

肱川感潮域における高濁度水塊の挙動の数値解析

伊 福 誠*・合 田 宏 隆**・中 田 正 人***

現地河川において観測して得た結果を著者が開発した鉛直 2 次元数値モデルを使って再現し、感潮域における懸濁粒子の動態や turbidity maximum の出現を時・空間的に把握し、堆積環境に及ぼす影響についての基礎的資料を得ることを目的とした。高濁度水塊は河口より 6.6 km 程度上流側付近で縦断方向流速の向きが逆転する位相付近において出現し、高濃度の水塊は 1~2 時間程度持続すること、7~9 psu 程度の塩分が懸濁粒子の凝集に大きく影響していること、凝集が生じている 5.5~6.7 km 付近では、懸濁粒子の粒径は上流境界のその 60~800 倍、有効密度は 1.3~10 kg/m³ であり流体の密度と同程度であること等が明らかになった。

1. ま え が き

近年、懸濁粒子の凝集については、粒子の表面に吸着される特殊な物質の生化学的結合作用による効果が大きいことが明らかにされつつある (Leussen, 1988)。また、小田ら (1999) は、中国長江河口で採取した微細浮遊粒子を用いて凝集過程と終局粒径について定量的に調べ、ベントナイトを用いて得た実験結果との比較を通して微細粒子の凝集機構の解明を試み、凝集機構には微細粒子に付着する有機物が強く関わっていることを明らかにしている。

河川感潮域における懸濁粒子の輸送、沈降・堆積過程は、流速や化学的または生物学的な特異性により、湖沼や海洋と比較するとかなり異なった特徴を示すと推測される。ドイツのウェーザー川における MASEX と呼ばれる大規模観測が 1993 年と 1995 年に河口から約 60 km の範囲に対して実施され、turbidity maximum の出現は塩分が 6 psu である付近を上端にしている場合が多いことが報告されている (Riethmüller ら, 1988)。また、わが国においては、佐藤ら (2001) や鷲見ら (2001) が、レーザ回折式粒度測定器を用いて河道内や河口周辺において観測を実施している。さらに、山下ら (2002) は、現地河川における懸濁粒子の凝集過程について調べ、実海域では実験室と比較すると凝集が活発であることを得、現地河川における観測から微細浮遊粒子の移動量を試算している。また、横山ら (2001) は、環境に配慮した河川管理を行うにあたっては河川感潮域における地形や底質の形成機構を明確にすることが重要であるとの考えから、現地河川における観測から turbidity maximum の挙動を明らかにしている。伊福ら (2002) も、河川感潮域においてレーザ回折式粒度計やドブラー流速計等を用いた観測から懸濁粒子の動態について調べ、塩分が 6~8 psu 程度で凝集が活発になり、急激な濃度の増大が

生ずること等を明らかにしている。

以上のように、懸濁粒子に関する研究は、その堆積が底質環境や水質環境ひいては底生生物にも影響を及ぼすことから、徐々に実施されるようになってはきたものの感潮域における観測結果を再現し、懸濁粒子の凝集・沈降現象を予測する数値モデルの開発に関する研究は著者の知り得る限りないのが実状である。こうしたことから、本研究では、既往の研究成果を参考にし、懸濁粒子の時・空間的挙動を再現できる数値モデルを開発するとともに、伊福らが愛媛県肱川の感潮域で実施した観測で得た結果に基づいた解析を行い、懸濁粒子の動態や turbidity maximum の出現を時・空間的に把握し、水環境や底質環境に及ぼす影響についての基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 数 値 解 析

(2) 基礎方程式

a) 連続の式と運動量方程式

流体が非圧縮性で密度は塩分と温度の関数とし、Bousinesq 近似が適用できるとすると、 x 方向の運動量方程式は x 軸を水平な基準面にとり z 軸を基準面より鉛直上向きにとると次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x}(Bu^2) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x}(B\tau_{xx}) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \dots (1)$$

ここに、 t は時間、 u および w は、それぞれ x 方向および z 方向の流速成分、 B は河幅、 p は圧力、 ρ_0 は流体の基準密度、 τ_{xx} および τ_{xz} はせん断応力である。

せん断応力はテンソル表示すると以下のように表される。

$$\tau_{ji}/\rho_0 = (\nu + \nu_t)(\partial u_j/\partial x_i + \partial u_i/\partial x_j) \dots (2)$$

ここに、 ν は動粘性係数である。また、 ν_t は SGS(subgrid-scale) の渦動粘性係数であり、次式で与えられる。

$$\nu_t = (c_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]^{1/2} \dots (3)$$

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 正会員 工修 (株)富士通中国システムズ
*** (株)エイトコンサルタント 事業本部

ここに、 c_s は Smagorinsky 定数、 $\Delta = \Delta x \cdot \Delta z \cdot 1^{1/3}$ 、 Δx および Δz は、それぞれ x 方向および z 方向の格子間隔である。

連続の式は次式で与えられる。

$$(1/B)\partial(Bu)/\partial x + \partial w/\partial z = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

b) 塩分および懸濁粒子の輸送方程式

塩分の輸送方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x}(BuS) + \frac{\partial}{\partial z}(wS) \\ = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x}(BK_x \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial S}{\partial z}) \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

ここに、 S は塩分、 K_x および K_z は、それぞれ x 方向および z 方向の乱流拡散係数である。

懸濁粒子の輸送方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x}(BuC_s) + \frac{\partial}{\partial z}[(w - w_f)C_s] \\ = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x}(BK_{xx} \frac{\partial C_s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial C_s}{\partial z}) \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここに、 C_s は懸濁粒子濃度、 w_f は懸濁粒子の沈降速度、 K_{xx} 、 K_{zz} は、それぞれ x 方向および z 方向の乱流拡散係数である。

式(5)および(6)中の乱流拡散係数は、 x 方向および z 方向の流速成分に依存すると仮定すると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_x, K_{xx} = \gamma_x(a_L u^2 + a_T w^2)/q \\ K_z, K_{zz} = \gamma_z(a_L u^2 + a_T w^2)/q \\ q = (u^2 + w^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここに、 γ_x 、 γ_z は正の係数、 a_T 、 a_L は乱流拡散係数に寄与する特性長であり、次式で与える。

$$a_T = (\Delta x \cdot \Delta z \cdot 1)^{1/3}, a_L = c_1 \cdot a_T \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 c_1 は正の係数である。

圧力は静水圧分布を仮定すると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} p = \rho g(\xi - z) + \beta g \int_{z_0}^z S dz \\ \rho/\rho_0 = 1 + \beta S, \beta = (\rho_s - \rho_0)/\rho_s \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

ここに、 ρ は流体の密度、 ξ は基準面から自由水面までの高さ、 g は重力の加速度、 ρ_s は海水の密度である。

(2) 初期条件および境界条件

初期条件は、静水状態とする。下流、上流、河床および自由水面においては、以下のような境界条件を課す。

a) 下流

x 、 z 方向の流速成分および懸濁粒子濃度には以下の条件を課す。

$$\partial^2 u/\partial x^2 = 0, w = 0, \partial^2 C_s/\partial x^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

また、塩分は上げ潮時および下げ潮時において以下の条件を課す。

$$\begin{aligned} S = S_0 G(t) \quad (\text{flood: } u > 0) \\ G(t) = 1 - \{1 - \eta(t)/\eta_{\max}\} S' \\ \partial^2 S/\partial x^2 = 0 \quad (\text{ebb: } u < 0) \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここに、 S_0 は海域における塩分、 S' は重み係数、 $\eta_{\max}$ は解析対象期間中の潮位の最大値である。

b) 上流

上流境界においては、流速分布は次式で表す対数則分布を仮定する。

$$u = u_e \left[\ln \left\{ \frac{e-1}{\xi - z_0} (z - z_0) + 1 \right\} \right] \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 u_e は水面における x 方向の流速成分である。

塩分および懸濁粒子濃度対しては以下の条件を課す。

$$\partial^2 S/\partial x^2 = 0, C_s = C_0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 C_0 は上流境界における懸濁粒子濃度である。

c) 河床

$$\begin{aligned} z = z_b \begin{cases} p = \rho g(\xi - z_b), u = w = 0 \quad (\text{no-slip}) \\ \partial S/\partial z = 0, \partial C_s/\partial z = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

d) 自由水面

$$\begin{aligned} z = \xi \begin{cases} p = 0 \\ \partial u/\partial z = 0 \\ w_e = \partial \xi/\partial t + u_e(\partial \xi/\partial x) \\ w_e S - K_z(\partial S/\partial z) = 0 \\ w_e C_s - K_{zz}(\partial C_s/\partial z) = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

ここに、 w_e は水面における z 方向の流速成分である。

(3) 解析方法

a) 凝集と沈降モデル

小田らは、微細粒子としてベントナイトを用いて塩水中の凝集・沈降過程を室内実験で調べ、以下のような懸濁粒子のフロックの成長過程および沈降速度の予測式を提案している。

$$d_\infty = 3.28(S/C_s^{2/3})^{0.48}/G^{2/3} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 G は攪拌強度である。

攪拌強度は、次式で与えられる (Camp, 1943)。

$$G = \partial u/\partial z + \partial w/\partial x \quad \dots\dots\dots(17)$$

一方、十分成長したフロックの有効密度 ρ_e (g/cm³) は塩分、濁質濃度および攪拌強度にほとんど関係なく、フロックの球相当径 d_s (μm) との関係は次式で表され、フロックの有効密度は粒径の -1.66 乗に比例する。

$$\rho_e = 70.1 d_s^{-1.66} \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $\rho_e = \rho_{ss} - \rho$ であり、 ρ_{ss} は、懸濁粒子の密度である。

実験結果からフロックの沈降速度とフロックの球相当径の関係は次式で表され、フロックの沈降速度は粒径の 0.34 乗に比例する。

$$w_f = 7.01 \times 10^{-3} \frac{4g}{135\mu} d_s^{0.34} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 μ は粘性係数である。

(4) 解析条件

解析対象とする肱川の管内図によれば、感潮区間上流端は河口から約9 kmの位置である。そこで解析する範囲は河口から上流側に10 km、河口から海側に0.5 kmの位置を海側境界とし、そこでの河幅は5 kmで河口から指数関数的に広がるとした。さらに、河口から上流約0.2 kmの位置に形成されている砂州をモデル化した。また、河床は肱川管内図に記載されている1998年の最深河床高を使用した。

x 方向は420分割、 z 方向は10分割し、時間刻みは潮汐の周期(T)を20,000等分し、50周期間計算した。なお、底面からの懸濁粒子のpick-upは無視し、小田らの提案式に係数を乗じて、懸濁粒子の終局粒径や沈降速度を評価した。

(5) 潮位差、流量、懸濁粒子の粒径および密度

潮位差は、観測結果のうち主たる解析対象期間を6月3~5日としたので、その期間中の肱川河口に位置する長浜港における平均値を求め2.5 mとした。なお、上流境界の流量は、河口から約13 km上流の五郎観測所における水位から算出した値を用いた。すなわち、潮位の平均値を求めた6月3~5日の流量は $10 \text{ m}^3/\text{s}$ である。

国土交通省(2001a)は、2001年1月25日~2月26日の間、河口から0.4~6.4 kmまでの10観測点で堆積物トラップを用いて浮遊物質を採取している。採取した堆積物量の有機物含有率は9~12%であった。さらに、河口より0.4, 2.8および6.4 kmで採取した堆積物の粒度組成をみると、3点とも5~75 μm のシルトが77~87%を占める。以上のことから、肱川における堆積物はほとんどが無機質シルトであると判断して差し支えない。そこで粒径はシルト分の低界値である5 μm とした。なお、肱川における定期的な観測によれば、懸濁粒子の濃度は河口から6.8 kmの祇園橋で1~8 mg/l、肱川と矢落川との合流部付近(河口から約13 km)で1~15 mg/lである(愛媛県, 2001)。そこで、上流側境界における懸濁粒子の濃度および密度は、それぞれ10 mg/lおよび $2,600 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。

(6) 各種係数の評価

Smagorinsky 定数は、Ifuku・Kusu (1999) が密度流場での解析で用いた0.1を援用する。また、乱流拡散係数を評価する際に用いる式(7)中の係数 γ_x および γ_z は、それぞれ0.3および 10^{-5} とした。また、式(8)中の係数 c_1 および式(11)中の重み係数 S' は、それぞれ100および0.1とした。

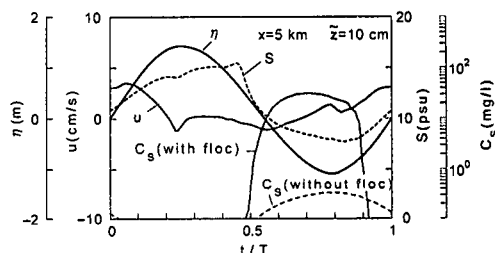
3. 解析結果

(1) 水位、流速、塩分および懸濁粒子濃度の変動

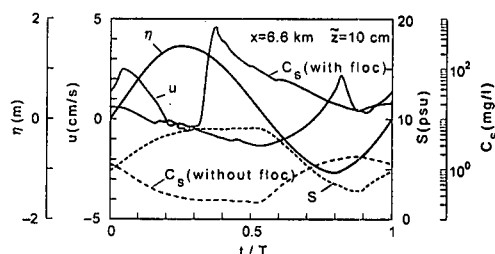
図-3は、河床から10 cmの高さにおける懸濁粒子濃度の一潮汐間の変動を水位、縦断方向流速および塩分とともに示したものである。

(a)は、 $x=5 \text{ km}$ におけるものである。塩分は、満潮時からかなり遅れた $t/T=0.46$ 付近で16 psu程度の最大値を示し、干潮時から少し遅れた $t/T=0.83$ 付近で8 psu程度の最小値を示す。また、縦断方向流速は一潮汐間を通じて上流向きの流速が卓越していることがわかる。懸濁粒子濃度は、凝集を考慮する場合および無視する場合ともに $t/T=0.5$ 付近から急激に増大しているが、各々の最大値には100倍ほどの差がある。水位が最低となる位相付近で懸濁粒子濃度が最大となっていることから、懸濁粒子は上流から輸送されてきたものと考えられる。なお、 $x=5 \text{ km}$ より下流側における懸濁粒子濃度は急激に低下する。

(b)は、 $x=6.6 \text{ km}$ におけるものである。塩分は大きく変動し、水位が最高となった後に9 psu程度の極大値を示し、水位が最低となった後に2.5 psu程度の極小値を示す。また、凝集を無視した場合の懸濁粒子濃度は、縦断方向流速とよく対応しているようである。なお、この懸濁粒子濃度の増大は、上流から懸濁粒子が輸送されてきたためであると考えられる。一方、凝集を考慮した場合の懸濁粒子濃度は、縦断方向流速が上流向きから下流向



(a) $x=5 \text{ km}$



(b) $x=6.6 \text{ km}$

図-1 水位、流速、塩分および懸濁粒子濃度

きへ逆転し、塩分が最大を示す時間帯付近で急激に増大し 700 mg/l 程度の最大値を示す。

(2) 一潮汐間の懸濁粒子濃度の変動

図-2 は、河口からの距離が $x=5\sim 6.8$ km における懸濁粒子濃度の一潮汐間の変動を示したものであり、河床から 1 cm の高さにおけるものである。 $x=6\sim 6.8$ km においては、懸濁粒子の変動は似た傾向を示し、 $t/T=0.34\sim 0.4$ 付近で急激に増大し、 $t/T=0.38\sim 0.5$ 付近で極値を示しその後緩やかに低下している。また、 $x=6.6$ km において懸濁粒子濃度は最大値を示し、その値は 700 mg/l 程度である。さらに、 $x=5$ km において懸濁粒子濃度は、 $t/T=0\sim 0.5$ 付近までは限りなく 0 に近い値を示し、 $t/T=0.5$ を過ぎたあたりから急激に増大し、水位が最低となる $t/T=0.7$ 付近で 30 mg/l 程度の極値を示す。その後、緩やかに低下し、 $t/T=0.85$ 付近から急激に低下し、再び 0 mg/l に近い値を示す。なお、 $x=6.6$ km 付近で生じた高濁度水塊は約 90 分で 0.6 km 程度移動する。

河床から離れた高さにおける懸濁粒子濃度も、 $t/T=0\sim 0.4$ 程度まではほぼ同一であり、鉛直混合が強いことがわかる。しかし、 $t/T=0.4$ を過ぎたあたりから $x=6.6$ および 6.8 km における懸濁粒子濃度が急激に減少している。河床からの高さが増大するにつれて懸濁粒子濃度が減少するのは、上層の比較的速い河川水の流下により懸濁粒子が下流に輸送されるため、あるいは、懸濁粒子の沈降によるためであると考えられる。

(3) 塩分、懸濁粒子濃度、粒径および有効密度

図-3 は、縦断方向流速の向きが逆転する位相 (ZDC) における塩分、懸濁粒子濃度、粒径および有効密度の空間分布である。なお、図中の上軸に示している矢印と矢印の間は攪拌強度、塩分および懸濁粒子濃度ともしきい値を超え凝集が生じている領域である。この位相においては、塩水は河口から 8 km 程度まで遡上し、懸濁粒子濃度は最大となる。また、凝集が生じている 5.5~6.7 km 付近の粒径は上流境界における 60~800 倍の 0.3~4 mm までにも達する。さらに、有効密度は 1.3~10 kg/m³

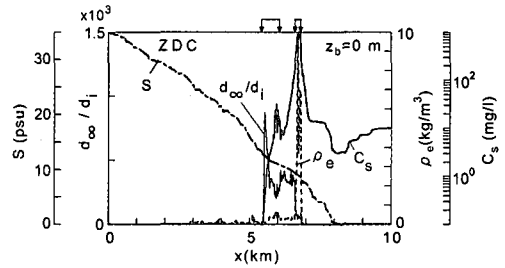


図-3 塩分、懸濁粒子濃度、粒径および有効密度の空間分布

程度であり、ほぼ流体の密度と同じである。なお、河口から約 6 km の観測点付近における粒径は 1~2 mm 程度であり、CCD カメラで撮影した映像にも同程度の粒径の懸濁粒子が多数確認されるので、計算結果はほぼ現地の状況を再現しているといえる。

(4) 懸濁粒子のフラックス

図-4 は式 (20) で算出した一潮汐における懸濁粒子の単位幅に対する総フラックスを示したものである。なお、 F_u および F_d は、それぞれ上流向きおよび下流向きの総フラックスを示す。

$$F = \int_t^{t+\tau} \int_{z_0}^e u C_s dz dt \quad \dots\dots\dots (20)$$

上流向きのフラックスが生ずる領域は河口から約 3 km 付近までである。一方、下流向きフラックスは河口から 5 km 付近から急激に増大する。上流向きおよび下流向きフラックスを比較すると、下流向きフラックスは、上流向きのその 10⁷ 倍程度でありかなり大きい。こうした懸濁粒子が下流側へ輸送され、沈降・堆積によって河床形状や水質環境に悪影響を及ぼすことが懸念される。図-5 は藻類が繁茂する 2001 年 2 月における藻類の分布状況を示したものである。図-4 と比較してみると、懸濁粒子のフラックスがかなり小さい 0~5 km 付近で藻類が繁茂していることが判る。このことは、沈降・堆積する懸濁粒子が河床の礫に付着する割合が低いため、藻類の発芽・生育が活発なためであると考えられる。なお、懸濁粒子の粒径が最大となる場所付近は、スジアオノリが生息する上流端付近であり (国土交通省, 2001 b), 比較的大きい懸濁粒子の沈降・堆積が長時間継続すると堆積環境や水質環境が劣化し、収穫量が減少することが危惧される。

数値計算結果は、肱川の河口から 6 km の地点において得た懸濁粒子の観測結果と定性的に一致する。なお、LISST-100 を用いて得た懸濁粒子濃度は体積濃度で表示されているので、計算結果と直接比較することは出来ない。しかしながら、数値計算で得た懸濁粒子の密度は最大で 1,010 kg/m³ 程度である。現地河川においてもこの程度の値であると仮定すれば、一潮汐間での塩分の最

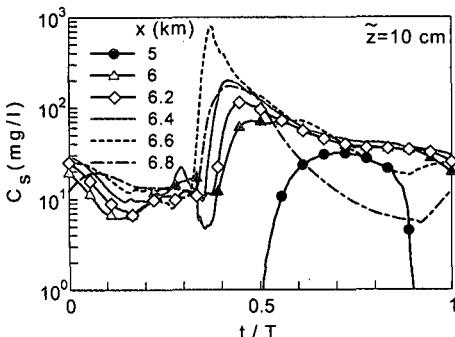


図-2 一潮汐間の懸濁粒子濃度の変動

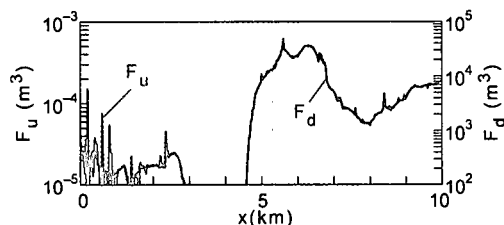


図-4 総フラックスの分布

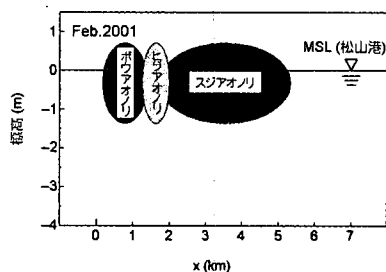


図-5 藻類の分布 (国土交通省, 2001b)

大値が 8 psu 以上の場合、懸濁粒子濃度は 100~1,000 mg/l 程度となり数値計算で得た値のおよそ 1~10 倍である。

4. おわりに

本研究では、鉛直 2 次元数値モデルを開発し、塩分、流速および懸濁粒子濃度について数値解析的に検討した。得た結果を要約すると以下の通りである。

(1) 懸濁粒子濃度は、縦断方向流速が上流向きから下流向きへと逆転し、塩分がピークを示す時間帯付近から急激に増大する。なお、河口からの距離が 6.4, 6.6 および 6.8 km における塩分の値から 7~9 psu 程度の塩分が懸濁粒子の凝集に大きく影響していると考えられる。

(2) 河床付近では、河口からの距離の増大に伴って懸濁粒子濃度は増大するが、河床からの高さが増大するにつれて $x=6.6$ および 6.8 km における懸濁粒子濃度のピーク値は減少傾向を示し、逆に、 $x=6.2$ および 6.4 km における懸濁粒子濃度のピーク値は増大傾向を示す。

(3) 数値計算結果は、肱川の河口から 6 km の地点において得た懸濁粒子の観測結果と定性的に一致する。しかしながら、計算値は観測値よりも低い場合が多いこ

とから、凝集・沈降機構を評価するのに用いた小田らの実験式を現地に適用するに当たっては修正が必要か否かをも含めて再検討する必要がある。

(4) 懸濁粒子の総フラックスが小さい領域では藻類の生育が良好であり、懸濁粒子の堆積が藻類の生育に深く関わっていることが明らかである。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費(基盤研究(B)、代表者：田中 仁)および河川整備基金(河川環境管理財団)の一部として行われた。

参考文献

- 伊福 誠・合田宏隆・中田正人 (2002): 河川感潮域における懸濁粒子の観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 351-355.
- 愛媛県 (2001): 平成 13 年版 愛媛県環境白書, pp. 294-295.
- 小田一紀・宋 元平・芝村 圭・農本 充 (1999): 塩水中における微細土粒子の凝集・沈降過程に関する研究—ベントナイトをモデルとして—, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 981-985.
- 国土交通省大洲工事事務所 (2001a): 平成 12 年度 肱川塩水遡上調査業務報告書, pp. 50-58.
- 国土交通省山鳥坂ダム工事事務所 (2001b): 平成 12 年度 肱川河口域藻類調査業務委託報告書, pp. 22-24.
- 佐藤慎司・Harry Yeh・加藤史訓 (2001): 利根川河口周辺沿岸域における浮遊懸濁粒子の挙動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 626-630.
- 鷺見栄一・鋤崎俊二 (2001): 沿岸海域の懸濁粒子の粒径分布の現地測定とデトリタス分布, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1101-1105.
- 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斎藤大作・山崎真一 (2002): 石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1016-1020.
- 横山勝英・宇野誠高 (2001): 河川感潮域における高濁度水塊の挙動—強混合河川の場合—, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 631-635.
- Camp, T. R. (1943): Velocity gradients and internal work in fluid motion, J. Boston Society of Civil Engineers, Vol.30, No.4, pp. 219-237.
- Ifuku, M. and Y.Kusu (1999): Numerical analysis of saline water intrusion with propagation of tide, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol.17, No.1, pp. 131-141.
- Leussen, W. van (1988): Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp. 347-377.
- Riethmüller, R. et al. (1988): Hydrographic measurement in the turbidity zone of the Weser estuary, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp. 332-344.