

肱川感潮域における懸濁物質の二次元数値解析

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF SUSPENDED SOLID IN HIJI RIVER ESTUARY

伊福 誠¹・坂田健治²・玉井秀子²

Makoto IFUKU, Kenji SAKATA and Hideko TAMAI

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²学生員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

On the basis of the results of field measurements taken by the authors in 2001, numerical analysis for a suspended solid was carried out by two-dimensional numerical model that includes the aggregation process. The main objectives are to obtain the fundamental data for the effects of turbidity maximum performance of suspended solid on the environment of water quality and the bottom sediment in an estuary. Turbidity maximum occurs in the high water phase at a 6.6km point from the river mouth and the duration of the high concentration is about 1~2 hours. These results agree well with the field measurements. At a 5.5~6.7 km point from the river mouth where the aggregation is active, the diameter of the floc is about 100~1,000 times the diameter of suspended solid at the upper boundary and the effective density of the floc is approximately $13\sim56 \text{ kg/m}^3$. It is approximately the same as that of fluid.

Key Words : estuary, saline water, suspended solid, flocculation, two-dimensional analysis

1. はじめに

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いことが明らかにされつつある¹⁾。また、小田ら²⁾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 60km 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³⁾。また、わが国においては、佐藤ら⁴⁾

や鷺見ら⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾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。著者の一人⁸⁾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

の知り得る限りが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、著者の一人が図-1に示す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。

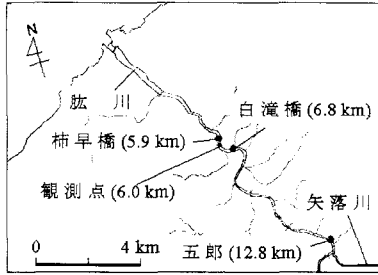


図-1 肱川下流域と観測点

2. 数値解析

(1) 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、Boussinesq 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。

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

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。なお、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。

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

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。

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

ここに、 c_{sm} 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 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。

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

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。

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

ここに、 S は塩分、 K_x および K_z は、それぞれ x 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。

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

ここに、 Cs は懸濁粒子濃度、 w_f は懸濁粒子の沈降速度、 K_{xx} および K_{zz} は、それぞれ x 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 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。

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

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。

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

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。

$$\left. \begin{aligned} p / \rho_0 g &= (\xi - z) + \beta \int_z^\xi S dz \\ \beta &= (\rho_s - \rho_0) / \rho_s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 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。

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

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。

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

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。

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

ここに、 u_ξ 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に対しては以下の条件を課す。

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

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

河床においては、圧力、流速、塩分および懸濁粒子濃度に対して以下の条件を課す。

$$z = z_b \left\{ \begin{aligned} p / \rho_0 g &= (\xi - z_b) + \beta \int_{z_b}^{\xi} S dz \\ u &= w = 0 \quad (\text{no-slip}) \\ \partial S / \partial z &= 0, \quad \partial C_s / \partial z = 0 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

d)自由水面

自由水面においては、以下の条件を課す。

$$z = \xi \left\{ \begin{aligned} p &= 0 \\ \partial u / \partial z &= 0 \\ w_\xi &= \partial \xi / \partial t + u_\xi (\partial \xi / \partial x) \\ w_\xi S - K z (\partial S / \partial z) &= 0 \\ w_\xi C_s - K z z (\partial C_s / \partial z) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (15)$$

ここに、 w_ξ 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。

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

ここに、 G は攪拌強度である。

攪拌強度 G は、次式で与えられる⁹⁾。

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

一方、十分成長したフロックの有効密度 $\rho_e (\text{g/cm}^3)$ 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 $ds (\mu\text{m})$ 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。

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

ここに、 $\rho_e = \rho_{ss} - \rho$ であり、 ρ_{ss} および ρ は、それぞれ懸濁粒子および流体の密度である。

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 ds 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。

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

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9kmの位置である。そこで解析する範囲は河口から上流側に10km、河口から海側に0.5kmの位置を海側境界とし、そこでの河幅は5km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0.2km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を20,000等分し、50周期間計算した。なお、著者らは、解析対象とした河道全域における懸濁粒子の堆積状態を十分把握していない。懸濁粒子のpick-upについて圧密を考慮すべきか否か検討中であるので、ここでは懸濁粒子の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2001年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2.5mとした。なお、上流境界の流量は、河口から約13km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¹⁰⁾。そこで、上流側境界における懸濁粒子の濃度は、10 mg/l とした。

山西¹²⁾は、熊本港内底泥および佐賀県牛津川底泥を用いて攪乱・不攪乱底泥野巻き上げ特性について検討し、粒径が1.4～9.7 μm の底泥の密度は、2,510～2,660 kg/m^3 であることを得ている。肱川の河床堆積物や懸濁粒子の密度も熊本港や牛津川のそれと同程度であると考え、2,600 kg/m^3 とした。

(6)各種係数の評価

Smagorinsky 定数は、Ifuku・Kusu¹³⁾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-2は、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。なお、懸濁粒子濃度は、底面から50cm程度まではほぼ同一である。底面ではnon-slipの境界条件を課しているため、流速の変動が表示できない。ここでは、10cmの高さにおける値を表示するものとする。

(a)は、4km (x :河口からの距離)におけるものである。塩分は、満潮時からかなり遅れた $t/T=0.4$ (T :潮汐の周期)付近で13 psu程度の最大値を示す。また、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1000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ほぼ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える。なお、 $x=5.4$ kmより下流側での懸濁粒子濃度は急激に低下する。

(b)は、観測点の $x=6$ kmにおけるものである。懸濁粒子濃度は、縦断方向流速の向きが逆転する位相付近から

急激に増大し、上流境界における値の50倍である500 mg/l 以上の濃度は1.6時間程度続く。このことは、観測によって得た結果と定性的・定量的に一致する。なお、観測結果によれば、塩分は2 psuから18 psu程度まで変動しているが、計算結果は10 psu程度でほぼ一定である。

(c)は、 $x=6.6$ 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きへ逆転する時間帯付近で急激に増大し 10^4 mg/l 程度の最大値を示す。

(a)～(c)の懸濁粒子の挙動をみると、高濃度は水位がほぼ最高となり、縦断方向流速がほぼ0 cm/s となる位相で生じ、水位の低下とともに徐々に下流側へ伝播している。なお、最大濃度を生ずる $x=6.6$ kmで生じた懸濁粒子のピークが $x=6.0$ kmおよび $x=5.4$ kmまで伝播するのに要する時間は、それぞれ1.4および3.2時間程度である。

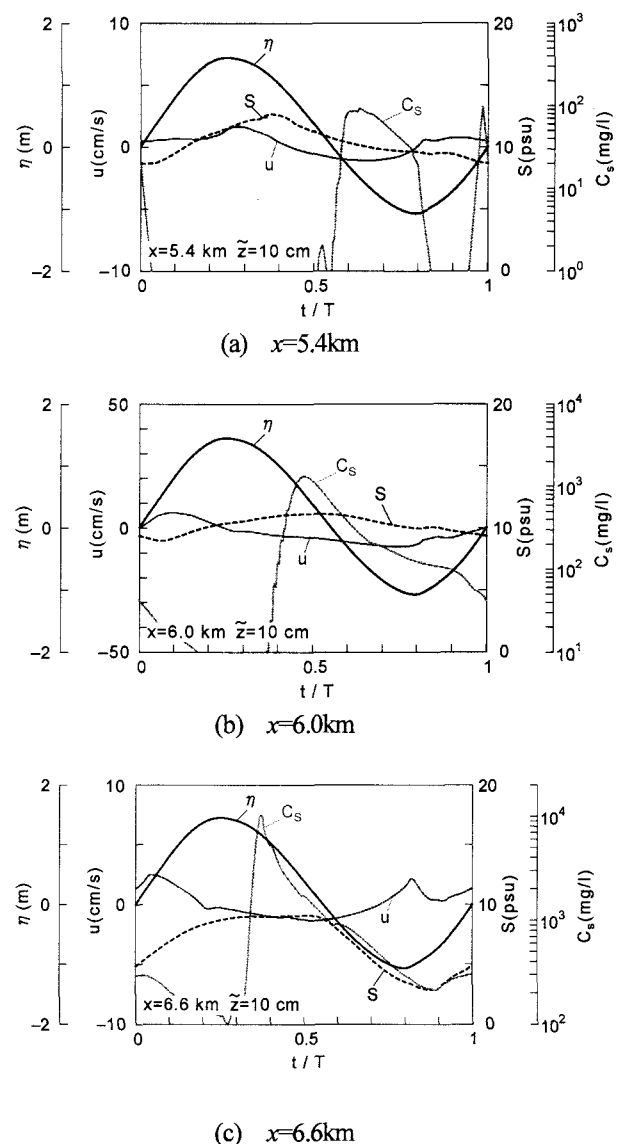


図-2 水位、流速、塩分および懸濁粒子濃度 ($\bar{z}$:河床からの高さ)

(2)一潮汐間の懸濁粒子濃度の変動

図-3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10 cmの高さにおけるものである。 $x=6.2\sim 6.8$ kmにおいては、懸濁粒子の変動は似た傾向を示し、 $t/T=0.2$ 付近で急激に増大し、 $t/T=0.25\sim 0.4$ 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 10^4 mg/l 程度である。さらに、 $x=5$ kmにおいて懸濁粒子濃度は、 $t/T=0\sim 0.55$ 付近までは限りなく0に近い値を示し、 $t/T=0.55$ を過ぎたあたりから急激に増大し、 $t/T=0.6$ 付近で300mg/l 程度の最大値を示す。その後、緩やかに低下し、 $t/T=0.8$ 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、濃度が徐々に低下しながら、 $x=5$ km 付近まで約4時間掛けて移動する。

河床から離れた高さにおける懸濁粒子濃度も似た傾向を示し、鉛直混合が強いことがわかる。しかし、 $t/T=0.3$ 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。

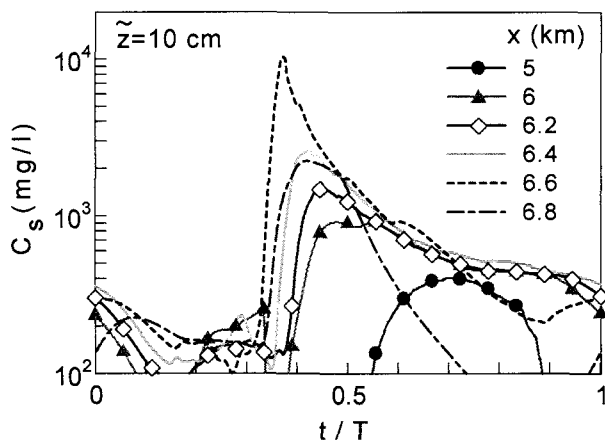


図-3 一潮汐間の懸濁粒子濃度の変動

(3)塩分、懸濁粒子濃度、粒径および有効密度

図-4は、観測点付近において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5.8~6.1 km 付近の粒径は上流境界における100~1,000 倍の0.5~5 mm までにも達する。さらに、6.5~7.1

km 付近の粒径は上流境界における10~40 倍の0.05~0.2 mm である。また、有効密度は $13\sim 56$ kg/m³ 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 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。

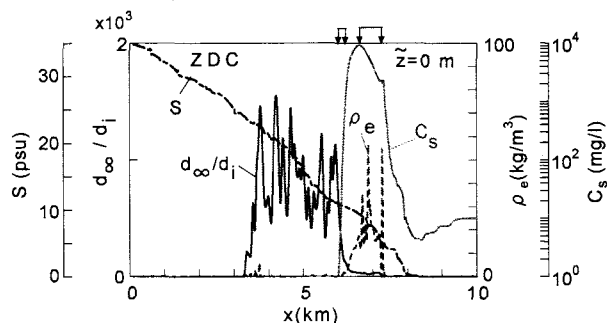


図-4 塩分、懸濁粒子濃度、粒径および有効密度の空間分布

(4)懸濁粒子のフラックス

図-5は式(20)で各時刻における上流向きおよび下流向きフラックスを一潮汐に渡って算出した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。

$$F = \int_t^{t+T} \int_{z_b}^{\xi} u \cdot C_s \, dz \, dt \quad (20)$$

上流向きおよび下流向きのフラックスは、河口から4.5~5 km 付近から急激に増大する。なお、上流向きフラックスは、塩水の遡上限界である8 km 付近から激減する。懸濁粒子の底面からの pick-up は考慮していないが、上流向きおよび下流向きのフラックスには増加がみられる。これは、懸濁粒子が凝集して粒径が増大し、その結果として沈降速度が大きくなり底面近傍の懸濁物質濃度が増大したためである。こうした上流側あるいは下流側へ輸送された懸濁粒子は、水位の変動に伴って側岸付近に沈降・堆積することによって底質環境や水質環境に悪影響を及ぼすことが懸念される。

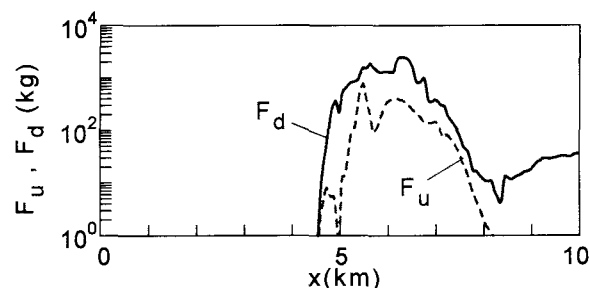


図-5 総フラックスの分布

図-6 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-5 と比較してみると、懸濁粒子のフラックスが極めて小さい 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¹⁴⁾、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・定量的に一致する。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 $1,060 \text{ kg/m}^3$ 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大値が 8 psu 以上の場合、懸濁粒子濃度は $1,000 \text{ mg/l}$ 程度となり数値計算で得た値とほぼ一致する。

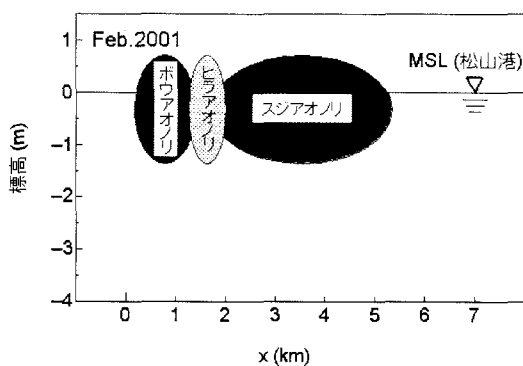


図-6 藻類の分布¹⁴⁾

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 6~8 psu 程度の塩分が懸濁粒子の凝集に大きく影響している。この値は、観測によって得た値とほぼ一致する。
- (2) 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・定量的に一致する。しかしながら、凝集・沈降機構を評価するのに用いた小

田らの実験式中、塩分のしきい値の選択によって懸濁粒子濃度はかなり変動する。小田らの実験式を現地に適用するに当たっては詳細な検討が必要となるかも知れない。

(3) 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

- 1) Leussen, W. van: Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp.347-377, 1988.
- 2) 小田一紀・宋 元平・芝村 圭・農本 充：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, 1999.
- 3) Riethmüller, R. et al.: 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, 1988.
- 4) 佐藤慎司・Harry Yeh・加藤史訓：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(1), pp.626-630, 2001.
- 5) 鷺見栄一・鋤崎俊二：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(2), pp.1101-1105, 2001.
- 6) 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斎藤大作・山崎真一：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, 2002.
- 7) 横山勝英・宇野誠高：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, 2001.
- 8) 伊福 誠・合田宏隆・中田正人：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, 2002.
- 9) Camp, T. R.: Velocity gradients and internal work in fluid motion, J. Boston Society of Civil Engineers, Vol.30, No.4, pp.219-237, 1943.
- 10) 国土交通省大洲工事事務所：平成 12 年度 肱川塩水遡上調査業務報告書, pp.50-58, 2001.
- 11) 愛媛県：平成 13 年版 愛媛県環境白書, pp.294-295, 2001.
- 12) 山西博幸：波動下での底泥輸送に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 174p., 1998.
- 13) Ifuku, M. and Y. Kusu: Numerical analysis of saline water intrusion with propagation of tide, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.17, No.1, pp.131-141, 1999.
- 14) 国土交通省山鳥坂ダム工事事務所：平成 12 年度 肱川河口域藻類調査業務委託報告書, pp.22-24, 2001.

(2003.9.30 受付)