

44. 海面上昇へのデルタの応答に関する研究

STUDY ON DELTA RESPONSE TO RISING SEA LEVEL

赤松良久*・Gary Parker**・武藤鉄司***

Yoshihisa AKAMATSU ・ Gary PARKER ・ Tetsuji MUTO

ABSTRACT: Rivers form deltas wherever they flow into standing water such as a lake, a reservoir or the ocean. Under conditions of constant base level of standing water deltas can be expected to gradually prograde outward, so that the delta shoreline regresses “seaward.” Rising base level can not only slow this progradation, but reverse it, so that the shoreline migrates landward, or transgresses. An extreme limit of this case is one of shoreline starvation, for which the supply of sediment at the shoreline drops to zero and the delta goes into transgressive autoretreat. A 1D morphodynamic model of delta response including backwater effect is developed to clarify the response of delta to sea level rise. The simulations revealed that the interaction between sediment supply and sea level rise determines whether or not a) the delta continues to prograde under conditions of sea level rise, or b) the delta begins to transgress and eventually goes into autoretreat.

Key Words : Delta, Morphodynamic Model, Sea Level Rise, Autoretreat

1. はじめに

約1.4万年前の最終氷期以降、海水面は毎年1cm以上の速度で急激に上昇し、約6000～7000年前に現在の海面とほぼ同じレベルか、わずかに高いレベルまでに達した。その後、何度かの海面の上昇および低下を繰り返し、約1000年前には現在の海水準とほぼ同じレベルに達し、安定的に推移してきた。しかし、今日の地球温暖化により今後急激な海面上昇が起こることが懸念されている。デルタはこのような海面上昇に対してどのように応答するのであろうか？

河川からの土砂の供給により形成されるデルタは海面が一定の場合には海域に進行し続ける。しかし、海水面が上昇する場合には、土砂によって埋められるべき余剰のスペースがなくなるため、デルタが後退する現象が起こりうる。Muto and Steel (1992)は急激な海面上昇によりデルタの前部堆積層への土砂供給が無くなり、デルタ全体が陸域に後退する現象を「Autoretreat」と名付けた。また、Muto (2001)は「Autoretreat」の概念を示すために、非常に狭い水路において水位を上昇させながら上流端から土砂を供給する実験を行った(図-1)。さらに、Parker and Muto (2003)は「Autoretreat」に関する実験に対して、一次元の地形変動モデルを用いて再現計算を行った。一次元の地形変動モデルは実験の再現を目的としたものであり、河川内の流れを考慮していないモデルであ

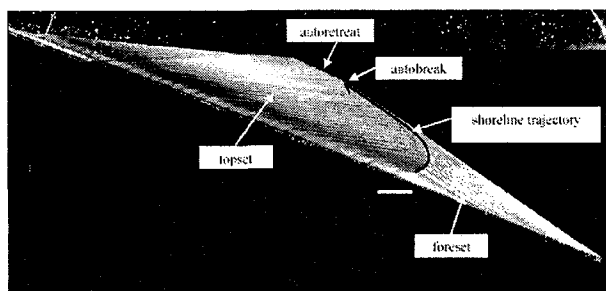


図-1 Muto(2001)の実験から得られた「Autoretreat」の概念図

るが、実験においてみられた「Autoretreat」を再現できなかったことがわかった。

そこで、本研究では実スケールのデルタに適応すべく、河川水面の背水曲線等を考慮した一次元の地形変動モデルを構築し、海面上昇に対するデルタの応答について検討した。さらに、デルタのスケールによる海面上昇に対する応答の違いについても検討した。

2. 数値計算モデル

本研究で用いるデルタの地形変動のモデルはSwenson et al. (2000)およびKostic and Parker (2003a,b)による研究を参考としている。これらのモデルはデルタの進行を考慮

*東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

**ミネソタ大学 University of Minnesota

***長崎大学 Nagasaki University

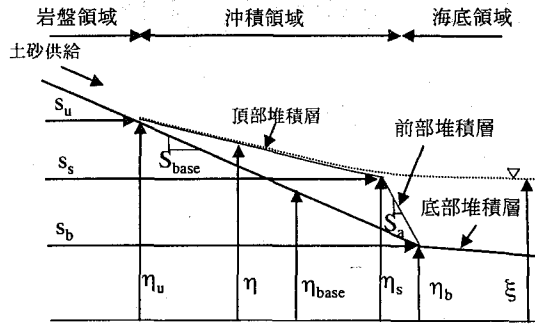


図-2 計算に用いるパラメーター

した移動境界を持つことが大きな特徴である。本研究では、デルタの上流端が自由に移動する場合および上流端が固定されている場合の二つのケースを考えている。計算に用いるパラメーターを図-2に示す。ここで、 η ：沖積河床高、 η_{base} ：地盤高、 s ：水平方向の座標、 ξ ：海水準、 S_{base} ：地盤の勾配、 S_s ：前部堆積層の勾配である。

(a) 流れの支配方程式

流れの支配方程式は以下のように表される。

$$UH = q_w \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx}(U^2 H) = -gH \frac{dH}{dx} + gHS - C_f U^2 \quad (2)$$

ここに、 x ：流れ方向の座標、 U ：流れ方向の水深平均流速、 H ：水深、 g ：重力加速度、 q_w ：単位幅流量、 S ：河床勾配、 C_f ：河床摩擦抵抗係数である。河床勾配は以下のように与えられる。

$$S = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3)$$

本モデルにおいて河床摩擦抵抗係数は一定であると仮定しており、河床せん断応力は以下のように表される。

$$\tau_b = \rho C_f U^2 \quad (4)$$

ここに、 ρ は水の密度を表している。式(3),(4)を用いて式(1),(2)は以下のように変形できる。

$$U = \frac{q_w}{H} \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{S - S_f}{1 - Fr^2} \quad (6)$$

ここに、

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad S_f = C_f Fr \quad (7a,b)$$

である。河川の流れは常流つまり $Fr < 1$ を仮定しており式(6)の境界条件は $x = s_s$ において以下のように与えられる。

$$H|_{x=s_s} = \xi - \eta_s \quad (8)$$

ここで、 $\eta_s = \eta(s_s, t)$ である。

(b) 土砂保存式

河床の土砂保存はExnerの式を用いて次のように表される。

$$B_f (1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} = -B \frac{\partial I q_t}{\partial x} \quad (9)$$

ここに、 B_f ：堆積盆地の幅、 B ：河川幅（網状の場合はその合計）、 λ_p ：堆積土砂の間隙率、 I ：間欠度（実時間に対する洪水時の有効時間の割合）、 q_t ：単位幅当たりの流砂量である。一般的に掃流砂量の算定式は以下のように表される。

$$q^* = \alpha_t (\tau^* - \tau_c^*)^{n_t} \quad (10a)$$

ここに、 α_t および n_t はパラメーターであり、 q^* および τ^* は以下のように定義される。

$$q^* = \frac{q_t}{\sqrt{RgDD}} \quad \tau^* = \frac{\tau_b}{\rho RgD} \quad (10b,c)$$

ここに、 R は堆積土砂の水中比重を示す。また、式(10a)中の τ_c^* は移動限界の無次元掃流力を表す。Engelund and Hansen (1967) の全流砂量式では砂床河川に対して以下のような値を用いるのが妥当である。

$$\alpha_t = \frac{0.05}{C_f} \quad n_t = 2.5 \quad \tau_c^* = 0 \quad (11a,b,c)$$

沖積領域の上流端での土砂供給条件は以下のように与えられる。

$$q_t|_{x=s_u} = q_{tr} \quad (12)$$

であり、ここに、 q_{tr} は上流端からの土砂供給量を示す。

(c) 移動境界における連続条件

岩盤領域と沖積領域の接点における連続条件は次のように表される。

$$\eta_u = \eta[s_u(t), t] = \eta_{base}[s_u(t)] \quad (13)$$

式(13)の時間微分をとり変形すると

$$\dot{\eta}_u = -\frac{1}{S_{base} - S_u} \frac{\partial \eta}{\partial t} \bigg|_{s_u} \quad (14a)$$

となる。ここで、ドットは時間微分であり、 S_u は沖積領域の上流端での河床勾配を表す。ここに、 S_u, S_{base} は以下のように表される。

$$S_u = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \bigg|_{s_u}, \quad S_{base} = -\frac{\partial \eta_{base}}{\partial x} \quad (14b,c)$$

また、前部堆積層と底部堆積層の接点においても式(13)と同様に以下のような連続条件が成り立つ。

$$\eta_b \equiv \eta[s_b(t), t] = \eta_s - S_a(s_b - s_s) = \eta_{base}[s_b(t)] \quad (15)$$

式(15)の時間微分をとり変形すると

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = \frac{S_a - S_s}{S_a - S_{base}} \frac{\partial \eta}{\partial t} \bigg|_{s_s} + \frac{1}{S_a - S_{base}} \frac{\partial \eta}{\partial x} \bigg|_{s_s}, \quad S_s = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \bigg|_{s_s} \quad (16a,b)$$

となる。ここに、 S_s は海岸線（頂部堆積層と前部堆積層の接点）での河床勾配を表す。

さらに、前部堆積層と底部堆積層の接点において土砂流出がないという条件の下で式(9)を前部堆積層の区間において積分すると、以下のような衝撃条件が得られる (Kostic and Parker, 2003a; Swenson et al., 2000)。

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial t} = \frac{1}{S_a - S_s} \left(\frac{q_{tf}}{s_b - s_s} - \frac{\partial \eta}{\partial t} \bigg|_{s_s} \right)$$

(17a)

ここで

$$q_{ss} \equiv q_s[s_s(t), t] \quad (17b)$$

である。

式(6), (9)を式(14), (16), (17)の条件の下で差分化して数値計算を行う。流れに関しては常流を仮定して、下流から上流へ計算を行い、土砂の保存式においては土砂供給のある上流から下流に向けて計算を進める。

3. 海面上昇へのデルタの応答

実スケールのデルタとして、初期河川長 $L=30(\text{km})$ 、河川幅 $B=100(\text{m})$ 、洪水時満水流量 $Q=600(\text{m}^3/\text{s})$ 、洪水時土砂供給量 $q_{tf}=8.4(\text{million metric tons/year})$ 、堆積盆地幅 $B_f=1500(\text{m})$ 、粒径 $D=0.5(\text{mm})$ 、間欠度 $I=0.1$ のデルタを想定し、海面上昇に対するデルタの応答に関して検討した（本計算では上流端を固定境界としている）。図-3(a), (b)に海面上昇率 V_s が $0(\text{cm/year})$ 、および $1(\text{cm/year})$ の二つのケースについて河床形態の変化を示す。海面上昇率がゼロの場合にはデルタは前進し続けている。しかし、海面上昇率が $1(\text{cm/year})$ という高い値をとる場合には、Muto(2001)の実験（図-1）同様に

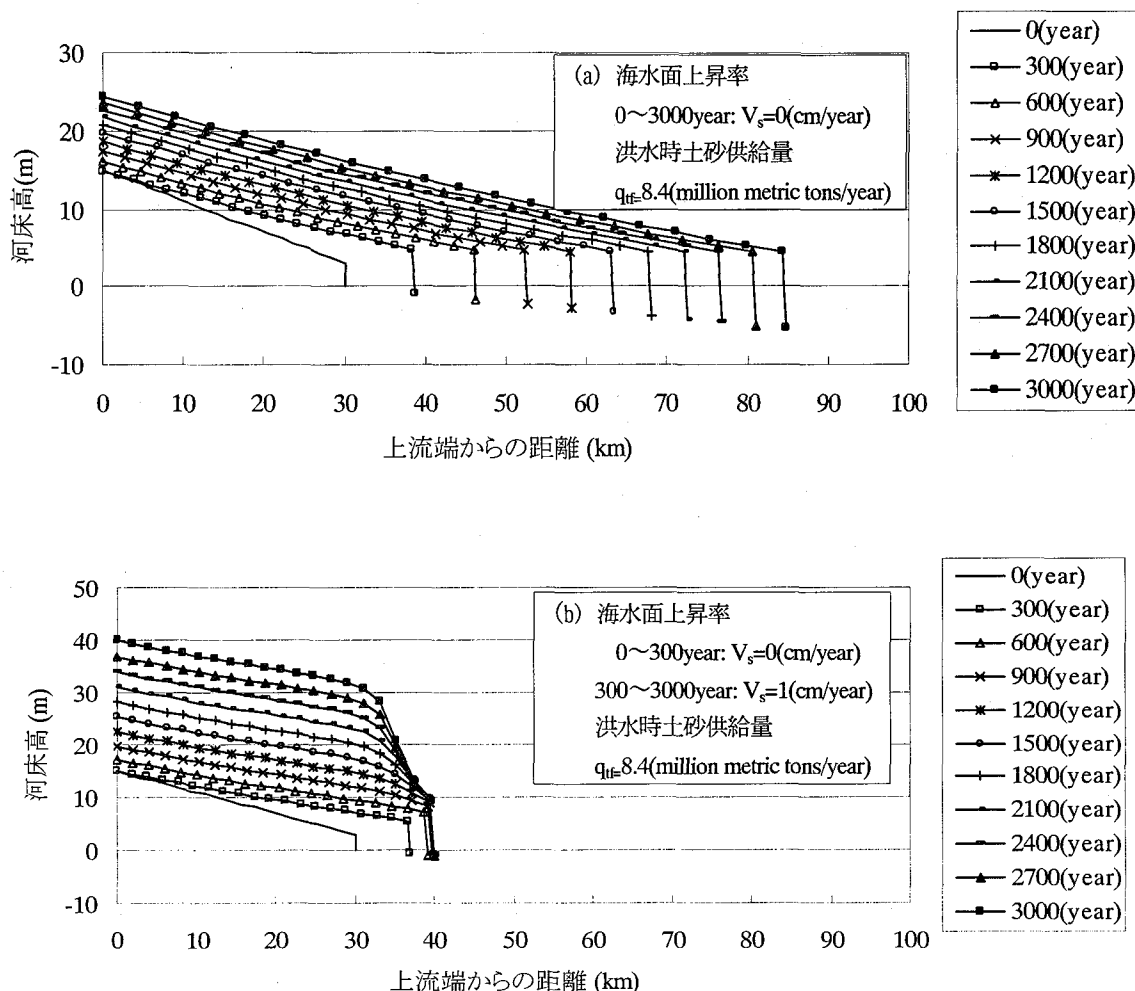


図-3 (a), (b) 海面上昇率が $0(\text{cm/year})$ および $1(\text{cm/year})$ の場合の河床形態の変化

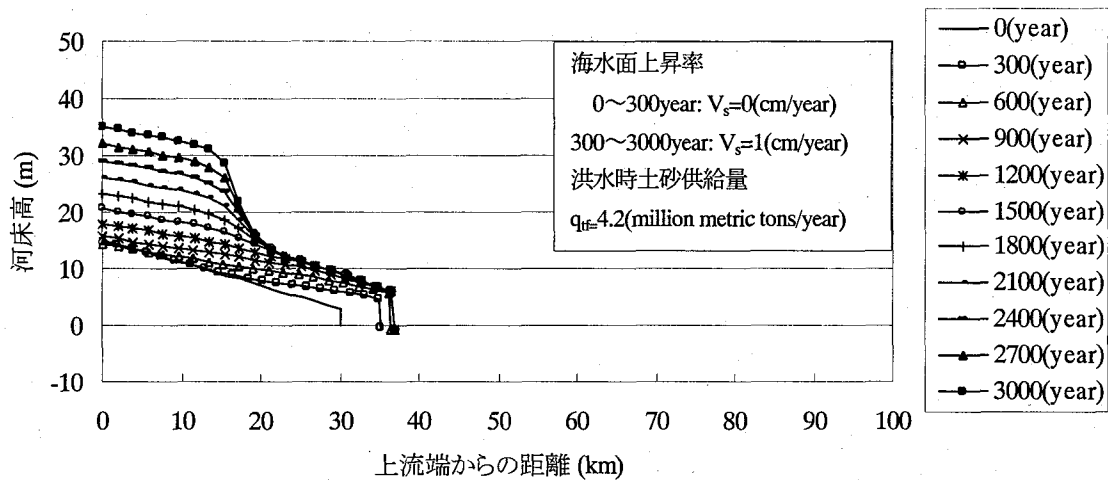


図-4 海面上昇率が高く、土砂供給量の少ない場合の河床形態の変化

デルタが後退する現象が見られる。また、図-4に海面上昇率を1(cm/year)として、上流端からの土砂供給量を半分にした場合 ($q_{if}=4.2(\text{million metric tons/year})$) の河床形態の変化を示す。海面上昇率が高く、土砂供給量が少ない場合には、湾が形成されることがわかる。これらのことから河川の上流端からの土砂供給量と海水面の上昇率のバランスによって、デルタの形態が決定されていると考えられる。

また、海面上昇に対するデルタの応答はデルタのスケールにも大きく依存すると考えられる。そこで、スケールの違う二つのデルタに対して本モデルを適用し、デルタの応答の違いを検討する。本計算では砂床河川を仮定して、粒径は0.25(mm)とした。また、デルタの上流端は移動境界とし、海底領域の勾配はゼロとした。さらに、川幅は満水時のShields応力が一定値を取るという仮定のもとに、流れの状態によって決定されている。表-1に本計算で用いた二つのデルタの初期河川長、河床勾配、流域面積、間欠度、洪水時土砂供給量、洪水時満水流量を示す。表-1中の河川のパラメーターは河川長、河川勾配のみを既知のパラメーターとして与え、流域面積、洪水時土砂供給量、洪水時満水流量、間欠度については以下のように算出した。流域面積は次式で表される流域の形状係数 $F(=A/L^2)$ を6として与え、河川長から算出した。洪水時土砂供給量については年平均土砂供給量と等しいと仮定しSyvitski et al.(2000)によって提案された次式を用いた。

$$\overline{Q_s} = \alpha H^{3/2} A^{1/2} \quad (18)$$

ここに、 $\overline{Q_s}$ ：年平均土砂供給量、 H ：堆積盆地の最大高度、 α ：係数 ($=2 \times 10^{-5}$) である。また、洪水時満水流量および間欠度についてはDodov and Foufoula (2004)の研究を参考に流域面積から決定した。

図-5に計算開始から2000年後から4000年後にわたって海水面が1.5(cm/year)で上昇した場合におけるそれぞれのデルタの河床形態の変化を示す。大きいデルタにおいてはデルタの進行は遅くなっているものの、沖積領域における河床形態の大きな変化はみられない。一方、小さいデルタにおいては2000~4000年後にわたる海水面の上昇により、沖積領域に土砂によって埋められるべき余剰のスペースが生まれており、そのため5000~8000年後にかけてデルタの後退現象が見られる。さらに、2000~2500年後にかけて8(cm/year)の急激な海面上昇が起こった場合について、それぞれデルタの河床形態の変化を図-6に示す。急激な海面上昇後には、どちらの河川においても河口に湾が形成されており、その影響は小さいデルタの方がより上流まで及んでいることがわかる。これらのことから小さいデルタは比較的海面上昇の影響を受けやすく、海面上昇によって河口域に湾を形成する可能性があることがわかる。また、それとは対照的に大きい河川においては海面上昇の影響は小さく、急激な海面上昇が長期間続かない限り、デルタは前進し続けると考えられる。

表-1 計算に用いたデルタのパラメーター

	初期河川長 (km)	河川勾配	流域面積 (km ²)	間欠度	洪水時土砂供給量 (kg/s)	洪水時満水流量 (m ³ /s)
(a)	800	1.0×10^{-4}	106667	0.21	4674	8224
(b)	400	1.5×10^{-4}	26667	0.1	1518	4562

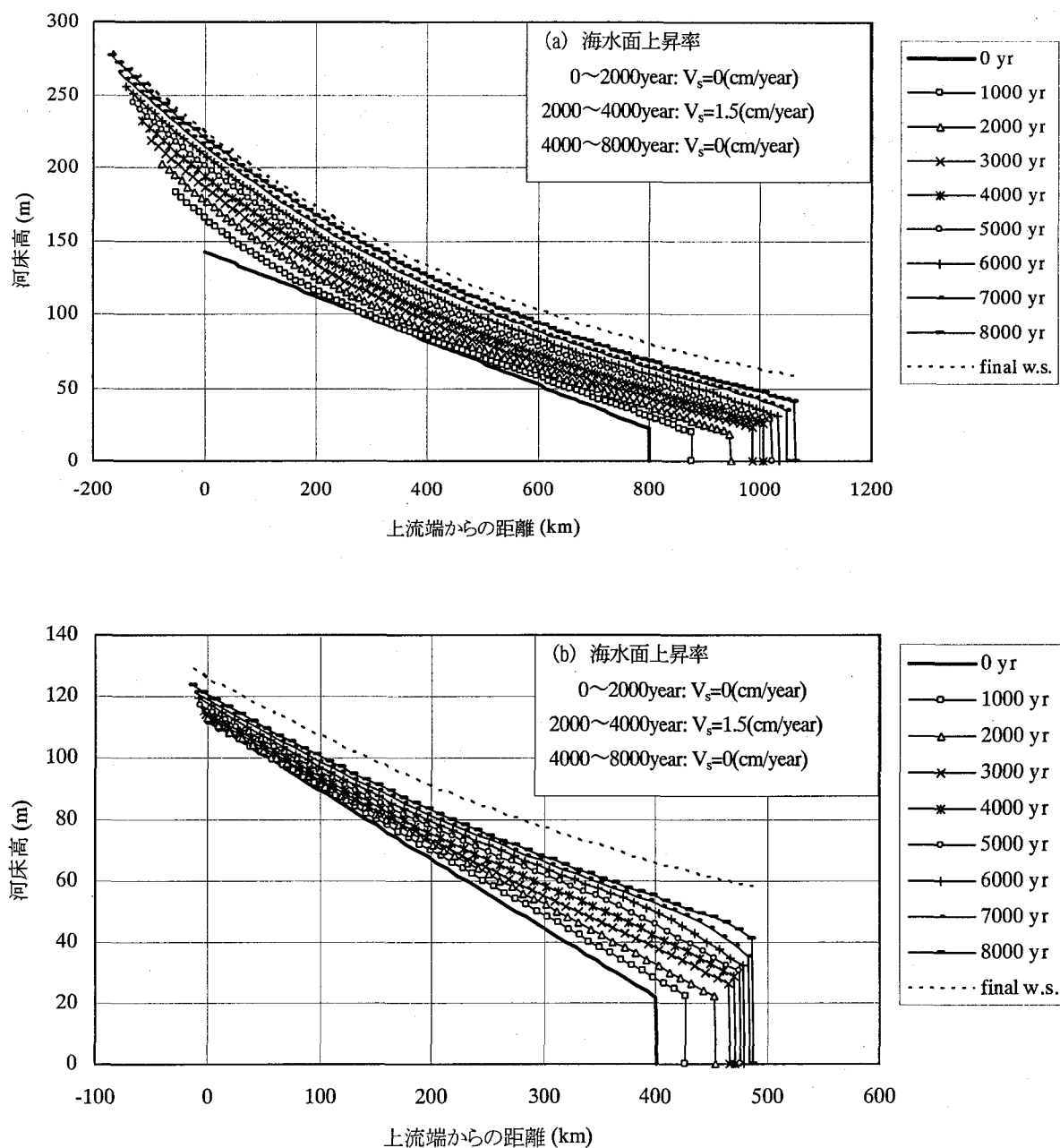


図-5 長期間の海水面上昇に対する大小のデルタの河床形態の変化

4. 結論

本研究によって河川の上流端からの土砂供給量と海水面上昇率のバランスによって、河口域でデルタが進行し続けるかあるいはデルタが後退し湾が形成されるかが決定されていることが明らかになった。また、河川のスケールによって海水面上昇に対する応答が大きく変化することがわかった。さらに、近年問題となっている地球温暖化による急激な海水面上昇が河口域のデルタの形状にどのような影響を及ぼすかを本モデルを用いて予測することが可能であると考えられる。

謝辞

本研究はNational Center for Earth-Surface Dynamics (Project Number:6217) の補助を受けている。

参考文献

- Dodov, B. and E. Foufoula-Georgiou. 2004 Fluvial processes and streamflow variability: Interplay in the scale-frequency continuum and implication for scaling. (投稿予定)
- Engelund, F. and E. Hansen, 1972, *A Monograph on Sediment Transport*, Technisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Kostic, S. and Parker, G. 2003a Submitted Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs Part 1. Theory and numerical

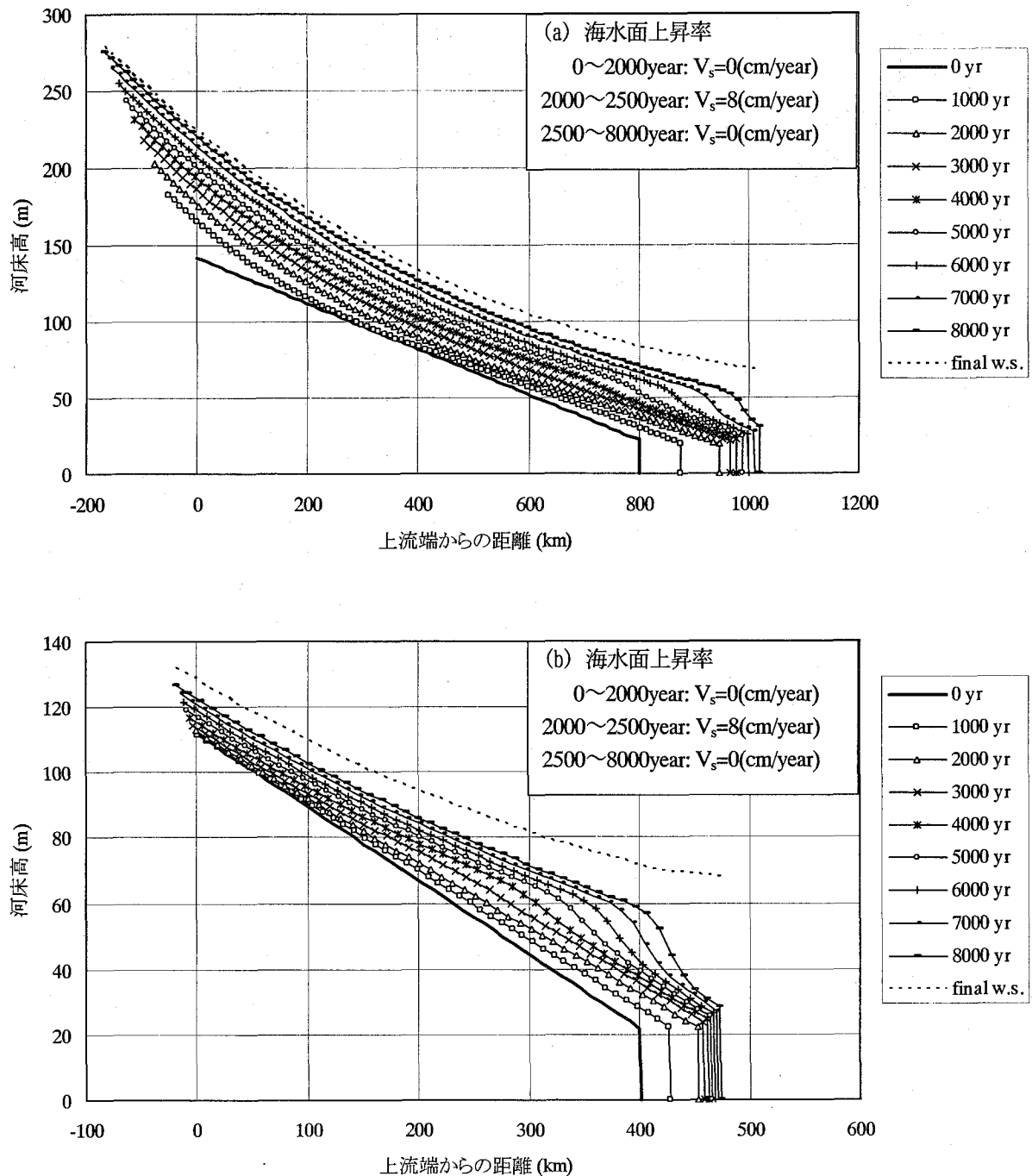


図-6 短期間の急激な海水面上昇に対する大小のデルタの河床形態の変化

- modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2).
- Kostic, S. and Parker, G. 2003b Submitted Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs Part 2. Experiment and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2).
- Muto, T. 2001 Shoreline autorettreat substantiated in flume experiment. *Journal of Sedimentary Research*, 71(2), 246-254.
- Muto, T. and Steel, R. J. 1992 Retreat of the front in a prograding delta. *Geology*, 20, 967-970.
- Parker, G and Muto, T. 2003 1D numerical model of delta response to rising sea level, *Proceedings, 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 558-570.
- Syvitski, J.P., Morehead, M.D., Bahr, D.B. and Muler, T. 2000 Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. *Water Resources Research*, 36, No.9, 2747-2760.
- Swenson, J. B., Voller, V. R., Paola, C., Parker, G. & Marr, J. 2000 Fluvio-deltaic sedimentation: A generalized Stefan problem. *European Journal of Applied Math.*, 11, 433-452.