

掃流砂・浮遊砂の流出に伴う河口テラスの初期堆積機構

伊達政直*・泉 典 洋**・田 中 仁***

1. はじめに

海や湖等の河口部に形成される河口テラスは内水排除や近隣海岸への土砂供給源という観点から工学的に重要な問題であるが、その形成プロセスは流れや波とそれによる土砂輸送が相互に影響し合う複雑な現象であり、未だに不明点が多い。

Özsoy (1977) は、境界層近似を施し横断方向に積分した浅水方程式を用い、流速の横断分布形の相似性を仮定することによって河口噴流の流速分布を求め、浮遊砂による初期堆積形状を求めている。potential core の存在まで考慮に入れた彼の理論は先駆的ではあるものの、浮遊砂の堆積モデルには原始的な経験則が用いられており、底面剪断力が限界値を超えると浮遊砂濃度がいくらか大きくても侵食が生じるという矛盾をはらんでいる。また掃流砂を完全に無視しているため、ある程度粒径の大きい砂によるテラス形状を再現することはできない。

本研究では Özsoy の解析手法を継承しつつも、不完全であった浮遊砂による堆積モデルをより合理的なものにすると同時に、掃流砂による堆積機構を導入し、様々な異なる条件下での初期堆積形状の特徴を明らかにする。

2. 理 論

2.1 河 口 噴 流

河口噴流を河口部近傍の流れの展開領域 (以下 ZOFE) とそれより遠方の完全発達領域 (以下 ZOEF) の二つの領域に分割する (Özsoy, 1977; Joshi, 1982)。ZOFE では potential core が発達し、中央流速 u_c は変化しない。ZOEF では potential core は存在せず、流速の横断分布形状の相似性が仮定される。図-1 にその概念図を示す。

流体運動の基礎方程式として二次元浅水方程式と連続式に境界層近似、無次元化を施した以下の式を用いる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial (-\bar{u}'v')}{\partial y} - \frac{u^2}{h^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

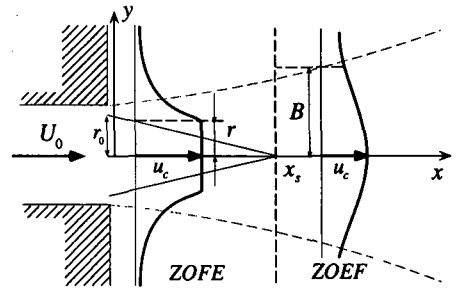


図-1 Potential Core の概念図

$$\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで x 及び y はそれぞれ流下方向及び横断方向の座標、 u 及び v はそれぞれ x 及び y 方向の水深平均流速、 u' 及び v' は流速の乱流変動成分、 $\bar{}$ はその時間平均、 h は水深であり、それぞれ後述するような無次元化が施されている。底面は横断方向に水平で流下方向に一様勾配とし、堆積初期における水深 h を次式で表す。

$$h(x) = 1 + I \cdot x \quad \dots\dots\dots (3)$$

無次元化の際、河口噴流における横断方向と流下方向の長さスケールの比 δ を導入し、この値を微小とみなして δ の一次以上の項を無視している (境界層近似)。 δ 及び河口中央 ($x=0, y=0$) における、噴流の半値幅 B_0 、水深 H_0 、流速 U_0 を用いて次の無次元化を行った。

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= (B_0/\delta)x, \quad \tilde{y} = B_0y, \quad (\tilde{B}, \tilde{r}) = B_0(B, r) \\ \tilde{u} &= U_0u, \quad \tilde{v} = \delta U_0v, \quad (\tilde{h}, \tilde{\eta}) = H_0(h, \eta) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\tilde{B}$ は噴流の半値幅、 $\tilde{r}$ は potential core の半幅、 $\tilde{\eta}$ は底面の高さであり、 δ 及び I は次式で表される。

$$\delta = n^2 B_0 g / H_0^{4/3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$I = i_0 B_0 / H_0 \delta = i_0 H_0^{1/3} / n^2 g \quad \dots\dots\dots (6)$$

i_0 は海浜域の底面勾配、 n はマンニングの粗度係数である。

中央流速 $u_c(x)$ 、半値幅 $B(x)$ を用いて流速分布形を次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_c \cdot f(\eta), \quad f(\eta) = \exp[-0.693\eta^2] \\ \eta &= \begin{cases} 0 & (|y| \leq r) \\ (|y| - r)/(B - r) & (r < |y|) \end{cases} \quad \text{in ZOFE} \\ \eta &= y/B & \text{in ZOEF} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科
 ** 正 会 員 Ph.D. 東北大学助教授 大学院工学研究科
 *** 正 会 員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

式(1), (2)を $y=-\infty$ から ∞ まで積分し次式を得る.

$$\frac{d}{dx}(\beta_2 u_c^2 B) + \frac{\beta_2 u_c^2 B}{h^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{d}{dx}(\beta_1 u_c B h) - 2\alpha^* u_c h = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで α^* は正規化された連行係数($=\alpha/\delta$), α は連行係数, β_1 および β_2 は積分補正係数で次式で定義される.

$$v|_{\pm\infty} = \mp \alpha^* u_c, \int_{-\infty}^{\infty} u dy = \beta_1 u_c B, \int_{-\infty}^{\infty} u^2 dy = \beta_2 u_c^2 B \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(8), (9)より u_c , B を求め, 式(7)に代入して $u(x, y)$ を得る. $v(x, y)$ は式(2)を横断方向に積分した次式より得る.

$$v = -\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x}(u_c h) \int_0^y f(\eta) dy + \frac{u_c}{B^2} \frac{dB}{dx} \int_0^y y \frac{df}{d\eta} dy \quad \dots\dots\dots (11)$$

a) ZOFEにおける流速分布

potential core内においては u_c が一定($=1$)となると, β_1 及び β_2 が $r(x)$ の関数となることに注意すると, $r(x)$ 及び $B(x)$ に関する次式が得られる.

$$\frac{d}{dx}(\beta_2 B) + \frac{\beta_2 B}{h^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{d}{dx}(\beta_1 B h) - 2\alpha^* h = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで $x=0$ での境界条件 $B(0)=1$ 及び $r(0)=r_0$ (後述)を用いて上式を解くと r , B が得られる. また $r=0$ となる点 $x=x_s$ がZOFEとZOEfの境界となる.

b) ZOEfにおける流速分布

ZOFEと異なり β_1 , β_2 は定数(それぞれ2.13, 1.51)であることに注意すると, 次式が得られる.

$$\frac{d}{dx}(u_c^2 B) + \frac{u_c^2 B}{h^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\beta_1 \frac{d}{dx}(u_c B h) - 2\alpha^* u_c h = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

a)より求められる $x=x_s$ における値を境界条件として上式を解くと u_c , B の分布が求まる.

2.2 掃流砂量

掃流砂ベクトル $(\bar{q}_x, \bar{q}_y)$ はMeyer Peter & Müller公式を用いて次のように表す.

$$(\bar{q}_x, \bar{q}_y) = \bar{q}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{-1/2}(\bar{u}, \bar{v}) \cong \bar{q}(1, v/u) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\bar{q} = 8(\tau^* - \tau_{c*}^*)^{3/2}(R_s g D_s)^{1/2} D_s \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\tau^* = \bar{\tau}/(\rho R_s g D_s) = (n^2 U_0^2 H_0^{-1/3} R_s^{-1} D_s^{-1}) \cdot u^2 h^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで $\bar{\tau}$ は底面剪断力, τ^* はシールズ数, τ_{c*}^* は限界シールズ数, R_s は砂粒子の水中比重($=1.65$), D_s は砂の粒径である. 式(16), (17)を無次元化して次式を得る.

$$(q_x, q_y) = q(1, v/u) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$q = \bar{q}/Q_b = (u^2 h^{-1/3} - T_c^*)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで T_c^* 及び Q_b は次式で表される.

$$T_c^* = \tau_{c*}^* R_s D_s / n^2 U_0^2 H_0^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$Q_b = 8n^2 g^{1/2} U_0^2 H_0^{-1/2} R_s^{-1} \quad \dots\dots\dots (22)$$

2.1で求められた流速分布から底面剪断力が求められる. 式(19)及び(20)より掃流砂量が計算できる.

2.3 浮遊砂量

浮遊砂の基礎方程式として, 移流拡散方程式を水深積分し, 境界層近似, 無次元化を施した次式を用いる.

$$u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial(-\bar{v} \xi)}{\partial y} = \varepsilon - \mathcal{D} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ξ は水深積分した無次元浮遊砂濃度($\xi = \xi_0 \zeta$)であり, ξ はその次元量, ξ_0 は河口中央での ξ , ζ は ξ の乱流変動成分である. $\mathcal{D}$ と ε はそれぞれ無次元沈降量と巻上げ量であり, 河口中央($x=0, y=0$)で地形変化がない($\varepsilon = \mathcal{D}$)ことを仮定して次のように表される.

$$\mathcal{D} = B_0/(\delta U_0 \xi_0) \cdot \bar{\mathcal{D}} = \alpha_1 \zeta/(u_c h^{5/6}) \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\varepsilon = B_0/(\delta U_0 \xi_0) \cdot \bar{\varepsilon} = \alpha_1 u^4/h^{2/3} \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで $\bar{\mathcal{D}}$, $\bar{\varepsilon}$ は沈降量, 巻上げ量の次元量であり, 泉・池田(1991)にならって次式を用いている.

$$\bar{\mathcal{D}} = w_s^2 \bar{\xi}/\varepsilon_x \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\bar{\varepsilon} = 0.001 \tau^{*2} R_s^2 w_s \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここで w_s は砂粒子の沈降速度, R_s は無次元沈降速度($=w_s/(R_s g D_s)^{-1/2}$)である. ε_x は水深方向の浮遊砂拡散係数であり, 泉・池田(1991)に倣って次式を用いる.

$$\varepsilon_x = 0.1 u_c^* \bar{h} \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここで u_c^* は噴流軸上における摩擦速度である. 式(24), (25)中の α_1 は次式で表わされる.

$$\alpha_1 = 10 w_s^2 B_0 / n g^{1/2} U_0^2 H_0^{5/6} \delta \quad \dots\dots\dots (29)$$

Özsoy(1977)に倣い, 浮遊砂濃度の横断分布は次式で表されると仮定する.

$$\xi(x, y) = Z_c(x) \cdot F(\eta), \quad F(\eta) = f(\eta)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (30)$$

式(23)を横断方向に積分すると次式が得られる.

$$\frac{d}{dx}(\beta_3 u_c Z_c B) = \alpha_1 \left(\beta_4 \frac{u_c^4}{h^{2/3}} - \beta_5 \frac{Z_c}{u_c h^{5/6}} \right) B \quad \dots\dots\dots (31)$$

ここで β_3 , β_4 , β_5 は次式で表されるが, 流れの場合と同様ZOFEでは x の関数, ZOEfでは定数となる.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \xi dy = \beta_3 Z_c B, \int_{-\infty}^{\infty} u^4 dy = \beta_4 u_c^4 B, \int_{-\infty}^{\infty} u \xi dy = \beta_5 u_c Z_c B \quad \dots\dots\dots (32)$$

式(31)より得られる $Z_c(x)$ を式(30)に代入すれば $\xi(x, y)$ が得られることになる.

2.4 初期堆積形状

初期堆積形状は全堆積速度 $\partial \eta_T / \partial t$ に等しく, 次式のよう掃流砂の堆積速度 $\partial \eta_B / \partial t$ と浮遊砂の堆積速度 $\partial \eta_S / \partial t$ の和で表される.

$$\frac{\partial \eta_T}{\partial t} = \frac{\partial \eta_B}{\partial t} + \frac{\partial \eta_S}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここで

$$\frac{\partial \eta_B}{\partial t} = -\frac{1}{1+M_D} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad \text{.....(34)}$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial t} = \frac{M_D}{1+M_D} \frac{\mathcal{D}-\mathcal{E}}{\alpha_1} \quad \text{.....(35)}$$

であり、無次元パラメータ M_D は次のように表され、

$$M_D = 0.000125 U_0 H_0^{7/6} n^{-1} g^{-1/2} w_s^{-1} D_s^{-1} \quad \text{.....(36)}$$

時間 $\bar{t}$ は次のように無次元化されている。

$$\bar{t} = Tt, \quad T = \frac{H_0(1-\lambda_p)B_0}{\partial Q_B(1+M_D)} \quad \text{.....(37)}$$

ここで λ_p は空隙率である。

3. 実 験

3.1 実験方法

固定床及び移動床の実験を行い流速分布及び初期堆積形状を計測した。実験に用いた水路は、図-2に示すように、幅0.06m、長さ1.75mの直線水路部と幅0.80m、長さ3.00mの長方形水槽部を接続したものであり、下流端には堰を設け、横断方向に水位が一樣となるように越流させている。水槽内に1/10勾配の海浜部を1.00m設け、それより沖側は平坦床とした。固定床実験では、河口水位・流量の異なる4ケースについて電磁流速計を用いて流速分布の測定を行った。また移動床実験では、直線水路内に砂を敷きつめ、上流タンクから一定流量の給水を行うと同時に水路部上端に設置した給砂機を用いて一定量給砂を行った。実験条件を表-1に示す。

3.2 実験結果および考察

実験より得られた流速分布に式(7)を適用し u_c 及び B を算出した。得られた u_c 及び B の分布が理論値と適合

するように α の値を定めた。その結果 ZOFE では $\alpha=0.08$ 、ZOEF では $\alpha=0.13$ となった。ZOFE における α の値は一般に ZOEF より若干小さくなることが知られて

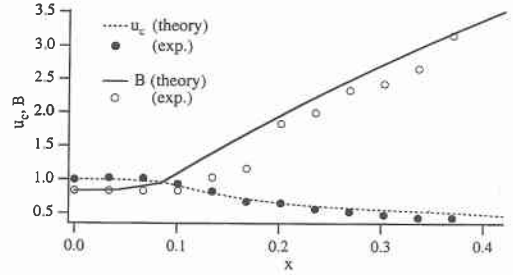


図-3 u_c , B の理論値と実験値の比較

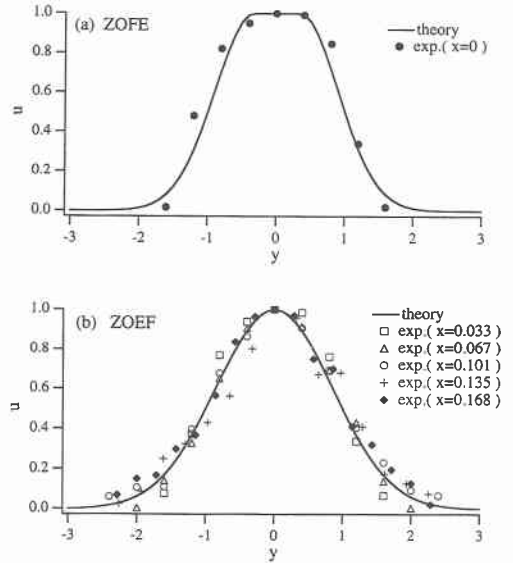


図-4 流速の横断分布形

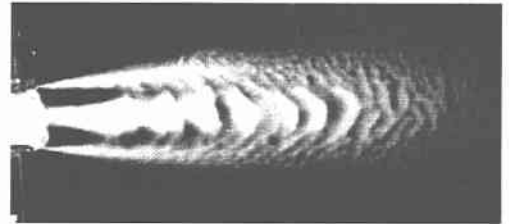


図-5 二時間後の堆積状況 (実験)

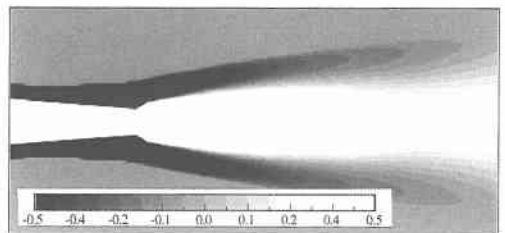


図-6 初期堆積形状 (計算)

図-2 実験装置 (単位: m)

表-1 実験条件

	U_0 (m)	H_0 (m)	給砂量(g/min.)
Case 1	0.135	0.05	0
Case 2	0.23	0.03	0
Case 3	0.053	0.05	0
Case 4	0.072	0.03	0
Case 5	0.23	0.03	5.41

おり(Özsoy 1977), Özsoyの用いた値と比較しても妥当な値となっている。 u_c 及び B の分布の実験値と理論値を図-3に示す。図-4に流速の横断分布を示す。実験で得られた横断方向の流速分布は式(7)に良好に一致しており、式(7)の仮定が妥当であったことを示している。

移動床実験における開始二時間後の堆積状況(写真)を図-5に示す。実験では十分な浮遊が生じておらず、この写真は掃流砂が支配的である場合の堆積形状であると考えられる。そこで $M_D=0$ として式(34)より算出された初期堆積形状を図-6に示す。理論は堆積初期においてのみ成り立つものであるのに対して、実験はある程度(最大、水深の20%程度)堆積が進んだ時点でのものであり、しかも海浜部に砂の無い状態から始めたため、両者の一致は決して良くない。しかし流軸の両側に侵食域が現れるという幾何学的特徴は良好に表れている。

4. 解析及び考察

4.1 I , T_c^* および M_D による堆積形状の変化

式(33)-(35)より得られる初期堆積形状を決定する無次元パラメータは δ , α , I , r_0 , T_c^* , M_D の六つである。この中で δ は y 方向と x 方向の長さスケールの比であり、この値が変化しても縦横の比が変化するだけに過ぎない。連行係数 α としては前節の実験で得られた値を用いる。また境界条件として r_0 を与える必要があるが、この値は主にpotential coreの長さを変化させるもので堆積形状を大きく変えることはない。 r_0 は川幅水深比が大きい河川ではほぼ1に近い値をとると考えられることから、 $r_0=0.9$ とした。

初期堆積形状が I , T_c^* , M_D によってどのように変化するかを示したのが図-7, 8, 9である。図は初期堆積形状のコンターを表わしており、明るい所ほど多くの堆積が、暗い所ほど侵食が生じていることを意味している。

浮遊砂が卓越する条件($T_c^*=0.05$, $M_D=1000$)のもとで無次元海浜勾配 I による堆積形状の変化を示したのが図-7(a), (b)である。(a)は $I=0$ (水平床), (b)は $I=2$ の時の堆積形状を表わしている。流軸上では侵食が生じており、その両側に堆積が生じているが、 I が小さ

くなると堆積域は横断方向に拡大することがわかる。

掃流砂が卓越する条件($I=0$, $M_D=0$)のもとで T_c^* の値による堆積形状の変化を示したのが図-8(a), (b)である。図-7とは異なり流軸上に堆積が生じ、流軸の両側に侵食域が現れる。 T_c^* は限界シールズ数と河口中央におけるシールズ数との比である。したがって、この値が小さいほど掃流が活発に起こり、 $T_c^*=1$ の時、掃流は起こらなくなる。 $T_c^*=0.05$ の時(図-8(a))掃流砂による堆積は広範囲に及んでいるが、 $T_c^*=0.3$ の時(図-8(b))は狭い範囲に限られているのがわかる。

図-9に M_D による堆積形状の変化を示す。ここでは $T_c^*=0.05$, $I=2$ としている。 M_D は掃流砂と浮遊砂のどちらが支配的なのかを示すパラメータであり、大きいほど浮遊砂が支配的であることを示している。(a)は $M_D=0.1$ であり掃流砂が活発な状態に対応している。このとき堆積は主として流軸上で生じ、その両側には帯状の侵食域が生じている。(b), (c)はそれぞれ $M_D=3$, 10であ

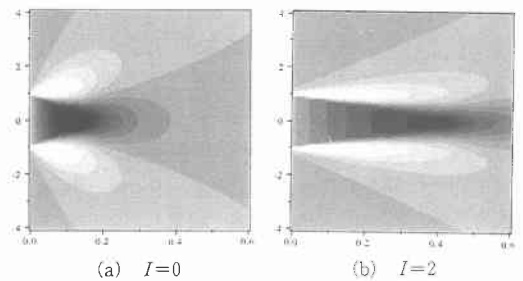


図-7 I による堆積形状の変化 ($T_c^*=0.05$, $M_D=1000$)

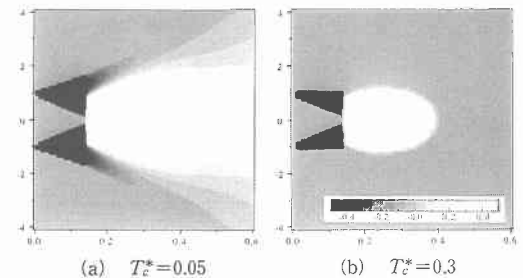


図-8 T_c^* による堆積形状の変化 ($I=0$, $M_D=0$)

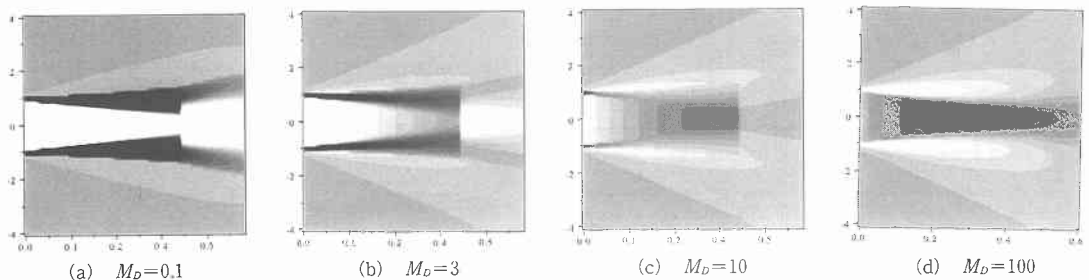


図-9 M_D の変化による堆積形状の変化 ($T_c^*=0.05$, $I=2$) (図中縦軸は y , 横軸は x を表わす。図-7, 8も同様)

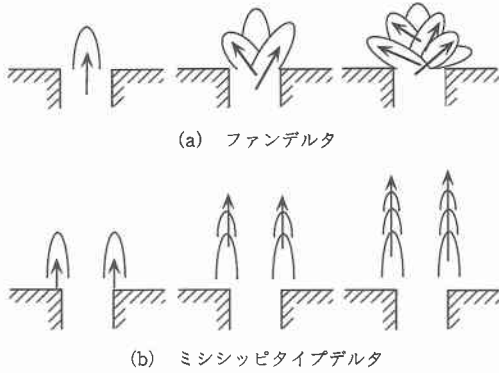


図-10 テラスからデルタへの発達


(a) Lagna Salada (Mexico) 西岸に形成されたファンデルタ (McPherson *et al.* (1987) より引用)


(b) ミシシッピデルタ (Davis (1994) より引用)

図-11 代表的な河口地形

り、掃流砂が卓越している状態から浮遊砂が卓越している状態へ移行する過程を表している。(d)は $M_D=100$ であり浮遊砂が支配的な状態である。このとき流軸の両側に自然堤防のような堆積が発生する。

4.2 テラスからデルタへ

本理論は底面形状の変化が無視できるような堆積初期においてしか成り立たないが、その後の堆積形状について大きな示唆を与えてくれる。例えば掃流砂が卓越し流軸上に堆積が生じるような場合、当初中心軸上にあった流軸は土砂堆積による流速逓減効果によって、中心軸上から左右どちらかにずれる。この流軸の首振り現象は堆積域を放射状に順次変化させ、円弧状をしたファンデルタを出現させることになる(図-10(a), 11(a))。

それに対し浮遊砂が卓越し自然堤防のような堆積が流軸の両側に堆積する場合、流軸は固定され、安定的に形成された自然堤防によって河口部は沖側に伸び、ミシシッピ川に見られるようなミシシッピタイプデルタが形成されることになる(図-10(b), 11(b))。

5. おわりに

本研究では河口噴流とそれによる掃流砂及び浮遊砂の堆積によって形成される河口テラスの初期堆積形状に関する数学モデルを提案し、以下の諸点を明らかにした。

- 1) 実験によって得られた横断方向の流速分布は式(7)で良好に表すことができる。
- 2) 適当な α を選ぶことでモデルは実験から得られた u_c 及び B の分布を良好に表すことができる。
- 3) 掃流砂による初期堆積形状について、理論は実験結果の幾何学的特徴(流軸の両側の侵食域)を良好に表すことができる。
- 4) 河口テラスの初期堆積形状は、主として I 、 T_c^* 、 M_D の三つの無次元パラメータで決定される。
- 5) 掃流砂が支配的であるとき河口噴流の流軸上に

堆積が生じ、浮遊砂が支配的であるとき流軸を挟んだ両側に自然堤防のような堆積が生じる。

6) 河口テラスは掃流砂が卓越する場合ファンデルタへ、浮遊砂が卓越する場合ミシシッピタイプデルタへ発達していく。

謝辞：本研究に対し、科研費の補助があった。記して謝意を表する。

参考文献

- 泉 典洋・池田駿介 (1991): 直線砂床河川の安定横断河床形状, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 47-55.
- Davis, R. A. Jr. (1994): *The evolving coast*, Sci. Am. Lib., 231 p.
- Joshi, P. B. (1982): Hydromechanics of tidal jets, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 108, pp. 239-253.
- McPherson, J. G., G. Shanmugam and R. J. Moiola (1987): Fan-deltas and braid deltas: Varieties of coarse-grained deltas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 99, pp. 331-340.
- Özsoy, E. (1977): Flow and mass transport in the vicinity of tidal inlets, *Technical Report* No. TR-036, 196 p.