-1に示した昭和24年当時の西日本沿岸域における底泥の存在場所と今日問題を引き起こしている場所と比較しても、ほとんど変わらないのは、量的な問題や都市河川のような局所的な場合を除き、水理学的に堆積し易いと

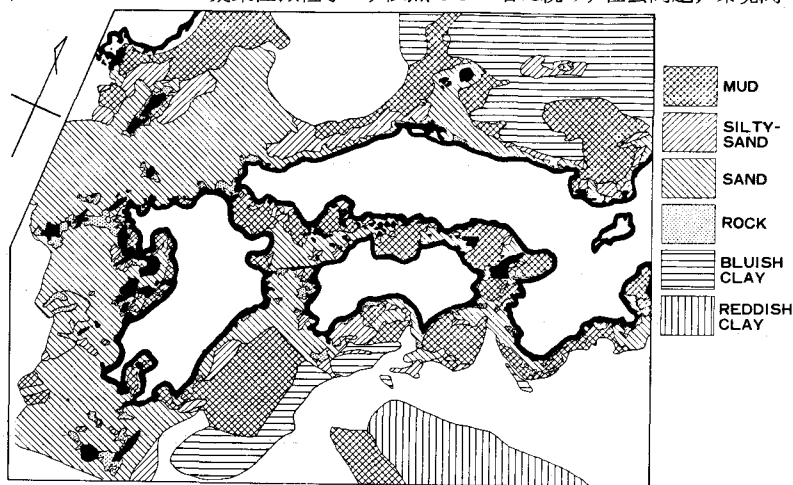


図-1 西日本海底域底泥分布図

(日本近海底質分布図(海上保安庁水路部 昭和24年)を改変)

ころに集積しているからといえる。海外での例、たとえば米国のSavannah川¹⁾、James川²⁾、San Francisco湾^{3,4,5)}、ヴェネズエラのMaracaibo湖へ通ずる水路、イギリスのThames川^{6,7)}、Maas川やMersy川⁸⁾、フランスのSeine川、インドのCalcutta港、インドネシアのBelawan港を見ても同じことがいえる。

これらの場所において、懸濁物質および底泥が引き起こしている問題は、物理的なもののみならず、化学的、生物学的なものにまで広がっている。たとえば、物理的には、航路、港湾、洪水流路への堆積、化学的には、種々の物質の吸着と放出・溶出、生物学的には水中での光量の急速な減衰による植物の生育阻害、有機物分解による溶存酸素の消費、底生生物の生育阻害等である。底泥あるいは懸濁物質が引き起こしているこれらの問題を解決するためには、多方面にわたる研究が必要であるが、特に、底泥及び懸濁物質の流れの場における輸送現象の解明が不可欠である。この現象の解明の努力は、1950年代より盛んとなり現在まで続いている。当初の力学的側面からのアプローチから、生物・化学的なものを含めたものの取り扱いと範囲は広がってきている⁹⁾が、力学的な面でも未解決の問題が依然として残されている。本研修会においても、1970年¹⁰⁾と1974年¹¹⁾に底泥の問題が取り扱われたので、ここでは、その後の展開を中心に物理的な面から見た底泥や懸濁物質の挙動について述べることにする。

II 底泥の輸送現象

1. 概説

陸上から排出された微粒の物質は河川を通して海域に流入する。このとき、水域での水理条件に応じて沈降し得たものがその水域での底泥となる。またその水理条件に応じて再浮上し得たものが流れにのって輸送されることになる。湖沼に流入した沈降性懸濁物質は、一度沈殿した後、次の強風時や出水時に巻き上げられる可能性を有する。ただし、植物プランクトンは日射に応じて上下降を行なうのでこの限りではない。河川に流入したこのような物質も水理条件に応じて下流へと輸送されてゆく。河口感潮部では底泥の輸送現象はかなり複雑で、密度勾配のある場において、河川固有流と潮汐の影響¹²⁾を直接受ける。さらに高次の影響の原因として、潮汐の上げ潮と下げ潮の非対称性、半日周潮の非対称性、大潮、小潮の二周間(大陰暦)の周期、春・秋分を極大値とする半年周期、懸濁物質の空間分布等¹³⁾がある。海域でも潮汐の影響を受けることになる。一方、微粒の懸濁物質はCoulomb力、Van der Waals力や有機物質の粘着力の作用により凝集性を生じるので、再浮上時の揚力は重力とこの凝集力に打勝たねばならず、沈降時にはある水深を沈降するための時間を要することになる。このいずれの作用も懸濁物質の輸送に時間遅れを生じさせることになる¹⁴⁾。したがって底泥の輸送現象は一般に非線形現象となる。このように複雑な底泥の輸送現象を支配する要因には次のようなものが考えられる。

① 固体粒子及び泥としての性質

粒度分布(フロック粒度分布)、粒子密度(フロック密度)、粒子形状(フロック形状)、凝集性、フロック強度、沈降速度、含水率、コンシステンシー限界、CEC、 ζ 電位、降伏値、塑性粘度、含有物質の種類と量

② 流体の性質

分子粘性係数、密度、溶解性物質の種類と濃度、水温

③ 水理学的特性

流速分布、密度勾配、渦動粘性係数、渦拡散係数、粗度を含む境界条件

④ 気象条件

風向、風速、日射量

⑤ その他

底泥の存在量、流入出力

力学的側面からとりまとめたものを図-2⁷⁾に示す。底泥の輸送現象を取り扱うにあたっては、対象としての水域や泥の特性に応じてこれらの関係を単純化して取り扱うことになる。

2. 底泥の物性

a) 底泥の密度

底泥が無機質から構成されていると、その密度は通常2.6前後である。有機物の含有とともに密度は低下し、湖沼泥では密度が2.1~2.5となる。

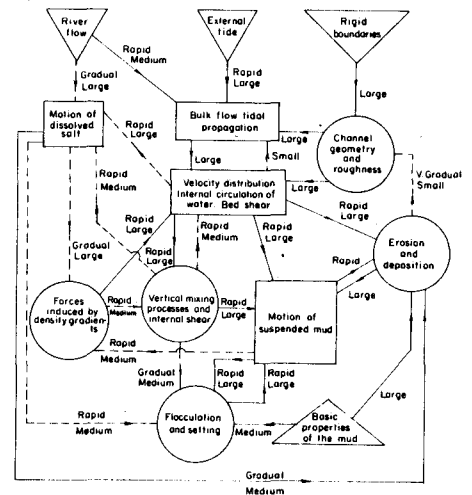


図-2 底泥の輸送現象の力学的関係
(Oddらによる)

b) 底泥の粒度分布, コンシステンシー限界, 強熱減量率

代表的な底泥の粒度分布, コンシステンシー限界, 強熱減量率 (灼熱減量比, VSS) を表-1に示す。砂粒ではなく底泥と見なされるものは, 平均粒径が $10\mu\text{m}$ 前後のシルト分が主成分になっている。海域の底泥の方が湖沼のものより平均径 (d_{50}) は小さい傾向にある。この表以外に東京湾泥²²⁾ や霞ヶ浦泥²³⁾ について詳しく調べられた例がある。

c) 底泥の流動特性

シルト分や粘土分を主成分とする底泥のレオロジー的性質は, その含水比に大きく支配される。含水比が極めて低い場合 (塑性限界以下) には固体に近い性質を, 液性限界程度までの含水比では塑弾性を, それを超えるとビンガム体のようになり, さらに含水比が高くなると粒子混相流としてのニュートン流体に近くなる。底泥のレオロジー的性質は僅かの含水比の変化により大きく変化する。底泥が流動するかしないか, するとすればその速さはどの程度かという流動特性は, 流水中での底泥 (浮泥) そのものの水平輸送量の算出や浚渫底泥の処分地への輸送時の粘性抵抗の算定に直接的に関係する。一方この流動特性を底泥 (浮泥) の限界掃流力や巻き上げ速度を表現するための指標としようとする試みもある。前者の試みとして, プレパクトコンクリートモルタル用コーンフロー試験装置を底泥に応用したもの²⁴⁾ がある。この結果によると, ある含水比でフロー値が急上昇するという使い辛さはあるが, 流動それ自身の判定には役立つようである。後者のものとして, 大坪による研究²⁵⁾ がある。通常の自然界に存在する底泥は図-3のような $\tau-\dot{\gamma}$ の関係を示す。 τ_{y2} はビンガム降伏値, η_2 は塑性粘度といわれている。大坪は市販の回転粘度計を用いて $\dot{\gamma}$ を時間変化させて, 種々の底泥について $\tau-\dot{\gamma}$ 曲線を求め, 図-4, 5の結果を得た。また, 初高 H_0 の底泥を144時間沈積させたときの最終高 H との比と η_1 についての関係も図-6のように求めている。図-4によれば, η_1 は含水比 w のほぼ3乗に比例しているようである。図-5においては $\tau_{y1} \sim \eta_1$ となっている。さらに τ_{y2} と η_2 についても類似の関係が得られることを示している。また図-6によれば, 最終沈降体積の比率が小さいものほど η_1 が小さくなっている。以上のいずれの結果も, 回転粘度計によって得られたものであるがこの装置を用いたときに生じる壁面におけるslip, 粗度, 壁面間距離の問題は残されているようである。

表-1 底泥の粒度分布, コンシステンシー限界及び強熱減量率

底泥名	平均粒径 d_{50} μm	強熱減量率 V.S.S %	コンシステンシー限界			粒度分布			文献
			P.L.	L.L.	Ip	粘土分	シルト分	砂分	
カオリン (ASP-600)	0.64	—	36	65	29	100	0	0	16
ベントナイト	10.0	1.6	33	187	154	25	71	4	15
霞ヶ浦	11.0	17.1	71	213	142	33	66	1	15
因幡沼	9.5	10.6	69	206	137	29	71	0	15
手賀沼	17.5	14.2	83	253	170	15	81	4	15
諏訪湖	7.5	14.3	81	232	151	40	59	1	15
名古屋・中川運河	15.0	11.4	39	120	81	36	42	22	15
大阪堂島・船津橋	40.4	7.7	34	59	25	13	52	35	15
寝屋川・放出橋	54.0	2.0	—	—	—	0	6	94	15
筑後川河口	6.7	12.0	41	99	58	40	56	4	17
豊前海	2.0	7.7	46	103	57	62	37	1	18
San Francisco湾	1.1	—	—	—	—	74	26	0	19
Maracaibo水道	19.5	—	—	—	—	34	49	17	20

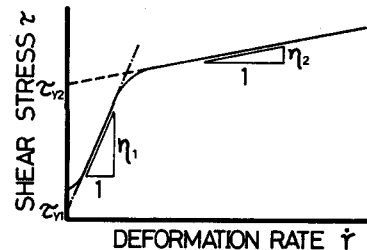


図-3 $\tau-\dot{\gamma}$ 曲線

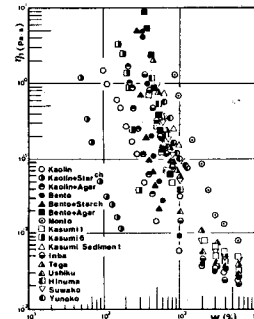


図-4 粘度 η_1 と降伏値 τ_{y1} の関係 (大坪による)

3. 静水中での懸濁物質の沈降と沈殿

静水中における微細粒子の沈降速度 w_s は Stokes 式によって求めうる。

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

$$\frac{w_s d}{\nu} < 0.5 \quad (1)$$

ここに ρ_p : 粒子密度, ρ_w : 流体密度, μ : 分子粘性係数, g : 重力の加速度, d : 粒子径である。

微粒子がフロック状になっている場合は

$$\rho_p - \rho_w \sim d^{-n}$$

$$n = 0.5 \sim 1.0$$

となるので

$$\frac{w_s}{w_{s0}} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^{1.0 \sim 1.5} \quad (3)$$

となる。ここに粒径 d_0 の粒子の沈降速度を w_{s0} とする。

筑後河口底泥で形成したフロックでは $w_{s0} l / d_0 = 1.5 \text{ sec}^{-1}$

$n = 1$ となり

$$w_s = 1.5 d \quad (\text{CGS 系})$$

の関係にある。この関係は G 値 (ϵ を単位質量当りの乱れエネルギー散逸速度, μ を分子粘性係数とするときの $\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$ の値) によらない²⁶⁾。静水中における懸濁物質群の沈降速度は化学工学分野を中心に数多くの研究者により研究されている。界面沈降を生ずる濃度領域では, 単粒子沈降速度を w_s , 界面の沈降速度を w_i , c を固体分率とすると $\frac{w_i}{w_s}$ は $(1-c)$ の指数形として与えられ,

$$\frac{w_i}{w_s} = (1-c)^{-n}$$

$$n = \begin{cases} 4.65 \cdots \cdots \text{層流状態} \\ 2.97 \cdots \cdots \text{遷移領域} \\ 2.32 \cdots \cdots \text{乱流} \end{cases}$$

となる²⁷⁾。

流体が塩分を含む場合には, 塩分濃度により沈降速度が変化する。これは Migniot²⁸⁾, Owen, 等により求められている。Owen が Severn 川の Avonmouth の底泥を用いて求めた例²⁹⁾ を図-7 に示す。自

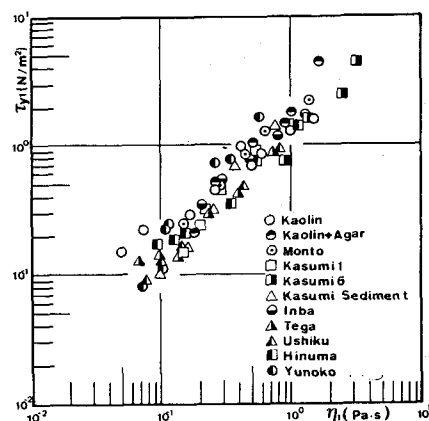


図-5 粘度 η_1 と含水比の関係 (大坪による)

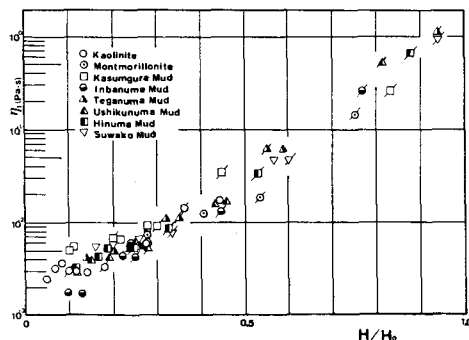


図-6 最終沈降体積比(144時間後)と粘度 η_1 との関係 (大坪による)

由沈降の領域では淡水から海水程度までの範囲で、塩分濃度が高いほど、また懸濁物質濃度が高いほど、沈降速度が大きくなっている。沈降速度の値は底泥の違いによりかなり異なるので、実験にて直接確かめねばならない。図—8

のように、沈降した粒子が底面に堆積すると底泥層ができ

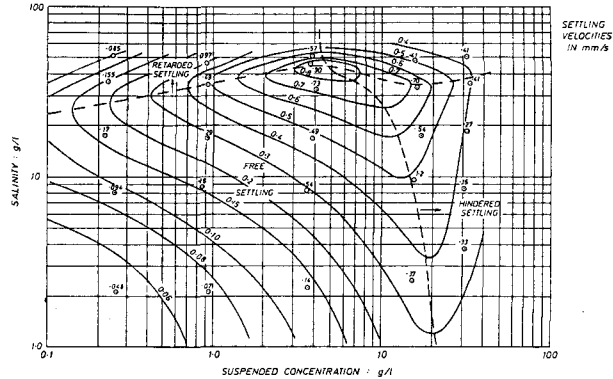
あがる。鉛直方向の底泥の含水比は有効応力と過剰間隙水圧の作用により決定される。圧縮（圧密）沈降中の底泥含水比は底部から早期に減少し始め、それが上方へ進行し底泥の自重が有効応力に等しくなると含水比の減少が停止する³⁰⁾。Kynchの理論³¹⁾では、底泥層厚は沈降初期では10%程度の誤差で推定し得るが、含水比の分布については基本的考え方が異なっているため、その推定値はかなりの

誤差を有する。カオリンの沈降界面の低下曲線と各時間における固体分率の例を図—9 a, b に示す³²⁾

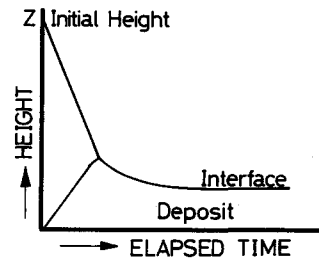
4. 底泥の再浮上と沈降現象

a) 巻き上げ時の限界掃流力

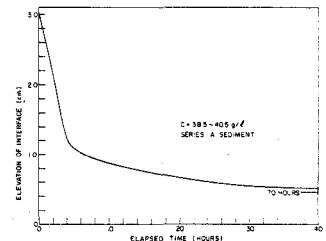
底泥上に水を流すとき、流速を徐々に増していくと、表層の粒子が移動し始める。さらに流速を増すと底泥が小さな塊として浮上していく。底泥が巻き上げられ始めるときの剪断応力を限界掃流力と名付けているが「巻き上げられ始めるとき」という表現には曖昧さがある。底泥表面のいくつかの粒子が移動し始めたとき（Surface erosion といい、このときの剪断応力を τ_{ce1} とする）なのか、巻き上げ速度曲線の剪断応力0への外挿値をとるのか、あるいは塊として大きく巻き上げられていくとき（massive erosion といい、 τ_{ce2} とする）なのか種々の定義法がある。この他の例として、馬場³³⁾らは、ヘドロが水中で雲状になることを限界掃流力と定義している。限界掃流力は、凝集力の作用しない砂粒子の場合には粒子の水中重量と鉛直上向きの力との平衡により表わされるが底泥の場合には、これらの他に粒子間凝集力を考えねばならない。しかもこの凝集力は底泥粒子の水中重量より1オーダー以上大きいことが多い。この凝集力の表示法が未だ確立されていないので非凝集性粒



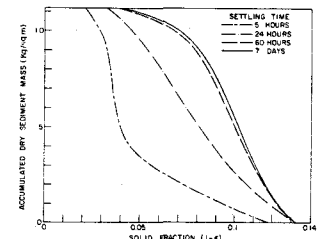
図—7 懸濁物質の沈降速度（Owen による）



図—8 懸濁物質の沈殿



図—9(a) 懸濁物質の沈降曲線



図—9(b) 堆積底泥の固体分率の分布

子に適用されるShields diagram に相当するものは、凝集性粒子の場合には得られていない。この凝集力の直接的推定がなされえないので、これに代る力学的指標を用いて間接的に限界掃流力を表わそうとする試みがなされている。Migniot²⁸⁾ は限界掃流力 τ_{ce1} を降伏値 τ_{y1} と関連付け

$$\left. \begin{aligned} \tau_{y1} > 2 \text{ N/m}^2 \text{ のとき } \tau_{ce1} &= 0.256 \tau_{y1} \quad (\text{N/m}^2) \\ \tau_{y1} < 1 \text{ N/m}^2 \text{ のとき } \tau_{ce1} &= 0.316 \tau_{y1}^{1/2} \quad (\text{N/m}^2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となることを実験的に示した。上式の関係が我国の湖沼泥にも適用できることが大坪²⁵⁾ によって確かめられている。大坪²⁵⁾ はまた、

$$\tau_{ce2} = 0.79 \tau_{y1}^{0.94} \quad (7)$$

$$\tau_{ce1} = 0.357 \eta^{0.59} \quad (8)$$

の関係をも与えている。しかし、(6)、(7)、(8)式の τ_{y1} 、 η_1 は前述のように測定に問題が残されたものである点に留意を要する。限界掃流力をコンシステンシー指標と関連付ける試みもある。たとえば、Smerdonら³⁴⁾ は土壌浸蝕に関連して巻き上げの限界掃流力 τ_{ce} を塑性指標 I_p を用いて

$$\tau_{ce} = 0.0034 I_p^{0.84} \quad (9)$$

としている。その他にバーン剪断強度と限界掃流力とを関連付けようとしたもの³⁵⁾ もあるが必ずしも適切に表現できていない。^{36,37)} また、水中での底泥の安息角と限界掃流力とを関連付けようとしたものもある²⁸⁾。このような考察は農地の浸蝕^{38,39)} や山地の浸蝕⁴⁰⁾ に関してかなり行なわれ43いる。水域の底泥の性質は多様性に富むので限界掃流力を一義的に定めうるまでには至っていないが、底泥が同一である限り、限界掃流力は含水比の関数となり、含水比の増加につれて限界掃流力は低下する。底泥の限界掃流力はほぼ $0.05 \sim 1 \text{ N/m}^2$ の範囲にある。^{16,41,42)}

b) 底泥の巻き上げ速度

泥の含水比をやや高めに調整し、底泥として水路床に敷き、ある剪断応力のもとで巻き上げ実験を行なうと、実験開始後20~30分間ほど急速な巻き上げを示す。その後巻き上げ速度は急激に低下する。ただし、その巻き上げ速度が零になることはなく、実験継続中底泥の巻き上げは続く。ただし数時間という時間範囲で見ると、急激な巻き上りの終了後の巻き上り量はそれ以前の部分の量に比べて少なく工学的には無視しえる場合が多い。筑後川河口泥を用いた実験例⁴³⁾ を図-10に示す。巻き上げ速度が20分程度で急激に低下するのは、上層水からの懸濁物質の沈降と巻き上げの速度が平衡に

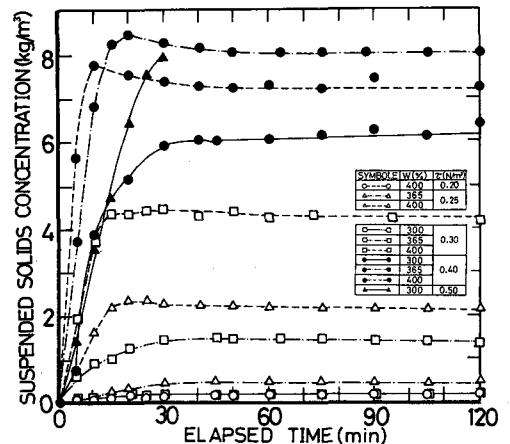


図-10 筑後川河口泥の巻き上げ

近づいたのではなく、①図-10のデータによれば急速な巻き上げが終了するまでの時間を t 、そのときの剪断応力を τ 、塑性粘度を η_s とすると、 $\tau t / \eta_s$ がほぼ一定値をとること、②図-11に示すように、実験終了時の含水比の鉛直分布が底泥表層部で減少していること、等から底泥の表層部の水平流動による粒子構造の変化により含水比が減少し表層が硬化したことによるといえる。勿論底泥に砂分が混入しているときには armoring が生じる⁴⁴⁾。表層硬化の効果は剪断応力を段階的に変化させた場合に顕著に現われる。図-12はカオリンを用いた場合の例³²⁾である。30分毎に剪断応力を増加させた場合のある剪断応力における一たとえば 0.35 N/m^2 —巻き上げ速度と当初からその剪断応力をかけた場合の巻き上げ速度は全く異なる。

実験開始時の巻き上げ速度 $E_{t=0}$ は

$$E_{t=0} = \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_{ec1}} - 1 \right)^n \quad (10)$$

で与えられ、筑後川河口泥⁴³⁾で、 $\alpha = 0.039 \text{ kg/m}^2 \text{ min}$ 、 $n = 1.7 \sim 2.0$ 、カオリン³²⁾で $\alpha = 0.12 \text{ kg/m}^2 \text{ min}$ 、 $n = 1.8$ 、貯水池泥⁴⁵⁾で $\alpha = 0.18 \text{ kg/m}^2 \text{ min}$ 、 $n = 1$ である。大坪²⁵⁾は①剪断力はガウス分布を示し、②底泥と水の界面直下の粒子塊が一層ずつ剪断応力によるずれ、によって剥れていく、として式(11)を導いている。この式の係数は連続的に剪断応力を変化させて底泥を巻き上げる方法によって得られている。

$$E = 0.75 P_0 \left\{ 1 + \frac{\sigma}{\tau} \frac{\phi(y_c)}{P_0} - \frac{\tau_c}{\tau} \right\} \quad (11)$$

ここに、 $P_0 = \int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy$ 、 $\int_{\frac{\tau}{\sigma}}^{\infty} \phi(y) dy$ 、 $y_c = \frac{1}{\sigma} (\tau_c - \bar{\tau})$ 、 $\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)$ 、 $y = (\tau - \bar{\tau}) / \sigma$ 、 σ ：剪断応力 τ の標準偏差、 $\bar{\tau}$ ：平均剪断応力。

一般に巻き上げ速度は周囲温度が上昇するほど大きくなる^{46,47)}。

またCECが大きいほど、あるいは、間隙水中の $[\text{Na}^+] / \frac{1}{2} ([\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}])$ が小さいほど、巻き上げ速度は小さくなる^{47,48)}。底泥の含水比がかなり低い場合に剪断応力を大きくすると底泥はLayer by Layerで巻き上げられるのではなく、ある塊りとして巻き上げられていく。このような場合の検討は少なく⁴²⁾、類似のものとして山地や農地の浸蝕に関するものがある^{39,40)}。逆に含水比がかなり高く、水中において容易に流動する場合には密度流の連行現象に類似となる。

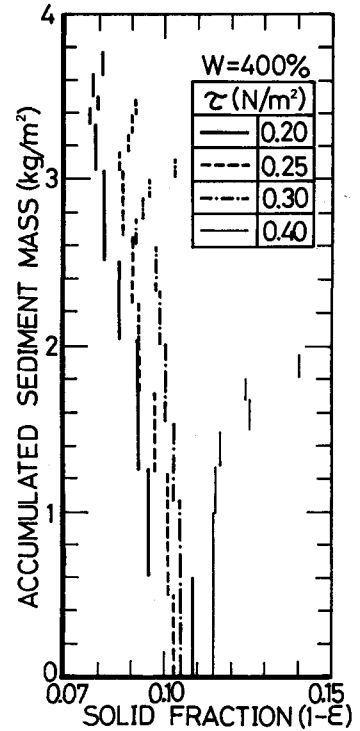


図-11 筑後川河の巻き上げ実験時含水比の鉛直分布

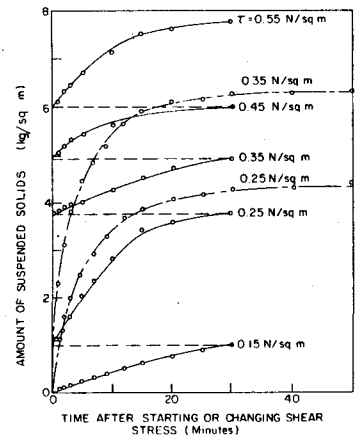


図-12 巻き上げ速度の応力履歴による差

c) 流水中における懸濁物質の沈降速度

筑後川河口泥についての実験結果をもとに、流水中での懸濁物質の沈降について述べる。^{17,49)} 流水中の懸濁物質の沈降フラックスは、極端な干渉沈降でない限り、通常初濃度に比例する。この例を図-13⁴⁹⁾に示す。0.05N/m²の剪断応力のもとで懸濁物質を沈降させると C_{∞}/C_0 (C_{∞} :最終濃度, C_0 :初濃度)の値は、初濃度10kg/m³程度までは、 C_0 によらず、0.2前後の値をとっている。この比の値は剪断応力や懸濁物質の種類による。流水中での懸濁物質濃度は洪水時を除いて一般的にみて10kg/m³を越えることはないので、懸濁物質の沈降現象は工学的には濃度に関して線形とみなしてさしつかえない。初濃度を2kg/m³と一定にして剪断応力を変化させると図-14⁴⁹⁾に示すように、懸濁物質濃度は急速に減少した後、ある濃度 (C_{∞}) に落ち着く。剪断応力が同一ならば、 C_{∞}/C_0 は C_0 によらず一定となることから、沈降フラックスと沈殿物の再浮上フラックスとが平衡して C_{∞} が決められるのではないことが解る。

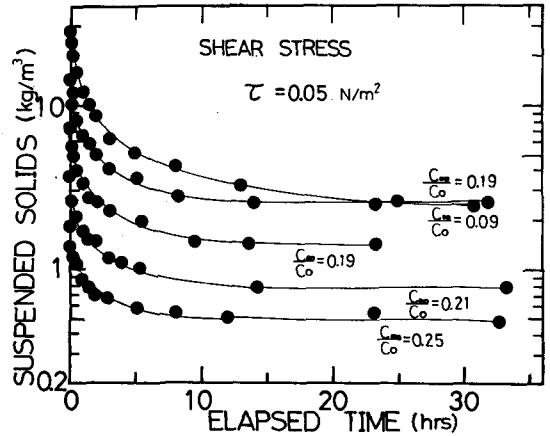


図-13 筑後川河口泥の初濃度をかえた場合の沈降

また、剪断応力に対応して決まる沈降可能物質のみが沈降するともいえる。懸濁物質の流水中での沈降では、初期に流水中に存在した懸濁物質が、実質上すべて沈降する最大剪断応力 τ_{cd} が存在し、この例の場合には、ほぼ

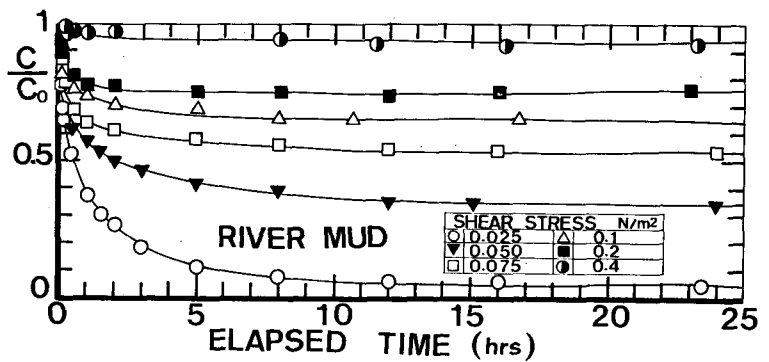


図-14 筑後川河口泥の沈降曲線

0.025N/m² となっている。 C_{∞}/C_0 が頂度 $\frac{1}{2}$ になるときの剪断応力の値を $\tau_{1/2}$ とすると、懸濁物質によらず、

$$\frac{C_{\infty}}{C_0} = f\left(\frac{\tau - \tau_{cd}}{\tau_{1/2} - \tau_{cd}}\right) \quad (12)$$

として、同一の関数で統一的に表現できるようである。沈降時の限界掃流力 τ_{cd} は、同一粒子を対象とする場合、巻き上げ時の限界掃流力 τ_{ce} より小さい。流水中に残留している懸濁物質は図-15に示すように粗なものから沈降していき最終的にある粒度分布になって変化しなくなる。懸濁物質濃度を予測す

る式を得るために、①

$w_s/u_* \ll 1$ であることから流水部を粘性底層とそれより上層部の完全混合と仮定された層に二分割しうる、②上層水中の懸濁物質濃度の減少量は粘性底層と上層部との境界面を通過する粒子フラックスにより決定される、③

粘性底層内で壁面の影響により d^2 に比例する揚力が粒子に生じる、④粘性底層内でフロックは破壊され、この層内での粒度分布は、懸濁物質の分散した粒度分布に近くなる、⑤この粒度分布は対数正規分布で表わされる、との仮定をおくと、濃度予測式は、

$$\left. \begin{aligned} C &= C_\infty + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp \left\{ -\frac{y^2}{2} - T e^{2\gamma y} + \zeta T e^{\gamma y} \right\} dy \\ C_\infty &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left(-\frac{1}{2} y^2 \right) dy \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここに、 $T = \beta d_{50}^2 t/H$, $\gamma = \ln \sigma$, $\zeta = d_c/d_{50}$, $y = \log(d/d_{50})/\log \sigma$, $x = \log(d_c/d_{50})/\log \sigma$, $\beta = (\rho_p - \rho_w)g/18\mu$, H : 水深, d_c : ある剪断応力で沈降しえない最大径, $\log \sigma$: 粒度分布を対数正規分布で表わしたときの標準偏差, である。この計算結果は図-16に示すとおりである。図-17に示す実測例 (図-14のものから C_∞ を差し引い

て無次元化したもの) とはストークスの沈降速度に係数0.7を乗ずればほぼ一致する。これは粒子形状が球形でないことに由来すると考えられる。 C_∞ の値の推定は式(13)に示したように粒径 (d_c) 以下の粒子は沈降しないの

で、この d_c と u_* との関係が定められていればもとの粒度分布式から求めることができる。この関係を図-18に示す。

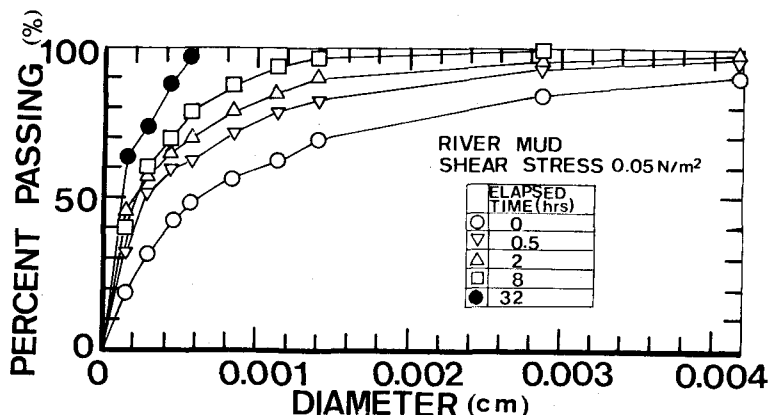


図-15 上層水の懸濁物質の粒度分布の時間変化

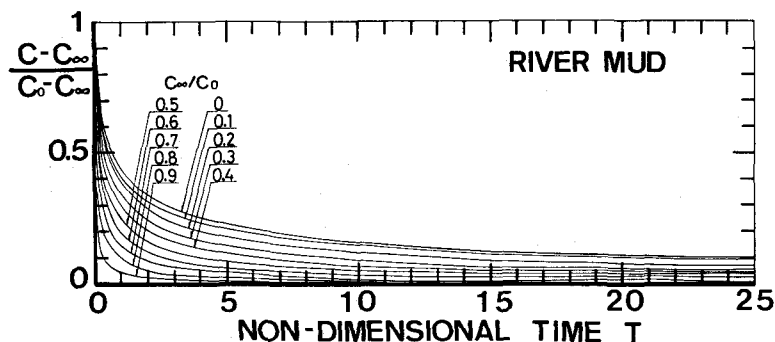


図-16 計算による沈降時の濃度変化曲線

懸濁物質濃度の式と
してKrone²¹⁾はSan
Francisco 湾泥を用
いて、

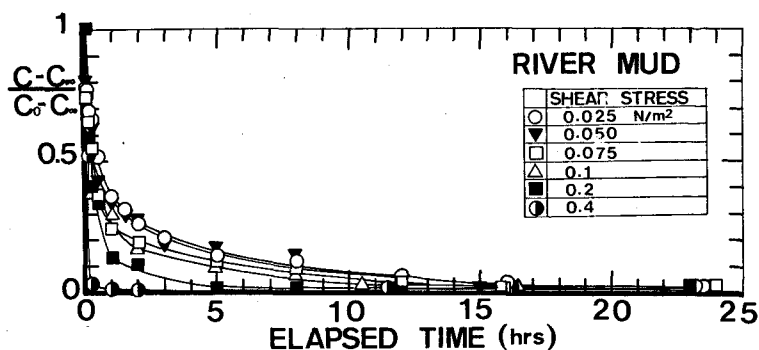


図-17 実験による沈降時の濃度変化

$$\frac{C}{C_0} = \exp \left\{ \frac{w_s t}{H} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd1}} \right) \right\} \quad \dots C \leq 0.3 \text{ g/l} \quad (14)$$

$$\log C = -\frac{103}{H} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd2}} \right) \log t + \text{const.} \quad \dots (\text{CGS系})$$

$$\dots 0.3 \text{ g/l} < C < 10 \text{ g/l} \quad (15)$$

を与えている。ここに、 H :水深、 $w_s = 6.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $\tau_{cd1} = 0.6 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\tau_{cd2} = 0.78 \text{ dyne/cm}^2$ である。これらの式に C_∞ が存在しないのは、途中でポンプを備えた循環式水路を実験に用いたため、沈殿が水路以外でも生じたことによると推定される。

c. 周期的に変化する剪断流場における底泥の巻き上げと沈降

筑後川河口泥を用いて360分周期で、最大剪断応力を 0.4 N/m^2 として、剪断応力をSine曲線で変化させた場合の、懸濁物質濃度が定常的に変化するようになったサイクルの例を図-19に示す。この図において、変化は反時計回りに生じている。図の右上つまり剪断応力が最大になったところから、剪断応力が減少していく過程では濃度の僅かの増加が 0.25 N/m^2 付近まで続いた後、減少に転じ、剪断応力が零とな

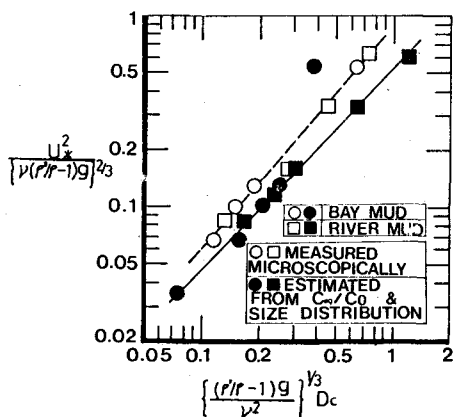


図-18 U_* と d_c との関係

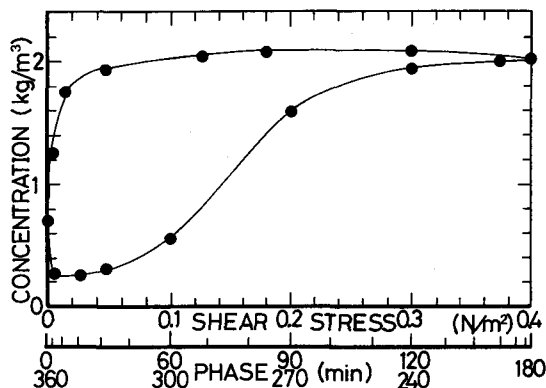


図-19 周期的に変化する剪断流における懸濁物質濃度変化

る30分前、つまり $\tau=0.025\text{ N/m}^2$ あたりからフロック化が生じ急激に減少している。剪断応力が増加に転じ40分後つまり $\tau=0.05\text{ N/m}^2$ 付近から底泥が巻き上げられ始め、増加率が最大に達した後減少し、剪断応力最大付近で増加率は零に近くなる。剪断応力に応じて巻き上げ速度が増加しないのは底泥の含水比に鉛直分布があること、巻き上げ時に粘土粒子間構造の変化があること、等による。また、この場合沈降が生じ始める剪断応力は、巻き上げが生じ始める剪断応力よりも大きくなっている。沈降速度、巻き上げ速度と剪断応力の関係を図-20に図示する。河口感潮部における底泥の輸送現象について考察を加える際には巻き上げと沈降の各々の継続時間が問題となる。

5. 河口感潮部における実測例

河口感潮部における水理諸量、塩分濃度、懸濁物質濃度、水質諸量等についての連続観測の例は余り多くない。多摩川についての例⁵⁰⁾もあるが、ここでは建設省によって調査された結果⁵¹⁾をもとに筑後川の例について述べる。筑後川は有明海に注ぎ、大潮時には強混合を示す。河口より19km付近まで塩分が遡上し、25km付近まで感潮区間となっている。最大潮位差は6mに及ぶ。平常の固有流量は $60\text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。筑後川本川河口より0, 6, 10, 18kmにおける1967年9月1日の計測結果を図-21~24に示す。このとき強混合状態であり塩分の鉛直方向分布は一様であった。

これらによると、6km, 10km地点での懸濁物質濃度は流速の大きいとき、特に上げ潮時に大きくなっていることが解る。0km地点では、懸濁物質濃度の極大は明瞭でなく、海域から懸濁物質が入り込んでいる様子を示している。0~6km地点間、10~18km地点間において各々の区間内で巻き上げと沈降のいずれが生じたかを物質収支から求めたものを図-25, 26に示す。実線は、その時刻における懸濁物質の存在量であり、破線は1時間前の懸濁物質の存在量に流入量と流出量の差を加えたものである。後者が前者より大きいと沈降を示すことになる。観測期間中の干潮から次の干潮までに輸送された懸濁物質

量は、0km地点で上流へ71t, 6km地点で上流へ730t, 河口部では上流へ懸濁物質が輸送されている。上流からかなりの懸濁物質の供給がない限りこのことは一般的に正しい。⁵²⁾ 巻き上げおよび沈降開始時の剪断応力を表-2にまとめている。巻き上げの限界掃流力の方が沈降のものより小さくなっている場合もある。河口から海域への拡がりの例については文献53)~56)を、河口部における粒子の凝集については、

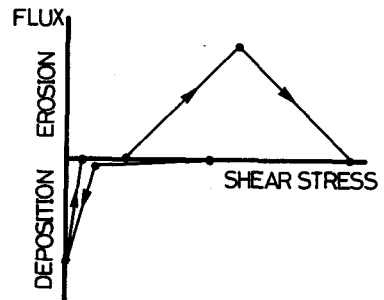


図-20 模式化したフラックスと剪断応力の関係

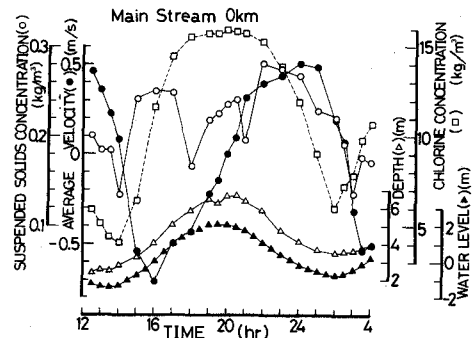


図-21 筑後川河口における実測結果

文献57)を参照されたい。

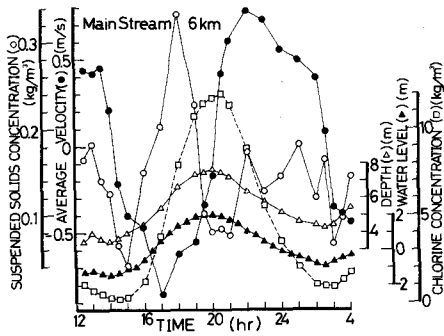


図-22 筑後川 6km地点における実測結果

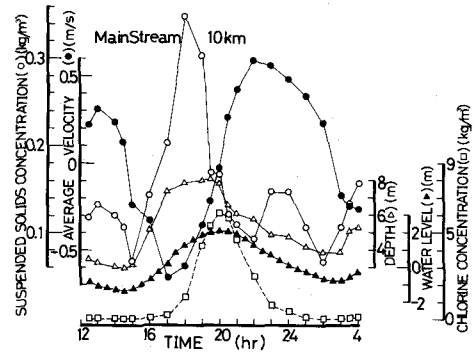


図-23 筑後川 10km地点における実測結果

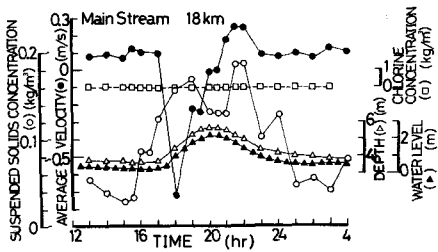


図-24 筑後川 18km地点における実測結果

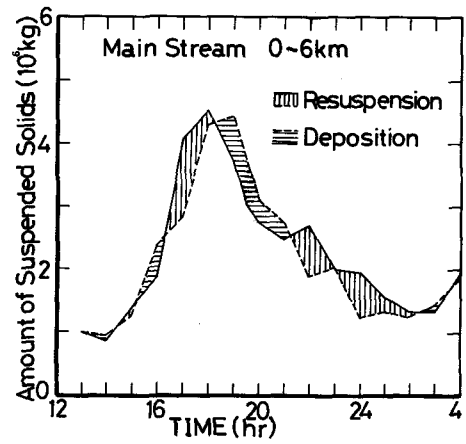


図-25 筑後川 0～6km区間における懸濁物質の収支

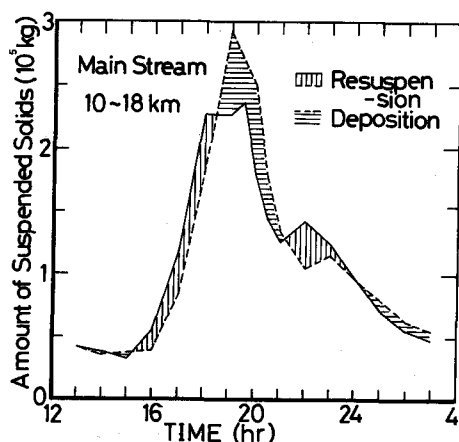


図-26 筑後川10~18km区間における
懸濁物質の収支

領域	地点	時刻	流速 m / s	剪断応力 N / m ²
巻き上げ	0 km / 0	14:30	0.25	0.88
		21:30	0.35	0.77
	6 km / 0	14:30	0.22	1.09
		21:30	0.65	1.03
	10 km / 0	15:30	0.28	0.18
		21:30	0.50	0.93
沈降	0 km / 0	18:30	0.33	1.70
		2:15	0.15	0.49
	6 km / 0	18:30	0.60	1.92
		2:15	0.25	0.67
	10 km / 0	18:30	0.48	0.07
		24:40	0.48	0.94

表-2 筑後川での実測値による鉛直方向輸送開始と剪断応力の関係

6. 数値計算

沈降性懸濁物質の輸送に関する数値計算は各地で行なわれている。海域における三次元シミュレーション^{58,59)}、河口感潮部における鉛直二次元拡散シミュレーション^{60,61)}、港湾や河口感潮部における水平二次元拡散シミュレーション^{62,63,64)}、河川における一次元拡散シミュレーション等がその例である。塩分や懸濁物質の混入による密度勾配を考慮に入れると運動方程式と物質保存式を別々に分離して解けなくなる。数値計算上の安定性、収束性の問題の他に、水理的な問題として、①鉛直方向に密度勾配のある場合の渦動粘性係数や渦拡散係数の与え方、②水平方向の渦動粘性係数や渦拡散係数の与え方、③底面における剪断応力の表現式、④水表面における剪断応力の与え方、懸濁物質・底泥の問題として、⑤底泥の巻き上げ速度の与え方、⑥底泥の流水中での沈降速度の与え方、⑦懸濁物質のフロック化と塩分濃度、剪断応力との関係、等が依然として残されている。対象地域の地形の複雑さ、数値計算上の時間ステップ、空間分割法等との関連から実測値に合うように各パラメータの値が適宜調整されるのが普通である。

計算例として水平二次元について述べる。まず基本式を導く。座標系は、 x 軸を東向に、 y 軸を北向に、 z 軸を鉛直上向とする。流速は x 、 y 、 z 軸方向を各々 u 、 v 、 w とする。三次元の連続式を鉛直方向に底面 $-h(x, y)$ から水面 $\zeta(x, y, t)$ まで積分すると、底面からの流入はないとして、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (14-1)$$

ここに、 ζ : 水面の高さ、である。

同様に運動方程式を積分すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} u v dz = -g(\zeta + h) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \int_{-h}^{\zeta} (\zeta - z) \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$$

$$+\frac{\tau_{x,s}-\tau_{x,b}}{\rho}+\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}D_x\frac{\partial u}{\partial x}dz+\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}D_y\frac{\partial u}{\partial y}dz+\int_{-h}^{\zeta}fudz \quad (14-2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}\int_{-h}^{\zeta}vdz+\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}uvdz+\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}v^2dz=-g(\zeta+h)\frac{\partial u}{\partial y}-\int_{-h}^{\zeta}(\zeta-z)\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial y}dz \\ +\frac{\tau_{y,s}-\tau_{y,b}}{\rho}+\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}D_x\frac{\partial v}{\partial x}dz+\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}D_y\frac{\partial v}{\partial y}dz-\int_{-h}^{\zeta}fvdz \end{aligned} \quad (14-2-2)$$

ここに、 $\tau_{x,s}$, $\tau_{y,s}$, $\tau_{x,b}$, $\tau_{y,b}$: x , y 方向の水面と底面における剪断応力, ρ : 流体密度, g : 重力の加速度, f : Coriolis の係数 ($=2\omega\sin\phi$, ω : 地軸の角速度, ϕ : 緯度), D_x , D_y : x , y 方向の渦動粘性係数, である。

$$\begin{aligned} \text{物質 } C_i \text{ の保存式は, } \quad \frac{\partial}{\partial t}\int_{-h}^{\zeta}C_idz+\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}uC_idz+\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}vC_idz=\frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\zeta}K_x\frac{\partial C_i}{\partial x}dz \\ +\frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\zeta}K_y\frac{\partial C_i}{\partial y}dz+[R(C_i)]_{-h}^{\zeta}+\int_{-h}^{\zeta}S(C_i)dz \end{aligned} \quad (14-3)$$

ここに、 K_x , K_y : x , y 方向の渦拡散係数, $R(C_i)$: 境界面を通しての流出・流入フラックス密度, $S(C_i)$: 生成, 死滅項, である。

簡単化のために、流速を平均化して $\int_{-h}^{\zeta}udz=HU$, $\int_{-h}^{\zeta}uvdz=HUV$, …… のようにおき、さらに $D_x=D_y$, $K_x=K_y$, $S(C_i)=0$ とし、式 (14-2) の右辺第 2 項は同第 1 項に較べて小さいとして無視すると、二次元の式として

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\nabla \cdot \mathbf{U}H=0 \quad (14-1')$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}+(\mathbf{U} \cdot \nabla)\mathbf{U}=-g\nabla\zeta-f\mathbf{K} \times \mathbf{U}+D\nabla^2\mathbf{U}+\frac{(\tau_s-\tau_b)}{\rho H} \quad (14-2')$$

$$\frac{\partial HC_i}{\partial t}+\nabla \cdot H\mathbf{U}C_i=\nabla \cdot (\mathbf{K}\nabla C_i)+R(C_i). \quad (14-3')$$

ベルギーの Scheldt エスチャリーを対象を計算するにあたり、Baeyens らがおいた仮定は⁶³⁾、内部パラメータとして、① $D=25\text{ m}^2/\text{s}$, ② $\tau_s=0$, ③ $\tau_b=\rho gU|U|/C^2$ (C は Chezy の係数, $=\frac{1}{n}R^{1/6}$, $n=0.033$), ④ $K=5+|U|H\sqrt{g}/C$ (m^2/s), 境界条件として、⑤ 上流境界では固有流量と塩分、懸濁物質濃度の実測値を与える、⑥ 下流境界では潮位と塩分、懸濁物質濃度の実測値を与える、⑦ 沈降フラックス密度 $R=-w_sC_i(1-\tau_b/\tau_{cd})$, w_s : 粒子沈降速度, τ_{cd} : 沈降の限界剪断応力 (4.9 N/m^2), 他の条件として、

$$\begin{aligned} w_s &= 1.6 \times 10^{-2} \text{ [m/min]} & S_{ai} &> \frac{1}{100} \\ w_s &= 1.6 \times 10^{-2} - 1.38 \left(\frac{1}{100} - S_{ai} \right) \text{ [m/min]} & S_{ai} &< \frac{1}{100} \end{aligned}$$

ここに、 S_{ai} : 塩分濃度, である。

計算上の条件として、 $\Delta x = \Delta y = 300\text{ m}$, $\Delta t = 2\text{ min}$, 固有流量: $80\text{ m}^3/\text{s}$

これらの条件のもとに式(14)を解いた結果として、干潮 1 時間前の流速分布 (図-27, a), 上げ潮へ

の転流時の流布分布 (図-27, b), 干潮時の塩分濃度 (図-27, c), 干潮時の懸濁物質濃度 (図-27, d), 満潮時の塩分濃度 (図-27, e), 満潮時の懸濁物質濃度 (図-27, f), 一潮時の底泥の物質収支 (図-27, g), である。(図27- h), は固有流量を $350 \text{ m}^3/\text{s}$ としたときの一潮時の底泥の物質収支である。河口部両岸の浅いところへの懸濁物質の堆積が顕著でことが解る。

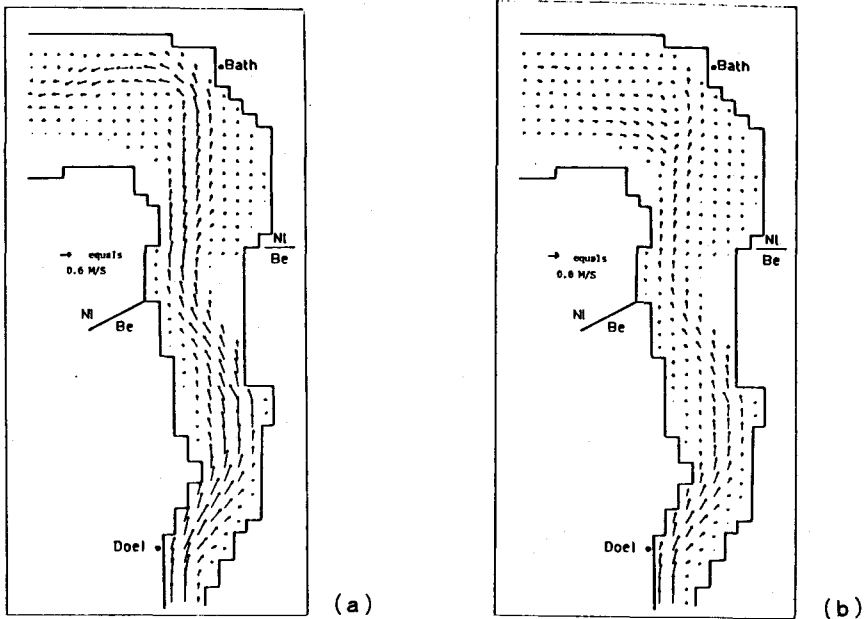


図-27 (a) 干潮時より1時前の流速分布
(b) 上げ潮への転流時の流速分布 (Baeyensらによる)

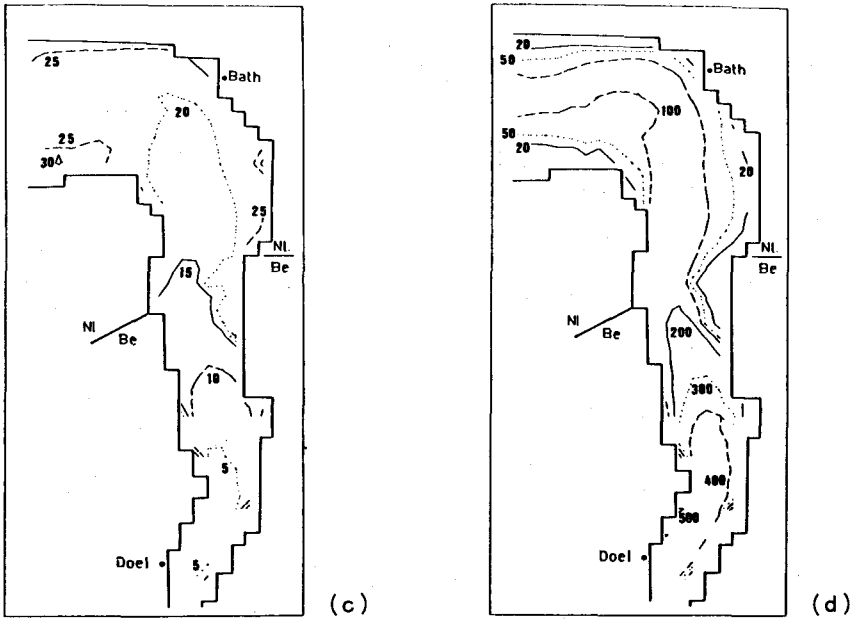


図-27 (c) 干潮時の塩分濃度分布
(d) 干潮時の懸濁物質濃度分布

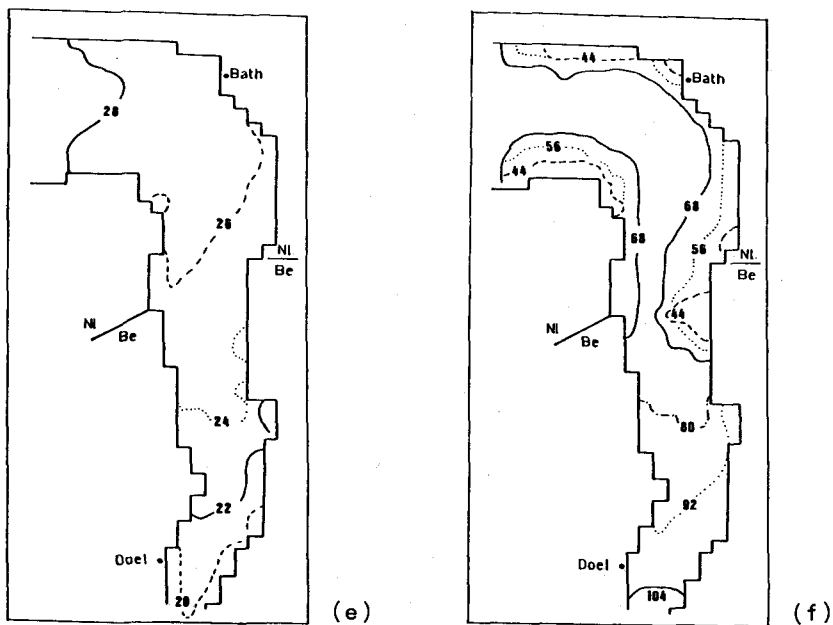


図-27 (e) 満潮時の塩分濃度分布
(f) 満潮時の懸濁物質濃度分布

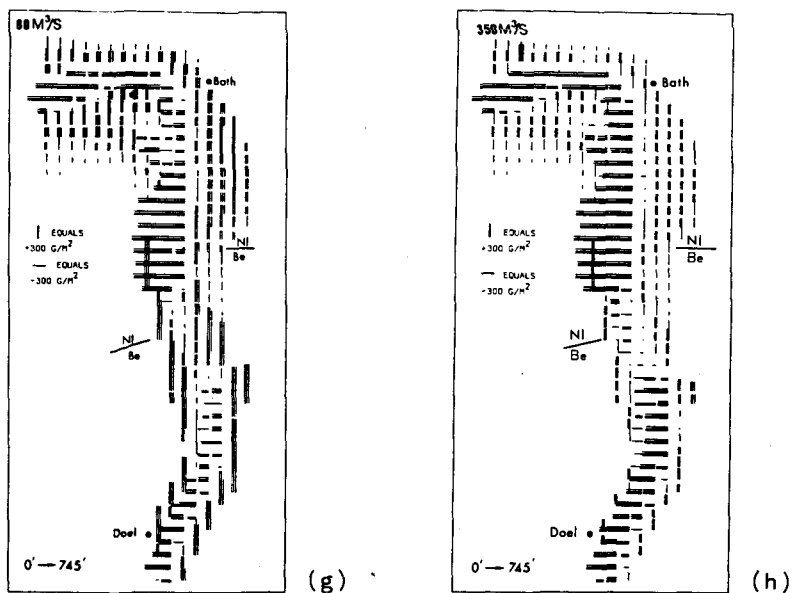


図-27 (g) 底泥の物質収支 (固有流量80 m³/sec)
(h) 底泥の物質収支 (固有流量350 m³/sec)

Ⅲ. 底泥の水質に及ぼす影響

海域における生態系をエネルギーの流れから見ると図-28のようになる。この生態系のなかで底泥が果たす役割は小さくない。底泥はプランクトンの死骸や有機物等を含んでいるためバクテリアにより分解されて窒素をアンモニアの形で溶出させ、嫌気性条件下では金属イオンと結合していた $PO_4^{3-}-P$ も溶出してくる。富栄養化水域では、水中に現存しているNやPの量より底泥内に貯えられているN、Pの量の方が桁違いに大きい。底泥からのN、Pの溶出速度は底泥の種類、水温、DO、共存イオン、pH等によってかなり異なる。その範囲は実測例によれば、湖沼で、窒素 $0.001 \sim 0.292 \text{ g/m}^2 \text{ day}$ 、磷 $0.0002 \sim 0.097 \text{ g/m}^2 \text{ day}$ 、海域で窒素 $0.007 \sim 0.280 \text{ g/m}^2 \text{ day}$ 、磷 $0.001 \sim 0.060 \text{ g/m}^2 \text{ day}$ である。アンモニウムイオンの懸濁物質の吸着能に関して筑後川河口泥を用いた実験結果を図-29に示す。淡水中の方が、海水中にあるよりも吸着量が多い。この現象は溶解性物質が懸濁物質と共に存在する場合、流体塊と共に輸送されず、ある遅れをもって輸送されることを示している。また、海域の潮目や河川感潮部のある塩分濃度のところでの懸濁物質や溶解性物質の濃度の高まりは、流体運動に起因する場合もあれば、生物活動による場合もある。これらの問題についての検討は、水質環境管理上益々必要となるであろう。

Ⅳ. おわりに

底泥及び懸濁物質の輸送現象に関して、原理的に全く不明のものは含まれておらず、既知の原理を組合せてこの現象をどう説明するかが問題である。基礎的な研究と実用化との間には、埋られねばならない隙間が存在している。

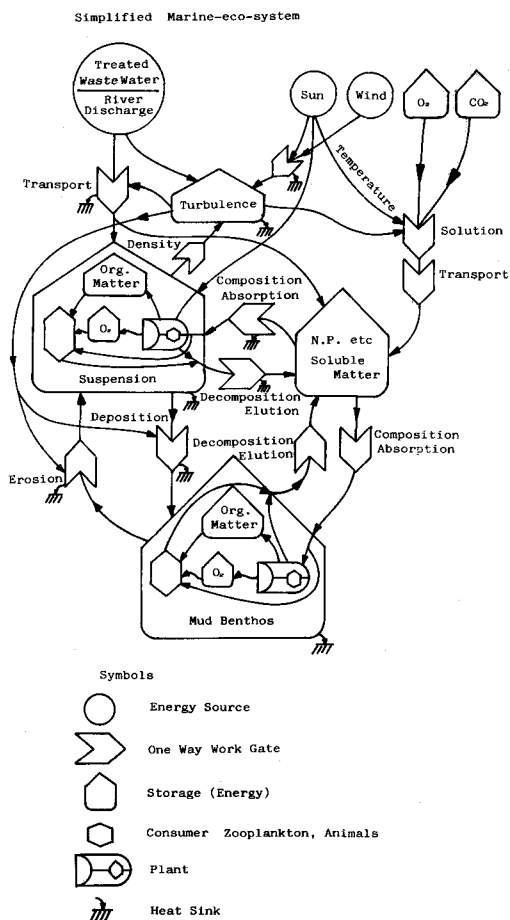


図-28 海域生態系のエネルギーフロー

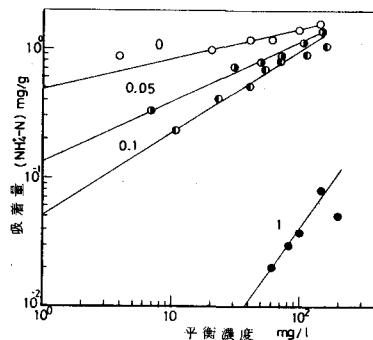


図-29 アンモニウムイオンの吸着量と間隙水濃度 (図中数字は、海水の混入比率)

本文では触れなかったが、底質に関する文献集⁶⁸⁾と底質の調査法⁶⁹⁾のあることを付記する。

本稿に使用したデータは海田輝之氏（元九州大学工学部助手，現岩手大学工学部）の労に負うところが多い。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Harris, J. W. : Means and Methods of Inducing Sediment Deposition and Removal, U. S. Dep. of Agr., Washington, Proc. of the Interagency Committee Sedimentation Conference, Miscellaneous Publication, No. 970, pp 669~674, 1965.
- 2) Nichols, M. M. : Sediments of the James River Estuary, Virginia. In : Environmental Framework of Coastal Plain Estuaries, Memoir 133, Geological Society of America, pp 169~212. 1972.
- 3) Einstein, H. A. and R. B. Krone : Estuarial Sediment Transport Patterns, J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87, No. HY 2, pp 51~59, 1961.
- 4) Peterson, D. H. et al : Location of the Nontidal Current Null Zone in Northern San Francisco Bay, Estuarine and Coastal Marine Sci., Vol. 3, pp 1~11, 1975.
- 5) Krone, R.B. and R. Ariathurai : Applications at Predictive Sediment Transport models, Proc. of the 7th World Dredging Conference, pp 259~272, 1976.
- 6) Inglis, C. C. and F. H. Allen : The Regimen of the Thames Estuary as Affected by Currents, Salinities and River Flows, Proc. of the Institution of Civil Engineers. Vol. 7, pp 827~868, 1957.
- 7) Odd, N. V. M. and M. W. Owen : A Two Layer Model of Mud Transport in the Thames Estuary, Proc. of the Institution of Civil Engineers. Supplement IX, paper 7517S, pp 172~205, 1972.
- 8) Kirby, R. and W. R. Parker : The Physical Characteristics and Environmental Significance of Fine Sediment Suspensions in Estuaries, In : Estuaries Geophysics and the Environment, National Academy of Sciences, Washington. pp 110~120, 1977.
- 9) 松 生 治 : 沿岸域における海中懸濁物の挙動研究報告, 環境科学研究報告B179-S706, 1983
- 10) 吉川秀夫 : エスチャリーの水理, 1970年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, 70-B-18, 1970.
- 11) 村岡浩爾 : 都市河川の水理, 1974年度同上, A-3, 1974.
- 12) Bowden, K. F. and P. Hamilton : Some Experiments with a Numerical Model of Circulation and Mixing in a Tidal Estuary, Estuaries and Coastal Marine Science, Vol. 13, pp 281~301, 1975.
- 13) Postma, H : Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment, In : Estuaries, American Assoc. for the Advancement of Science, No. 83, pp 158~184, 1967.
- 14) Postma, H : Transport and Accumulation of Suspended Matter in the Dutch Wadden Sea, Netherlands J. of Sea Research, Vol. 1, pp 148~190, 1961.
- 15) 大坪国順 : 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告42号, pp 23, 1983.

- 16) 海田輝之, 楠田哲也, 栗谷陽一, 則松秀晴: 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究, 土木学会第17回衛生工学研究討論会講演論文集, pp 42~48, 1981.
- 17) 楠田哲也, 海田輝之, 栗谷陽一, 石原達弘: 同上 (II), 第18回同上, pp 152~157, 1982.
- 18) 楠田哲也: 未発表
- 19) Mehta, A. J. and E. Partheniades: Depositional Behavior of Cohesive Sediments, Univ. of Florida COE Laboratory Technical Report, No. 16, pp 250, 1973.
- 20) Krone, R. B.: Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarine Shoaling Processes, Final Report for U. S. Army, No. DA - 04 - 203, pp 6, 1962.
- 21) 下川洪平, 高田英明, 渡辺憲人, 安田裕, 小瀬洋喜: 河川底質の粒度分布について (II), 水質汚濁研究, Vol. 2, No. 3, pp 152~156, 1979.
- 22) 小林節子, 宇田川理: 東京湾底質の粒度分布, 用水と廃水, Vol. 19, No. 11, pp 94~102, 1977.
- 23) 軽部重太郎: 霞ヶ浦底泥の理工学的性質について, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp 33~40, 1978.
- 24) 奥村樹郎, 梅原靖文: 海底浮泥の基本的性質, 同上, pp 25~32.
- 25) 15) と同一, pp 79~177.
- 26) 古賀憲一, 栗谷陽一, 楠田哲也: 塩水中における微粒子の成長と沈降特性に関する基礎的研究, 土木学会第18回衛生工学研究討論会講演論文集, 1982. pp 160~165.
- 27) 石井勉: 固液系流動層の挙動, 化学工学, Vol. 29, No. 11, pp 915~921, 1965.
- 28) Migniot, P. C.: Étude des Propriétés Physiques de Différents Sédiments Très Fins et de Leur Comportement Sous des Actions Hydrodynamiques, La Houille Blanche, Vol. 23, No. 7, pp 591~620, 1968.
- 29) Owen, M. W.: A Detailed Study of Settling Velocities of an Estuary mud, Hydraulics Research Station Report, INT 78, 1970.
- 30) 楠田哲也, 古賀憲一, 栗谷陽一: 汚泥の濃縮沈降に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 294, pp 59~71, 1980.
- 31) Kynch, G.: A Theory of Sedimentation, Trans. of the Faraday Society, Vol. 48, 1952, pp 166~176, 1952.
- 32) Kusuda, T., T. Umita & Y. Awaya: Erosional Process of Fine Cohesive Sediments, The Memoirs of the Faculty of Engrg., Kyushu Univ., Vol. 42, No. 4, pp 317~pp 333, 1982.
- 33) 馬場洋二, 佐々木重義, 伊藤雄二: ヘドロ河床の流れによる洗掘特性, 土木技術資料, 16 - 10, pp 518~523, 1974.
- 34) Smerdon, E. T. and Beasley, R. P.: Tractive Force Theory Applied to Stability of Open Channels in Cohesive Soils, Research Bulletin No. 715, Agricultural Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia, Mo., 1959.
- 35) Dunn, I. S.: Tractive Resistance of Cohesive Channels, J. of the Soil Mechanics and Founda-

- tions Division, ASCE, Vol. 85, No. SM 3, pp 1~24, 1959.
- 36) Partheniades, E. : Erosion and Deposition of Cohesive Soils, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, No. HY 1, pp 755~771, 1965.
 - 37) Partheniades, E. and R. E. Paaswell : Erodibility of Channels with Cohesive Boundary, *ibid*, Vol. 96, No. HY 3, pp 166~176, 1970.
 - 38) Anderson, H. W. : Physical Characteristics of Soil Related to Erosion, J. of Soil and Water Conservation, pp 129~133, 1951.
 - 39) Sedimentation Committee of H. Y. Division of ASCE : Erosion of Cohesive Sediments, J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No. HY 4, pp 1017~1049, 1968.
 - 40) 澤井健二 : 粘性性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究, 京都大学学位論文, 1977.
 - 41) 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回水理講演会講演集, pp 181~186, 1974.
 - 42) 青木美樹, 首藤伸夫 : 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 同上第26回論文集, pp 87~92, 1982.
 - 43) 松永達生 : 底泥の巻き上げ機構に関する実験的研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp 234~235, 1983.
 - 44) 馬場洋二, 伊藤雄二 : 河床に堆積したヘドロの洗掘速度, 土木技術資料, 21 - 3, pp 29~34, 1979.
 - 45) 小暮和史, 首藤伸夫 : 貯水池における濁度物質の堆積と洗掘, 土木学会第24回水理講演会論文集, pp 265~270, 1980.
 - 46) Kelly, W. E. and R. C. Gularte : Erosion Resistance of Cohesive Soils, J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, No. HY10, pp 1211~1224, 1981.
 - 47) Arulanandan, K., P. Loganathan and R. B. Krone : Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil, J. of Geotechnical Engrg. Division, ASCE, Vol. 101, No. GT 1, pp 51~66, 1975.
 - 48) Ariathurai, R. and K. Arulanandan : Erosion Rates of Cohesive Soils, J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 104, No. HY 2, pp 279~283, 1978.
 - 49) Kusuda, T., T. Umita, K. Koga, H. Yoroze and Y. Awaya : Depositional Process of Fine Sediments, Water Science and Technology, Vol. 14, pp 175~184, 1982.
 - 50) 馬場洋二, 岩井国臣 : 感潮部河道における浮遊物質の移動特性について, 土木学会第24回水理講演会論文集, pp 185~190, 1980.
 - 51) 建設省筑後川工事事務所 : 塩分・浮泥・入退潮調査資料, 1968.
 - 52) Schubel, J. R. and H. H. Carter : Suspended Sediment Budget for Chesapeake Bay, In: Estuarine Process, Vol. II, Academic Press, N. Y., pp 48~62, 1976.
 - 53) Takano, K. : On the Velocity Distribution off the Mouth of a River, J. of the Oceanographical

- Soc. of Japan, Vol. 10, pp 60~64, 1954.
- 54) Takano, K. : On the Salinity and Velocity Distribution off the Mouth of a River, *ibid*, Vol.10, pp 92~98, 1954.
 - 55) Takano, K. : A Complementary Note on the Diffusion of the Sea-ward River Flow off the Mouth, *ibid*, Vol. 11, pp 147~149, 1955.
 - 56) Beardley, R. C. and J. Hart : A Simple Theoretical Model for the Flow of an Estuary onto a Continental Shelf, *J. of Geophysical Research*, Vol. 83, pp 873~883, 1978.
 - 57) Edzwald, J. K., J. B. Upchurch and C.R.O'Melia : Coagulation in Estuaries, *Environmental Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp 58~63, 1974.
 - 58) 堀江 毅 : 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港湾技術資料, No. 360, 1980.
 - 59) Kochergin, V. P. and A. G. Bokovikov : A Three-Dimensional numerical Model of Contaminant Dispersion in the Near-Shore Zone of a Deep Basin, *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 16, No. 7, pp 512~517, 1980.
 - 60) Salomon, J. C. : Modelling Turbidity Maximum in the Seine Estuary, *Proc. of the 12th International Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, No. 14, 1980.
 - 61) Lambermont, L. and G. Lebon : Erosion of Cohesive Soils, *J. of Hydraulic Research*, Vol. 16, No. 1, pp 27~44, 1978.
 - 62) Miles, G. V. : Two-Dimensional Two Layer Salt and Mud Transport Model, *Hydraulic Research Station Report*. IT182, 1978.
 - 63) Baeyens, W., Y. Adam, J. P. Mommaerts, and G. Pichot Numerical Simulations of Salinity, Turbidity and Sediment Accumulation in the Scheldt Estuary, *Proc. of the 12th International Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, No. 15, 1980.
 - 64) Ariathurai, R. and R. B. Krone : Finite Element Model for Cohesive Sediment Transport, *J. of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. HY 3, pp 323~338, 1976.
 - 65) 村上 健 : 富栄養化による有機性汚濁のモデリング, 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, 70-A-7, 1970.
 - 66) Jorgensen, S. E. : *Lake Management*, Pergamon Press, 1980.
 - 67) 浮田正夫, 中西弘, 天谷満徳 : 底泥よりの N, P, 溶出量推定における種々の問題点について (I), 用水と廃水, Vol. 17, No. 10, pp 1277~1290, 1975, 同上 (II), Vol. 17, No. 11, pp 1391~1401, 1975.
 - 68) (社)底質浄化協会編 : 底質工学文献覧, 公害対策技術同友会, 1977.
 - 69) 環境庁編 : 底質調査方法とその解説, (社)日本環境分析協会, 1980.