潮汐作用と河川作用の相互作用によって形成された堆積構造 —長崎県対馬対州層群下部層のデルタ成堆積物の例—

中条武司*

Sedimentary structures produced by interaction of tidal and fluvial processes
in the Tertiary Taishu delta system,
Tsushima Islands, southwestern Japan

Takeshi Nakajo*

The distributary-channel deposits of the Tertiary Taishu delta system record the interaction of tidal and fluvial processes. Mud-draped cross-stratification and flaser to lenticular bedding are common in the distributary-channel deposits, indicating intermittent migration of bedforms governed by tidal processes. In spite of the clear evidences of tidal influences on distributary-channel sedimentation, paleocurrents of channel deposits are not multi- or bi-directional but are consistently unidirectional. The bundles of mud-draped foresets also do not show the neap-spring tidal cycles as represented by a regular change in the bundle thickness. In the distributary channels, tidal processes should have superimposed on fluvial processes. The combined effect of fluvial and ebb-tidal flows accelerated down-channel migration of bedform, whereas the effect of flood tide was probably set off by fluvial flows not to produce reversal currents within the channel. Fluctuations in fluvial discharge prevented the regular tidal cycles to be recorded in the channel deposits.

Key words: tidal process, fluvial process, distributary channel, delta, Taishu Group

はじめに

潮汐作用は河川の流入や波浪作用などと共に、浅海域での堆積作用において重要な要素の一つである。潮汐作用は、上げ潮・下げ潮や大潮・小潮といった規則的な周期を持っている点で、他の作用とは大きく異なっている。このような周期は、地層中に残された堆積構造にもよく反映される。上げ潮・下げ潮の周期は、ヘリンボーン構造やマッド・ドレイプを伴う斜層理、レンズ状～フレーザー状層理、2方向性の古流向をしめすリップル葉理や斜層

理などに反映される (Dalrymple, 1992; Reading and Collinson, 1996参照)。また、大潮・小潮の周期は、葉理や斜層理のフォアセットラミナの厚さの周期的な変化に反映される。特に大潮・小潮の周期を反映した堆積構造から、斜層理の形成にかかった期間や水理条件、過去の潮汐周期を求める研究などが数多くなされている (Visser, 1980; Homewood and Allen, 1981; Allen and Homewood, 1984; Yang and Nio, 1985; 中山・増田, 1988; Williams, 1989; Brown et al., 1990など)。

潮汐作用が堆積過程に大きく影響してくるような浅海域では、波浪作用や河川作用など、他の営力も潮汐作用と同時に働いていることが予想される。しかし、地質記録における浅海成堆積物については、堆積システムや堆積シーケンスとしては複数の作用が堆積過程に影響しているものでも、潮汐作用と

受付: 1998年3月2日 受理: 1998年5月12日

*大阪市立大学理学研究科地球学教室

*Department of Geosciences, Graduate School of Science,
Osaka City University, Sugimoto 3-3-138, Sumiyoshi-ku,
Osaka 558-8585, Japan

その他の作用はおの他の場所あるいは別の時期の堆積過程を示していると考えられている事が多い (Johnson, 1977; Leckie and Walker, 1982; Soegaard and Eriksson, 1985; Richards, 1986; Duke et al., 1991; Prave et al., 1996など). 潮汐作用とその他の作用が影響しあって形成した堆積物の例として, 中山・増田 (1988) や Yokokawa (1995) が潮汐作用と波浪 (ストーム) 作用の影響によって形成された堆積構造の例を, Smith (1987, 1988) や Bridge and Willis (1994) が潮汐作用と河川作用の影響によって形成された堆積物および堆積構造の例を報告しているに過ぎない.

長崎県対馬に分布する対州層群下部層は主にデルタ成堆積物から構成され, 河川作用・波浪作用・潮汐作用など複数の作用がその堆積過程に関係していたことが明らかにされている (Nakajo and Maejima, in press). このデルタ成堆積物中の分岐チャネル堆積物において, 潮汐作用と河川作用が複合することによって形成された堆積構造を認定することができた. 小論では, この堆積構造の特徴や形成過程, その周期性などについて報告する.

地質概説

長崎県対馬には, 第三系である対州層群が広く分布し, 中新世の火成岩類がこれに貫入している (第1図). 対州層群の層序については高橋 (1992) によりまとめられている. 対州層群はおもに泥岩および砂岩泥岩互層からなり, 一部に砂岩・礫岩・層灰岩を伴う. 対州層群は下部層・中部層・上部層に区分されており, それぞれは整合関係にある. 対州層群の下限および上限はともに海中に没しているため不明であるが, 露出している限り厚さは5400m以上ある. 対州層群は北東-南西方向の軸を持つ褶曲構造が発達しており, 多くの背斜・向斜を繰り返している. 対州層群からは海棲貝化石群集や浮遊性微化石の産出が報告されており (高橋・西田, 1975; 茨木, 1994; 中条・舟川, 1996), 主に海成層からなると考えられている (酒井, 1993). また堆積学的検討から, デルタ成堆積物をともなうことが知られている (岡田, 1970; 岡田・藤山, 1970; 古賀ほか, 1988; Nakajo and Maejima, in press). 対州層群の堆積した年代は, 浮遊性微化石から, 下部層

第1図 対馬の地質図 (高橋, 1992を簡略化) と調査位置.

は前期始新世（中条・舟川，1996），上部層は前期中新世（茨木，1994）と考えられている。

潮汐作用と河川作用の相互作用で形成された堆積構造

本研究の調査地域は，下島西部の厳原町久根浜付近の海岸沿いで，その層準は対州層群下部層下部にあたる（第1図）．この地域の対州層群は，堆積盆地・プロデルタ・河口州・下流分岐チャネル・上流分岐チャネル・チャネル間低湿地の6つの堆積相組み合わせから構成されるデルタ成堆積物からなる（Nakajo and Maejima, in press）．この対州層群下部層を形成したデルタは，慣性力の卓越した河川作用と潮汐作用の相互作用のために鳥趾状の形態を成していたこと，北方向へのデルタのプログラデーションが何回も起こっていたことが明らかにされている（Nakajo and Maejima, in press）．対州層群下部層を構成しているデルタ成堆積物のうち，潮汐作用と河川作用の相互作用によって形成されたと考えられる堆積構造は，主に下流分岐チャネル堆積物中に認められる．下流分岐チャネル堆積物は，基底侵食面を持つ厚層砂岩とその上位に重なる砂岩泥岩互層からなり，全体として上方薄層化・細粒化シーケンスを示すチャネル埋積体からなる（第2図）．このようなチャネル埋積体は，潮汐作用の影響を受けたチャネルおよびエスチュアリー堆積物であるとされている（Smith, 1987, 1988）．対州層群デルタの下流分岐チャネル堆積物の埋積過程については Nakajo and Maejima (1997) 及び Nakajo (1998) の報告議論を参照されたい。

下流分岐チャネル堆積物において潮汐作用と河川作用の相互作用から形成されたと考えられる堆積構造は，マッドドレイブを伴う斜層理とレンズ状～フレーザー状層理である．マッドドレイブを伴う斜層理は，下流分岐チャネル堆積物のうち，厚層砂岩部・砂岩泥岩互層部両方に認められるが，特に砂岩泥岩互層部に多く認められる．マッドドレイブは，斜層理のフォアセットラミナ上を覆い，特に斜層理の底置部によく発達する．まれにマッドドレイブを伴う斜層理のフォアセットラミナが，その前方側で砂岩泥岩の薄互層に移化するものが見られる（第3図）．潮汐流による斜層理に見られるようなダブルマッドドレイブ（Visser, 1980）やフォアセットラミナ上に斜層理と逆方向の古流向を示すリップル葉理などは認められず，斜層理の古流向も一方向卓越

型で，北向きの古流向が卓越する（第4図）．マッドドレイブを伴う斜層理のフォアセットラミナの厚さを測定すると，第5図のようになる．得られたフォアセットラミナの厚さの変化は，測定数が少ないせいもありほとんど周期性は見られないが，30枚前後での周期がわずかに見られなくもない（第5図a）．しかし，隣りあった個々のフォアセットラミナの厚さの変化を見てみると，段階的なフォアセットラミ

第2図 下流分岐チャネル堆積物の例。

第3図 マッドドレイプを伴う斜層理。斜層理のフォアセットがその前方側で砂岩泥岩の薄互層へと変化する。層準は第2図に示す。

第4図 下流分岐チャネル堆積物の古流向。矢印は平均の方向。n は測定数。A, B はそれぞれ第2図の柱状図 A, B に対応する。

ナ厚さの変化などは認められず、その変化にかなりばらつきがあるのわかる (第5図b)。

斜層理のフォアセットラミナ上にマッドドレイプを伴うことは、斜層理を堆積した流れが間欠的であり、斜層理を前進させる時期と停止させる時期が交互していたことを示している。このような流れは潮汐流の上げ潮・下げ潮の周期を考えるとわかりやすい。対州層群下部層を形成したデルタが北方向にプログレードしていた (Nakajo and Maejima, in

press) ことを考えると、この斜層理を形成した流れはおもに下げ潮流であったといえる。ただし、一般に瀬海域や内湾域の潮汐流は、上げ潮流と下げ潮流ではその流路が異なり、それぞれの流路ごとにどちらかの流れが卓越することが多いが (Boothroyd, 1985; Dalrymple, 1992参照)、完全に一方向流となることはほとんどなく、流路内には卓越流と従属流が存在することが普通である (Boothroyd, 1985)。つまりマッドドレイプを伴う斜層理を形成した流れが引き潮流が卓越していたにしても、逆方向を示す斜層理やリップル葉理が全く存在しないのは不自然である。しかし、この堆積物はデルタの分岐チャネル堆積物中に存在することから、潮汐作用とともに常に河川流の影響下にもあったと考えられる。その結果、チャネル内の流れは、下げ潮時には河川流との複合によりその流れが加速され、上げ潮時には河川流と相殺しあって陸側に向かう流れが形成されず、停水域が形成されるにとどまったと考えられる。よって、下げ潮流の古流向のみを持った、マッドドレイプを伴う斜層理が形成されたのであろう。

潮汐流から形成された斜層理のフォアセットラミナの厚さの変化が、大潮・小潮のサイクルを示すことはよく知られている (Visser, 1980; Homewood and Allen, 1981; Allen and Homewood, 1984; Yang and Nio, 1985; Richards, 1986; 中山・増田, 1988など)。今回の得られた斜層理のフォアセットラミナの厚さの変化は、わずかながら30枚前後での周期が見られることから、大潮・小潮の潮汐周期を表しているのかもしれない。しかし、基本的には厚さの変化に周期性はほとんど見られず、隣り合ったフォアセットラミナとの厚さの変化にかなりのばらつきが見られることは、この斜層理が潮汐流のみで形

斜層理A

斜層理B

第5図 a. マッドドレイプを伴う斜層理のフォアセットラミナの厚さの変化. b. 隣り合ったフォアセットラミナとの厚さの差. それぞれの斜層理の層準は第2図に示す.

成されたのではなく、他の要素がからんでいたことを示唆している。斜層理の前進の割合、つまりフォアセットラミナの厚さの変化は、流速の変化だけでなく碎屑物の供給量の変化などもその原因に考えられるが、この斜層理を形成した流れの場合、前述の

ように河川流の影響が大きいと考えられる。つまりこの斜層理の場合、河川作用の影響のため斜層理のフォアセットラミナに記録されるべき潮汐周期はかなりの割合で消されてしまったとみなされる。

レンズ状～フレーザー状層理は、下流分岐チャネ

第6図 レンズ状層理。層準は第2図に示す。

ル堆積物のうち、砂岩泥岩互層部に見られる（第6図）。内部堆積構造は大半がカレントリップル葉理からなる。古流向は斜層理と同様に、北向きの一方向卓越型である（第4図）。このレンズ状～フレージャー状層理も、砂を堆積した流れと泥を堆積した停水期が交互におとずれる、間欠的な流れの状態を示している（Reineck and Wunderlich, 1968）。ここでみられるレンズ状～フレージャー状層理は、一方向性の古流向を示すものなので、マッドドレイブを伴う斜層理と同様に、潮汐作用の上げ潮・下げ潮の周期と河川作用が複合して堆積したと考えられる。上げ潮流・下げ潮流と河川流の複合によるチャンネル内の流れの加速期・停水期の繰り返しが、一方向の古流向を持つレンズ状～フレージャー状層理を形成したのであろう。

おわりに

我々が浅海成堆積物などを見たときに、2方向性の古流向がないからとか、斜層理のフォアセットラミナの厚さの変化に周期性がないからなどの理由で、堆積過程に潮汐作用が影響してないとするのは、誤った解釈を導く可能性がある。今回示した例のように、潮汐作用と他の作用が複合することにより、周期性や逆向きの流れを示す構造が地層から消されている可能性は十分に考えられる。それと同様に、潮汐作用に特徴的な堆積構造とされているヘリンボーン構造やマッドドレイブを伴う斜層理、フレージャー状層理などは、現世の河川成堆積物からも報告されており（Alam et al., 1985; Bhattacharya, 1997）、上記のような堆積構造があったからといって、一義的に潮汐作用を考えるのは非常に危険であ

る。これらの堆積相を正しく理解するために、地層の堆積過程や総合的な堆積システム、堆積シーケンスを十分に把握する必要があるだろう。

デルタ域や浅海域の地層に限らず、堆積過程において複数の作用が同時に作用することが、その堆積システムや堆積シーケンスの発達に大きな影響を及ぼすことは十分考えられる。実際、今回研究で扱った対州層群下部層を形成したデルタについては、河川作用と潮汐作用の相互作用が、デルタの形状を強く支配していた（Nakajo and Maejima, in press）。本報告の様に、露頭で観察された堆積構造から複数の作用を読み取ることができれば、堆積システムや堆積シーケンスの形成・発達過程についての理解がさらに深まるであろう。

謝 辞

大阪市立大学理学研究科地球学教室の前島 渉助教授には、粗稿を校閲いただいた。同教室の劉 建波博士（現北京大学）には堆積物の周期性について議論していただいた。以上の方々に深く感謝いたします。

文 献

- Alam, M. M., Crook, A. W. and Taylor, G., 1985, Fluvial herring-bone cross-stratification in a modern tributary mouth bar, Coonamble, New South Wales, Australia. *Sedimentology*, 32, 235-244.
- Allen, P. A. and Homewood, P., 1984, Evolution and mechanics of a Miocene tidal sandwave. *Sedimentology*, 31, 63-81.
- Bhattacharya, A., 1997, On the origin of non-tidal flaser bedding in point bar deposits of the river Ajay, Bihar and West Bengal, NE India. *Sedimentology*, 44, 973-975.
- Boothroyd, J. C., 1985, Tidal inlets and tidal deltas. In Davis, R. A., Jr., ed., *Coastal Sedimentary Environments*. 2nd ed., Springer-Verlag, 445-532.
- Bridge, J. S. and Willis, B. J., 1994, Marine transgressions and regressions recorded in Middle Devonian shore-zone deposits of the Catskill clastic wedge. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 106, 1440-1458.
- Brown, M. A., Archer, A. W. and Kvale, E. P.,

- 1990, Neap-spring cyclicity in laminated carbonate channel-fill deposits and its implication: Salem Limestone (Mississippian), south-central Indiana, U. S. A.. *Jour. Sediment. Petrol.*, **60**, 152-159.
- 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. Can., 195-218.
- Duke, W. L., Fawcett, P. J. and Brusse, W. C., 1991, Prograding shoreline deposits in the Lower Silurian Medina Group, Ontario and New York: storm- and tide-influenced sedimentation in a shallow epicontinental sea, and the origin of enigmatic shore-normal channels encapsulated by open shallow-marine deposits. In Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W., and Thorne, J. A., eds., *Shelf Sand and Sandstone Bodies: Geometry, Facies and Sequences Stratigraphy*. Spec. Pub. Int. Assoc. Sediment., no. 14, 339-375.
- Homewood, P. and Allen, P. A., 1981, Wave-, tide-, and current-controlled sandbodies of Miocene molasse, western Switzerland. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **65**, 2534-2545.
- 茨木雅子, 1994, 浮遊性有孔虫群から見た九州西北部第三系の年代と古環境. 月刊地球, **16**, 150-153.
- 古賀和英・平 朝彦・芦 寿一郎・倉本真一・藤岡換太郎, 1988, デルタフロントの大崩壊—対馬対州層群の例—. 月刊地球, **10**, 516-522.
- Johnson, H. D., 1977, Shallow marine sand bar sequence: an example from the late Precambrian of North Norway. *Sedimentology*, **24**, 245-270.
- Leckie, D. A. and Walker, R. G., 1982, Storm- and tide-dominated shorelines in Cretaceous Moosebar-lower Gates interval—outcrop equivalents of deep basin gas trap in western Canada. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **66**, 138-157.
- Nakajo, T., 1998 Tidal influences on distributary-channel sedimentation of the Tertiary delta in the Taishu Group, Tsushima Islands, southwestern Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ.*, **41**, 37-46.
- 中条武司・舟川 哲, 1996, 長崎県対馬の対州層群下部層から産出した始新世放散虫化石. 地質雑, **102**, 751-754.
- Nakajo, T. and Maejima, W., 1997, Distributary channel sedimentation in the Tertiary delta, Tsushima Islands, southwestern Japan. *Vistas in Geol. Res., Utsal Univ.*, **2**, 15-28.
- Nakajo, T. and Maejima, W., in press, Morphodynamic development and facies organization of the Tertiary delta system in the Taishu Group, Tsushima Islands, southwestern Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **104**,
- 中山尚美・増田富士雄, 1988, 潮汐堆積物中にみられるストームイベント, 月刊地球, **10**, 488-493.
- 岡田博有, 1970, 対馬南部, 小茂田付近における対州層群最下部の堆積型式. 鹿児島大学理科報告, **19**, 67-74.
- 岡田博有・藤山家徳, 1970, 対馬中部, 塩浜付近の対州層群中のサイクルと堆積, *Jour. Sed. Soc. Japan*, **3**, 9-18.
- Prave, A. R., Duke, W. L. and Slattery, W., 1996, A depositional model for storm- and tide-influenced prograding siliciclastic shoreline from the Middle Devonian of the central Appalachian foreland basin, USA. *Sedimentology*, **43**, 611-629.
- Reading, H. G. and Collinson, J. D., 1996, Clastic coast. In Reading, H. G., ed., *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. 3rd ed., Blackwell Sci., 154-231.
- Reineck, H. E. and Wunderlich, F., 1968, Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology*, **11**, 99-104.
- Richards, M. T., 1986, Tidal bed form migration in shallow marine environments: evidence from the Lower Triassic, western Alps, France. In Knight, R. J. and McLean, J. R., eds., *Shelf Sands and Sandstones*, Can. Soc. Petrol. Geol., Mem. 11, 257-276.
- 酒井治孝, 1993, 北部九州の第三紀堆積盆地のテクトニクスと堆積作用. 地質学論集, no. 42, 183-201.
- Smith, D. G., 1987, Meandering river point bar

- lithofacies models: modern and ancient examples compared. In Ethridge, F. G., Flores, R. M. and Harvey, M. D., eds., *Recent Development in Fluvial Sedimentology*. Spec. Pub. Soc. Econ. Paleont. Miner., no. 39, 83-91.
- Smith, D. G., 1988, Modern point bar deposits analogous to the Athabasca Oil Sands, Alberta, Canada. In de Boer, P. L., van Gelder, A. and Nio, S. D., eds., *Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies*, D. Reidel Publishing Co., 417-432.
- Soegaard, K. and Eriksson, K. A., 1985, Evidence of tide, storm, and wave interaction on a Precambrian siliciclastic shelf: the 1,700 m. y. Ortega Group, New Mexico. *Jour. Sediment. Petrol.*, **55**, 672-684.
- 高橋 清, 1992, 対馬地域. 日本の地質「九州地方」編集委員会編, 日本の地質 9「九州地方」, 120-123, 共立出版.
- 高橋 清・西田民雄, 1975, 対馬上県地域の対州層群下部層の軟体動物化石について. 長崎大学教養部紀要 (自然科学), **15**, 15-20.
- Visser, M. J., 1980, Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note. *Geology*, **8**, 543-546.
- Williams, G. E., 1989, Late Precambrian tidal rhythmites in South Australia and the history of the Earth's rotation. *Jour. Geol. Soc., London*, **146**, 97-111.
- Yang, C. and Nio, S., 1985, The estimation of paleohydrodynamic processes from subtidal deposits using time series analysis methods. *Sedimentology*, **32**, 41-57.
- Yokokawa, M., 1995, Combined-flow ripples: genetic experiments and applications for geologic records. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D., Earth Planet. Sci.*, vol. XXIX, 1-38.

潮汐作用と河川作用の相互作用によって形成された堆積構造 —長崎県対馬対州層群下部層のデルタ成堆積物の例—

中条 武司, 1998, 堆積学研究, No. 48, 13—20

Nakajo, T., 1998: Sedimentary structures produced by interaction of tidal and fluvial processes in the Tertiary Taishu delta system, Tsushima Islands, southwestern Japan. *Jour. Sed. Soc. Japan*, No. 48, 13—20.

長崎県対馬に分布する対州層群下部層のデルタ成堆積物中の分岐チャネル堆積物には, 潮汐作用と河川作用の相互作用によって形成された堆積構造が認められる. それはマッドドレイブを伴う斜層理とフレーザー～レンズ状層理で, とともに潮汐流による間欠的な流れからの堆積を示している. しかし, 潮汐堆積物に特徴的である2方向性の古流向やフォアセットラミナの厚さに周期的な変化はほとんど認められない. これは分岐チャネル内において, 潮汐流の周期性が河川作用によって消されてしまったためであると考えられる.