インド東岸のマハナディ・デルタ

前島 渉*・N. K. Mahalik**

Mahanadi delta in the east coast of Peninsular India

Wataru Maejima* and N. K. Mahalik**

The Mahanadi delta in the east coast of Peninsular India has an arcuate shape, and covers an area of about 9,000 km² with a maximum width of 140 km. Among the important geomorphic features recognized on the delta are active distributary channels, dead or defunct channels, ancient beach ridges, coastal sands, tidal flats, swamps, and spits. The sediments brought by the Mahanadi River are distributed by riverine and marine agents to give rise to a broad deltaic plain. Waves, winds and littoral currents have played an important role to rework the deltaic sediments and have been responsible for the development of the sea-marginal transition zone of the delta plain. Based on the disposition of the geomorphic features, four major stages are recognized in the evolution of the delta.

key words : Mahanadi delta, Orissa State, India, delta evolution, distributary channel system, geomorphology.

はじめに

インドの主要なデルタは半島東部に発達しており(第1図), ガンジス-ブラマプトラ (Ganges-Brahmaputra), マハナディ (Mahanadi), ゴダバリ (Godavari), クリシュナ (Krishna), カウベリー (Cauvery) などのデルタがよく知られている (Vaidyanadhan, 1991). これらのデルタは, 各々に作用する諸営力とそれらの相対的強さの違いによって, それぞれ異なった形態や発達過程を示す. 例えば, 広大なガンジス-ブラマプトラ・デルタでは, 細粒碎屑物質と強い潮汐作用の影響が特徴的であり, そのため独特の形態をもったデルタとなっている (Fisher *et al.*, 1969; Coleman, 1969; Wright, 1978). 一方, マハナディ・デルタやゴダバリ・デ

ルタ, クリシュナ・デルタでは, 河川作用に加えて波浪作用がデルタの形成・発展に関与している (Sambasiva Rao *et al.*, 1978; Sambasiva Rao and Vaidyanadhan, 1979; Nageswara Rao and Vaidyanadhan, 1978; Bharali *et al.*, 1991). マハナディ・デルタでは, さらに沿岸流の作用も大きな役割を担っている (Mahalik and Acharya, 1986). この小論では, マハナディ・デルタの地形上の特徴を紹介し, 現在までに得られている知識をもとにデルタの発展過程を簡単にまとめる.

マハナディ・デルタの概要

マハナディ川は, 東ガーツ山脈北部に端を発する幹川延長約850kmの河川で, オリッサ州都ブバネシュワール (Bhubaneswar) 東方でベンガル湾に注ぐ(第2図). マハナディ川の流域はオリッサ州のほか, マディヤプラデッシュ, ビハール, マハラストラの各州にまたがり, 流域面積は140,000km²余りにおよぶ.

マハナディ川は, ブバネシュワールの北約25kmのカッタック (Cuttack) 付近で丘陵地帯から平野

受付1995年8月12日, 受理1995年11月28日

*大阪市立大学理学部地球学教室 Department of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University, Osaka 558, Japan.

** P. G. Department of Geology, Utkal University, Bhubaneswar 751 004, Orissa, India.

Fig. 1 River deltas in the east coast of Peninsular India.

部に抜け出るとすぐに分岐を始め、デルタを形づくる（第2図）。マハナディ・デルタは円弧状デルタの形態をもち、両外側の分岐チャンネル間の隔たり約140°の扇型をなす。デルタの面積は約9,000km²で、最大幅は140kmある。また、デルタ面の平均傾斜は1/4,800である。デルタの南西端は、ラグーンであるチリカ（Chilika）湖によって境されている。北東側はブラamani（Brhamani）川を境としてブラamani・デルタと接する。つまり、マハナディ・デルタはブラamani・デルタとともに複合デルタを構成しているといえる（Sambasiva Rao *et al.*, 1978; Mahalik, 1984）。

マハナディ川およびデルタの各分岐チャンネルの年間流量のうち、85～95%が7～9月のモンスーン期に集中している。そのため、モンスーン期にはデルタの低地部は河川水の氾濫を受け、広域にわたって停滞水域を生ずる。被害を生ずる規模の氾濫は3～4年に1回程度の割合で発生している。

デルタの海岸部においては、南からの卓越風のため、南ないし南西からの波の来襲頻度が高い。波高1.25m以下、周期7秒以下の波が卓越するが、ストーム時には波高は4～5mに達する。また、海岸に沿って北ないし北東へ向かう強い沿岸流が存在し、

Fig. 2 Sketch map showing the Mahanadi delta system.

分岐チャンネルによってもたらされた碎屑物質を再動させている。潮位差は2～3mで、北へ向かって大きくなる傾向がある。潮汐作用の影響は分岐チャンネルの河口から30～40km上流にまで及ぶこともある。

マハナディ・デルタの地形

マハナディ・デルタには、河川や海の諸作用あるいはそれらの複合作用が働く種々の堆積環境が含まれ、それぞれ特徴的な微地形をつくっている（第3図）。これらの微地形の分布・配列に基づき、マハナディ・デルタの現在のデルタ面は、上流半部の沖積帯と下流半部の臨海漸移帯に分けることができる。

1. 沖積帯

デルタ上流半部の沖積帯は、主として河川作用によって形成された地帯で、基本的に分岐チャンネルシステムとチャンネル間の後背湿地から構成されている。分岐チャンネルシステムには、現在活動的なシステムのほか、放棄されたシステムも認定できる（第3図）。

(1) 活動的チャンネルシステム

マハナディ川は、デルタ頂部のカッタック西方で、2つの主チャンネルに分岐し、それらは流下とともにさらに分岐をくり返し、デルタ面上に活動的な分岐チャンネル網を発達させている。これらのチャンネル群は、北東から南西へ、ビルパ（Birupa）、マハナディ、

Fig. 3 Geomorphic features of the Mahanadi delta.

カツジョディー-デビ (Kathjodi-Debi), クアカイ (Kuakhai) の4つの分岐チャンネルシステムを形成している。

ビルパ・システム：この分岐チャンネルシステムは、ビルパ川とバダゲングティ (Badagenguti) 川の2大チャンネルから構成される。ビルパ・システムは、デルタ頂部付近でマハナディ川から分岐した後、北東方向へ流れ、最終的にブラマニ川に合流する。つまり、ビルパ・システムはマハナディ・デルタの分岐チャンネルシステムであると同時に、ブラマニ・デルタの形成にも参画している。

マハナディ・システム：マハナディ川本流はデルタ頂部から東へ流れ、チトロットパラ (Chitrotpala),

ヌナ (Nuna), パイカ (Paika) などのチャンネルを分岐させる。これらの分岐チャンネルは再び合流し、潮汐チャンネル的性格を持つチャンネル (マハナディ川本流) となってベンガル湾に注ぐ。マハナディ川は、海岸における強い沿岸流の作用および波浪作用による直線的な浜堤の形成のため、海岸付近で大きく北へ向かって屈曲する。ただし、現在は屈曲部に決壊が生じており、そこで直接海とつながっている。

カツジョディー-デビ・システム：このシステムは、マハナディ・デルタの分岐チャンネルシステムのうち、現在最も活動的なシステムである。カツジョディ川はマハナディ川から分岐した後、さらに分岐・合流をくり返し、ループ状の分岐チャンネル網を形成し

ている。主要なチャネルとして、サルア (Sarua)、デビ、ビルアカイ (Biluakhai)、カンダール (Kandal) などがある。そのうち、デビ川が本システム内の本流である。分岐チャネルは最終的にデビ川に合流し、1本のチャネルとなってベンガル湾に注ぐ。

クアカイ・システム：クアカイ川はカッタック付近においてカツジョディ川から分岐した後、プバネシュワール東方でクシュバドラ (Kushbhadra)、バルガビ (Bhargabi)、ダヤ (Daya) の3川に分岐してこのシステムを形づくる。他のシステムのチャネルが分岐・合流をくり返すのに対し、クアカイ・システムのチャネルは3川ともに単一の蛇行チャネルを形成している。クアカイ・システムの末端部はデルタ南西部に発達する幅広い海岸砂丘帯にさえぎられている。そのため、クシュバドラ川は東へ屈曲しつつ砂丘帯を横断してベンガル湾へ注ぐ。一方、バルガビ川はこの砂丘帯により西方へ屈曲し、砂丘帯の北縁部に沿って流れ、最終的にダヤ川とともにチリカ湖に注いでいる。

(2) 放棄チャネルシステム

現在活動的な分岐チャネルシステムのほか、デルタ面上には多くの放棄チャネルが認められる (第3図)。これらの放棄チャネルは、旧河道の痕跡をとどめているにすぎないものから、一応河川としての機能を保持し、まがりなりにも定常的に河水を流しているものまで、様々な活動度のものがみられる。

放棄チャネルはデルタ面上に一樣に認められるのではなく、あるまとまりをもって分布している (第3図)。つまり、放棄チャネルも過去には、現在活動的な分岐チャネルシステムと同様なチャネルシステムを形成していたことがわかる。このような放棄システムとして、スクバドラ (Sukhbhadra)、古カツジョディ (Old Kathjodi)、ブルダ (Burdha)、アラカ (Alaka)、ブラッチ (Prachi) などのシステムを認定することができる (第4図)。

スクバドラ・システム：現在のビルパ・システムとマハナディ・システムの間には多くの放棄チャネルの河道跡が残されている。これらの放棄チャネルは北東から南西方向へゆるやかに湾曲し、現在の海岸から10数 km 内陸で消滅する。チャネルのあるものは北へ向かって大きく屈曲し、ブラamani川を越えて現在のブラamani・デルタの領域内にまで、25km 以上にわたって追跡することができる。

古カツジョディ・システム：現在のカツジョディ川およびビルアカイ川の東側に沿い、ジャガツイン

プール (Jagatsinghpur) 付近で北へ屈曲する旧河道が残されている。その北への延長はマハナディ川に切られるため不明である。このチャネル跡は現在は完全に放棄されてしまっており、局地的な線状の凹地のつらなりがみられるにすぎない。

ブルダ・システム：現在のカツジョディ-デビ・システム内の1チャネルであるビルアカイ川の東方延長に一群の放棄チャネルが認められる。これらの放棄チャネルは、ほぼ完全に活動を停止しており、海岸から10km 前後内陸で消滅する。

アラカ・システム：アラカ川はジャガツインプール付近でビルアカイ川から分岐し、下流でさらにいくつかのチャネルを分岐させる。このアラカ・システムのチャネルは活動度が低く、中には完全に放棄されてしまっているものもある。アラカ川は一応河川としての機能を有していて、多少なりとも定常的に河水を流している。

ブラッチ・システム：ブラッチ・システムは、ブラッチ川およびパタルブハ (Patharbuha) 川の2つの主分岐チャネルからなり、デルタ頂部でマハナディ川から分岐して南東へ流れる。このシステムは、現在では洪水期を除いてほぼ放棄されてしまっており、広い旧河道のかかなりの部分は砂丘によっておおわれている。ただし、ブラッチ川の下流域では、定常的な流れが存在する。

(3) 後背湿地および集水チャネル

分岐チャネルにはさまれたデルタ面は、広大な後背湿地を形成している。後背湿地の中軸部には集水チャネルがあり (第3図)、後背湿地に溜まる雨水や分岐チャネルからのはんらん水を下流側へ流している。ただし、集水チャネルは碎屑物の運搬にはほとんど寄与しておらず、ごくわずかの量の細粒物質を流しているにすぎない。後背湿地の中心部では、集水チャネルによる排水作用もさほど効果的ではなく、停滞水域が生じがちで、沼沢地となっていることが多い。特に、臨海漸移帯に接する地域では、後述する旧浜堤や海岸砂丘帯に阻まれて多くの湖沼が形成されている。

2. 臨海漸移帯

デルタ面のうち、海岸に沿う幅10~20kmの弧状の地帯には、新旧の分岐チャネルのほか、海岸にほぼ平行に配列する旧浜堤や海岸砂丘、潮汐低地、マングローブ沼沢地など、海の諸作用に関連した微地形が良く発達しており、沖積帯とはかなり性格の異なるデルタ面を形成している (第3図)。また、海

岸に沿って砂州や沿岸州もみられる。

(1) 旧浜堤

旧浜堤は主に細粒砂からなり、低平な泥質デルタ面上に比高 2 m 程度までの線状の高まりをつくっている。旧浜堤は北東-南西方向に互いにほぼ平行に配列する。特に、デビ川最下流からマハナディ川最下流にかけての地域には、何列もの旧浜堤が集中して分布している。

(2) 潮汐低地およびマングローブ沼沢地

デルタの海岸に沿う地帯には、ほぼ全域にわたって潮汐低地や沼沢地がみられる。ただし、それらの多くは分岐チャネルの河口周辺や浜堤間の低地などに小規模な広がりをもっているにすぎない。デルタ北東部の、マハナディ川河口からプラマニ川河口にかけての地域には、比較的広い面積を占める潮汐低地およびマングローブ沼沢地がある。

(3) 海岸砂丘帯

デルタの海岸に沿っては、砂浜の背後に砂丘帯が形成されている。特に、デルタ南西部のチリカ湖東岸からコナルク (Konark) にかけての海岸沿いには、5 km 程度の幅をもつ広い砂丘帯が延長50km 以上にわたって発達している。この砂丘帯は15m 前後の比高をもち、分級の良い細粒砂から構成されている。砂丘砂は潮汐低地もしくは沼沢地成の泥質堆積物をおおっている。

(4) 砂州

ベンガル湾に注ぐ分岐チャネルの河口では、北へ向かう強い沿岸流の作用のため、堆積物の再動が著しい。その結果、各河口では北へ延びる砂州や沿岸州が発達し、チャネルを大きく北へ屈曲させている。マハナディ川河口に形成されているフキトラ (Hukitola) 砂州は延長20km 以上におよび、その内側を内湾化させ、潮汐低地やマングローブ沼沢地の発達を促している。そして、このような内湾の埋積がデルタ面の拡大に大きく寄与している。これらの砂州は著しい洪水の発生やサイクロンの来襲時にしばしば破壊され、海への開口部を生じる。フキトラ砂州は現在数カ所で開口している。

デルタの発展段階

マハナディ・デルタのデルタ面上には、現在活動的な分岐チャネルシステムのほか、非活動的あるいは放棄されたチャネルシステムが残されている。これらの旧チャネルの多くは、現在の海岸よりも内陸側で消滅している。また、旧チャネルのなかには、

現在活動的なチャネルが沿岸流の影響により北へ屈曲しているのと同様、末端近くで北への屈曲を示しているものもある。このような、旧チャネルの終端位置と屈曲パターン、チャネルの活動度、そしてデルタ面上に残された旧浜堤の位置などから、マハナディ・デルタの成長段階を区分することが可能である (Mahalik, 1991)。現在のところ、4つの段階が識別できている (第4図)。

(1) 第1期

マハナディ・デルタで現在確認できる最も古いチャネルシステムは古カツジョディ・システムである。このシステムは、より新期の河川作用によって覆いかくされているため、旧河道の一部が残されているにすぎない。古カツジョディ・システムに対応する旧浜堤は今のところ確認できていない。しかし、古カツジョディ・システムの旧河道がジャガツインプール付近で北へ屈曲すること、および Sambasiva Rao *et al.* (1978) がデルタ南西部のプーリー (Puri) の海岸から30km 余り内陸のダヤ川東岸に旧浜堤の存在を報告していることから、当時の海岸線は現在より30~40km 内陸側にあったことが推定される。

(2) 第2期

このステージを代表する分岐チャネルシステムとして、スクバドラおよびブルダの両放棄システムがあげられる。いずれのシステムにおいても、一群の旧河道は現在の海岸から10~10数 km 内陸で消滅している。スクバドラ・システムは、当初は大きく北へ屈曲して北東方向へ流れ、現在のプラマニ・デルタの領域内で海へ注いでいたが、その後東向きのチャネルが優勢化したことが旧河道の分布パターンから読み取れる。ブルダ・システムは古カツジョディ・システムから分岐して発達した。そのため、古カツジョディ・システムは放棄されるに至ったと考えられる。第2期の海岸の位置は、スクバドラおよびブルダの両システムを作る旧河道の消滅位置から判断して、現在よりも10数 km 内陸にあったとみなされる。エルサマ (Ersama) 付近には、この時期に形成されたと考えられる、やや保存の悪い旧浜堤がいくつか残されている。

(3) 第3期

非活動的チャネルシステムであるアラカ・システムおよびブラッチ・システムは第3期に形成されたシステムである。アラカ川はブルダ・システムから分岐して南へ流れ、下流域でさらに多くのチャネルを分岐させた。これらのチャネルは、末端近くでの

Fig. 4 Stages in the evolution of the Mahanadi delta.

北への屈曲をよく示している。

アラカ・システムの発達はブルダ・システムの活動を著しく低下させ、ついには完全に放棄させている。プラッチ川はデルタ頂部でマハナディ川本流から分岐し、2本の主チャネルからなる分岐システムを作った。なお、現在活動的なマハナディ・システムの領域内にも、第2期あるいは第3期に対応すると考えられる旧河道が存在する。マハナディ・システムの前身は第3期には既に形成されていたのであろう。この時期の海岸の位置は、パラディップ (Paradip) 北方からコナルクにかけての海岸内側の地帯に分布する一連の旧浜堤列によって示される。

(4) 第4期

第4期はマハナディ・デルタが現在の姿をとるに

至る最終ステージである。クアカイ川、デビ川、ビルパ川が出現し、それぞれに新しい活動的な分岐チャネルシステムを発達させている。第3期に活動的であったシステムのうち、マハナディ・システムは引き続き活動しているが、他のシステムは新たなシステムに活動の場を譲っている。すなわち、カツジョディ川から分岐したクアカイ川は、プラッチ川を横断して分岐チャネルシステムを作り、プラッチ・システムを放棄させている。同様に、デビ川の形成によるカツジョディ-デビ・システムの形成は、アラカ・システムの活動を著しく低下させてしまっている。

おわりに

小論では、インド東岸のマハナディ・デルタにつ

いて、デルタ面上の地形を中心に紹介し、あわせてデルタの発展段階を簡単にまとめた。マハナディ・デルタでは、河川作用に加えて、波浪作用および沿岸流の作用もデルタの形成に重要な役割を担っている。特に、分岐チャネルの河口付近での屈曲と砂州の延伸は、その内側に形成される内湾域の埋積を通じて、デルタの拡大に大きく寄与している。また、デルタの成長は、漸進的というよりはむしろ、新しい分岐チャネルシステムの発達のためごとに、段階的に促進されていったといえる。

マハナディ・デルタの発展段階に時間尺度を入れることは、現在のところほとんどできていない。コナルクには有名な太陽寺院があり、東ガンガー朝のナラシムハ・デーヴァ王によって、西暦1250～60年に当時の海岸に建てられたことが記録に残っている。この寺院は第3期のブラッチ・システムに関連して形成された臨海デルタ面上にあり、第3期のデルタ面の主要部は少なくとも約750年前には形成されていたとみなされる。また、太陽寺院は現在の海岸から約3 km 内陸にあり、発掘されるまでは砂丘に埋もれていた。これは、過去750年間ににおける海岸線の前進と幅広い海岸砂丘帯の形成を示している。マハナディ・デルタの地下からは、貝化石を含む試錐試料がいくつか得られている。これらの年代測定により、今後デルタの発展段階により細かな時間尺度を入れることが可能になるであろう。

文 献

- Bharali, B., Rath, S. and Sarma, R., 1991: A brief review of Mahanadi delta and the deltaic sediments in Mahanadi basin. In R. Vaidyanadhan, ed.: *Quaternary deltas in India*. Mem. Geol. Soc. India, No. 22, 31-49.
- Coleman, J. M., 1969: Brahmaputra river: channel processes and sedimentation. *Sedimentary Geol.*, 3, 129-239.
- Fisher, W. L., Brown, L. F. Jr., Scott, A. J., and McGowen, J. H., 1969: *Delta systems in the exploration of for oil and gas, a research colloquium*. Bur. Econ. Geol., Univ. Texas at Austin, 78p.
- Mahalik, N. K., 1984: Satellite imageries in geological mapping of Orissa and geomorphological study of Mahanadi-Brahmani-Baitarani compound delta. *Eastern Geograph. Soc., Research Bull.*, No. 22, 12p.
- Mahalik, N. K., 1991: Evolution of Mahanadi delta. *Eastern Geographer*, 1, 21-23.
- Mahalik, N. K. and Acharya, S., 1986: *Geology and geomorphology of Mahanadi delta*. Dept. Geol., Utkal Univ., 62p.
- Nageswara Rao, K. and Vaidyanadhan, R., 1978: Geomorphic features in the Krishna delta and its evolution. *Symp. Morphology and Evolution of Landforms*. Dept. Geol., Delhi Univ., 120-130.
- Sambasiva Rao, M., Nageswara Rao, K., and Vaidyanadhan, R., 1978: Morphology and evolution of Mahanadi and Brahmani-Baitarani deltas. *Symp. Morphology and Evolution of Landforms*. Dept. Geol., Delhi Univ., 241-249.
- Sambasiva Rao, M. and Vaidyanadhan, R., 1979: Morphology and evolution of Godavari delta, India. *Z. Geomorph. N. F.*, 23, 243-255.
- Vaidyanadhan, R., 1991: Status of Quaternary delta studies in India. In R. Vaidyanadhan, ed.: *Quaternary deltas in India*. Mem. Geol. Soc. India, No. 22, 1-11.
- Wright, L. D., 1978: River deltas. In R. A. Davis, Jr., ed.: *Coastal sedimentary environments*. Springer-Verlag, New York, 5-68.