

大河川デルタの地形と堆積物

堀 和 明* 斎 藤 文 紀**

Morphology and Sediments of Large River Deltas

Kazuaki HORI * and Yoshiki SAITO **

Abstract

Large rivers with high sediment discharge, such as the Amazon, Ganges-Brahmaputra, and Huanghe (Yellow) rivers, have formed mega-deltas at their mouths. This paper reviews morphology and sediments of mega-deltas and their Holocene evolution in relation to sea-level changes, channel avulsion, and past-sediment discharge. Application of various radiometric dating techniques to delta deposits, especially since the 1980's has made it possible to clarify delta evolution dynamically on 10- to 1000-year time scales. Most of the deltas are located in developing countries, and have environmental problems principally caused by human activities. For the evaluation of current status and human activities in deltas and drainage basins, both natural and anthropogenic changes of deltas should be analyzed from the viewpoints of geology, sedimentology, and their evolution.

Key words : large river , delta , coastal environment , sea-level change , sediment discharge , Holocene

キーワード : 大河川 , デルタ , 沿岸環境 , 海水準変動 , 土砂供給 , 完新世

1. はじめに

「大河川」という言葉を耳にしたとき、流域面積、流路長、流量の大きな河川を思い浮かべる人は多いのではないだろうか。地理の教科書や理科年表などにもこれらのデータが記載され、世界や日本のランキングが掲載されている。一方、地層の形成や堆積学においては、河川の土砂運搬量がこれらのデータ以上に重要である。表1は流量1万 m^3/s 以上、流域面積100万 km^2 以上、浮遊土

砂運搬量年間1億トン以上の大河川を、また図1はそれらの河川の河口位置を示している。これらの表や図からも明かなように浮遊土砂運搬量の大きな河川はアジアおよび南米の低緯度から中緯度域に多く分布している。なかでもアジアには、ガンジス-ブラマプトラ河、エーヤワディー(イラワジ)河、メコン河、長江、黄河と世界を代表する大河川が流れている。これらは、世界最高峰のヒマラヤ山脈-チベット高原付近に源流を持っており、モンスーンによる多雨の影響や急峻な地

* 日本学術振興会 / 産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門

** 産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門

* Japan Society for the Promotion of Science / Institute for Marine Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

** Institute for Marine Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

表 1 浮遊土砂運搬量，流量，流域面積からみた世界の大河川．

Table 1 Large rivers in the world in terms of suspended sediment load, water discharge, and drainage area.

Average annual suspended load		Water discharge		Drainage area	
River	$\times 10^6 \text{t}$	River	$\times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$	River	$\times 10^6 \text{km}^2$
Amazon	1200	Amazon	20.00	Amazon	6.15
Huanghe(Yellow)	1080	Zaire(Congo)	4.09	Zaire(Congo)	3.70
Ganges-Brahmaputra	1060	Orinoco	3.49	Mississippi	3.34
Changjiang(Yangtze)	480	Ganges-Brahmaputra	3.09	Nile	2.72
Mississippi	400(210)	Changjiang(Yangtze)	2.85	Parana	2.60
Ayeyarwady(Irrawaddy)	260	Mississippi	1.84	Yenisey	2.58
Indus	250(59)	Parana	1.80	Ob	2.50
Magdalena	220	Yenisey	1.78	Lena	2.43
Godavari	170	Lena	1.62	Changjiang(Yangtze)	1.94
Mekong	160	Mekong	1.49	Amur	1.86
Orinoco	150	St. Lawrence	1.43	Ganges-Brahmaputra	1.59
Song Hong(Red)	130	Ayeyarwady(Irrawaddy)	1.36	Mackenzie	1.45
Narmada	125	Ob	1.22	Zambezi	1.40
Colorado	120(0.1)	Amur	1.03	Volga	1.35
Nile	120(0)			St. Lawrence	1.19
Fly	115			Niger	1.11
				Shat al Arab(Tigris-Euphrates)	1.05
				Orange	1.02

土砂運搬量は Milliman and Sivitski (1992)，流量と流域面積は Hovius (1998)．土砂運搬量の括弧内の値はダム建設後の値．コロラド河やナイル河では流域での大規模ダム建設後に土砂運搬量が激減している (Milliman and Meade, 1983)．

Suspended sediment load is after Milliman and Sivitski (1992)．Water discharge and drainage area are after Hovius (1998)．Load value in parentheses indicates post-dam values. Sediment loads of the Nile and Colorado rivers have been decreased sharply by the construction of dam reservoirs (Milliman and Meade, 1983)．

形のため，流域の土砂生産量が多く，河川の土砂運搬量も大きくなっている。

表 1 に挙げた土砂運搬量の大きな河川は，河口部に大規模なデルタを形成しており，その面積も大きい (表 2)．デルタに関する研究は，1950–1970 年代に米国のルイジアナ州立大学が中心となって，ミシシッピデルタを主対象に詳細な研究を行ったことで大きく進展した。この研究は世界のデルタ研究を先導し，現行の堆積プロセス研究，海水準変動と関係させた地層形成研究など，デルタ形成を考える上で基礎となる多くの考え方を示した (たとえば, Coleman, 1981, 1988)．このため，堆積学や地形学のテキストにおいてもミシシッピデルタで得られたモデルが基準として扱われている場合が多い。しかし, Middleton (1991)

は，大規模なデルタの多くが潮差の大きい場所で発達していることを示し，それらの特徴があまり理解されていないことを指摘した。世界に分布する多くのデルタは，河川卓越型 (図 2a) のミシシッピデルタと異なった特徴を持っているにもかかわらず，1990 年頃まで詳細な研究があまり行われてこなかったといえる。多くのデルタが途上国に位置していたことも研究の進捗を阻んだ大きな要因であろう。しかしながら 1980 年代後半からアメリカ，ドイツ，日本の研究者が中心となってこれらの大規模デルタにおいて多くの共同研究が行われ，大規模デルタに関する情報も得られるようになってきた (たとえば国際誌の特集号では, 長江デルタ: Milliman and Jin, 1985, 黄河デルタ: Keller and Prior, 1986, アマゾンデルタ:

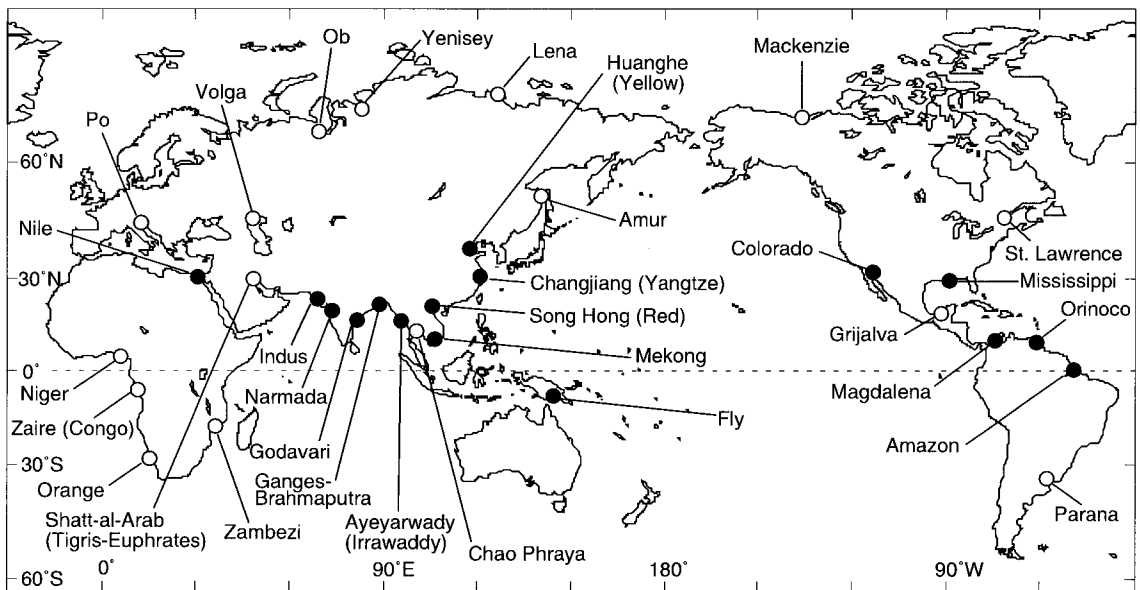


図 1 代表的な大河川の河口位置。
黒丸は表 1 に示した土砂供給量の大きな大川。

Fig. 1 Map showing the locations of mouths of major rivers.
Filled circles indicate large rivers with high sediment load shown in Table 1.

Nittrouer and DeMaster, 1986, 1996; Nittrouer and Kuehl, 1995)。また、日本人によるこれら大規模デルタの研究としては、海津によるガンジスデルタについての一連の研究 (Umitsu, 1985, 1987, 1993) があり、ガンジスデルタにおける先駆的研究として評価され、引用されている。本稿では土砂供給の大きな大川が作る大規模デルタに注目し、近年の研究成果を中心にその特徴や発達過程を紹介する。なお、デルタ一般については、Coleman and Wright (1975), 貝塚 (1978), Coleman (1981), Miall (1984), Wright (1985), Elliott (1986), 鍋谷ほか (1990a, b), Bhattacharya and Walker (1992), Davis (1992), Suter (1994), Galloway and Hobday (1996) などに詳しいので、これらの文献を参照して欲しい。

II. デルタの定義と区分

Elliott (1986) は堆積学の教科書において次のようにデルタを定義している。“Deltas are defined as discrete shoreline protuberances

formed where rivers enter oceans, semi-enclosed seas, lakes or lagoons and supply sediment more rapidly than it can be redistributed by basinal processes (デルタは、河川が海洋、半閉鎖性海域、湖やラグーンなどに流入する場所、かつ、河川からの堆積物供給がこれら水域側での波浪や潮汐作用などによる堆積物の再移動よりも速く行われる場所に形成される海岸・湖岸線の突出部)”。また、地形学辞典 (町田ほか, 1981) では「河川の搬出する砂泥が河口付近に堆積し、侵食基準面の高さの付近に発達する低平な堆積地形」と定義されている。他の定義もこれらに類似しているが、Walker (1995) では「海岸線の前進」によって形成されることが強調されている。この「海岸線の前進」は、デルタと同じく河口域に発達するエスチュアリー (Boyd *et al.*, 1992; Dalrymple *et al.*, 1992) との差異を明確にする上でも重要である。Boyd や Dalrymple らの堆積地質学的な定義によれば、河口域の堆積システムでは、エスチュアリーは海岸線が後退してい

表 2 代表的なデルタの面積 .

Table 2 Delta areas of selected major river systems.

Delta area	
River	km ²
Amazon	467,078
Ganges-Brahmaputra	105,641
Mekong	93,781
Changjiang (Yangtze)	66,669
Lena	43,563
Huanghe (Yellow)	36,272
Indus	29,524
Mississippi	28,568
Volga *	27,224
Orinoco	20,642
Ayeyarwady (Irrawaddy)	20,571
Niger	19,135
Shatt-al-Arab (Tigris-Euphrates)	18,497
Grijalva	17,028
Po	13,398
Nile	12,512
Song Hong (Red)	11,908
Chao Phraya	11,329

Coleman and Wright (1975).

ヴォルガ川はカスピ海に流入する .

After Coleman and Wright (1975).

The Volga River empties into the Caspian Sea.

る堆積システム, デルタは海岸線が前進する堆積システムとされている。そこで本稿では, デルタを「河川によって運ばれた土砂が河口付近に堆積し, 海岸線や湖岸線の前進によって形成される堆積地形」と定義する。

次に, デルタとデルタを構成する堆積物の区分について述べる。日本でもよく知られているギルバード型デルタ (Gilbert-type delta) は, 米国の Bonneville 湖の更新統ファンデルタの研究により, 3 種の堆積相に区分されている (Gilbert, 1885, 1890; Allen, 1978)。陸側から, 傾斜の小さい頂置層 (Topset bed), その沖側の傾斜角 10–25 度程度の前置層 (Foreset bed), 再び傾斜が小さくなる底置層 (Bottomset bed) で, 各層に対応する地形がそれぞれ頂置面, 前置面, 底置面と呼ばれる (図 3a)。ファンデルタや湖成デルタなどで

は前置面の傾斜が大きく, 縦断方向の地形傾斜変化が明瞭な場合が多いため, この区分がよく用いられる。

一方, 本稿で扱うような現成の大規模デルタや細粒な堆積物からなるデルタでは, 堆積環境や堆積相にもとづいた区分が広く使われている (図 3b, c)。これらのデルタでは海面 (水面) との関係から, 低潮線より陸側が陸上デルタ (Subaerial delta), 低潮線より海側が水中デルタ (Subaqueous delta) に区分されている。さらに前者は潮汐の影響が及ぶ下部デルタプレーン (Lower delta plain) とその影響がない上部デルタプレーン (Upper delta plain), 後者はデルタフロント (Delta front) とプロデルタ (Prodelta) に細分される (図 2, 3) (Wright, 1982; Suter, 1994; Thomas and Goudie, 2000)。デルタフロントは, 河川からデルタに供給される堆積物が最も活発に堆積している場所である。とくに分流路の末端にみられる砂州は分流河口州 (Distributary mouth bar) と呼ばれる (図 2)。これは分流路から水域に流入した際に, 急速な流速の減少にともなって土砂が堆積してできたものである。またデルタフロントの堆積物の一部は掃流で運ばれ, プロデルタに比べて堆積物の粒度は粗い (Wright, 1982)。一方, プロデルタはデルタフロントの沖側に位置し, 堆積物のほとんどは浮流により運ばれた細粒シルトや粘土からなる (Wright, 1982)。地層からデルタを復元する場合に, 陸域, 粗粒な堆積物からなるデルタ主部, それと沖合の細粒な堆積物からなるデルタ末端部, この 3 つの堆積環境の識別が容易であることから, 地層におけるデルタ研究ではこの区分が最もよく用いられている。しかし, この区分では, 前述したギルバード型デルタのそれとは異なり, 堆積環境 (堆積物) と地形面との関係が明確ではない。

では, この地層による区分と現在のデルタ地形とはどのような関係にあるのだろうか。図 6 ~ 9 には世界の主な大規模デルタの地形と堆積物分布を, 図 3 にはそれらから導かれる模式的なデルタの縦断面と堆積環境との関係を示した。現在みられるデルタの縦断面は次の 2 つのタイプに大きく

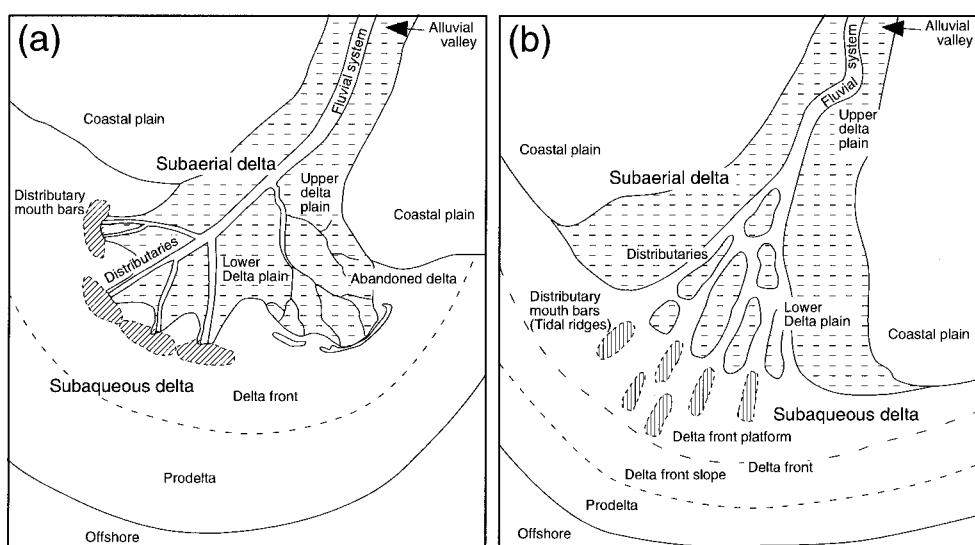


図 2 デルタの模式的堆積環境。
 (a) 河川卓越型 (Suter, 1994 に加筆)。
 (b) 潮汐卓越型。ここでいうデルタプレーン (Delta plain) と海岸平野 (Coastal plain) は、それぞれ主として河川、海の営力によって形成される海岸沿いの低地を意味する。

Fig. 2 Basic environments of deltas.
 (a) Fluvial-dominated delta (modified after Suter, 1994). (b) Tide-dominated delta.

区分される。1つは、ミシシッピデルタのようにデルタプレーンとデルタフロントの境界付近、すなわち海岸線の近くで傾斜が大きくなるタイプ (図 3b), もう1つは、アマゾンやガンジス-ブラマプトラデルタのようにデルタフロントの途中、つまり海岸線からかなり離れた場所で傾斜が大きくなるタイプである (図 3c)。地形との関係を検討すれば、デルタフロントを陸側の傾斜の小さなデルタフロントプラットフォーム (Delta front platform) (Allen, 1965) と海側の傾斜の大きいデルタフロントスロープ (Delta front slope) に細分するのがよいだろう。

さらに図 3b, 3c は、デルタフロントとプロデルタの境界付近での傾斜変化の有無によりそれぞれ2つに細分される。Nittrouer *et al.* (1986) や Kuehl *et al.* (1989) は、図 3c の下段のタイプの水中デルタ (アマゾンやガンジス-ブラマプトラデルタ) をギルバート型デルタのように地形傾斜にもとづいて頂置面、前置面、底置面に区分している。これは堆積環境からみれば、頂置面がデルタ

フロントプラットフォーム、前置面がデルタフロントスロープ、底置面がプロデルタにほぼ対応する。このように堆積環境による区分と地形との関係は図 3 で示した4つのタイプにまとめられる。本稿では、堆積環境による区分を重視し、縦断方向の地形傾斜の変化によりデルタフロントを細分できる場合には、デルタフロントプラットフォームとデルタフロントスロープという用語を用いる。

III. デルタの分類

デルタの分類で現在最も広く知られているものに Galloway (1975) の三角ダイアグラムがある (図 4)。これはデルタを成長型 (High-constructive) と変形型 (High-destructive) に分類した Fisher (1969) を発展させたものである (日本語訳は、大内, 1995 による)。この分類では、デルタフロントにおいて卓越する営力にもとづき、デルタを河川、潮汐、波浪卓越型の3種類に分類し、河川営力が強い場合は鳥趾状デルタ (図 2a), 波浪の影響が強ければカスプ状デルタ、潮汐の影響が

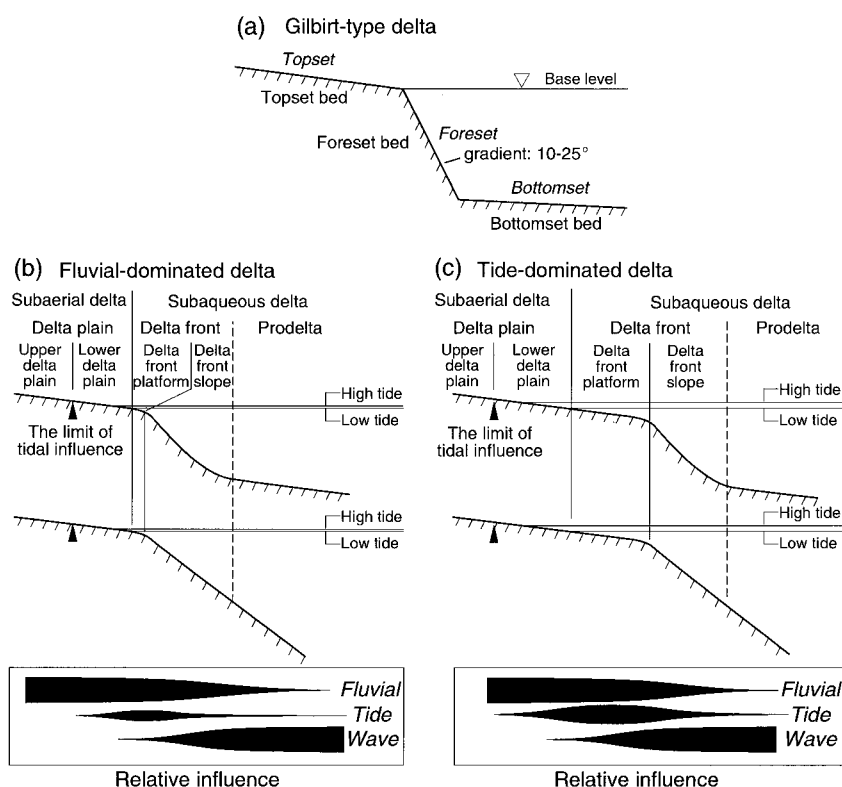


図 3 地形、堆積環境によるデルタの区分。

地形により区分される (a) ギルバート型デルタと堆積環境により区分される、(b) 河川卓越型デルタ、および (c) 潮汐卓越型デルタ。

Fig. 3 Components of deltas based on morphology and sedimentary environment. (a) Gilbert-type delta, (b) Fluvial-dominated delta, (c) Tide-dominated delta.

強ければ河口部が海側に開くエスチュアリーのような形態を示すデルタ (図 2b) が形成されるとした。Orton and Reading (1993) は、この分類を発展させて、デルタを構成する土砂の粒度を考慮した分類を提示し、泥質から礫質までのデルタの分類を行った。これらの分類は、デルタに働く主要な営力を明確にし、形状と堆積相を同時に理解できる優れた分類である。この分類に対して、Walker (1992) は、潮汐卓越型デルタの河口付近の海岸線形態が河川卓越型や波浪卓越型デルタと異なり海側に突出しないことから、これをエスチュアリー (Dalrymple *et al.*, 1992) に含めるべきだとした。しかし、これは潮汐卓越型デルタの研究例が非常に少なかったため、また、現成の潮

汐卓越型デルタがみられる地域では、完新世の海水準上昇により海岸線が後退または安定していると Walker が誤解したために出されたものである。完新世に前進 (プログラデーション) をしている潮汐卓越型デルタは知られていなかったようである。逆に Walker の指摘以降、潮汐卓越型デルタの論文が数多く報告されるようになってきていることもそれを裏付けている。

一方、バリアシステム (バリアーアイランドシステム) の沿岸域の区分に平均潮差と平均波高による区分がある。これは Hayes (1979) によって考案され、Davies and Hayes (1984) によって修正された沿岸環境の分類図である。Orton and Reading (1993) は、上記の三角ダイアグラムと

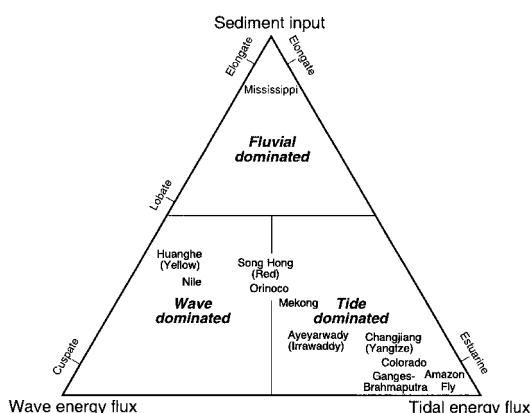


図 4 河川、波浪、潮汐の影響に基づいたデルタの分類。Galloway (1975) に加筆。

Fig. 4 A classification of deltas in terms of fluvial, wave and tide influence. Modified after Galloway (1975).

共にこの区分をデルタの分類に導入している。図 5 に平均潮差と平均波高にもとづいた大河川河口部の沿岸環境を示した。Middleton (1991) の指摘通り、土砂供給量の大きい河川はその河口部が潮汐卓越型に属している。これまでに最も多くの研究が行われてきたミシシッピデルタの沿岸環境は、他の大規模デルタのそれと大きく異なっていることが読みとれる。ミシシッピ河が注ぐメキシコ湾沿岸域は、潮汐・波浪共に小さい低エネルギーの沿岸環境として有名であり、沿岸環境からすれば非常に特殊だといえる。このことはミシシッピデルタで提示されているデルタモデルが、他のデルタにはそのまま適用できない可能性が大きいことをも意味している。

以上みてきたように、平均潮差と平均波高をデルタの分類に援用することは、定性的な Galloway の三角ダイアグラムを定量的なものへと発展させる上で有効だといえる。この流れをさらに推進させるためには、もう 1 つの成分である河川の営力をどのような指標（数値）にもとづいて評価するかが重要になる。前述したように Orton and Reading (1993) は、土砂の粒度を考慮したデルタの分類を提示している。これ以外の指標としては流量や土砂供給量が挙げられるが、

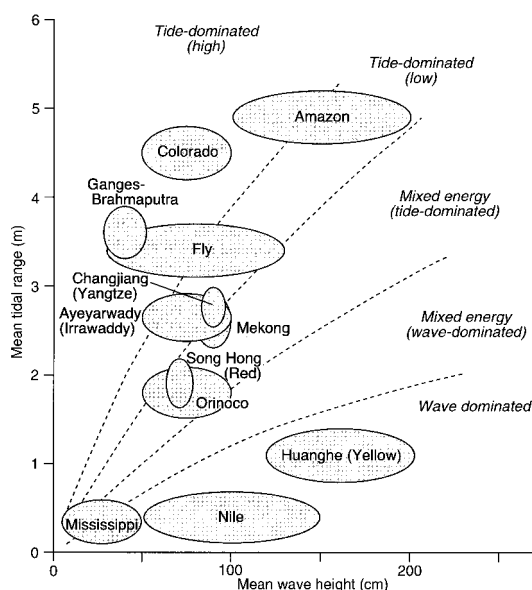


図 5 主要な大河川デルタにおける平均波高と平均潮差。Hori et al. (2002) に加筆。

Fig. 5 Mean wave height versus mean tidal range for major large-river deltas. Modified after Hori et al. (2002).

堆積物としてのデルタを考慮すれば「土砂供給量」を用いた分類が望ましいかもしれない。次章では、図 5 で示した沿岸環境の区分にしたがって、これらのデルタを便宜的にタイプ 1 (河川卓越型)、タイプ 2 (波浪卓越型)、タイプ 3 (潮汐・波浪混合型)、タイプ 4 (潮汐卓越型) に分け、デルタの地形や堆積物、堆積速度について述べる。

IV. デルタの地形と堆積物

1) 地形

図 5 にプロットされた河川が形成するデルタの特徴を示すため、既存研究を参照して図 6 ~ 9 を描いた。情報が少ないコロラド河およびエーヤワディー (イラワジ) 河は除いた。

タイプ 1 (河川卓越型) のミシシッピデルタは、典型的な河川卓越型デルタである。ミシシッピデルタの沿岸は前述したように低エネルギー沿岸環境となっており、河川から供給された土砂が波浪や潮流によってあまり再移動しないことが、河川

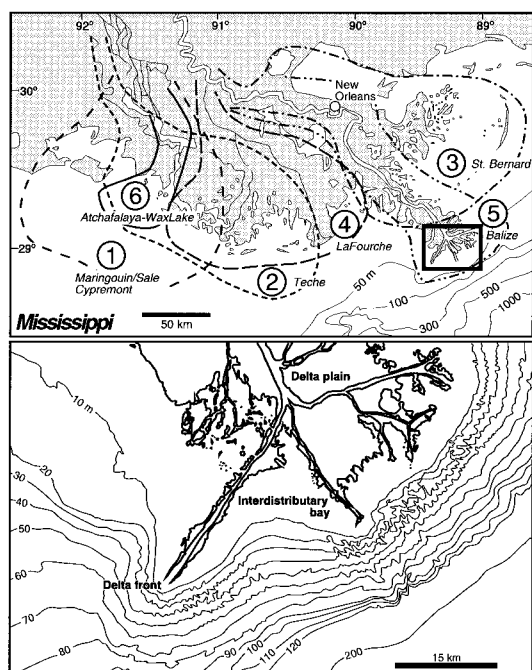


図 6 河川卓越型（タイプ 1）ミシシッピデルタ。
Coleman *et al.* (1998) に加筆。

Fig. 6 Fluvial-dominated (Type 1) Mississippi delta.
Modified after Coleman *et al.* (1998).

卓越型デルタを形成している理由である。河道や分流路 (Distributary channel) が海側に伸びていき、その両側には自然堤防が発達する。デルタの平面形態は鳥趾状を示し、分流路間には海域 (Interdistributary bay) が広がる (図 6)。海岸線からデルタフロントスロープまでの距離 (デルタフロントプラットフォームの幅) は小さい。デルタプレーンでは湿地 (Marsh や Swamp) の発達がいよ (Kosters, 1989; Kosters and Suter, 1993)。

タイプ 2 (波浪卓越型) のナイル河デルタや黄河デルタにおいても、タイプ 1 と同様に河道や分流路が海に流入する部分では海岸線が海側に突出し、ナイルデルタではカスプ状、黄河デルタでは鳥趾状を呈する (図 7)。デルタフロントプラットフォームの幅は小さい。河道や分流路以外の海岸線は波浪の影響で円弧状もしくは直線状になって

いることが多く、ナイルデルタでは海岸線とほぼ平行する方向に浜堤やバリアー、大規模なラグーンが数カ所みられる (Sestini, 1989)。ナイルデルタ域の分流路間にこのようなバリアーシステムが発達しているのは、この地域の現在の海水準が後氷期以降最も高いためである (Warne and Stanley, 1993)。黄河デルタでは、流量が少ないため主河道は 1 本で、土砂運搬量が大いことと渤海が浅いことから伸長状の形態を示す。河口部分だけをみれば河川卓越型デルタといえる。しかし、周辺部は波浪が卓越するため、放棄された河口では沿岸侵食が卓越している。また利津 (Lijin) から渤海に突出する 1855 年以降のデルタ (ほぼ図 7 に示された地域) は舌状を示し、北側と南側に広がる 1855 年以前に形成されたデルタでは、沿岸侵食が卓越し、比較的平滑な海岸線とチェニアー (貝殻堤) が発達している (Saito *et al.*, 2000, 2001)。このため黄河デルタ全体を捉えた場合は、波浪卓越型デルタといえる。

タイプ 3 (潮汐・波浪混合型) のデルタでは、多くの分流路が発達するほかに、海岸線付近に伸びの方向が異なる数群の浜堤列やチェニアー (Nguyen *et al.*, 2000; Warne *et al.*, 2002) が分布するのが特徴である (図 8)。メコンデルタでは、デルタプレーンの陸側には浜堤列がみられないが、海側には幾重にも浜堤列が発達している (Nguyen *et al.*, 2000)。紅河 (ホン河) デルタでも浜堤列がデルタプレーンの海側に発達している (Mathers and Zalasiewicz, 1999)。これは、デルタの前進にともなって、沿岸環境がより波浪の影響を受けるようになったためである (Ta *et al.*, 2002a, b; Tanabe *et al.*, 2003a)。また、紅河デルタ北東部にはデルタの埋積から取り残されて潮汐低地が発達している。メコンデルタと紅河デルタを比較すれば、紅河デルタでは舌状にデルタが前進し、河口の両側に波浪によって再堆積したハの字の河口州がみられる。一方、メコンデルタのデルタフロントは比較的平滑で、河口はいくつかに分流するものの、全体的にデルタが前進している。両者の平均波高と平均潮差はメコンデルタの方が大きく、土砂供給量もメコンの方が大きい。

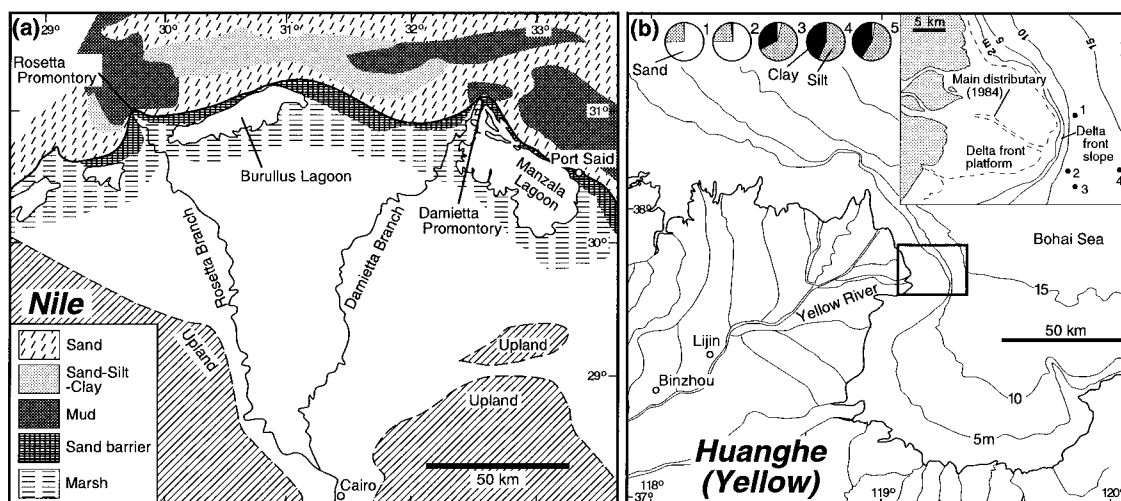


図 7 波浪卓越型（タイプ 2）デルタ。

(a) ナイル (Coleman *et al.*, 1981; Sestini, 1989), (b) 黄河 (Bornhold *et al.*, 1986; Prior *et al.*, 1986). なお、現在の黄河デルタの河口は 1984 年よりも約 15 km 南東へ前進している。

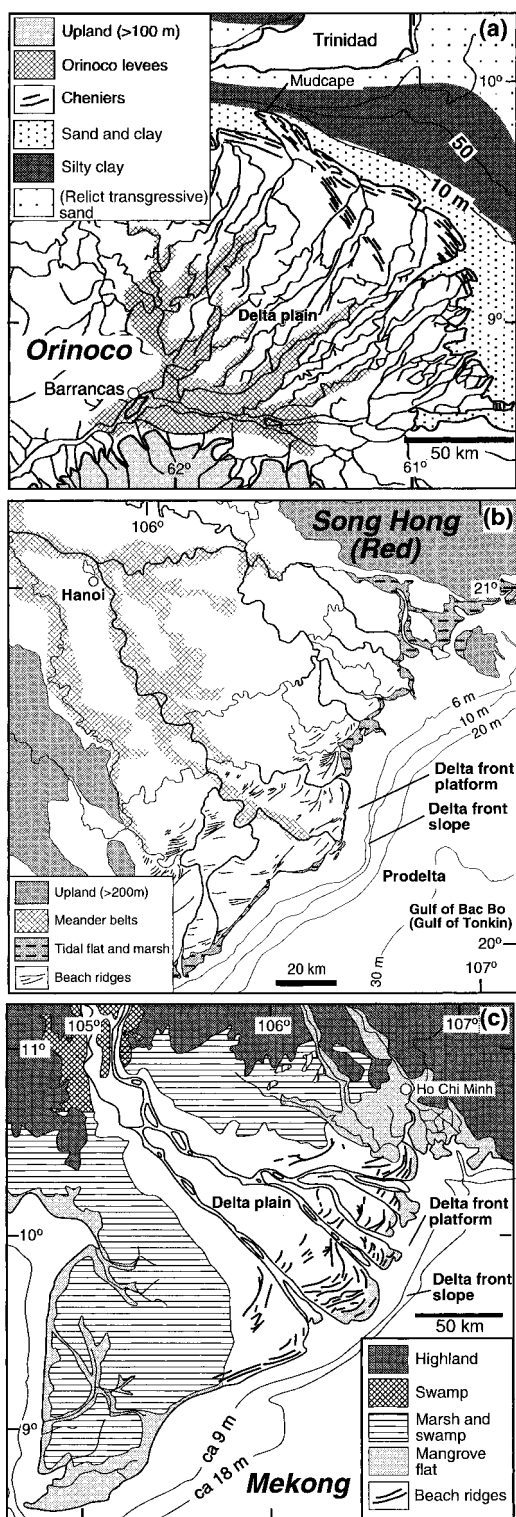
Fig. 7 Wave-dominated (Type 2) deltas.

(a) Nile (Coleman *et al.*, 1981; Sestini, 1989), (b) Huanghe (Yellow) (Bornhold *et al.*, 1986; Prior *et al.*, 1986). Present mouth of the Huanghe (Yellow) River is located about 15 km southeastward than that of 1984.

このことからメコンデルタの方がより高エネルギーの沿岸環境のデルタだといえる。また、紅河デルタの方が、潮汐に比べて河川と波浪の影響を強く受けているといえるだろう。一方、オリノコ河の陸上デルタでは分流路に沿って自然堤防やスクロールバー（蛇行州：蛇行河道の凸岸側に形成される堆積地形）が顕著に発達する（Van Andel, 1967）。また、海岸線付近の地形は、河川および潮汐の影響の強い東部がエスチュアリー状を呈するのに対し、沿岸流の影響の強い北部はチェニアーやマッドケープ（Mudcape）で特徴づけられる（Warne *et al.*, 2002）。マッドケープは泥質堆積物からなる丸みを帯びた細長い岬状の堆積地形で、典型的なものはギアナ（Guayana）沿岸流の影響が強いアマゾン河河口西方からオリノコ河河口にかけてみられる（Allison *et al.*, 1995）。

タイプ 4（潮汐卓越型）のデルタでは、河口が海側に開いており、エスチュアリーのような形態を示す（図 9: アマゾン河、ガンジス河、長江、フライ河）。デルタフロントプラットフォームの幅は他のタイプに比べて大きい（Nittrouer *et al.*,

1986）。河口部には数本の分流路と流路に平行な島がみられ、潮間帯には泥質干潟が広く分布する。分流路の海側末端には分流路と平行に伸長する、砂質な堆積物からなる分流河口州が発達する。これは潮汐リッジ（Tidal ridge）と呼ばれる場合もある（Dalrymple, 1992）。分流路のなかで末端にこのような河口州が形成されているものが、現在の主要分流路だと考えられる。分流路間の島は、分流河口州が成長し、さらに放棄され、陸化したものである。長江デルタではこのような島が順次形成され、過去 6 千年間デルタが前進することにより、現在のようなデルタになったと考えられている（王ほか, 1981）。長江デルタ南部には海岸線にほぼ平行する形でチェニアーも発達している（Liu and Walker, 1989）。ガンジス-ブラマプトラデルタの海岸線付近東部はエスチュアリーのような形状を呈し、過去約 200 年間は海側に前進していることが明らかにされている（Allison, 1998b）。西部は Sunderbans と呼ばれる、零筋の発達が著しいマングローブ湿地（Umitsu, 1987; Allison and Kepple, 2001）で特徴づけら



れる。内陸の陸上デルタ上には河道や旧河道に沿っていくつかのタイプの自然堤防が識別されている (Umitsu, 1985)。また、ダッカ北東部 (図 9d 枠外) には雨期に大部分が冠水する標高 3m 以下のシルベット盆地が広がる (Umitsu, 1987, 1993)。

2) 堆積物

大陸の大河川が運搬する土砂は、8 ~ 9 割が浮流によって運搬される細粒な堆積物、1 ~ 2 割が掃流によって運搬される粗粒な (砂質) 堆積物からなる (Milliman and Meade, 1983)。このためデルタを構成する堆積物は一般にプロデルタがシルト~粘土、デルタフロントおよびデルタプレインがシルト~砂からなることが多い。

プロデルタ堆積物は、デルタのタイプに関係なく薄いシルト層や貝化石の密集層を挟み、堆積構造は生物擾乱を受けていることが多い。貝の密集層はストーム堆積物である場合が多く、洪水やストームがプロデルタにイベント的に粗粒な堆積物を供給している。デルタフロント堆積物では一般に砂泥互層がみられ、砂層中には斜交葉理や平行葉理が観察される (Coleman, 1981; Kuehl *et al.*, 1982; Couerrier and Stanley, 1987; Harris *et al.*, 1993)。アマゾンデルタやガンジス-ブラマプトラデルタのデルタフロントの現成堆積物の調査では、砂泥互層の形成に潮汐とくに大潮-小潮周期が強く効いていることが報告されている (Segall and Kuehl, 1994; Jaeger and Nittrouer, 1995)。個々の砂質な層は日々の潮流に支配されているが、これらは癒着やカットアンドフィルしてしまうため、すべては保存されず、大潮時の砂質な部分と小潮時の泥質な部分が互層を形成している。また、長江デルタの完新世堆積

図 8 波浪・潮汐混合型 (タイプ 3) デルタ。
(a) オリノコ (Van Andel, 1967), (b) 紅河 (Mathers and Zalasiewicz, 1999; Tanabe *et al.*, 2003c), (c) メコン (Morgan, 1970)。

Fig. 8 Mixed energy (Type 3) deltas.
(a) Orinoco (Van Andel, 1967), (b) Song Hong (Red) (Mathers and Zalasiewicz, 1999; Tanabe *et al.*, 2003c), (c) Mekong (Morgan, 1970)。

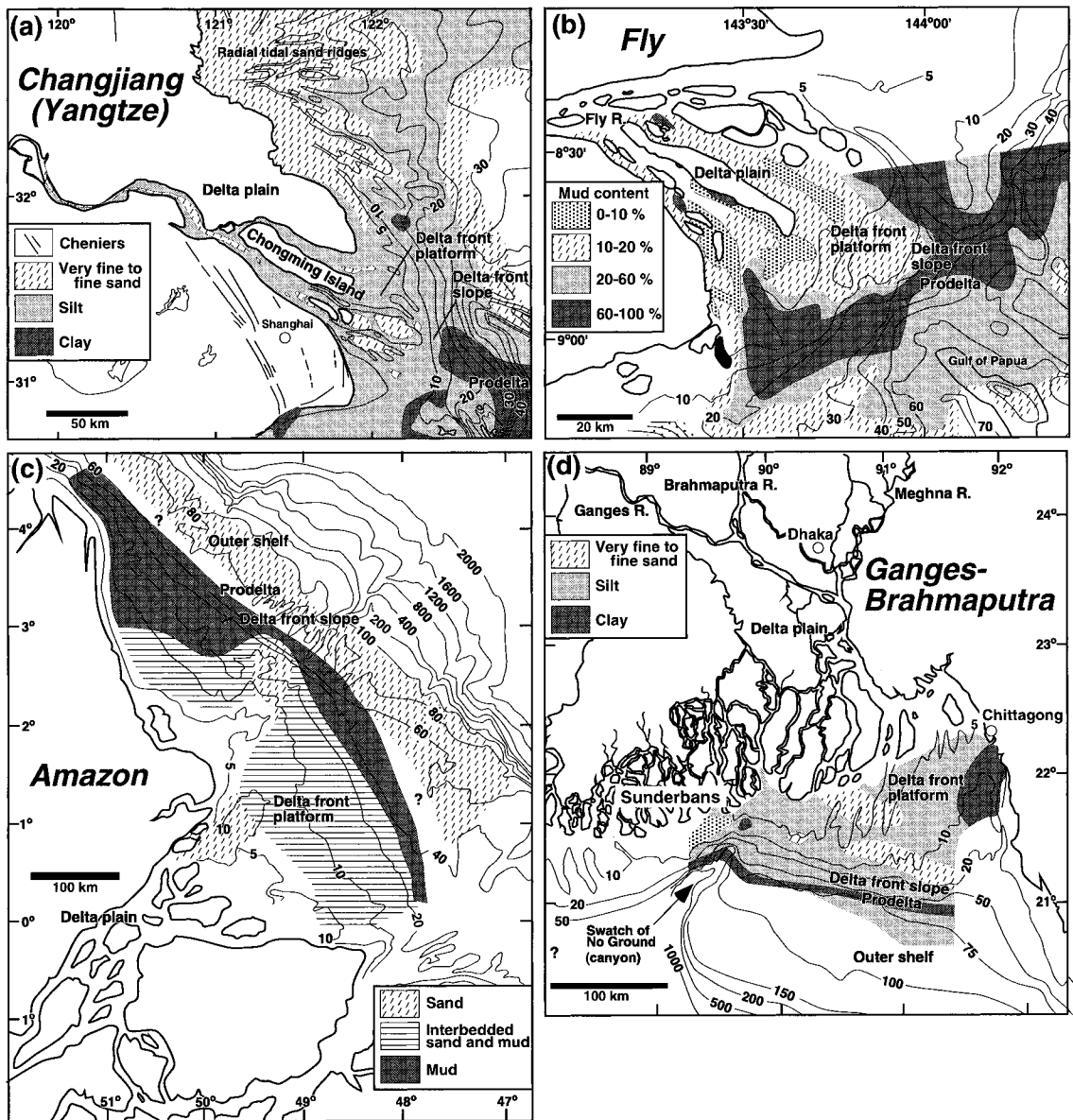


図 9 潮汐卓越型 (タイプ 4) デルタ。
(a) 長江, (b) フライ, (c) アマゾン, (d) ガンジス-ブラマプトラ. Hori *et al.* (2002) に加筆.

Fig. 9 Tide-dominated (Type 4) deltas.

(a) Changjiang (Yangtze), (b) Fly, (c) Amazon, (d) Ganges-Brahmaputra. Modified after Hori *et al.* (2002)

物でも、砂泥互層中の砂層に潮汐の影響を示唆する二方向の古流向を示すリップル葉理がみられ (Hori *et al.*, 2001a), サイドスキャンソナーによる底質調査でもデルタフロントにリップルが確認

されている (Chen and Yang, 1993)。一方、フライデルタでは、年間の堆積速度 (約 1.7 cm) と砂泥互層の厚さ (約 2 cm) との対応から、現在のデルタフロントにみられる砂泥互層は波浪の季節変

化によって形成されたと考えられている (Harris *et al.*, 1993)。すなわち、南東貿易風により生じる表面波の強い時期に生物擾乱のみられる砂質なラグ堆積物が堆積し、表面波の弱い時期にそれが泥に覆われて砂泥互層が形成される。

デルタブレインでは、デルタ地形や潮汐と波浪の影響、デルタが発達する場所の気候条件を反映したさまざまな堆積物がみられる。ミシシッピデルタでは、分流路沿いの自然堤防や破堤個所に生物擾乱を受けた細粒砂やシルト、分流路間の湿地には有機物を多く含む泥質堆積物が発達する (Coleman, 1981)。波の影響が強いナイルデルタでは海岸線付近に浜堤や海岸砂丘などを構成する貝殻片を含んだ細～中粒砂、ラグーンや湿地を構成する泥が堆積する (Couterrier and Stanley, 1987)。また、メコンデルタの海岸線付近でも浜堤や前浜、後浜を構成する砂質堆積物や湿地を構成する泥質堆積物が報告されている (Ta *et al.*, 2002a)。潮汐の影響が強いタイプ4のデルタでは潮汐低地に植物根を含む砂と泥の細互層が発達する (Hori *et al.*, 2001a)。また、亜熱帯域に位置する紅河デルタ、メコンデルタ、ガンジス-ブラマプトラデルタではマングローブによる泥炭質の堆積物がみられる。

このようにデルタの前進により下位からプロデルタ、デルタフロント、デルタブレインと重なる典型的なサクセションが形成される。一般的にはプロデルタからデルタフロントにかけては上方粗粒化のサクセションとなり、デルタフロント上部からデルタブレインでは上方細粒化のサクセションとなる。最も粗粒な堆積物は、分流河口州が形成される場所やデルタフロントスロープとデルタフロントプラットフォームの境界付近にみられる (Coleman, 1981; Hori *et al.*, 2002; Ta *et al.*, 2002a)。これはこの付近でエネルギーが最も大きくなり、細粒物が洗い流されることによる。さらに波浪が強く影響してくると、上方細粒化のサクセションは、潮間帯の中・上部に前浜が発達し、砂丘などの浜堤堆積物に覆われるため、デルタフロントプラットフォームからデルタブレイン堆積物では、下部が上方細粒化、上部が上方粗粒化の

サクセションとなる (Ta *et al.*, 2002a)。波浪の影響がより強くなれば、上部外浜から前浜・後浜のストランドプレインの層相と類似するようになる。一方、潮汐卓越型デルタでは、潮間帯には干潟やマングローブ (中等潮位よりも上部) が発達し、明瞭な上方細粒化を示す (Hori *et al.*, 2002)。河川の影響が大きなデルタでは、上方粗粒化や上方細粒化のサクセションは一樣ではない。黄河デルタでは、一回の洪水で4-5億トンにも及ぶ土砂が運ばれることがあり (Ren and Shi, 1986)、ボーリング調査から報告されているサクセションもデルタフロントからデルタブレインにかけて変化に富む (Saito *et al.*, 2000)。

このようなデルタのサクセションは前進している現在の陸上デルタ下に多く認められるが、一部のデルタでは異なった様相を示す。たとえば、ナイルデルタでは北東部のマンザラ湖付近と北西のロゼッタ岬付近のみに典型的なサクセションがみられ、両者間ではバリアーとラグーンが発達し、異なった層相を示す (El Askary and Frihy, 1986; Coutellier and Stanley, 1987; Frihy and Stanley, 1987; Arbouille and Stanley, 1991; Chen *et al.*, 1992; Stanley and Warne, 1993)。これはナイルデルタ地域が海水準の上昇地域にあたるため、河口にのみデルタ堆積物が分布し、他の沿岸域では海進期にみられるバリアーシステムが分布しているためである。このように典型的なデルタのサクセションの分布は、海進が及んだ範囲やデルタ地域の完新世の海水準変動、デルタが形成される以前の開析谷地形の位置、形態、深度などにも影響されている。

3) 堆積速度

Scruton (1960) は、ミシシッピデルタにおいて1874年と1940年の水深変化からデルタ域での堆積速度を推定した。これによればデルタフロント上部で堆積速度が最も大きく、デルタブレインおよびプロデルタに向かって堆積速度が減少し、その差は10倍以上に達している。同じような結果はGould (1970) のデータをもとにしたColeman (1988) も得ている。これは前進するデルタにおいては、河川から供給された堆積物が海

面下のデルタフロントに活発に堆積すること, また, デルタの縦断面形において傾斜の大きな場所, すなわちデルタフロント(スロープ)付近で堆積速度が大きくなること(増田・斎藤, 1995)に起因する。

以上のような地形変化によるデルタの堆積速度算定ではなく, 海底の堆積物から直接的に堆積速度を測定する研究が1980年代以降盛んに行われるようになった。さまざまな放射性核種, ^{234}Th (半減期 24.1 日)や ^{210}Pb (同 22.3 年), ^{137}Cs (同 30.2 年)を用いた100日-10年オーダーでの堆積速度の見積もりである(アマゾンデルタ: Kuehl *et al.*, 1982, 1986, 1996, 長江デルタ: McKee *et al.*, 1983; DeMaster *et al.*, 1985, フライデルタ: Harris *et al.*, 1993, 1996; Baker *et al.*, 1995, ガンジス-ブラマプトラデルタ: Kuehl *et al.*, 1989, 1997; Allison *et al.*, 1998; Goodbred and Kuehl, 1998; Michels *et al.*, 1998; Allison and Kepple, 2001)。ガンジス-ブラマプトラデルタでは, 陸上のデルタブレイン, 海域のデルタフロントからプロデルタで放射性核種を用いた堆積速度が測定されている。陸上デルタでは自然堤防から離れるにつれて堆積速度が小さくなり, またビル(bil)と呼ばれるデルタブレインの凹地で堆積速度が大きくなっている(Allison *et al.*, 1998; Goodbred and Kuehl, 1998)。また, 水中デルタではデルタフロントスロープでの堆積速度が最大5 cm/yr以上と大きく, プロデルタで< 0.3 cm/yrと小さい(Kuehl *et al.*, 1997; Michels *et al.*, 1998)。アマゾンデルタでは, 水深30-60 mのデルタフロントプラットフォームからデルタフロントスロープにかけて堆積速度が大きな値を示し, とくにデルタフロントスロープ最上部付近で10 cm/yr弱と最も大きい。プロデルタおよび河口近くのデルタフロントプラットフォームではそれぞれ2 cm/yr, < 1 cm/yrと小さい(Kuehl *et al.*, 1985, 1986)。

海域で得られたこのような堆積速度も時間スケールを異にすると違った値を示すことがある。長江沖合の水深約15 mの地点から採取した柱状試料について, ^{210}Pb を用いた数10年間の堆積速

度と ^{234}Th による数十日間の堆積速度の両方を求めた結果, それぞれ5.4 cm/yr, 4.4 cm/monthとなり, 短い期間の堆積速度が約10倍大きかったことが報告されている(Mckee *et al.*, 1983)。これは土砂供給の大きい夏期に海域に堆積した堆積物の約9割が, 冬期の波浪で再移動し, 結果として1割だけが保存されていることを示しているとされ(Mckee *et al.*, 1983), 短期間の堆積速度と地層として保存される堆積速度の両者が堆積作用と地層形成の理解に重要なことを示唆している。

ところで, ^{210}Pb などによる数10年オーダーの解析ではなく, ^{14}C 法による100年から1000年オーダーの解析もボーリング試料を用いて1990年以降盛んに行われるようになった。1本のボーリング試料に多数の ^{14}C 年代値を入れることによってボーリング地点の堆積速度変化を明らかにでき(中井・中村, 1988), 堆積速度と堆積環境との関係や, 堆積速度(曲線)と海水準変動の比較により古標高と古水深の変化を詳細に検討することができるようになった(斎藤, 1995; Saito, 1995)。このような多くの年代値を用いた詳細な完新統の研究は, アメリカ, オランダ, オーストラリアにおいてバリアーアイランドシステムやエスチュアリーシステムを対象に活発に行われてきたが, デルタや浜堤平野に関しては, 世界でも日本が先導的に研究を進めてきたといえよう(遠藤ほか, 1995; Saito, 1995; 増田, 1998)。

近年このような手法を用いて, アジアのデルタにおいて多くの研究が行われるようになった(黄河: Saito *et al.*, 2000, 長江: Hori *et al.*, 2001a, b, 2002, 紅河: Tanabe *et al.*, 2003c, メコン: Ta *et al.*, 2001, 2002a, b; Tanabe *et al.*, 2003a, チャオプラヤ: Tanabe *et al.*, 2003b)。1本のボーリングコアから各堆積環境と堆積速度の関係を明らかにできる。また, 数本のボーリングコアを扱うことにより地層断面に同時刻線を描くことが可能となる。同時刻線は過去の陸上や海底の地形を示し, これによりデルタの前進速度や各堆積環境の堆積速度, 過去の地形勾配を推定することが可能になった。次に現在みられるデルタがいつごろから, どのように発達してきたかをみてみよう。

V. デルタの発達

1) 海水準変動との関係

デルタは一般に海退期に発達する堆積システムである(Boyd *et al.*, 1992)。海岸線が海側に移動することによって形成されるシステムであることから海進期には基本的には形成されにくい。現在みられるデルタの形成は氷床の融解にともなう海水準上昇速度が低下した約 8.5–6.5 kyr BP 頃に始まったと考えられている(Stanley and Warne, 1994; Warne and Stanley, 1995)。これは河川からの土砂供給量が海水準の上昇によって形成されるスペース(堆積空間)を上回る状態になったことを示唆する。

デルタの形成が始まった 8.5–6.5 kyr BP 以降の相対的海水準変動は、ハイドロアイソスタシー(Nakada *et al.*, 1991)やテクトニックな隆起と沈降、堆積物の圧密(Roberts *et al.*, 1994)などの影響を受けるため、場所によって異なる。そのため、海水準変動に対するデルタの応答にも違いがみられる。たとえば長江では相対的海水準は約 6 kyr BP に最も高く(現在よりも 2–3 m 高)、それ以降現在の海水準まで徐々に低下してきた。このことを反映して、8–6 kyr BP は上方へデルタ堆積物が累重(アグラデーション)し、海水準が安定した 6 kyr BP 以降は、活発なデルタの前進(プログラデーション)が起こっている(Hori *et al.*, 2002)。一方、ミシシッピデルタやナイルデルタでは、現在の海水準が完新世の中で最も高いため、長江とは異なった発達様式を示す。ミシシッピデルタでは完新世に Teche や St. Bernard, LaFourche など 6 つのデルタ複合体(Delta complex)が形成されてきた(図 6)(Kolb and van Lopik, 1958; Frazier, 1967; Roberts, 1997)。このうち Teche まで(図 6 の ①)は 3.5 kyr BP 以前の海水準上昇期に、St. Bernard 以降(図 6 の ②)が引き続き海水準の安定期に発達したと考えられている(Boyd *et al.*, 1989)。とくに海水準上昇期のデルタ複合体は、上昇速度の小さい時期あるいは停滞期に発達したと推定されている(Boyd *et al.*, 1989)。

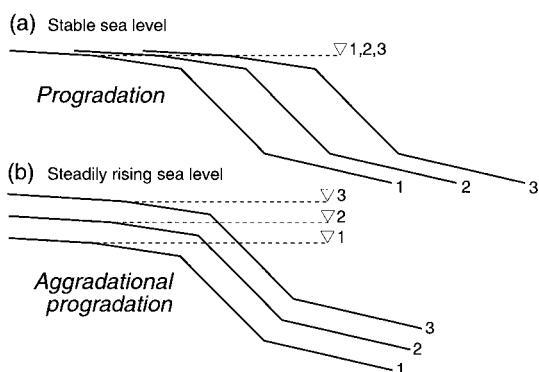


図 10 海水準変動に対するデルタの応答。各断面図は縦断方向に沿っている。実線、破線はそれぞれ時間 1 ~ 3 における同時間線、海水準を表す。

Fig. 10 Evolution of deltas in response to sea-level changes.

Each profile displays a longitudinal cross-section. Solid and dashed lines represent isochrons and sea levels at time 1, 2, and 3, respectively.

完新世の海水準変動はデルタの累重様式に大きな影響を与えている。1000 年オーダーで海水準が現在も上昇しているナイル、ガンジス-ブラマプトラデルタなどでは、堆積空間はデルタプレーン上に形成される。このため河川から供給される堆積物の多くがデルタプレーンに堆積し、そこで行ったボーリング試料の年代と深度から得られる埋積(堆積)曲線は海水準上昇速度に支配される(図 10b)。海水準上昇速度が一定であれば、堆積物の深度と年代の関係は堆積速度一定の直線になる。一方、6 kyr BP 以降海水準が徐々に低下もしくは安定しているところでは、河川から供給される土砂の多くはデルタプレーン上でなく海域に堆積する。デルタプレーンで行ったボーリング試料の深度と年代の関係は、ボーリング地点によって異なり、最上部の年代は陸側では古く、海側では新しい(図 10a)。また、堆積物の深度と年代の関係は、堆積速度一定の直線にはのらず、海底での堆積速度分布(地形の勾配)に支配される。つまり前章で述べたように、勾配が急なデルタフロントスロープでは堆積速度が大きく、プロデルタとデルタプレーン・デルタフロントプラットフォームでは勾配が緩いため堆積速度が小さくなり、堆

積速度は一定にはならない (Scruton, 1960; Gould, 1970; Michels *et al.*, 1998; Hori *et al.*, 2001a)。

このような考え方に対し、すべてのデルタの¹⁴C年代値が、深度と年代を軸にした場合に、堆積速度一定の直線上にのるべきで、これにのらないデータは、サンプルへの古い炭素の混入やサンプルの再移動などが起こったためだという問題提起が最近なされている (Stanley and Chen, 2000; Stanley and Hait, 2000; Stanley, 2001)。しかし、この考え方は、海域での堆積作用や地形、完新世の海水準変動を全く考慮していない解釈であり、問題が多い。

2) 河道・分流路の移動

河道や分流路の急激な変更 (アバルジョン) に関する研究が近年注目され (Jones and Schumm, 1999), アバルジョンとデルタの発達過程との関係がミシシッピや黄河デルタで検討されている。ミシシッピデルタではアバルジョンにともなってデルタ複合体が形成され、それぞれの複合体の形成に要する時間は 1000–2000 年と考えられている (Frazier, 1967; Roberts, 1997)。近年、これらの複合体の形成開始時期が、オーバークン堆積物の下位に位置する有機物の¹⁴C年代を使って再検討された (Törnqvist *et al.*, 1996)。この研究では、St. Bernard や LaFourche の形成開始時期が、従来広く知られていたもの (Frazier, 1967) よりも 1000–2000 年ほど新しく、各複合体上に分布する考古遺跡の年代とも調和的であることが示された。放棄されたデルタ複合体は、沿岸侵食および相対的な海水準の上昇によってバリアーやバリアー島に遷移し、最終的に内側陸棚の浅瀬 (inner-shelf shoal) になると考えられている (Penland *et al.*, 1988) (図 2a)。黄河では河口から約 500 km 上流の開封 (Kaifeng) 付近で河道が振れることで河口の位置が変わり (斎藤ほか, 1994), 過去 6000 年間に 10 のデルタ複合体が形成された (Xue, 1993; Saito *et al.*, 2000)。放棄されたデルタ複合体では侵食が卓越し、貝殻片と砂からなるチェニアーが発達している。

デルタ複合体では、分流路の移動により活動的なデルタ (active delta lobe) の形成位置が変化する (Frazier, 1967; Xue, 1993) (図 11a)。ローブの形成位置の変化はミシシッピや黄河だけでなく、ナイルデルタ北東部においてもボーリング堆積物の解析から認められている (Coutelier and Stanley, 1987)。さらに、ローブの中においても分流路から派生する二次的な流路や破堤などによって subdelta や crevasse-splay が形成される (Coleman and Gagliano, 1964)。なお、こうしたデルタのスイッチングが気候変動や陸地の沈降にともなう海水準の微変動に対応しているとする研究 (Lowrie and Hamiter, 1995) もみられるが、海水準変動以外の要因でも河道や分流路の移動は起こりうるので、解釈には注意が必要である。

オリノコデルタをはじめとするタイプ 3 のデルタでは伸びの方向が異なる浜堤列やチェニアーが認められる (図 8)。また、上流側では自然堤防も発達している。これらの形成年代を堆積物を用いて精度よく決めることができれば、分流路の移動時期や河口位置の変遷、およびそれらがデルタの発達過程に与える影響を評価できるようになるだろう。

タイプ 4 の長江では河道が深いためアバルジョンは起こらず、デルタ複合体のようなものはみられない (Hori *et al.*, 2002)。ただし、各々の分流路に入る流量は時間とともに変化している。たとえば、18 世紀以前は崇明 (Chongming) 島 (図 9) の北側の分流路への流量が多かったが、現在は河川水のほとんどが南側の分流路に流れ込んでいく (Chen *et al.*, 1985)。そのため、現成の分流河口州は南側で発達し、大きくなったものは徐々に離水する。同じような現象はフライ河でもみられる (Dalrymple *et al.*, 2003)。このように、タイプ 4 のデルタでは分流路間での流量変化が水中デルタの形成に大きな役割を果たしている (図 11b)。

3) 前進によって生じる沿岸環境の変化

海進から海退に転じてデルタの前進が始まった 8–6kyr BP 頃に、河口部が湾入していた場所は多い。このような場所でデルタが前進していくと湾入部はやがて埋積され、外洋に面するデルタに変

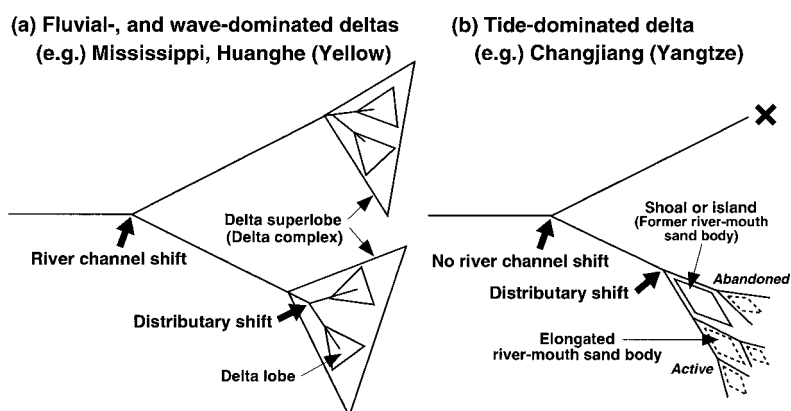


図 11 デルタスイッチングの模式図．

(a) 河川、波浪卓越型デルタでは河道や分流路の急激な移動（アバルジョン）により、デルタ複合体やデルタローブのスイッチングが大規模に生じる、(b) 潮汐卓越型デルタでは河道が深いため、河道の大きな移動は起こりにくい。しかし、分流入る流量が河口州の発達にともなって変化するため分流入の形成と放棄が繰り返され、分流入河口州の形成位置が変化する。Hori *et al.* (2002) に加筆。

Fig. 11 Schematic illustration of delta switching.

(a) Fluvial-, and wave-dominated deltas show widespread switching of delta superlobe (Delta complex) and delta lobe because of channel avulsion, (b) Tide-dominated deltas do not show such switching because there are stable shingle deep river channels. However, the formation and the abandonment of distributary channels occur commonly in tide-dominated deltas, forming river-mouth sand bars at the seaward ends of these channels. Modified after Hori *et al.* (2002).

化する。Ta *et al.* (2002a, b) や Tanabe *et al.* (2003a) は、メコンデルタのボーリング堆積物の層相が、デルタの前進にともない約 3 kyr BP を境に潮汐卓越型から潮汐-波浪卓越型へ変化し、デルタフロントスロープの勾配も現在まで徐々に急になってきたことを明らかにした。これはメコンデルタにおいて浜堤列が現在の海岸線付近のみにみられ、内陸側には分布しないことも調和的である。このようにデルタの前進によって河口環境が変化し（とくに外洋に面することで波浪の影響が相対的に強くなる）、それが地形や堆積物にも反映されていく。海水準変動との関係でいえば、最も海が広がった時期から現在まで、海進により生じた海（湾入部）はデルタの前進により消失・縮小し、デルタの位置も湾奥部から外洋に直接面するようになる。このことから、潮汐卓越型から潮汐-波浪卓越型へのデルタの進展は高海水準期

におけるデルタの一般的变化といえるかもしれない。別のタイプの環境変化としては、海進期に形成されていたバリアー背後のラグーンやエスチュアリーに形成されていたデルタ（ベイヘッドデルタ）(Dalrymple *et al.*, 1992) が、これらを埋積し、前進することによって外洋に直接面するようになる変化で、この場合も波浪がより卓越する環境への進展といえよう。

VI. 土砂供給にまつわる問題

1) 過去の土砂供給量の見積もり

デルタフロントの前進速度やデルタ域での堆積量を求め、過去の土砂供給量を推定することは、陸域から海域への物質輸送を考える上で大切である。とくにアジアの河川から海洋へ供給される土砂の量は、1960 年代から 1970 年代のデータにもとづけば、全世界の約 40% を占めている

(Milliman, 1991)。しかし、この値は自然の状態のものではなく、過去 2000–2500 年間の森林伐採や農耕など人為的影響を受けたためだと考えられている (Milliman and Syvitski, 1992)。

Hori *et al.* (2001a) はボーリング試料の解析により長江のデルタフロントの前進速度が 2 kyr BP 以降にそれ以前の 2 倍になったことを示した。この結果は陸上デルタから推定された急激な前進態 (王ほか, 1981; Chen, 1998) と調和的であった。急激な前進は河口へ供給される土砂の増加を意味するが、この要因として、広大な氾濫原や湖沼が広がり現在も 2–3 割の土砂が堆積している中流域での堆積量が減少し、河口域への堆積量が相対的に増加したこと (Hori *et al.*, 2001a) や、人為的影響により流域での土砂生産量が増加したこと (Chen *et al.*, 1985) が挙げられている。黄河においても約 1 kyr BP 以降に土砂供給量がそれ以前の 10 倍になったことが海域での土砂堆積量の見積もりから示され、黄土高原での農耕が土砂供給量の急増につながったと考えられている (Milliman *et al.*, 1987; Xue, 1993; Saito *et al.*, 2001)。黄河の例は人間活動による土砂供給増加の典型とされ、アジアにおける過去 1000–2000 年間の人間活動を考慮して、人間活動以前の世界の土砂供給量が現在の 3 分の 1 程度であったと見積もられている (Milliman and Syvitski, 1992)。しかし、東南アジア最大のデルタであるメコンデルタでは、過去 3000 年間のデルタフロントの位置にもとづいて計算された土砂量から、この期間中に顕著な土砂供給量の変化がなかったことが報告されている (Ta *et al.*, 2002b)。また、Tanabe *et al.* (2002b) も、タイ中央平野において完新世中期以降のデルタ堆積物の総量から、チャオプラヤ河とメクロン河の両者を加えた土砂供給量が現在とほぼ同じであったことを示し、急激な供給量の増加には否定的である。さらにガンジス–ブラマプトラデルタにおいてもボーリングによる調査から、過去 7000 年間は土砂供給量に大きな変化がなかったと報告されている (Goodbred and Kuehl, 2000)。したがって、人間活動以前の世界の土砂供給量を現在の 3 分の 1 と推定した

Milliman and Syvitski (1992) は、人間活動の影響を過大評価しすぎているだろう。世界全体で年間 200 億トンと推定されている現在の運搬量は、人間活動以前でも 150 億トン以上であった可能性が大きい。

2) デルタ域での土砂収支と海域への土砂供給量

河川から海域に供給される堆積物量は、Milliman and Meade (1983) や Milliman and Syvitski (1992) などにより報告されている。これらのデータは各河川の最下流部の観測点データにもとづいているため、実際の河口におけるデータとなっていない。多くの大河川では、観測点は河口から数十 km、場合によっては数百 km 上流に位置しているため、観測点でのデータは海域への実際の運搬量を示さない。ガンジス–ブラマプトラデルタでは、観測点を通じた土砂がどのくらいの割合で陸上および水中デルタに堆積しているかが検討されている (Kuehl *et al.*, 1997; Allison, 1998b; Allison *et al.*, 1998; Goodbred and Kuehl, 1998, 1999; Michels *et al.*, 1998)。これらをまとめた Goodbred and Kuehl (1999) は、現在両河川によりデルタに運ばれる約 1 億トンの土砂のうち 30% が陸上デルタ、40% が水中デルタに堆積し、残りが海底谷を通して深海 (ベンガル扇状地) (Weber *et al.*, 1997; Kudrass *et al.*, 1998) に運ばれていると推定した。つまりデルタの海域部に供給される土砂量は、7 割に過ぎない。アマゾンデルタでは、最下流の観測点を通じた土砂のうち 25% が陸上デルタや河川氾濫原、50% が水中デルタや陸棚に堆積し、残りの 25% が沿岸流によって北西に運ばれ、最終的にオリノコデルタの水中デルタやその沖合に堆積すると推定されている (Meade, 1994)。また、黄河デルタでも、約 3 割がデルタプレインに堆積し、海域に運搬される量は 7 割ほどしかない (斎藤・楊, 1994)。洪水時には土砂の多くが氾濫原やデルタプレインに堆積するため、実際に海域に供給される土砂量は少なくなる。したがって、Milliman and Syvitski (1992) など示されている土砂量は、海域への土砂量としてみるのでは

なく、デルタ域への土砂量とみた方がより現実に近い。

VII. おわりに

本稿では、近年の研究成果を中心に大河川デルタの特徴を堆積学的な見地からまとめた。最後に、今後検討すべき課題として次の二点を挙げたい。一点目は、異なる時間スケールの解析で得られた定量的なデータを統合し、現在の堆積作用と地層形成の階層性についての理解を深めることである。この際、さまざまな放射性核種を使った堆積速度の算定は有効な手法となる。二点目として、デルタ発生前後における堆積システムの変化を検討することが挙げられる。現在みられるデルタは後氷期の海水準上昇速度の低下にともなって形成され始めたが、デルタ発生前と発生後でどのような変化が生じたかを明らかにすることは、海進-海退にともなう河口域の環境変遷、とくにエスチュアリーとデルタの違いを考察する上で重要だろう。

大河川デルタでは、ダム建設や流域の水利用、また流域の土地利用の変化など人間活動の影響が近年問題となっている (Coleman and Roberts, 1989; Stanley and Warne, 1998; Woodroffe, 2000)。黄河の洪水・干上がりと海岸浸食 (Yang *et al.*, 1998)、長江に建設中の三峡ダム、メコン流域のダム建設やデルタ域の地下水の塩水化、マングローブ伐採とエビ養殖池 (海津, 2001)、紅河デルタの沿岸侵食 (春山・Phai, 2002)、ガンジス-ブラマプトラデルタの沿岸侵食や地下水汚染 (Allison, 1998a; 海津, 2001) など、とくにアジアの大河川デルタにおいて問題が顕在化しつつある。これらのデルタは、居住地として重要なばかりでなく、南アジア、東南アジア、東アジアにおける中心的な経済活動の場でもあり、さらには 21 世紀に懸念される食糧問題においてもアジアの穀倉地帯として重要な役割を果たす。また、食料と同じく 21 世紀は水管理の重要性が叫ばれているが、水管理は大河川デルタにも大きな影響を与える。大河川デルタが多く分布するアジアにおいて、国際的な視野の下に総合的なデルタ研究を進めていくことが期待されており、現在、アジアのデル

タに関する新しい IGCP プロジェクト「Deltas in Monsoonal Asia and Pacific region: Delta-MAP Project」が 2003 年開始予定で提案 (IGCP-475) されている。

謝 辞

査読者の名古屋大学・海津正倫教授には本稿を改善する上で有益な御意見をいただいた。記して謝意を表します。本研究は、平成 12-14 年度文部科学省科学研究費 (基盤研究 B1)「紅河デルタの環境変動と環境評価」(代表者: 東京大学・春山成子) および地球環境研究総合推進費による成果である*。

文 献

- Allen, J.R.L. (1965) Late Quaternary Niger delta, and adjacent areas: Sedimentary environments and lithofacies. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **49**, 547-600.
- Allen, J.R.L. (1978) Deltaic sediments. In Fairbridge, R.W. and Bourgeois, J. eds.: *The Encyclopedia of Sedimentology* (*Encyclopedia of Earth Science Series*; v. 6) Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., 235-240.
- Allison, M.A. (1998a) Geologic framework and environmental status of the Ganges-Brahmaputra delta. *J. Coastal Res.*, **14**, 826-836.
- Allison, M.A. (1998b) Historical changes in the Ganges-Brahmaputra delta front. *J. Coastal Res.*, **14**, 1269-1275.
- Allison, M.A. and Kepple, E.B. (2001) Modern sediment supply to the lower delta plain of the Ganges-Brahmaputra River in Bangladesh. *Geo-Mar. Lett.*, **21**, 66-74.
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A. and Faria, L.E.C., Jr. (1995) Rates and mechanisms of shoreface progradation and retreat downdrift of the Amazon river mouth. *Mar. Geol.*, **125**, 373-392.
- Allison, M.A., Kuehl, S.A., Martin, T.C. and Hassan, A. (1998) Importance of flood-plain sedimentation for river sediment budgets and terrigenous input to the oceans: Insights from the Brahmaputra-Jamuna River. *Geology*, **26**, 175-178.
- Arbouille, D. and Stanley, D.J. (1991) Late Quaternary evolution of the Burullus lagoon region, north-central Nile delta, Egypt. *Mar. Geol.*, **99**, 45-66.
- Baker, E.K., Harris, P.T., Keene, J.B. and Short, S.A. (1995) Patterns of sedimentation in the Fly River Delta. In Flemming, B.W. and Bartholoma, A. eds.: *Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments*. Spec. Publ. Int. Ass. Sedi-

- ment., **24**, 193–211.
- Bhattacharya, J.P. and Walker, R.G. (1992) Deltas. In Walker, R.G. and James, N.P. eds.: *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Assoc. Canada, 157–177.
- Bornhold, B.D., Yang, Z.S., Keller, G.H., Prior, D.B., Wiseman, W.J., Jr., Wang, Q., Wright, L.D., Xu, W.D. and Zhuang, Z.Y. (1986) Sedimentary framework of the modern Huanghe (Yellow River) delta. *Geo-Mar. Lett.*, **6**, 77–83.
- Boyd, R., Suter, J. and Penland, S. (1989) Relation of sequence stratigraphy to modern sedimentary environments. *Geology*, **17**, 926–929.
- Boyd, R., Dalrymple, R. and Zaitlin, B.A. (1992) Classification of clastic coastal depositional environments. *Sediment. Geol.*, **80**, 139–150.
- Chen, J., Zhu, H., Dong, Y. and Sun, J. (1985) Development of the Changjiang estuary and its submerged delta. *Cont. Shelf Res.*, **4**, 47–56.
- Chen, X. (1998) Changjiang (Yangtze) River delta, China. *J. Coastal Res.*, **14**, 838–858.
- Chen, W. and Yang, Z. (1993) Study of subaqueous slope instability of the modern Changjiang River delta. In Hopley, D. and Wang, Y. eds.: *Proceedings of the 1993 PACON China Symposium, Estuarine Coastal Processes, Resource Exploration and Management*. 133–142.
- Chen, Z., Warne, A.G. and Stanley, D.J. (1992) Late Quaternary evolution of the northwestern Nile Delta between the Rosetta Promontory and Alexandria, Egypt. *J. Coastal Res.*, **8**, 527–561.
- Coleman, J.M. (1981) Deltas: *Processes of Deposition and Models for Exploration*. Burgess Publishing Co.
- Coleman, J.M. (1988) Dynamic changes and processes in the Mississippi River delta. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **100**, 999–1015.
- Coleman, J.M. and Gagliano, S.M. (1964) Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **14**, 67–80.
- Coleman, J.M. and Roberts, H.H. (1989) Deltaic coastal wetlands. *Geologie en Mijnbouw*, **68**, 1–24.
- Coleman, J.M. and Wright, L.D. (1975) Modern river deltas: Variability of processes and sand bodies. In Broussard, M.L. ed.: *Deltas, Models for Exploration*. Houston Geological Society, 99–149.
- Coleman, J.M., Roberts, H.H., Murray, S.P. and Salama, M. (1981) Morphology and dynamic sedimentology of the Eastern Nile delta shelf. *Mar. Geol.*, **42**, 301–326.
- Coleman, J.M., Roberts, H.H. and Stone, G.W. (1998) Mississippi River delta: An overview. *J. Coastal Res.*, **14**, 698–716.
- Coutellier, V. and Stanley, D.J. (1987) Late Quaternary stratigraphy and paleogeography of the eastern Nile Delta, Egypt. *Mar. Geol.*, **77**, 257–275.
- Dalrymple, R.W. (1992) Tidal depositional systems. In Walker, R.G. and James, N.P. eds.: *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Assoc. Canada, 195–218.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. and Boyd, R.A. (1992) A conceptual model of estuarine sedimentation. *J. Sediment. Petrol.*, **62**, 1130–1146.
- Dalrymple, R.W., Baker, E.K., Harris, P.T. and Hughes, M.G. (2003) Sedimentology and stratigraphy of a tide-dominated, foreland-basin delta (Fly River, Papua New Guinea) In Posamentier, H.W., Sidi, F.H., Darman, H., Nummedal, D. and Imbert, P. eds.: *Tropical Deltas of Southeast Asia - Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*. SEPM Spec. Publ., No. 76. (in press)
- Davis, R.A., Jr. (1992) *Depositional Systems: An Introduction to Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd ed. Prentice-Hall.
- Davis, R.A., Jr. and Hayes, M.O. (1984) What is a wave-dominated coast? *Mar. Geol.*, **60**, 313–329.
- DeMaster, D.J., McKee, B.A., Nittrouer, C.A., Qian, J. and Cheng, G. (1985) Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**, 143–158.
- El Askary, M.A. and Frihy, O.E. (1986) Depositional phases of Rosetta and Damietta promontories on the Nile delta coast. *J. African Earth Sci.*, **5**, 627–633.
- Elliott, T. (1986) Deltas. In Reading, H.G. ed.: *Sedimentary Environments and Facies*. Second ed. Blackwell Scientific Publication, 113–154.
- 遠藤邦彦・牧野内 猛・坪田邦治・岩尾雄四郎 (1995) 沖積層の形成過程 . 土と基礎, **43**(10), 8–12 .
- Fisher, W.L. (1969) Facies characterization of Gulf Coast Basin delta systems, with some Holocene analogues. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **19**, 239–261.
- Frazier, D.E. (1967) Recent deltaic deposits of the Mississippi River: Their development and chronology. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **17**, 287–315.
- Frihy, O.E. and Stanley, D.J. (1987) Texture and coarse fraction composition of Nile Delta deposits: Facies analysis and stratigraphic correlation. *J. African Earth Sci.*, **7**, 237–255.
- Galloway, W.E. (1975) Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In Broussard, M.L. ed.: *Deltas, Models for Exploration*. Houston Geological Society, 87–98.
- Galloway, W.E. and Hobday, D.K. (1996) *Terrigenous Clastic Depositional Systems: Applications to Fossil Fuel and Groundwater Resources*. 2nd

- ed. Springer-Verlag.
- Gilbert, G.K. (1885) The topographic features of lake shores. *U.S. Geol. Surv., 5th Ann. Rept.*, 69–123.
- Gilbert, G.K. (1890) Lake Bonneville. *U.S. Geol. Surv. Monogr.*, **1**.
- Goodbred, S.L., Jr. and Kuehl, S.A. (1998) Flood-plain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges-Brahmaputra river sediment: An accretion study using ^{137}Cs and ^{210}Pb geochronology. *Sediment. Geol.*, **121**, 239–258.
- Goodbred, S.L., Jr. and Kuehl, S.A. (1999) Holocene and modern sediment budgets for the Ganges-Brahmaputra river system: Evidence for highstand dispersal to flood-plain, shelf, and deep-sea depocenters. *Geology*, **27**, 559–562.
- Goodbred, S.L., Jr. and Kuehl, S.A. (2000) Enormous Ganges-Brahmaputra sediment discharge during the strengthened early Holocene monsoon. *Geology*, **28**, 1083–1086.
- Gould, H.R. (1970) The Mississippi delta complex. In Morgan, J.P. ed.: *Deltaic Sedimentation: Modern and Ancient*. SEPM Spec. Publ., **15**, 3–30.
- Harris, P.T., Baker, E.K., Cole, A.R. and Short, S.A. (1993) A preliminary study of sedimentation in the tidally dominated Fly River Delta, Gulf of Papua. *Cont. Shelf Res.*, **13**, 441–472.
- Harris, P.T., Pattiaratchi, C.B., Keene, J.B., Dalrymple, R.W., Gardner, J.V., Baker, E.K., Cole, A.R., Mitchell, D., Gibbs, P. and Schroeder, W.W. (1996) Late Quaternary deltaic and carbonate sedimentation in the Gulf of Papua foreland basin: Response to sea-level change. *J. Sediment. Res.*, **66**, 801–819.
- 春山成子・Phai, V.V. (2002) 紅河デルタ南部の沿岸域の変化. 地学雑誌, **111**, 126–132.
- Hayes, M.O. (1979) Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In Leatherman, S.P. ed.: *Barrier Islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, 1–27.
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q., Cheng, C., Wang, P., Sato, Y. and Li, C. (2001a) Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta, China. *Geomorphology*, **41**, 233–248.
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q., Cheng, C., Wang, P., Sato, Y. and Li, C. (2001b) Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze) estuary during the last transgression. *Mar. Geol.*, **177**, 331–351.
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q. and Wang, P. (2002) Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China. *Sediment. Geol.*, **146**, 249–264.
- Hovius, N. (1998) Controls on sediment supply by large rivers. In Shanley, K.W. and McCabe, P.J. eds.: *Relative role of eustasy, climate, and tectonism in continental rocks*. SEPM Spec. Publ. **59**, 3–16.
- Jaeger, J.N. and Nittrouer, C.A. (1995) Tidal controls on the formation of fine-scale sedimentary strata near the Amazon river mouth. *Mar. Geol.*, **125**, 259–281.
- Jones, L.S. and Schumm, S.A. (1999) Causes of avulsion: An overview. In Smith, N.D. and Rogers, J. eds.: *Fluvial Sedimentology VI*. IAS Spec. Publs Int. Ass. Sediment., **28**, 171–178.
- 貝塚爽平 (1978) 自然は語る, 2. 三角州の地表と地下. 土と基礎, **26**, 71–76.
- Keller, G.H. and Prior, D.B. eds. (1986) Huanghe (Yellow River) Delta. *Geo-Mar. Lett.*, **6**, 63–120.
- Kolb, C.R. and van Lopik, J.R. (1958) *Geology of the Mississippi River Deltaic Plain, Southeastern Louisiana*. US Army Engineer Waterways Experiment Sta., Vicksburg, MS, Tech. Rept.
- Kosters, E.C. (1989) Organic-clastic facies relationships and chronostratigraphy of the Barataria interlobe basin, Mississippi delta plain. *J. Sediment. Petrol.*, **59**, 98–113.
- Kosters, E.C. and Suter, J.R. (1993) Facies relationships and systems tracts in the late Holocene Mississippi delta plain. *J. Sediment. Petrol.*, **63**, 727–733.
- Kudrass, H.R., Michels, K.H., Wiedicke, M. and Suckow, A. (1998) Cyclones and tides as feeders of a submarine canyon off Bangladesh. *Geology*, **26**, 715–718.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A. and DeMaster, D.J. (1982) Modern sediment accumulation and strata formation on the Amazon continental shelf. *Mar. Geol.*, **49**, 279–300.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J. and Curtin, T.B. (1985) An overview of sedimentation on the Amazon continental shelf. *Geo-Mar. Lett.*, **4**, 207–210.
- Kuehl, S.A., DeMaster, D.J. and Nittrouer, C.A. (1986) Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, **6**, 209–225.
- Kuehl, S.A., Hariu, T.M. and Moore, W.S. (1989) Shelf sedimentation off the Ganges-Brahmaputra river system: Evidence for sediment bypassing to the Bengal fan. *Geology*, **17**, 1132–1135.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., Allison, M.A., Faria, L.E.C., Dukak, D.A., Jaeger, J.M., Pacioni, T.D., Figueiredo, A.G. and Underkoffler, E.C. (1996) Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment. *Cont. Shelf Res.*, **16**, 787–815.
- Kuehl, S.A., Levy, B.M., Moore, W.S. and Allison, M.A. (1997) Subaqueous delta of the Ganges-Brahmaputra river system. *Mar. Geol.*, **144**, 81–96.

- Liu, C. and Walker, H.J. (1989) Sedimentary characteristics of cheniers and the formation of the chenier plains of East China. *J. Coastal Res.*, **5**, 353-368.
- Lowrie, A. and Hamiter, R. (1995) Fifth and sixth order eustatic events during Holocene (fourth order) highstand influencing Mississippi delta-lobe switching. In Finkl, C.W. Jnr. ed.: *Holocene Cycles: Climate, Sea Levels, and Sedimentation*. J. Coastal Res. Spec. Issue, **17**, 225-229.
- 町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・榎根 勇・小野有五編 (1981) 地形学辞典. 二宮書店.
- 増田富士雄 (1998) 高密度で測定された ^{14}C 年代値による完新等のダイナミック地層学. 地学雑誌, **107**, 713-727.
- 増田富士雄・斎藤文紀 (1995) プログラデーションによる地層の特徴とテクトニクス的説明. 月刊地球, **17**, 671-674.
- Mathers, S. and Zalasiewicz, J. (1999) Holocene sedimentary architecture of the Red River delta, Vietnam. *J. Coastal Res.*, **15**, 314-325.
- McKee, B.A., Nittrouer, C.A. and DeMaster, D.J. (1983) Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River. *Geology*, **11**, 631-633.
- Meade, R.H. (1994) Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco Rivers. *Quat. Int.*, **21**, 29-39.
- Miall, A.D. (1984) Deltas. In Walker, R.G. ed.: *Facies Models*. Second ed. Geoscience Canada, Reprint Series **1**, 105-118.
- Michels, K.H., Kudrass, H.R., Hubscher, C., Suckow, A. and Wiedicke, M. (1998) The submarine delta of the Ganges-Brahmaputra: Cyclone-dominated sedimentation patterns. *Mar. Geol.*, **149**, 133-154.
- Middleton, G.V. (1991) A short historical review of clastic tidal sedimentology. In Smith, D.G., Reinson, G.E., Zaitlin, B.A. and Rahmani, R.A. eds.: *Clastic Tidal Sedimentology*. Canadian Soc. Petroleum Geologists, Memoir **16**, ix-xv.
- Milliman, J.D. (1991) Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas. In Montoura, R.F.C., Martin, J.-M. and Wollast, R. eds.: *Ocean Margin Processes in Global Change*. John Wiley and Sons, 69-89.
- Milliman, J.D. and Jin, Q. eds. (1985) Sediment Dynamics of the Changjiang Estuary and the Adjacent East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**, 1-251.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H. (1983) World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, **91**, 1-21.
- Milliman, J.D. and Syvitski, J.P.M. (1992) Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the oceans: The importance of small mountain rivers. *J. Geol.*, **100**, 525-544.
- Milliman, J.D., Qin, Y., Ren, M. and Saito, Y. (1987) Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: The Yellow River (Huanghe) example. *J. Geol.*, **95**, 751-762.
- Morgan, J.P. (1970) Depositional processes and products in the deltaic environment. In Morgan, J.P. ed.: *Deltaic Sedimentation: Modern and Ancient*. SEPM Spec. Publ., **15**, 31-47.
- 鍋谷 淳・宮田雄一郎・山村恒夫・岩田尊夫・小幡雅之 (1990a) 淡水成デルタ海成デルタの堆積作用—その1: 構成粒子, 内部構造, 形態からみた比較. 石油技術協会誌, **55**, 113-120.
- 鍋谷 淳・宮田雄一郎・岩田尊夫・山村恒夫 (1990b) 淡水成デルタ海成デルタの堆積作用—その2: 形成過程からみた比較. 石油技術協会誌, **55**, 177-185.
- Nakada, M., Yonekura, N. and Lambeck, K. (1991) Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: Implications for tectonic histories and mantle rheology. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **85**, 107-122.
- 中井信之・中村俊夫 (1988) 放射性炭素年代測定法. 板谷徹丸・今井 登・大村明雄・鈴木正男・中井信之・蜷川清隆・広岡公夫編: 人類紀の年代測定. 地質学論集, **29**, 235-252.
- Nittrouer, C.A. and DeMaster, D.J. eds. (1986) Sedimentary Processes on the Amazon Continental Shelf. *Cont. Shelf Res.*, **6**, 1-379.
- Nittrouer, C.A. and DeMaster, D.J. eds. (1996) Oceanography of the Amazon Continental Shelf. *Cont. Shelf Res.*, **16**, 551-841.
- Nittrouer, C.A. and Kuehl, S.A. eds. (1995) Geological Significance of Sediment Transport and Accumulation on the Amazon Continental Shelf. *Mar. Geol.*, **125**, 175-399.
- Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., DeMaster, D.J. and Kowssmann, R.O. (1986) The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **97**, 444-458.
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Tateishi, M. (2000) Late Holocene depositional environments and coastal evolution of the Mekong River Delta, Southern Vietnam. *J. Asian Earth Sci.*, **18**, 427-439.
- 大内俊二訳 (1995) 現代地形学. 古今書院. Chorley, R.J., Schumm, S.A. and Sugden, D.E. (1984) *Geomorphology*. Methuen & Co. Ltd.
- Orton, G.J. and Reading, H.G. (1993) Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, **40**, 475-512.
- Penland, S., Boyd, R. and Suter, J.R. (1988) Transgressive depositional systems of the Mississippi delta plain: A model for barrier shoreline and shelf sand development. *J. Sediment. Petrol.*, **58**, 932-949.

- Prior, D.B., Yang, Z.S., Bornhold, B.D., Keller, G.H., Lin, Z.H., Wiseman, W.J., Jr., Wright, L.D. and Lin, T.C. (1986) The subaqueous delta of the modern Huanghe (Yellow River). *Geo-Mar. Lett.*, **6**, 67-75.
- Ren, M.E. and Shi, Y.L. (1986) Sediment discharge of the Yellow River (China) and its effect on the sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea. *Cont. Shelf Res.*, **6**, 785-810.
- Roberts, H.H. (1997) Dynamic changes of the Holocene Mississippi River delta plain: The delta cycle. *J. Coastal Res.*, **13**, 605-627.
- Roberts, H.H., Bailey, A. and Kuecher, G.J. (1994) Subsidence in the Mississippi River delta - Important influences of valley filling by cyclic deposition, primary consolidation phenomena, and early diagenesis. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **44**, 619-629.
- 斎藤文紀 (1995) 河口デルタの埋積システム—小樽川三角州の形成機構— . 大沢雅彦・大原 隆編: 生物-地球環境の科学—南関東の自然誌— . 朝倉書店, 29-40 .
- Saito, Y. (1995) High-resolution sequence stratigraphy of an incised-valley fill in a wave- and fluvial-dominated setting: Latest Pleistocene-Holocene examples from the Kanto Plains of central Japan. In Saito, Y., Hoyanagi, K. and Ito, M. eds.: *Sequence Stratigraphy: Toward a New Dynamic Stratigraphy*. Memoirs Geol. Soc. Japan **45**, 76-100.
- 斎藤文紀・楊作升 (1994) 黄河: 河川流量, 浮遊堆積物運搬量と堆積物収支. 堆積学研究, **40**, 7-17 .
- 斎藤文紀・池原 研・片山 肇・松本英二・楊作升 (1994) 東シナ海陸棚堆積物に記録された黄河の河道変遷と人為的影響. 地質ニュース, **476**, 8-16 .
- Saito, Y., Wei, H., Zhou, Y., Nishimura, A., Sato, Y. and Yokota, S. (2000) Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) Delta, China. *J. Asian Earth Sci.*, **18**, 489-497.
- Saito, Y., Yang, Z.S. and Hori, K. (2001) The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: A review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene. *Geomorphology*, **41**, 219-231.
- Scruton, P.C. (1960) Delta building and the deltaic sequence. In Shepard, F.P. and van Andel, T.H. eds.: *Recent Sediments, Northwest Gulf of Mexico*. Am. Assoc. Petroleum Geologists, 82-102.
- Segall, M.P. and Kuehl, S.A. (1994) Sedimentary structures on the Bengal shelf: A multi-scale approach to sedimentary fabric interpretation. *Sediment. Geol.*, **93**, 165-180.
- Sestini, G. (1989) Nile Delta: A review of depositional environments and geological history. In Whateley, M.K.G. and Pickering, K.T. eds.: *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels*. Geol. Soc. Spec. Publ., **41**, 99-127.
- Stanley, D.J. (2001) Dating modern deltas: Progress, problems, and prognostics. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, **29**, 257-294.
- Stanley, D.J. and Chen, Z. (2000) Radiocarbon dates in China's Holocene Yangtze delta: Record of sediment storage and reworking, not timing of deposition. *J. Coast. Res.*, **16**, 1126-1132.
- Stanley, D.J. and Hait, A.K. (2000) Deltas, radiocarbon dating, and measurements of sediment storage and subsidence. *Geology*, **28**, 295-298.
- Stanley, D.J. and Warne, A.G. (1993) Nile Delta: Recent geological evolution and human impact. *Science*, **260**, 628-634.
- Stanley, D.J. and Warne, A.G. (1994) Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science*, **265**, 228-231.
- Stanley, D.J. and Warne, A.G. (1998) Nile Delta in its destruction phase. *J. Coastal Res.*, **14**, 794-825.
- Suter, J.R. (1994) Deltaic coasts. In Carter, R.W.G. and Woodroffe, C.D. eds.: *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, 87-120.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2001) Sedimentary facies, diatom and foraminifer assemblages in a late Pleistocene-Holocene incised-valley sequence from the Mekong River delta, Bentre Province, southern Vietnam: The BT2 core. *J. Asian Earth Sci.*, **20**, 83-94.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2002a) Sediment facies and Late Holocene progradation of the Mekong River Delta in Bentre Province, southern Vietnam: An example of evolution from a tide-dominated to a tide- and wave-dominated delta. *Sediment. Geol.*, **152**, 313-325.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I., Tanabe, S. and Saito, Y. (2002b) Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong River, southern Vietnam. *Quat. Sci. Rev.*, **21**, 1807-1819.
- Tanabe, S., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2003a) Delta evolution model inferred from the Mekong Delta, Southern Vietnam. In Posamentier, H.W., Sidi, F.H., Darman, H., Nummedal, D. and Imbert, P. eds.: *Tropical Deltas of Southeast Asia - Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*. SEPM Spec. Publ., No. 76. (in press)
- Tanabe, S., Saito, Y., Sato, Y., Suzuki, Y. and Sinsakul, S. (2003b) Stratigraphy and Holocene evolution of the mud-dominated Chao Phraya delta. *Quat. Sci. Rev.*, **22**, 789-807.
- Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., Doanh, L.Q., Sato, Y. and Hiraide, S. (2003c)

- Sedimentary facies and radiocarbon dates of the ND (Nam Dinh)-1 core sediments obtained from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *J. Asian Earth Sci.*, **21**, 503–513.
- Thomas, D.S.G. and Goudie, A. eds. (2000) *The Dictionary of Physical Geography*. 3rd ed. Blackwell Publishers.
- Törnqvist, T.E., Kidder, T.R., Autin, W.J., van der Borg, K., de Jong, A.F.M., Klerks, C.J.W., Snijders, E.M.A., Storms, J.E.A., van Dam, R.L. and Wiemann, M.C. (1996) A revised chronology for Mississippi River subdeltas. *Science*, **273**, 1693–1696.
- Umitsu, M. (1985) Natural levees and landform evolutions in the Bengal Lowland. *Geogr. Rev. Japan*, **58B**, 149–164.
- Umitsu, M. (1987) Late Quaternary sedimentary environment and landform evolution in the Bengal Lowland. *Geogr. Rev. Japan*, **60B**, 164–178.
- Umitsu, M. (1993) Late Quaternary sedimentary environments and landforms in the Ganges Delta. *Sediment. Geol.*, **83**, 177–186.
- 海津正倫 (2001) アジアのデルタにおける海面上昇の影響 . 海津正倫・平井幸弘編 : 海面上昇とアジアの海岸 . 古今書院 , 16–34 .
- Van Andel, T.H. (1967) The Orinoco delta. *J. Sediment. Petrol.*, **37**, 297–310.
- Walker, R.G. (1992) Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In Walker, R.G. and James, N.P. eds.: *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Assoc. of Canada, 1–14.
- Walker, R.G. (1995) *Clastic Sedimentology Seminar*. Japan National Oil Corporation Technology Research Center, 21–42.
- 王靖泰・郭蓄民・許世远・李 萍・李从先 (1981) 全新世長江三角州的發育 . 地質學報 , **55** , 67–81 .
- Warne, A.G. and Stanley, D.J. (1993) Archaeology to refine Holocene subsidence rates along the Nile delta margin, Egypt. *Geology*, **21**, 715–718.
- Warne, A.G. and Stanley, D.J. (1995) Sea-level change as a critical factor in development of basin margin sequences: New evidence from Late Quaternary record. In Finkl, C.W. Jnr. ed.: *Holocene Cycles: Climate, Sea Levels, and Sedimentation*. J. Coastal Res. Spec. Issue, **17**, 231–240.
- Warne, A.G., Meade, R.H., White, W.A., Guevara, E.H., Gibeaut, J., Smyth, R.C., Aslan, A. and Tremblay, T. (2002) Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology*, **44**, 273–307.
- Weber, M.E., Wiedicke, M.H., Kudrass, H.R., Hubscher, C. and Erlenkeuser, H. (1997) Active growth of the Bengal Fan during sea-level rise and highstand. *Geology*, **25**, 315–318.
- Woodroffe, C.D. (2000) Deltaic and estuarine environments and their Late Quaternary dynamics on the Sunda and Sahul shelves. *J. Asian Earth Sci.*, **18**, 393–413.
- Wright, L.D. (1982) Deltas. In Schwartz, M.L. ed.: *The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments*. Hutchinson Ross Publishing Co., 358–369.
- Wright, L.D. (1985) River Deltas. In Davis, R.A., Jr. ed.: *Coastal Sedimentary Environments*. 2nd Revised Expanded ed., Springer-Verlag, 1–76.
- Xue, C. (1993) Historical changes in the Yellow River delta, China. *Mar. Geol.*, **113**, 321–329.
- Yang, Z.S., Milliman, J.D., Galler, J., Liu, J.P. and Sun, X.G. (1998) Yellow River's water and sediment discharge decreasing steadily. *EOS*, **79**, 589–592.

(2002 年 6 月 3 日 受付 , 2003 年 1 月 20 日 受理)

補 遺

* 本論文受理後 , 2003 年 2 月に行われた IGCP 理事会において , IGCP-475 “ DeltaMAP Project ” は採択され , 2003 年から実施されている .