

出水時における河口前面でのテラス形成過程の計算

田 中 仁*・秦 恵 敏**

1. 序 論

河口部に大規模な砂州が形成されている河川では、洪水時にこれがフラッシュされ、河口前面に「テラス地形」と呼ばれる舌状の堆積地形が発生することが知られている。河口テラスの形成を扱った研究としては、現地資料にもとづく研究として、須賀・石川・灘岡・田中 (1987)、澤本・首藤・谷口 (1987)、佐々木・宇多・刀爾・菅原・海野 (1987) がある。また、実験的研究としては、Butakov (1971)、榎木・出口・片山 (1987)、田中・須賀・高山・羽鳥 (1987) 等が挙げられる。テラス地形の発達プロセスは、内水排除という観点から工学的にきわめて重要な問題であるが、一方、宇多・山本・永瀬 (1992) は河川流出土砂の近隣海岸への供給源といった観点から現地資料の解析を行っている。

河道計画に重要となる洪水時の河口水位の時間変化は、河口地形変化過程と密接に関係しているが、実際に現地において出水時の河口地形変化の詳細を観測することはほぼ不可能である。先に示した現地データをもとにした研究においても、洪水直後の測量結果をもとにしている。従って、河口地形変化およびこれに伴う河口水位の変動の予測に際しては、数値計算による手法が極めて有効な手段となると考えられる。

現在までに、榎木・出口・片山 (1987)、Hatanaka and Kawahara (1989)、佐藤・首藤 (1992) らにより河口前面テラスの数値計算が試みられているが、その予測手法が十分に確立されているとは言えない。特に、河口前面では水深の増大に伴い流速が急激に減少しており、このような場での流れ場・砂移動の計算に際し、従来の平面二次元計算法がそのまま適用出来るかは不明である。また、掃流状態の砂移動が卓越する場合、テラス縁部の斜面はほぼ安息角を保って前進する。このような堆積形態の予測に関しては、貯水池堆砂を対象とした研究が既になされているが、多くは一次元解析であり、本論文で扱う河口流れとは大きくかけ離れている。

そこで、本研究では出水時における河口周辺の地形変

化、特に河口テラスの形成過程を予測するための平面二次元モデルを構築し、さらに著者の一人により行われた室内実験結果との比較を行うことにより、モデルの妥当性の検討を行った。

2. 実験データ

検証データとしては、著者の一人によって行われた室内実験データ (田中・須賀・高山・羽鳥, 1987; Tanaka・Suga, 1993) を用いた。実験には幅 350 cm, 長さ 540 cm, 深さ 60 cm の平面水槽を用いた。その概要を図-1 に示す。海浜部・河口部共に木製の固定床で、海浜の勾配は 1/10 であり、沖側の一様水深部の水深は 25 cm である。海浜中央部には幅 30 cm の河道を設け、沖に向けて導流堤を設置した。実験では、河川上流から一定流量の水を流すと共に砂の供給を行い、河口前面地形の変化を測定した。実験には平均粒径 0.2 mm の豊浦標準砂を用いた。一般に、洪水時には波の作用に比べ河川流が卓越する。従って、本実験では波は作用させていない。実験は合計で 11 ケース行われたが、ここではそのうちのケース H, ケース J を対象として計算を行った。両ケースの実験条件を表-1 に示した。ここで、給砂量は空隙を含む体積で示したものであり、導流堤長は汀線 (図-1 の y 軸原点) よりの長さである。

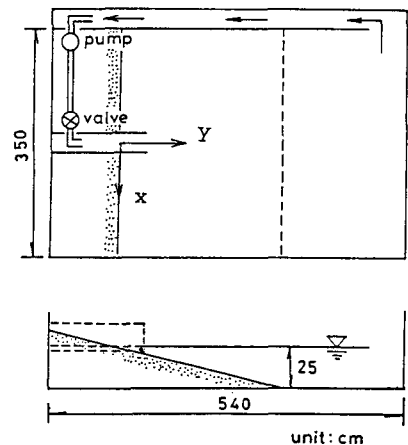


図-1 田中ら (1987) の用いた実験水槽

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

** M. Eng. Hong Kong Univ. of Sci. and Tech. 博士課程

表-1 実験条件

Case	導流堤長 (cm)	流量 (1/sec)	給砂量 (1/min)	給砂時間 (min)
H	15.0	2.30	3.30	18
J	75.0	2.30	3.30	24

3. 計算方法

本計算で用いたモデルは、水理モデルおよび地形変化モデルよりなる (Tanaka・Qin, 1993)。基礎方程式・計算法などの基本的なモデルの構成は、津波による地形変動の計算を行った高橋・今村・首藤 (1992) のそれとほぼ同様である。すなわち、流体運動の基礎方程式としては浅水流方程式を用い、これと砂移動の連続式を連立させて、流れ場と地形の時間発展を求めて行くものである。本モデルと高橋ら (1992) のそれとの主な相違点としては、①水理計算・地形計算の境界条件の与え方、②水理計算の際、運動量の水平拡散項を考慮したこと、③点である。①に関しては、河川上流端で流量及び給砂量を、海側沖側境界で水位を与えた。②に関しては次節に詳述する。

流砂量公式としては、河川でよく用いられている Meyer-Peter・Muller (1948) の式を二次元に拡張した次式を用いた。

$$q'_x = 8\sqrt{sgd^3}(\tau^* - \tau_{0cr}^*) \frac{M}{\sqrt{M^2 + N^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q'_y = 8\sqrt{sgd^3}(\tau^* - \tau_{0cr}^*) \frac{N}{\sqrt{M^2 + N^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 (q'_x, q'_y) は斜面効果を考慮していない移動砂量の x, y 方向成分、 s : 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 砂の粒径、 τ^* : 無次元掃流力、 τ_{0cr}^* : 移動限界無次元掃流力、 (M, N) : 線流量の x 成分、 y 成分である。ここで、 τ^* の評価にはマニング則を用い、 τ_{0cr}^* は岩垣公式により求めた。

通常、テラスの縁部の斜面は急な勾配を有することが知られている。従って、この形状を計算で再現するためには、砂移動に対する重力の効果を加味する必要がある。このために、ここでは渡辺ら (1984) の手法を用いた。すなわち、次式により式 (1)、(2) の (q'_x, q'_y) を補正し、実際の移動量 (q_x, q_y) を得る。

$$q_x = q'_x - \varepsilon_s |q'_x| \frac{\partial z}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q_y = q'_y - \varepsilon_s |q'_y| \frac{\partial z}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 z : 基準面からの砂面高さ、 ε_s : 定数である。

本研究では差分法により計算を行った。流れ場の計算には、後藤・小川 (1982) による Leap-frog 法をもとに

して計算を行った。地形変化の計算においては、水理量計算と同様に staggered scheme を用い、線流量計算点と流砂量計算点、および水位計算点と地形高さ計算点とをそれぞれ一致させた。計算では空間格子間隔を全領域で一様な 10 cm とした。なお、異なる格子サイズの領域を連結させることにより、浅海域での計算精度を上げることが出来る (例えば、後藤・小川, 1982)。本研究では、均一格子による計算の他に異格子を接続させた計算も行っているが、ここでは紙面の都合上、前者の結果のみを報告する。

4. 結果

本研究では、まず Case J を対象として基本式に含まれる係数の同定を行った。次に、得られた係数を用いて Case H の計算を行い、その値の妥当性を検証した。

(1) Case J

田中ら (1987) の実験結果によれば、河川流の水理条件により、幅 B と長さ L の比で代表される河口テラス形状が大きく変化する。田中ら (1987) は B/L 比を河道内流れの底面剪断応力の関数として表したが、直接的にはテラス上の流れとテラス地形との相互干渉のもとに、ある地形が出来上がると考えられる。従って、精度よい地形予測が行うためには、まず正確な流れ場の予測が必要となる。

本研究では、当初、運動方程式中の水平拡散項を除いて計算を行ったが、テラスは流下方向に細長く伸び、実験で見られた横断方向への伸長が得られなかった。これは、河口前面での流れの直進性が強すぎ、実験でみられる様なジェット状の流れの拡がりを予測することが出来なかったことによると考えられた。そこで、運動方程式に水平拡散項を導入し、運動量水平拡散係数としては、Fischer (1973) により実河川に対して提案されている次式を用いた。

$$A_h = 0.6Du^* \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 D : 全水深、 u^* : 摩擦速度である。

砂の連続式として用いた渡辺ら (1984) の式の中には、斜面の効果を表わす係数 ε_s が含まれる。通常は、 $\varepsilon_s = 10$ (渡辺ら, 1984)、あるいは $\varepsilon_s = 2$ (Dibajnia・渡辺, 1987) 程度の値であることが知られている。 $\varepsilon_s = 5, 10$ 及び 20 とした Case J を対象とする計算結果を図-2 に示した。図は河口中央測線での縦断図を示している。 ε_s 値の増加に連れて、テラス斜面の勾配がより緩やかになる。このうちで、 $\varepsilon_s = 10$ によるもののがもっとも良好な結果を与える様である。なお、 $\varepsilon_s = 2.0$ を用いて計算を行ったところ、図-3 に示すように、計算途上でテラスの前縁部斜面がほぼ直立してしまい、テラス全体の進行が止まってしまった。ただし、図-3 は計算開始後 8 分後の結果を示し

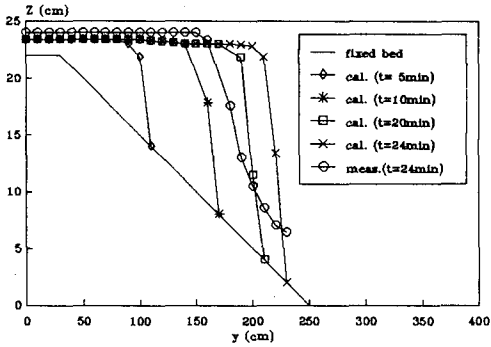
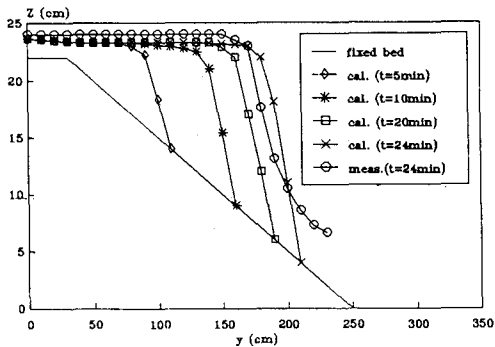
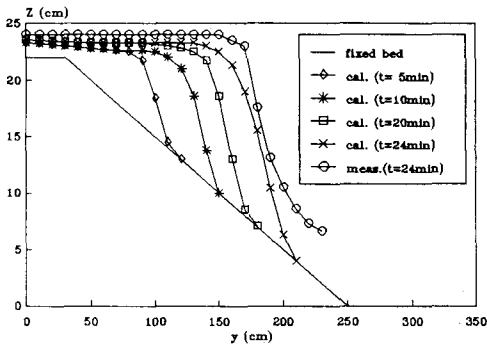
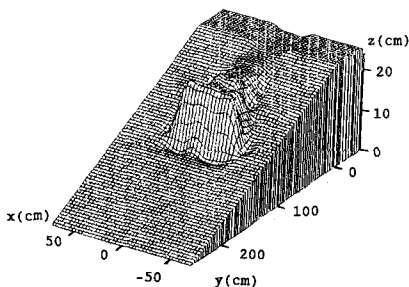
(a) $\varepsilon_s = 5$ (b) $\varepsilon_s = 10$ (c) $\varepsilon_s = 20$

図-2 縦断地形の比較 (Case J)

図-3 $\varepsilon_s = 2$ とした計算結果 (Case J)

ている。

図-4はテラスの横断地形の時間変化を示したもので、 $\varepsilon_s = 10$ とした時の計算と実験結果を示している。ここで、図-1に示したように、 y 座標の原点は汀線に位置する。図-4(a)は $y = 80$ cmでの結果であり、測線は導流堤先端より少しだけ沖側に行った所に位置する。実験に比べて計算値は横断方向への拡がりが大きいが、一方、より下流側の測線 $y = 120$ cm, $y = 170$ cmでは、逆に計算値の方が拡がりが大きくなり、砂面高さもより高くなっている。ただし、テラスの全体的な形状に関しては、比較的

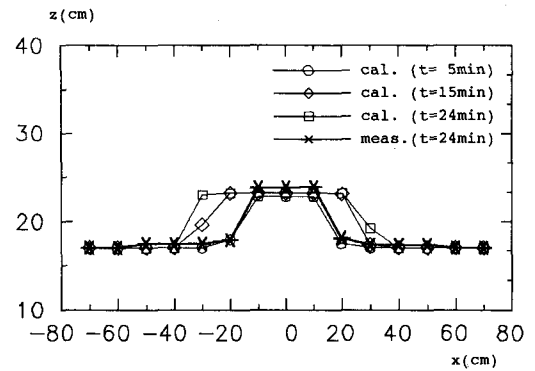
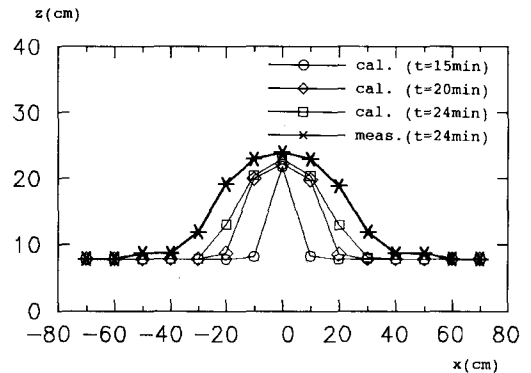
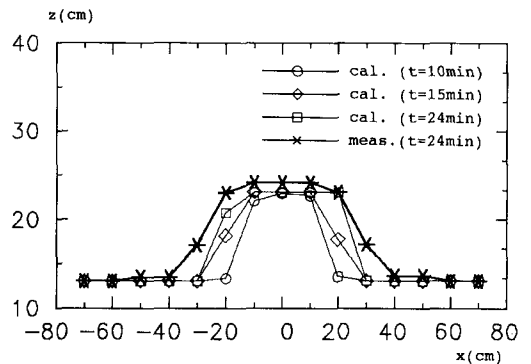
(a) $y = 80$ cm(b) $y = 120$ cm(c) $y = 170$ cm

図-4 横断地形の比較 (Case J)

良好な一致が見られることがわかる。

(2) Case H

Case H の計算では、先のケースで得られた $\varepsilon_s=10$ を用いた。また、拡散係数としては、先と同様に式 (5) を用いた。

図-5 には河口中央測線での縦断図を示した。テラス先端部位置、斜面勾配共に良好な予測値が得られている。また、図-6 は鳥瞰図を示したものである。最終地形 ($t=18$ 分) の実測値と計算値は良好な一致を示している。

なお、Case H, J のいずれにおいてもテラス先端付近で計算値と実測値にずれが見られるが、これは実験で幾

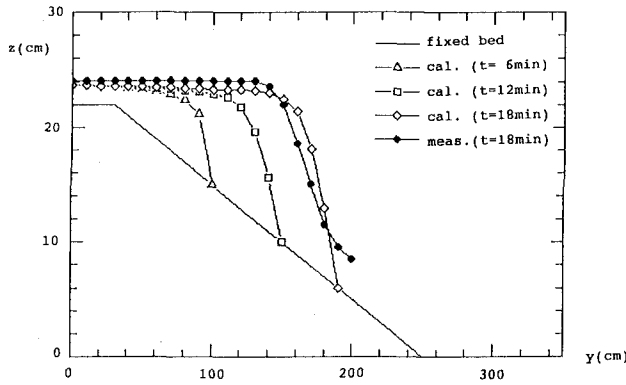


図-5 縦断地形の比較 (Case H)

分浮遊状態の砂移動見られたためである。

5. 結 語

本研究では、洪水時に河口前面に形成されるテラスの数値計算を行った。基礎方程式としては、通常の浅水流方程式および砂の連続式を用い、さらに砂移動量式として Meyer-Peter and Muller の流砂量式を採用した。田中ら (1987) による実験データとの比較の結果、運動方程式中に水平拡散項を導入する必要があると判断され、Fischer (1973) による表現式を用いた。また、砂の連続式については、渡辺ら (1984) と同様な修正を行った。連続式に含まれる係数 ε_s としては、10 を用いることにより良好な結果が得られることが判った。今後、他の実験資料やさらには現地資料を用いて、本モデルの検証を行う必要がある。

謝辞：本研究は、著者らがアジア工科大学 (AIT) に在籍中に行ったものの一部である。研究を行うに際し、AIT 水資源工学科 Suphat 教授、同 Tawatchai 教授には貴重な助言を頂いた。また、本論文の発表に際し、小川基金の補助を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

宇多高明・山本幸次・永瀬恭一 (1992): 貯砂源としての

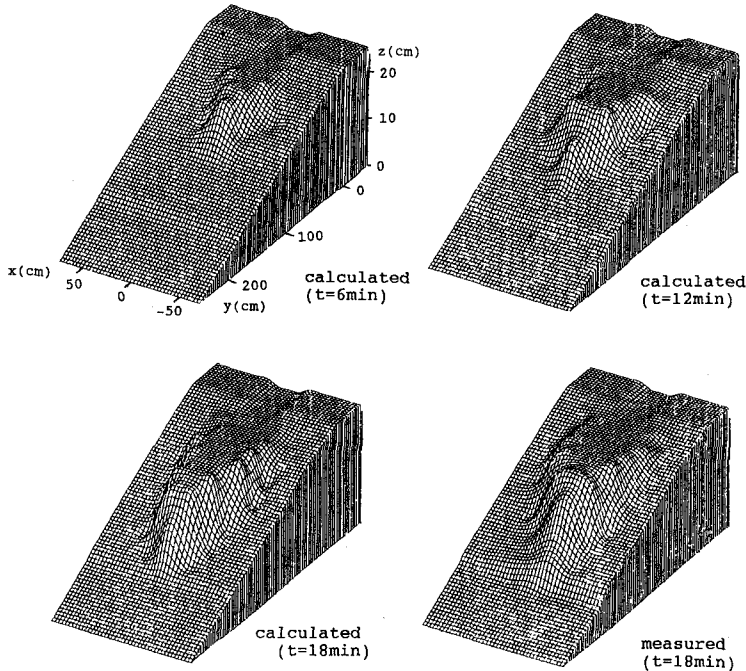


図-6 河口地形 (Case H)

- 観点から見た河口部海浜の地形的特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.391-395.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-forg 法を用いた津波の計算法, 東北大学工学部土木工学科, 52 p.
- 佐々木隆士・宇多高明・刀爾 賢・菅原信雄・海野 仁 (1987): 洪水流による河口砂州のフラッシュ, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 327-331.
- 佐藤勝弘・首藤伸夫 (1992): 洪水による河口砂州崩壊過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 396-400.
- 澤本正樹・首藤伸夫・谷口哲也 (1987): 阿武隈川河口砂州の変形過程, 土木学会論文集, 第387号/II-8, pp. 179-188.
- 榎木 享・出口一郎・片山貴文 (1987): 河口流出砂の堆積形状に関する数値予測モデルと堆積形状に及ぼす河口処理工の影響, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 377-391.
- 須賀堯三・石川忠晴・灘岡和夫・田中 仁 (1987): 河口前面テラスの形成とその消長, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 227-230.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1992): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 231-235.
- 田中 仁・須賀堯三・高山博之・羽鳥定久 (1987): 河口部の流れと河口砂州の形成に関する研究, 第31回水理講演会論文集, pp. 737-742.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・橋山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形の数値計算モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Butakov, A. N. (1971): Study of development and deformation of mouth bar, Proc. of 14th IAHR, pp. 95-102.
- Fischer, H. B. (1973): Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open channel flow, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp. 59-78.
- Hatanaka, H. and Kawahara, M. (1989): A finite element application of sand terrace formation process, Proc. Int. Symp. on Sediment Transport Modeling, pp. 326-331.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948): Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, pp. 39-64.
- Tanaka, H. and Qin, H. (1993): Numerical Simulation of sand terrace formation in front of a river mouth, Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems II, ed. by Wrobel, L. C. and Brebbia, C. A., Computational Mechanics Publications, pp. 241-248.
- Tanaka, H. and Suga, K. (1993): Sand terrace formation in front of a small river mouth due to flush flood, Advances in Hydro-Science and Engineering, ed. by Wang, S. Y., University of Mississippi, pp. 1731-1736.