

びわ湖における河口 Delta の発達過程について (I)

——藤の木川河口 Delta の変形について——

金成 誠一*・中川 鮮*・山本 淳之**
(順不同)

THE STUDY ON THE DELTAIC PROCESSES OF THE RIVER MOUTH IN LAKE BIWA (I)

——On the deformation of the Fujinoki river delta——

By *Seiichi KANARI, Akira NAKAGAWA*
and *Atsuyuki YAMAMOTO*

Synopsis

The paper deals with the problem of dynamic processes of river mouth deltas in Lake Biwa. The delta of Fujinoki river mouth, which has a small dimension and deforms remarkably, was chosen as the study area.

Observations of daily change were carried out through three methods: aerial photography with balloon, daily photography by the Automatic Camera with Timer System, and level survey. Samples of deltaic sediments were analyzed by sieves for granulometry and the hydraulic observations related to the sedimentation were undertaken principally as to water velocity and river runoff around the river mouth.

As a result, on the development and modifications of deltaic pattern in the Fujinoki river mouth, the major characteristics are summarized:

The apparent shapes of delta subjected to the lake water level, change daily and seasonally corresponding to the river runoff; that is, typically arcuate shape in early summer, meager or submerged in summer, extending and deviating to the left in autumn, most enlarged and left-deviated in winter, and then contracting.

The net developments of the delta are estimated by three methods; the first, from photographs and outline maps, by extracting influences of the water level change; the second, from contour maps by level survey; the third, from volumetric computations of sediment discharge due to catchment of traction load on the river bed.

Further, granulometric characteristics of deltaic sediments subjected to the past and present hydraulic conditions, are clarified and classified on the Sorting-Median diagrams.

1. 緒 言

湖沼は、流入河川流域から供給される sediment の最終的な堆積域であり、河口 delta は、いわば流域回路網の out put と考えられる。特に発達途上にある delta の内部構造は過去の流域生産過程をある程度記憶しており、また delta ならびにその周辺部の堆積地形は、周辺水域の水理条件を反映した結果であることは良く知られている。こうして形成された堆積地形は地理学的に (1) lobate 型, (2) arcuate 型, (3) cusplate 型の

* 京都大学防災研究所 ** 大阪電気通信大学

三つの型に分類される。その各々の成因を供給土砂の量ならびに性質と湖水の諸営力の組合わせによって定性的に説明しようというのが従来の地理学または地形学の多くの text に見られる delta 形成の標準的な取扱いであった。もち論、このような観点は、delta 地形をいわゆる Gilbert 型 delta (上記 (2) の分類に属する) のみとしていた一時代前の認識に比べ、はるかに進んだものと考えられる。しかし、いわゆる「営力」を水理学的な量として表現し、三つの型の成因を定量的に論じ分けようという試みは、不完全ながらやっと最近になって見られるようになった。

そのひとつの現われが、C. Bates の Rational Theory of Delta Formation (1953) である。Bates は流入水と basin water の間の密度差を jet flow theory と結びつけ、流入水の flow pattern を三つに分類した。この flow patterns に応じて、各種の delta の型が決まることを、主として Mississippi delta の例を用いて説明を試みた。この理論には定量的という面でおおむね今後検討の余地を残しているとはいえ、delta 形成理論の定量化への一方向を示したものと言えよう。

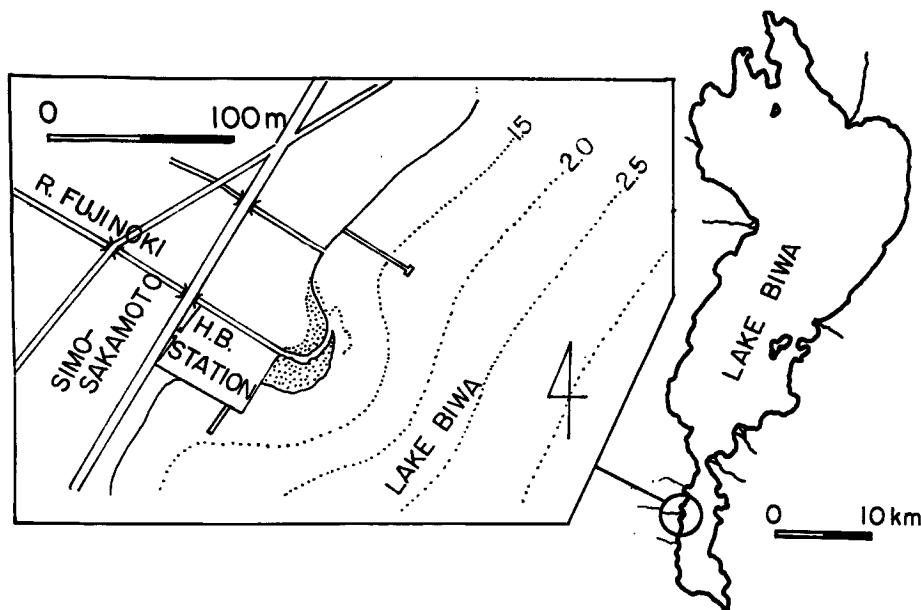


Fig. 1 Delta region of the Fujinoki river and the location of the study area in Lake Biwa.

著者らは、昭和 46 年度初頭より、びわ湖へ流入する河川の河口 delta の分類を地形図 (1 万分の 1) と現地調査とによって試みようとしたが、地形図における delta 形状と現地の形状との間に著しい差異があることを見出し、結局静的な見地での分類はむしろ危険であり、動的な変形をも考慮した分類を行なう必要があるとの結論に達した。しかしながら、現存する delta の静的な分類は従来から多くの地形学者によって行なわれているが、変形の過程をも考慮した分類の手法は未だ確立されていない。そこで、著者らはひとつの test case として、観測のし易い小河川である藤の木川をえらび、その河口 delta (Fig. 1) の変形の過程の追跡を試みた。この河川は約 4 km² の流域面積を有し、平常 70 l/sec 程度の流量を維持し、その河口部はびわ湖南湖の下阪本湖岸に流出している。特にこのような調査では、河口微地形の形状観測の手法を確立する必要があるので、河口部に格子状の標定点を多数設けて、水準測量と気球による空中さつ影装置、ならびに新たに開発した定時自動さつ影装置 (ACTS) の併用により河口の微地形変化の過程を追跡した。また、delta 上ならびに周辺水域の採砂を行ない、その粒度特性についても調べた。上記二点が今回の予備調査の主眼であったが、周辺の水理観測も若干行なった。

2. 河口 delta の形状変化

河口 delta の発達過程の追跡において、すくなくとも湖面上に露出された delta の形状観測は極めて重要な位置を占める。特に河道遷移の時期、波浪による変形過程等を知るには連続的な形状観察が必要であるが、連続性という点において時間と労力の両面での制約はまぬがれない。幸い、藤の木川 delta の右岸基部に京都大学大津臨湖実験所が位置しており、delta のほぼ全域が実験所屋上から俯瞰しうる点に着目し、3階屋上に定時自動さつ影装置*を設置した。本装置は Fig. 2 のブロック・ダイアグラムに示すように、毎日定時刻に自動巻上げ式カメラのシャッターを動作し、したがって、ほぼ一定の俯角を保ったまま、不動点 B_1 を起点とする 10 m 間隔の格子状標定点を含む delta の斜写真をほぼ一定の時間かん隔でフィルムに収めることができる。本装置は昭和 46 年 10 月 13 日に始動し、現在もなお delta の変形過程のさつ影を正常に実行しつづけている。さらに、さつ影された斜写真から、写真上の標定点に基づく水位面上の斜交座標により、delta 汀線の平面形状を読みとり図化された。

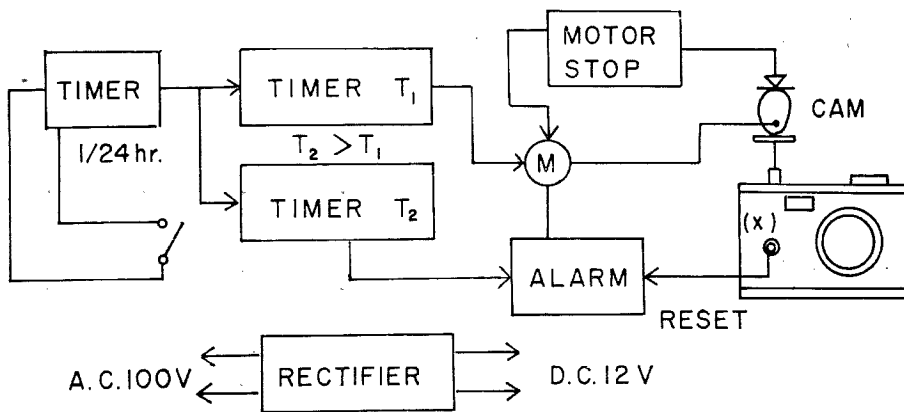


Fig. 2 Blockdiagram of the Automatic Camera with Timer System (ACTS), recording daily variation of the shape of the delta.

一方、ひとつの試みとして気象観測用気球 (He ガス 4 m^3) に無線遠隔操作式小型カメラをとりつけ (Photo. 1)、ほぼ鉛直上方 (係留高度約 80 m) からの delta の空中写真をさつ影した。地上風速約 3 m/sec 以内で良好な結果が得られている (後述)。

以上の写真さつ影はいずれもステレオ方式ではないので、比高に関する情報が得られず、しかも高精度が望めないで、適宜、水準測量ならびに形状測量を実施した。これによって写真からは得られない delta 周辺の bottom topography の変化もある程度とらえることができた (Fig. 4, Fig. 5)。

以上のような方法によって集積された資料から

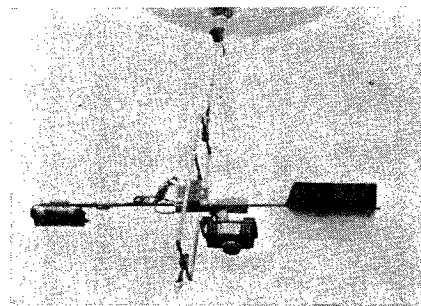
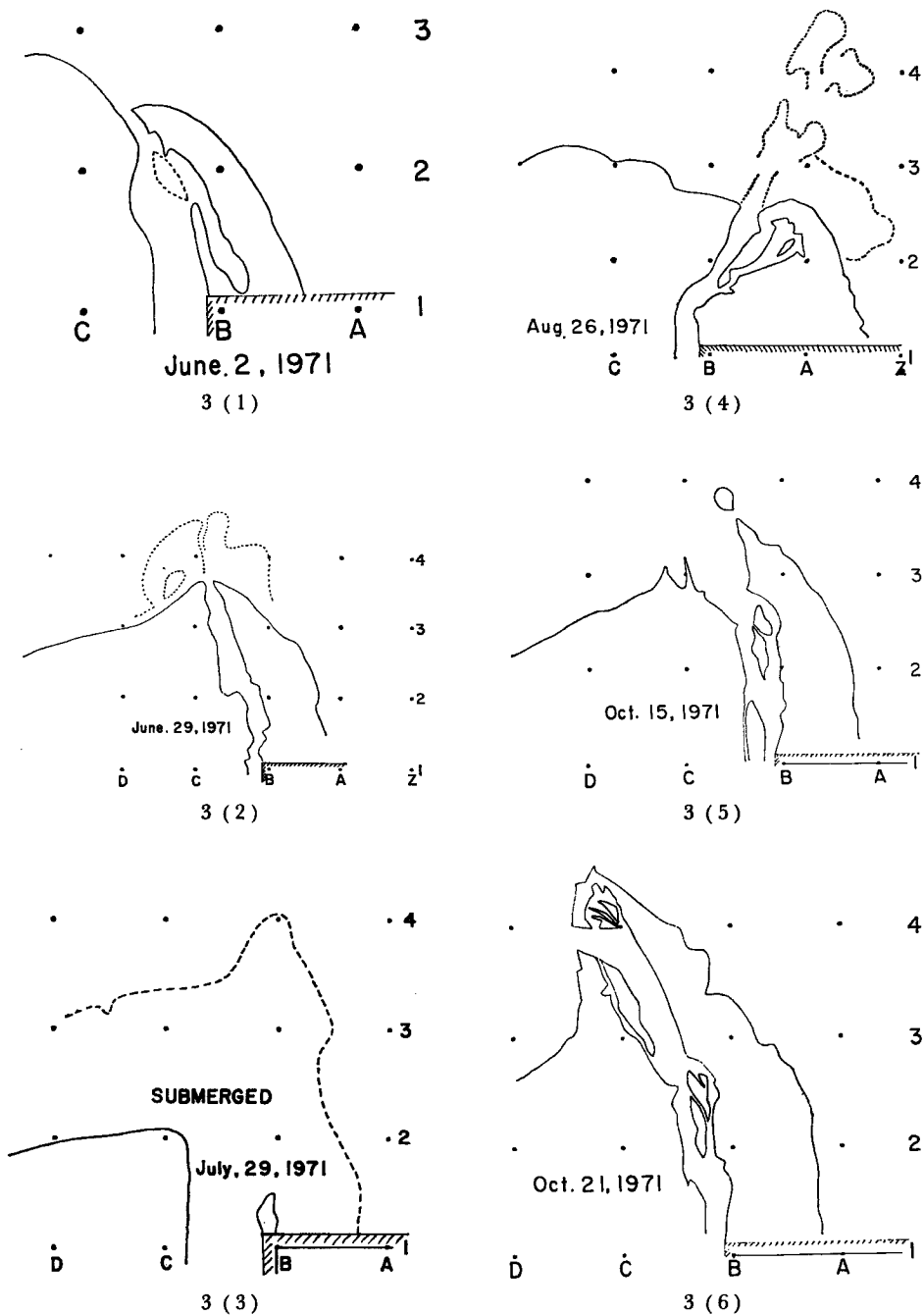
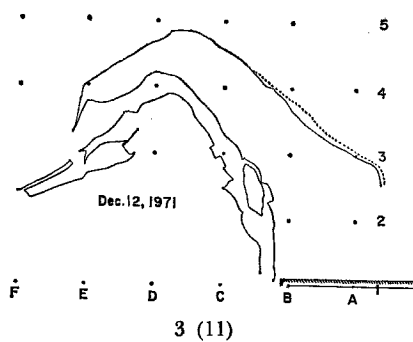
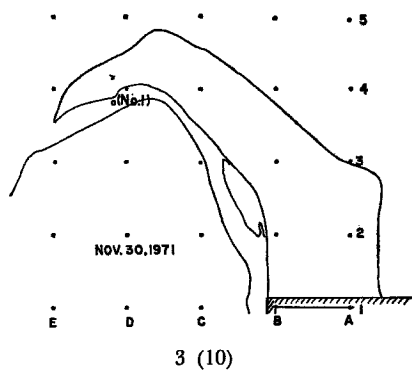
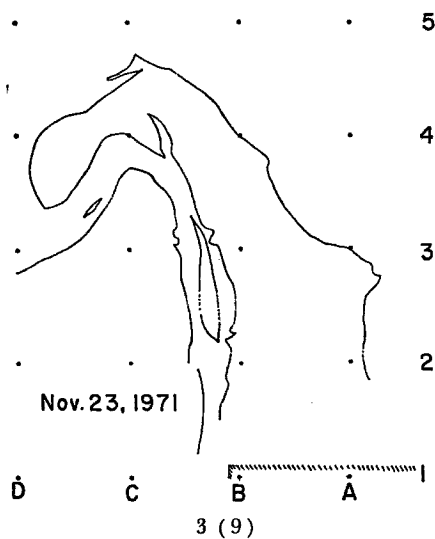
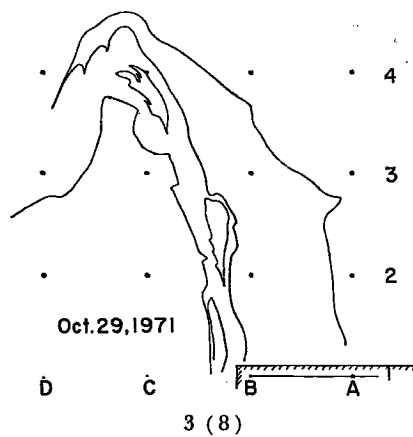
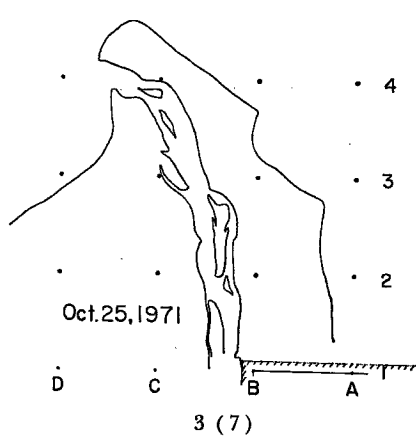


Photo. 1 View of the aerial photograph camera with the remote-shutter system, hung down by a balloon.

* Fig. 2 に示した定時自動さつ影装置は大阪電気通信大学助手奥村康昭氏により考案作製されたものである。

delta の形状変化を昭和 46 年 4 月から、ほぼ一年間にわたり追跡した。Fig. 3 (1)~(17) は、写真さつ影および測量時の汀線によって縁どられた delta 形状を図化したものである。この一連の形状変化図には、湖水位の変動に伴う見掛けの形状変化が含まれていることに注意しなければならない。





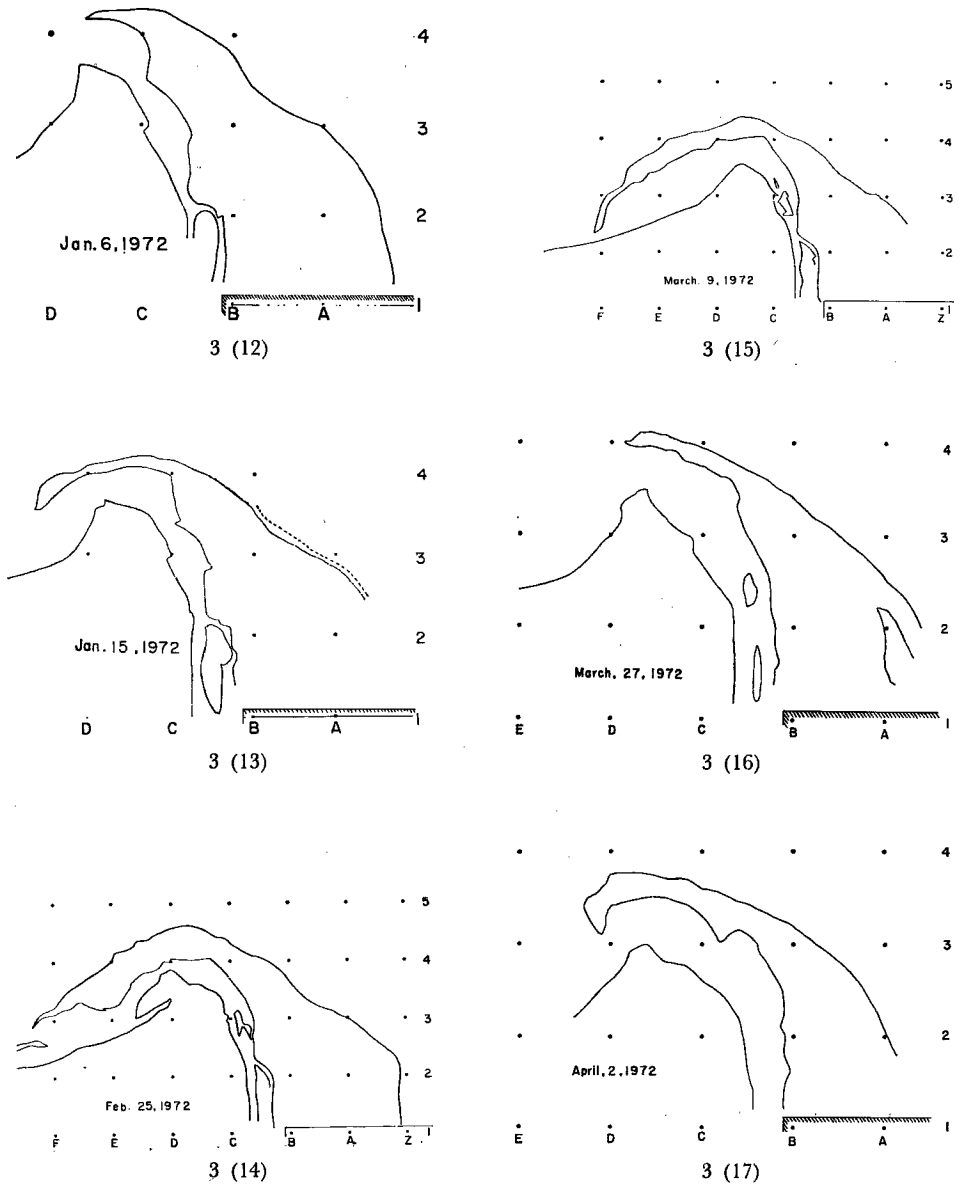
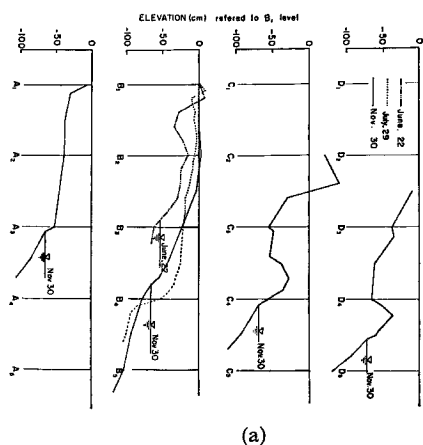


Fig. 3 Progressive development of the Fujinoki delta.

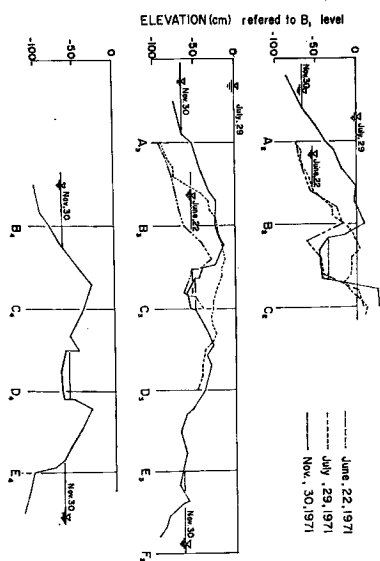
(1) and (2), from aerial photograph by a balloon; (3) and (10), by levelling; and the others by ACTS.

Fig. 3 (1), (2) は、気球による空中写真から図化されたものであるが、両者には27日間の開きがあり、この間に delta 形状は見掛け上大きく変化している。ところが、Fig. 19 によれば、この間に湖水位が約 30cm 低下しており、Fig. 4 の縦・横断面図を参考にすればこの見掛けの形状変化は湖水位の低下でほぼ説明できる。ただし、水面下の部分については、Fig. 3 (2) の破線から見られるように幾分成長がうかがえる。

Fig. 3 (3) は水準測量によるもので、70 cm の水位上昇によりほぼ(2)の形状を保って水没している。

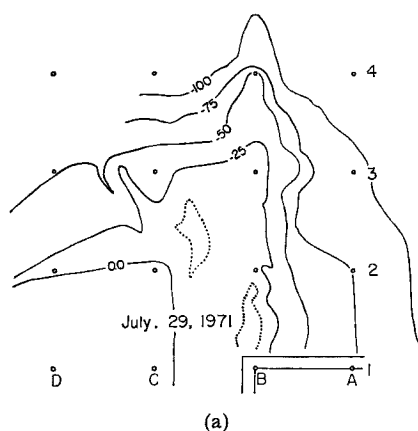


(a)

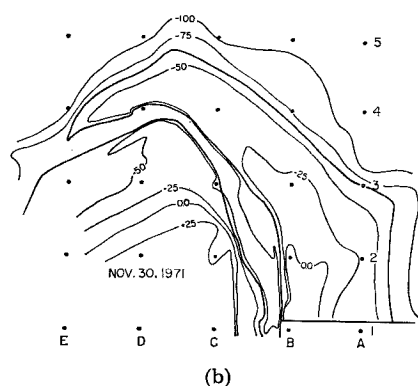


(b)

Fig. 4 Change of the profiles across the Fujinoki delta by levelling. (a) the longitudinal sections, (b) transverse sections.



(a)



(b)

Fig. 5 Contour map of the delta region of the Fujinoki river by levelling, (a) surveyed on July 29, 1971, (b) on Nov. 30, 1971.

Fig. 3 の (4) 以後は、測量による (10) を除いて、すべて斜写真の中から変形の目立ったものを選んで図化したものである。(4) では、点線で示すような濁水の流出が見られ、その流軸は B-line から 30 度右偏している。しかしこの一連の記録から観察されることは、藤の木川の河口附近の流軸がほぼ左岸側へ偏向することであり、河口部 delta の活動的な性格を明示している。特に、雨量の少ない冬期に右岸先端部が次第に左方へ屈曲し成長する傾向は、現地観察および写真の記録からみて波浪の影響によるものと思われる。このような成長の maximum は (15) に見られる。

3. 堆積物の粒度特性

河川上流部から供給される堆積物粒子は、浮遊または掃流の形式で河口部へ運搬され湖内へと流入し湖底に堆積するに至る。河川と湖との接点をなす河口部では、その水理条件に応じて流送粒子の顕著な堆積が起こるが、この堆積は一方向的に進行する訳ではなく、河水や湖水による再侵食を受けて絶えず調整される。この意味で、河口 delta は陸源堆積物の倉庫の役割を演じているといえよう。ゆえに河口 delta の形成・変形過程の研究においては、その構成主体である堆積物の特性を知ることが極めて重要であり、殊に力学過程に注目する場合、粒度の調査には十分な綿密さが必要とされる。河口部の堆積過程の研究はまた、湖心部への堆積物の輸送過程、粒径の空間的配分、湖底堆積層の形成等の問題に対しても良い足掛かりを与えることになる。ここでは、藤の木川 delta の堆積物を中心に粒度分析結果について述べる。また、粒度分布の統計量として Inman の表示を用いる。

Fig. 6 は昭和 46 年 6 月 29 日の藤の木川水中 delta 表層堆積物の粒度分布を柱状図で平面図上に示したも

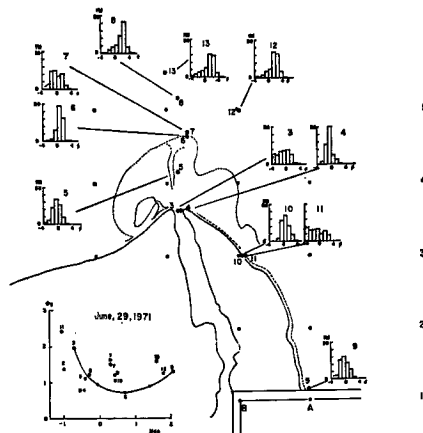


Fig. 6 Size distributions and Sorting-Median diagram of the superficial sediments over the underwater delta in the Fujinoki river mouth.

のである。河口中心 (測点 No. 3) から流軸に沿って No. 5, No. 6 (頂置層先端) と進むにつれ最頻径が細粒側へ移動し、かつ淘汰が急速に進んでゆくのがわかる。ついで、前置層斜面の裾 (No. 7) は異常に粒度が粗く淘汰も悪いが、その沖側の底置層 (No. 8) では一層細粒化し fine sand が主体になっている。しかし、更に沖 No. 13 ではもはやこの傾向は見られない。No. 12 と No. 13 は位置の違いに拘らず非常に似た分布をもつのは興味深い。湖面の波が delta 堆積物の粒度を再構成する様子は No. 10 (汀線上) と No. 11 (汀線斜面の裾) の差に明らかである。両者の差は No. 6 と No. 7 との差に類似している。流軸方向の流速および粒度の変化を中央径 Md_ϕ と淘汰度 σ_ϕ を用いて示したのが Fig. 7 であるが、歪度 α_ϕ 、尖鋭度 β_ϕ についても同様な傾向がみられる。Fig. 6 (左下図) によれば、流軸に沿っては頂置層の最先端 (No. 6) において $\sigma_\phi = 0.72$ で淘汰は最良となり、 $Md_\phi = 0.67$ (0.628 mm) である。この先端で σ_ϕ が極小値をとること、ならびに前置層の裾で急に粗粒化し σ_ϕ も大となることは、藤の木川のみならず鶴川水中 delta においても確認された (Fig. 8)。

露出した河口 delta の表層堆積物を昭和 47 年 2 月 25 日に採取した。この時期は、河川流量が少なく、波の影響を強く受けて変形も最も著しく、また湖水位も年間の最低に近いので、delta の露出部分が最も拡大している。採取地点は、Fig. 9 (a) に示すように、delta 右岸基部の横断 No. 1~No. 8、右岸砂洲に沿った縦断 No. 2~No. 17 および砂洲屈曲部附近の横断 No. 18~No. 27 であり、測線ごとに粒度分布の統計量を一

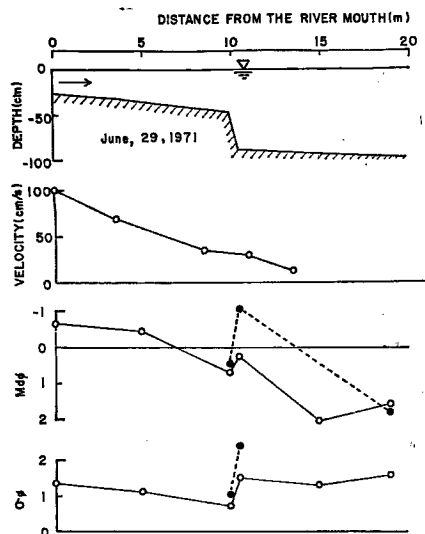


Fig. 7 Longitudinal profiles of water depth, median size of grains, sorting measure and water velocity in the Fujinoki river mouth.

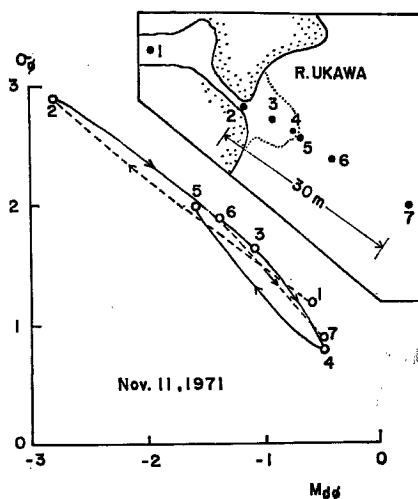


Fig. 8 Sorting-Median diagram for the sediments on the delta front in the river Ukawa.

括して Fig. 9 (b), (c) に示す。基部横断では No. 1 と湖岸汀線上で波の影響を受けた No. 8 の両者のみ中央径が 1 mm 以上の粗粒であるが、他はすべて中央径 0.5 mm 程度である。淘汰は No. 1 で悪く、湖岸側 (No. 6 ~ No. 8) で非常に良い。平均径 M_d と σ_s の値が測線の中間位置で変動しているのは、delta の成長や水位昇降に伴う水流や波の影響の推移を反映しているものと思われる。粒度分布の両端附近の特性を表わす 2 次歪度 $\alpha_{2\phi}$ や β_ϕ の変動についても同様である。屈曲部横断線では、側方侵食を受けている川岸附近の No. 21, No. 14, No. 24 で中央径がやや粗 (1 mm 前後)、波打際 No. 26 は更に粗 (2.2 mm)、礫による armour coat が形成された水底にほど近い水深 10 cm の No. 27 では中央径 16 mm となる。delta 左岸の No. 18, No. 19 は、 M_d , M_s いずれも 0 ~ 1 で淘汰もよく、後述される掃流砂と粒度特性が似ていることより、河道遷移に伴って掃流砂が殆んどそのまま取残されたものと推察される。砂洲のほぼ中央を貫く縦断線については Fig. 9 (c) に示される。年間の多雨期を除きほぼ不変と考えられる delta 基部の No. 2, No. 9, No. 10 および、短時間内にも変化する砂洲最先端 No. 17 は他に比して平均径が細かく 0.4 ~ 0.6 mm で淘汰も割に良いのに反し、中間の No. 11 ~ No. 16 は平均径 1 mm 程度で淘汰も概して良くない。各地点の位置的特徴と粒度特性との関係をより明瞭に示すと思われるのは Fig. 10 である。Fig. 10 (a) で M_d - σ_s ダイアグラムに描かれた領

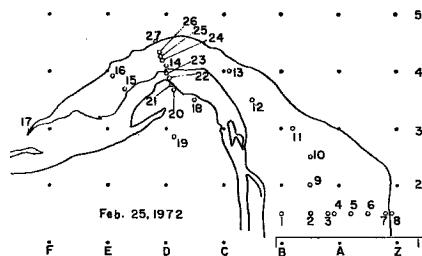


Fig. 9 (a)

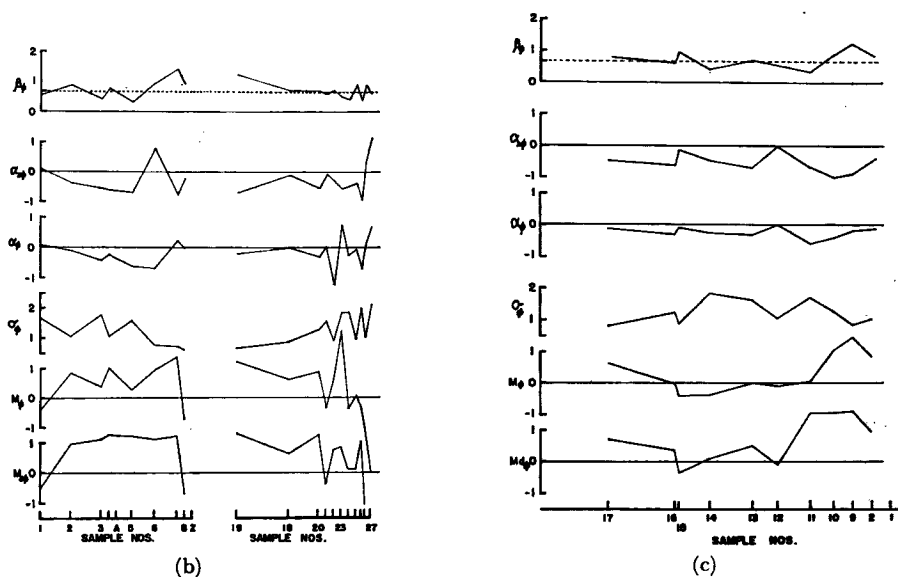


Fig. 9 Sampling positions of deltaic sediments on the surface of the Fujinoki river delta (a), and the horizontal variations of the granulometric parameters ((b) and (c)).

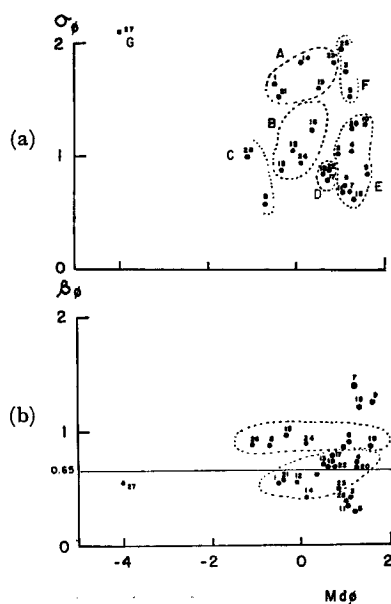


Fig. 10 Grouping pattern of the surface sediments on the Sorting-Median diagram (a), and the Kurtosis-Median diagram (b).

域は、堆積時の水理環境または現在に至る履歴の違いを示しているとみることができ。 $Md_\phi=0$ 付近の A, B 2 領域に属するものは、直接に河川流の影響を受けているかまたは受けた状態で保存されているもので、主に右岸の川岸近くの堆積物である。特に領域 A は水流の強い影響を受けている(受けた)ことを示

しているようである。領域 E, F は $Md_\phi=1.2$ 附近に存在し、かつて湖水の影響の及んだ領域と思われる。淘汰の幾分良い領域 E は delta 表面の起伏の峯の堆積物で元 berm 上部に相当するらしい。一方、領域 F は時に低湿地となりうる起伏の谷に存在する堆積物に当る。領域 D は河流と波の影響圏または遷移領域と思われる。現在の波打際の堆積物は独自の領域 C を占める。礫混りの砂をもつ浅い湖底 G の領域は不明である。以上の領域分化は、粒度分布の中央附近の特性に基づくものであるが、分布の末端附近の特性による Fig. 10 (b) においても、ある種の領域区分が可能である。正規分布に固有な値 $\beta_\phi=0.65$ の周りに描かれた領域は、前図よりも一層明瞭に河流附近の堆積物を区分しているようである。 $\beta_\phi=0.9$ 付近の領域は砂洲の脊梁よりも湖側のものである。図上で領域を示していない堆積物の共通点は湖水の影響を受けたということである。

粒度の鉛直分布をみるために、昭和 46 年 11 月 30 日 C_4 点附近、および昭和 47 年 2 月 25 日 B_3 点附近で、それぞれ長さ 97.3 cm および 70 cm の 2 本の柱状試料をアルミ管を用いて採取した。これをほぼ同質と思われる長さごとに分割して、篩による粒度分析を行ない、Fig. 11 の結果を得た。両コアは、60 cm 以

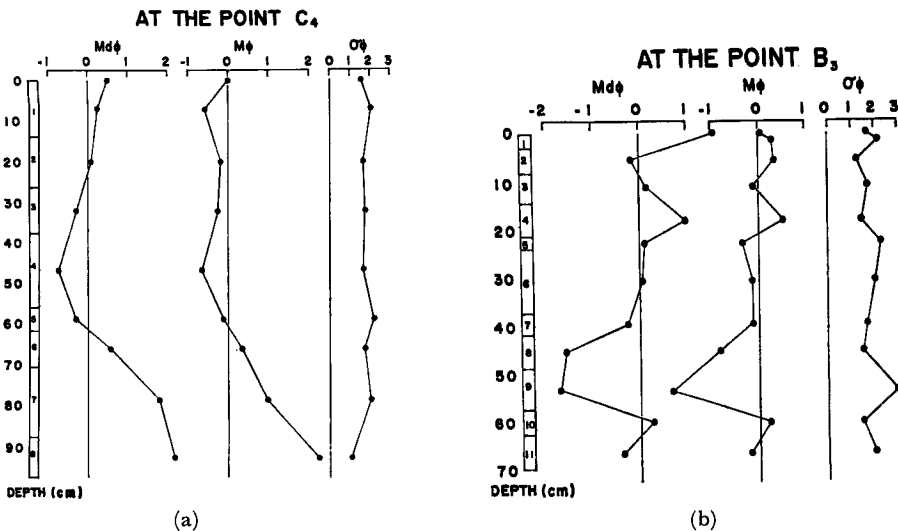


Fig. 11 Vertical variations of the granulometric parameters obtained from two core samples, of which one at the point C_4 and the other at the point B_3 . The C_4 -core was divided into eight pieces and the B_3 -core divided into eleven pieces of sub-samples.

浅で粒径の鉛直変動の傾向が似ている。いまかりに、最初 C_4 点が delta 沖の底置層に位置し、delta の成長は Fig. 7 の特徴を保ったまま前進して C_4 点を前置層・頂置層で被ったものと考えらるならば、Fig. 7 の Md_ϕ, σ_ϕ の変化の型を沖側から逆に辿った形の変動が Fig. 11 (a) に見出されるはずである。 C_4 コアにおいてこれに適合すると思われる部分は、深さ約 80 cm から 50~60 cm までの部分である。これを検証するために Fig. 6 (左下図) の結果を用いる。 C_4 コアの Md_ϕ - σ_ϕ ダイアグラム (Fig. 12 (a)) 上で上記の深さに対応する No. 7→No. 5 の径路をみると Fig. 6 (左下図) と同じ形をとっており、どちらも $Md_\phi=0.6\sim0.7$ に σ_ϕ の極小が存在する。従って、 C_4 コアでは No. 6 (深さ 65 cm 付近) が丁度頂置層先端が C_4 点を通過した時期に当ると考えてよからう。前節の Fig. 3 より推測するに、昭和 46 年 10 月 15 日には既に頂置層で被われていたであろうから、もっと早い時期、昭和 46 年 6 月 2 日~29 日の間に水中 delta 先端が C_4 を通過したのであろう。ゆえにこの 5 か月間に C_4 点には少なくとも約 65 cm 以上の砂の堆積をみたと判断される。最後に、Fig. 12 (a) の矢印は時間的経過を示すが、Fig. 12 (b) の B_3 コアにおいても殆んど同型の径路がみられる。

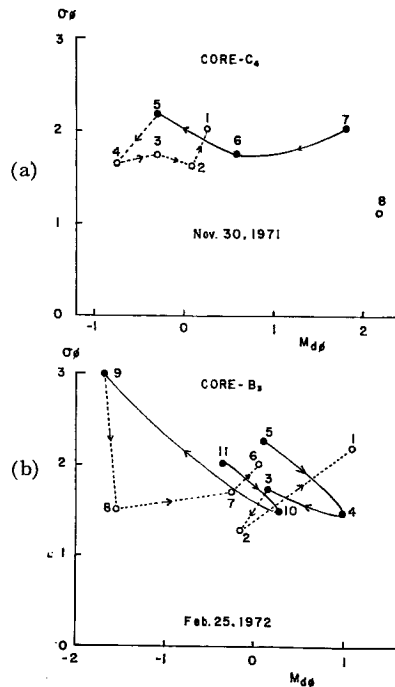


Fig. 12 Sorting-Median diagrams for the core samples, (a) at the point C₄ and (b) at the point B₃ in the Fujinoki delta.

B₃ 点では 70 cm の堆積期間内に delta 先端が 2 度通過したとみられよう。なお、破線で示した径路は堆積時の水理環境を指示するものと期待されるが、その内容については未知である。

4. 予備的な水理観測

河口付近の河川部および delta 周辺の水理環境は、形成される delta の形状およびその周辺部への土砂の輸送・堆積現象を支配すると考えられる。したがって、河川内および河口周辺の流速分布、波浪、湖水と河水の密度差、河川流量、含有土砂量等をきめ細かに測定することは、delta の発達過程を論ずる上で不可欠の基本量であることは言うまでもない。しかしながら、今回の藤の木川における観測では、delta の構成物質の調査と delta の変形、特に変形が年間の水位変化に対応した周期性を反映しているにすぎないのかどうかという点を確かめることに重点が置かれたので、十分な水理観測を行なうことはできなかった。したがって、以下に示すのは、上記の観測作業に準じて行なわれた測定結果であり、むしろ、今後に予定されている水理観測のための予備的な資料にすぎない。

(a) 河川流況

河川の流況測定は河口付近の流路上の三地点で行なわれた。その内の一点は測線 1 よりも上流約 10 m の地点、第二の点は測線 1 と交叉する流路上にある。最下流部の測点は河口付近にあるが、流路の変動があるので、位置の指定はできない。測定結果は Table 1 に示すようにほぼ平水時の流況と思われるものばかりで、流量変動の巾は、ほぼ 50 l/sec どまりである。

流量の見積りでは、1 割程度の誤差はまぬがれないが、それを考慮しても、B₁ から河口へかけて流量が増加している場合と減少している場合があり、浸透、湧出の影響を考える必要があるかも知れない。

Table 1 Hydraulic characteristics of the Fujinoki river.

Date	Station	Mean depth (cm)	Max. depth (cm)	Channel width (m)	Max. velocity (cm/sec)	Mean velocity (cm/sec)	Total flux (l/sec)
Nov. 30 1971	B ₁ -10m	12.0	14.0	1.6	37.0	26.7	51.2
	B ₁	11.0	16.0	2.3	55.0	35.2	87.8
	River mouth	6.2	11.0	2.6	46.0	28.2	45.4
Dec. 25 1971	B ₁	7.1	11.0	2.1	67.0	42.0	62.6
	River mouth	8.4	11.0	1.6	63.0	46.0	61.8
Jan. 25 1972	B ₁ -10m	8.3	14.0	1.5	47.0	33.0	41.1
	B ₁	10.3	15.0	1.95	47.0	25.2	50.6
	River mouth	5.6	11.0	3.7	54.0	43.9	91.0

(b) 河口周辺の流速分布

Fig. 13 は微流速計による河口周辺部の表層の流速分布を示したものであるが、測定時 3~4 m/sec の NW 風の影響と思われる湖流 (5~9 cm/sec) が見られる。河川水は河口で delta の流軸方向 (一点鎖線) へ 1 m/sec 程度の流速で流出しているが、河口から沖に向って流速は減っており、しかも、河口から 3~4 m のところから流路が delta の流軸からわずかに右にそれている。流路の周辺では流速が急減し、かなり巾の狭い噴流の形態を示している。

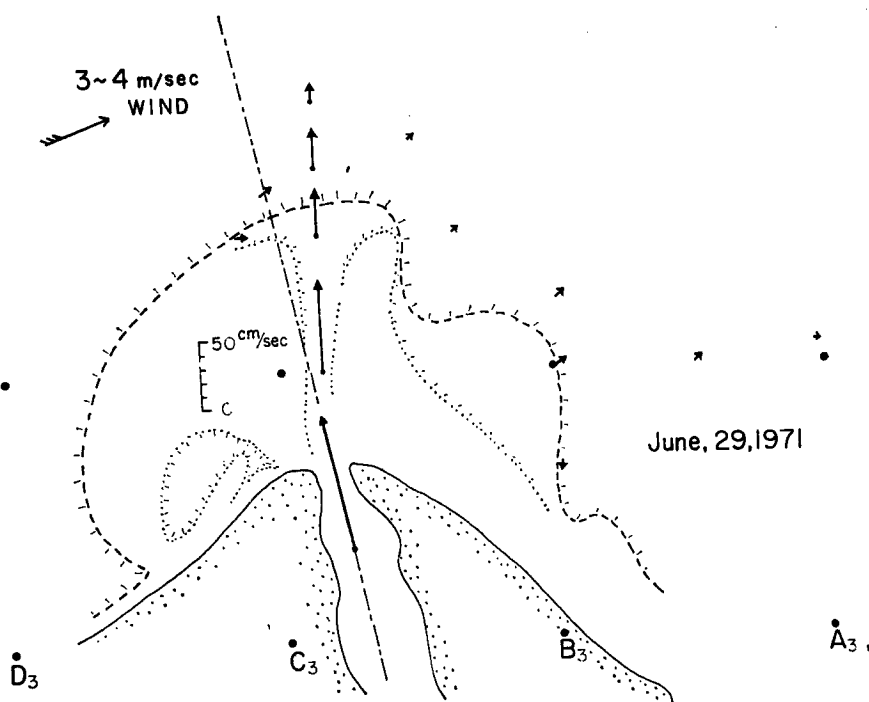


Fig. 13 Flow pattern of the lake current and outflow of the river water in the delta region of the Fujinoki river.

(c) Bed load

河口部付近の河底には粒径 1 mm 前後の砂が多く、これが河水によって常時下流側へ移動している。この移動量の見積りのために、容積 1.8 l の桁の上部に 30×30 cm² の薄板をとりつけ、板の中央部に直径 7 cm の穴をあけたものを河底に埋めて移動砂の捕集を試みた。Fig. 14 は捕集砂の粒度組成を確率紙上に plot したものであるが、Table 2 にも示されているように、11 月 30 日 (Fig. 3 (10) の点 No. 1), 1 月 25 日 (Fig. 17 の点 A) のいずれの場合も 1 mm 強の粒径のものが多く、特に 11 月 30 日に捕集された砂の淘汰が極めて良いという特徴が見られる。この測定から得られた bed load の flux は Table 2 に示す。Table には Fig. 5 の (a), (b) に示した等高線から算出した堆砂量も参考のために示してある。bed load の捕集と同時に河床

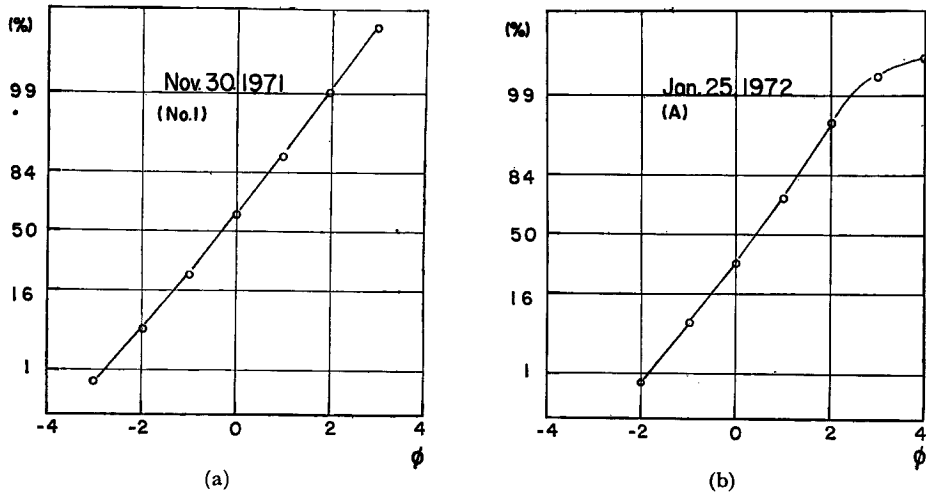


Fig. 14 Cumulative curves of grain size of the bed load in the Fujinoki river, plotted on the normal probability paper.

Table 2 Estimation of the volume of discharged sand.

Date	Nov. 30, 1971	Jan. 25, 1972
Flux of river water	75 l/sec	98 l/sec
Mean velocity at sampling point	50 cm/sec	60 cm/sec
Opening diameter of bed load sampler	7.3 cm	7.3 cm
Estimated volume of discharged sand	$Q_s = 74 \text{ m}^3/120\text{days}$	$Q_s = 78 \text{ m}^3/120\text{days}$
Md_ϕ	-0.29	0.42
σ_ϕ	0.96	0.89
Q_s/Q_c	0.255	0.269
Volume of discharged sand estimated from the Fig. 4(a), (b)	$Q_c = 290 \text{ m}^3/120\text{days}$	

上を転動する砂粒のいくつかを一定距離追跡し、その間の grain velocity を測定すると同時に、その砂粒を採取して質量および粒径を測定した。その結果は Fig. 15 に示してある。図から、grain velocity の上限が grain mass に比例し、grain velocity の切片が約 8 cm/sec 付近に在ることがわかる。

Fig. 16 は 12 月 25 日 (Fig. 17 参照) における河口周辺の水温分布を示したものであるが、このときの湖水温は 8.8°C で河水温の 9.8°C にくらべ 1°C の差がみられる。常時河川水は Fig. 16 の矢印で示した方向へ湖岸に沿って流出しており、かつ河水の温度が高いにもかかわらず、 9.8°C の等温線が比較的短い距離で閉じているのは、恐らく、この領域に打ち寄せる波により河水と湖水が急速に混合するためと考えられる。

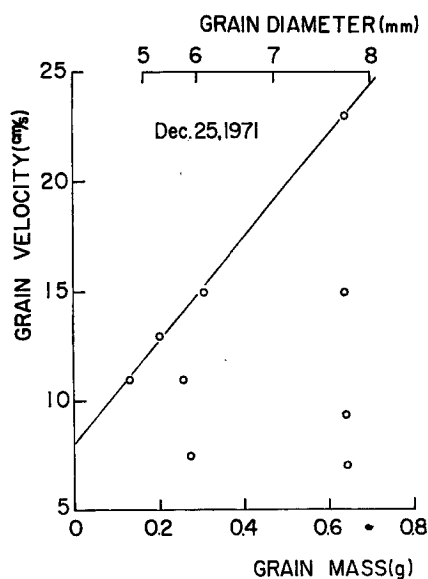


Fig. 15 Linear relation between grain velocity and grain mass over the traction load in the Fujinoki river mouth.

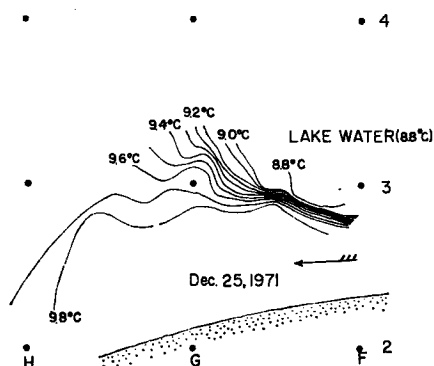


Fig. 16 Horizontal distribution of water temperature off the mouth of the Fujinoki river in winter.

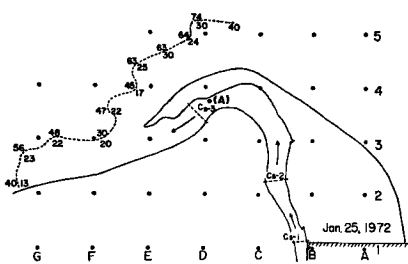


Fig. 17 Shape of the delta surveyed on Jan. 25, 1972.

Numerals on both sides of the broken line show water depth at the top and the foot of frontal face of the delta.

5. 考 察

deltaの研究を始めるにあたって、地形図と現地地形の間に著しい差異を認め、静的な delta 地形分類の不備を感じたが、この一年間の継続観測によって、静的な分類方法に欠けていた河口 delta の激しい変化過程を力学的観点に立って理解してゆくための見通しが得られた。これについては、これまでに個々の観測結果を通じて述べてきたが、改めてそれらの結果を再構成することによって、変形の過程を総括的に考察してみよう。

Fig. 18 は、京都大学大津臨湖実験所における記録に基づいた日雨量で、日雨量 62 mm の 5 月 27 日を中心とする 1 週間、50 mm の 8 月 31 日の前後数日、および 48 mm の 9 月 7 日の前後 1 週間が比較的大きな雨量を示している。また 6 月 11 日から 10 月 11 日までの期間は上記以外に 10~30 mm を頂点とする雨が頻繁にあり、最も雨の多い季節であった。その後 12 月末までは降水量が僅少で、47 年 1 月には、上旬に計約 10 mm、1 月 19 日 (30 mm) 前後数日間に降水がみられた。この雨量記録で藤の木川流域の降水量を代表させることには無理が伴うが、河口流量を考える上で充分参考に供することができる。

昭和 46 年 1 月 1 日から 昭和 47 年 4 月 4 日までの堅田および三保ヶ崎における びわ湖南湖の水位記録を O.P. +8545.4 cm 基準に引き直おしたものを Fig. 19 に示す。藤の木河口は堅田と三保ヶ崎のほぼ中間にあ

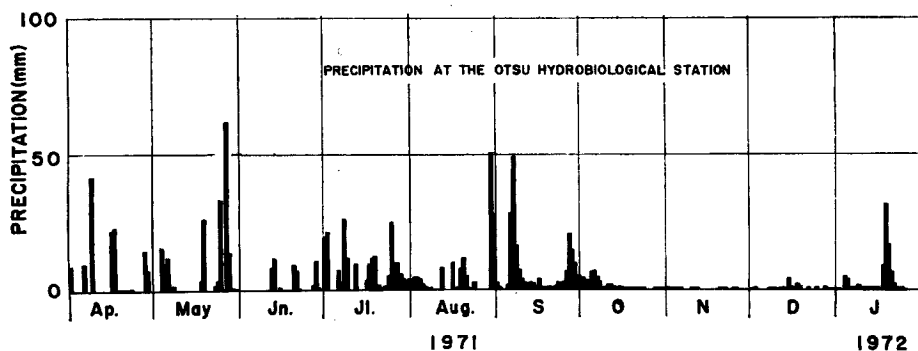


Fig. 18 Daily precipitation at the Ōtsu Hydrobiological Station of Kyoto University by the Fujinoki river mouth.

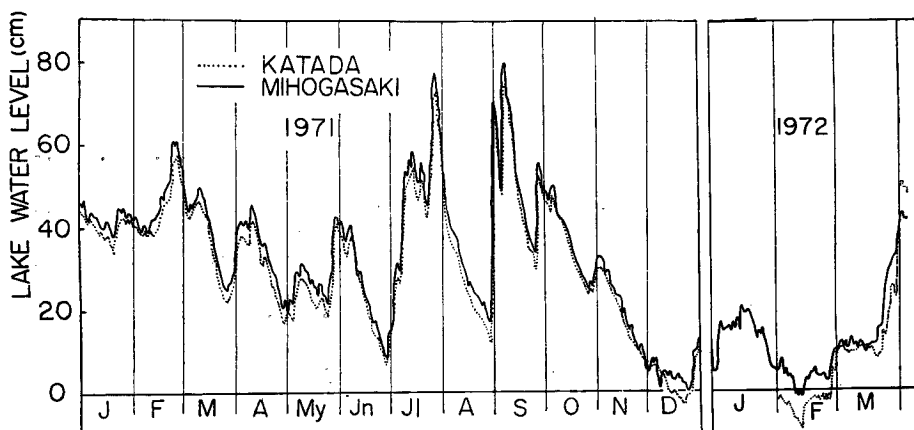


Fig. 19 Seasonal variations of lake water levels referred to O.P. +8545.4 cm, observed at Katada and Mihogasaki.
The delta of Fujinoki lies between Katada and Mihogasaki.

り、両水位記録間の最大水位差はたかだか 5 cm 程度で、年間の水位変動を見る上では、一方の水位（たとえば三保ヶ崎）を藤の木河口周辺の水位とみなしても差つかえないであろう。

この記録では、6月下旬から9月上旬にかけてそれぞれ2回の低水位（6月29日、8月30日）および高水位（7月29日、9月7日）があり、冬期は1月中旬の一時的な水位上昇の前後（12月24日、2月8～12日）にほぼ年間の最低水位が生じている。年間の水位変動の最大巾は約 80 cm で、その変動は9月7日から12月24日にかけて生じている。このような大きな水位変動は河口 delta の露出形状に大きな変化をひき起こす。第3節で述べたように、写真によるみかけ上の形状変化には当然このような水位変動の影響が含まれている筈である。その影響を抜き去って実質的な形状変化を取り出すために、水位の等しい日の写真を選び出して delta の露出部分の形状の比較を行ない発達を調べてみよう。

0 cm から 78 cm までの水位変化を9分割（0, 10, 14, 20, 26, 30, 33, 41.5, 78 cm）し、これまでにさつ影された写真の中から水位のほぼ等しい（その差が 2～3 cm 以内）ものを抜き出してそれぞれ対応する水位で分類した。このうちすでに Fig. 3 として図化されているのは、水位 14 cm で Fig. 3 (2) と Fig. 3 (5), 水位 20 cm で Fig. 3 (13) と Fig. 3 (4), 水位 26 cm では Fig. 3 (8) と Fig. 3 (16), 水位 41.5 cm では Fig. 3 (1) と Fig. 3 (17) および(5)である。

同水位でありながら露出形状の異なる場合、沈水部分が不明であるとはいえ、その差異は確かに delta の実質的な変形の一部を表わしているから、それを delta の変形および発達指標として用いることにする。露出形状の計測にとりあえず用いる三つの量を以下で定義する。

- B_1 を原点に B-line を x 軸、1-line を y 軸とする座標系を構成する。右岸砂洲汀線の x 軸方向へ最も張り出した点（これを R とする）に注目し、動径 $B_1R=r$ を考え、これを藤の木川流軸方向すなわち沖側への delta の進出の程度を表わす指標として用いる。つぎに、右岸河口砂洲最先端（これを P 点とする）の y 座標を y_1 とし、これを右岸河口砂洲の発達程度および河口流軸の左偏・右偏の目安として用いる。また、delta 右岸で 2-line 上の汀線位置を Q 点とし、その y 座標 y_2 を delta 基部の拡巾を計る量として用いる。この3つの量で以て複雑な delta の平面形状を表現することは不可能であろうが、成長の程度と変形の特徴の概略を示すことができよう。

湖水位の影響を除去した形で、delta 露出部分の形状を写真および復元図を用いて比較した結果を一括して Table 3 に示す。

ある期間を隔てた delta 形状の成長または変形を知るために、同一水位にある二つの復元図において、 r 、 y_1 および y_2 （この3つの量を併せて shape measures と呼ぶ）を測り両者の比を求めた。 r の比はほぼ河の流軸方向への進出の程度を表わすので、仮りに extention ratio と名づけよう。また、 y_1 の比は stretch ratio と名づけ、右岸砂洲の左方または右方への伸び具合を表わし、右岸砂洲の偏向が逆転した場合は負の値をとる。 y_2 の比は breadth ratio と呼び右岸の delta 基部の拡巾率を表わす。これらの3つの比を growth factors と呼ぶ。

Table 3 において、extention ratio に注目してみよう。たとえば水位 10 cm の No. 2～3, 水位 26 cm の No. 5～9 および水位 41.5 cm の No. 2～5 に関する比の値はほぼ 1 に近く、沖方向への目立った発達はないことを示している。この状態は、ほぼ 10 月下旬から翌年 4 月にかけての期間にあり、雨量が年間で最も少なく、水位も最低の季節である。一方、水位 14 cm の No. 1～2, 水位 20 cm の No. 1～3, 水位 41.5 cm の No. 1～2 または No. 1～5 においては、extention ratio は少なくとも 1.5 以上の値を持つ。これらに共通なことは、雨量も多く最高の水位を含む季節である 8 月から 10 月中旬までの期間を経過していることである。ちなみに、水位 41.5 cm の No. 1～5 は 6 月 2 日から翌年 4 月 2 日までの 10 カ月間に 2.2 倍進出したことを示しているが、その 6 割までが夏を含む初めの 4 カ月間に発達したものである。これと同じ傾向は stretch ratio や breadth ratio についてかならずしも言えるわけではない。stretch ratio に関しては、夏または秋を経過しただけでは降雨に伴う河川流量の増加による短期間の急激な変形のためか必ずしも一定の傾向を示さないが、

Table 3 Geometry of Delta.

Water level	Nos.	Date	Fig. Nos.	Shape measures			Growth factors			Remarks
				r (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	Extent. ratio	Stretch ratio	Breadth ratio	
0 cm	1 2	Dec. 25, '71 Feb. 9, '72								Unaltered.
10 cm	1 2 3	Nov. 21, '71 Jan. 6, '72 25,	3(12) 17	33.0 36.0	16.0 31.0	-16.0 -18.0	1.0 1.1	1.0 1.9	1.0 1.1	A little changed.
14 cm	1 2 3 4 5 6 7	Jun. 29, '71 Nov. 23, Dec. 31, Jan. 4, '72 10, 12, Mar. 8,	3 (2) 3 (9)	26.0 38.0	7.5 18.5	- 6.9 -13.0	1.0 1.5	1.0 2.5	1.0 1.9	Submerged ; July and September.
20 cm	1 2 3 4	Aug. 26, '71 Nov. 18, Jan. 15, '72 19,	3 (4) 3(13)	18.0 34.0	-5.0 26.0	- 2.8 -16.5	1.0 1.9	-1.0 5.2	1.0 5.9	Flow direction of river mouth changed.
26 cm	1 2 3 4 5 6 7 8 9	May. 21, '71 25, Jul. 3, Oct. 27, 28, Nov. 9, Feb. 12, '72 Mar. 27, 25,	3 (8) 3(16)	38.0 35.5	19.0 18.0	- 8.5 -14.0	1.0 0.9	1.0 1.0	1.0 1.7	Broadened. Elongated.
30 cm	1 2 3 4 5	Jul. 6, '71 Oct. 21, 22, Nov. 6, Mar 27, '72								Longshore barrier, at the right.
33 cm	1 2 3 4	Nov. 2, '71 3, Mar. 29, '72 30,								Arcked shore-line.
41.5 cm	1 2 3 4 5 6 7	Jun. 2, '71 Oct. 15, 13, Apr. 1, 2, 3, 4,	3 (1) 3 (5) 3(17)	15.8 25.7 34.0	6.0 3.0 20.0	- 1.7 - 7.0 -10.0	1.0 1.6, 1.0 2.2, 1.3	1.0 0.5, 1.0 3.3, 6.7	1.0 4.1, 1.0 5.9, 1.4	Extending front.
78 cm	1 2	Jul. 29, '71 Sept. 11,	Photo. 3							Submerged. Overflow near the trunk.

水位 41.5 cm の No. 2~6 などに見られるように、冬期を経過する場合に値が大きくなる。これは、雨量が少なくしたがって河川流量が少ないことと併せて、冬期の風による波の影響によって、右岸先端砂洲が左偏し、伸長が促されたことに起因すると考えられる。breadth ratio については、ここでは一般的な傾向をはっきり言うことはできないが、水位 41.5 cm の No. 1~2 において、拡巾が急激に進んだことが見られる。実

際には、水位 78 cm の欄にも示した **Fig. 19** にも見られるように、7 月末から 9 月上旬に delta 全体が 2 回水没している。当時、幾度かの河川増水に伴って多量の堆積物が右岸基部に排出・堆積された（たとえば、**Photo. 3**; 9 月 11 日）。10 月上旬からの一般的な水位低下に伴って、これらの堆積域が水面に露出したことが、拡巾の最も大きな原因であると思われる。この部分の汀線付近には 3 月下旬の水位上昇期に、barrier の形成が見られる。ちなみに、時を同じくして、右岸汀線全体が角ばった形から円弧状に変形するのが見られるが、いづれも波による shore process と考えられる。このような process は、この領域の堆積物の粒度特性を支配し、第 3 節に述べたような Sorting-Median diagram 上での領域区分あるいは粒度の平面分布特性を決定するのであろう。この delta の変形に及ぼす要因として見逃がすことのできないのは、汀線に沿った砂の横移動の原因である波の方向性の問題である。**Fig. 20** に夏に卓越する藤の木河口付近の波の進行方向の概念図を示す。 A_2 近くの湖岸沿いに河口に向かう砂の輸送が、図示された方向に進行する波によって行なわれ、右岸砂洲先端の左偏を促す傾向がうかがわれる。



Photo. 2 View of the Fujinoki river delta.
Photo taken on May 22, 1971.



Photo. 3 Flush out of the Fujinoki river
on September 11, 1971, soon
after a rainy week.

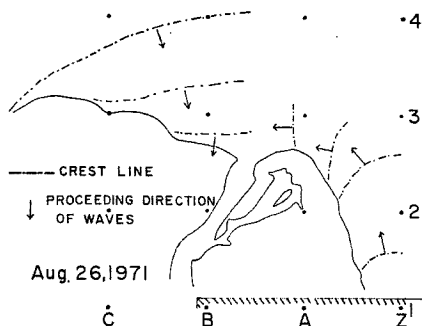


Fig. 20 An example of the proceeding direction of waves
attacking on the shore of the Fujinoki delta.

これまでは実質的な形状の変化についての考察を行なったが、この形状の変化が直接体積の変化によるものであることは、7 月 29 日の冠水時とほぼ最低水位に近い 11 月 30 日の水準測量からも求められる。**Fig. 5** の (a), (b) は上記の測量による当時の delta の等高線図であるが、この図から -100 cm の等高面を基準として、その上の delta の体積を見積った結果が **Table 2** の最下欄に示されている。これによって、7 月 29 日から 11 月 30 日までの 120 日間に約 290 m³ の実質的な体積変化の起ったことが明らかになった。また 11 月 30 日および 1 月 25 日に測定した掃流砂量を藤の木川の平均値とみなして、上記 120 日間の堆砂量を推定

してみると、 $74\sim 78\text{ m}^3$ の値となり、等高線図からの見積り値の $26\sim 27\%$ にしかない。しかしながら、観測を行なった時期の形状変化が比較的小さかったにも拘らず、この時期の流砂量を平均値とみなして 120 日間の堆砂量の推定を行なったことを考慮すれば、推定値が実質の体積変化の 30% 弱に収まったことは、掃流砂観測に基づく見積りがそれほど不当な値ではなかったことを示すものと考えてよいであろう。

藤の木川を通じてびわ湖へ年間どの位の堆積物量が搬入されるかは非常に興味深くまた重要な問題と考えられるが、それに対する解答はまだ与えられていない。上記の推定堆砂量を用いて年間の搬入量を推定するに、 $290\text{ m}^3/120\text{ days}$ を年間平均値とみなせば搬入量は $870\text{ m}^3/\text{year}$ となるが、一方、7月下旬から11月下旬までの期間は雨が最も多く流入土砂量が年間で最も多かった期間であることを考慮して、少な目に見積っても約 $300\text{ m}^3/\text{year}$ の搬入量となる。したがって、藤の木川からの搬入土砂量はおよそ数 $100\text{ m}^3/\text{year}$ の程度と考えてもよいであろう。

我々は河口 delta の変形発達過程を力学的な視点に立って理解して行くための第一歩として、規模は小さいが変動の著しい藤の木河口 delta において形状測量、水理観測および delta 堆積物の粒度分析等、多数の観測を実施したが、現象が複雑なだけに必らずしも十分な成果が得られたとはいえない。しかしながら、以上述べて来たように、藤の木 delta の発達の特徴に関するいくつかの知見と今後の研究への見通しがある程度得られたと云える。

以下に今回の観測による成果と今後の課題を要約する。

- (1) 水面に露出した delta の形状は季節的に大きく変化するが、一年間でほぼ相似な形状に復帰する傾向が見られる。この見かけの形状変化は湖水水位の変動の影響を大きく受けているが、実質的にも年間に発達が見られる。この発達は 7 月および 9 月の出水時に伴う多量の sediment の排出に基づくもので実質的にも大きな変形を生ずるが、delta は周辺の季節的な水理および気象条件によって再び以前と相似な形へと変形が促される傾向を示す。
- (2) 藤の木川 delta の堆積物は中央径が約 $0.3\sim 2\text{ mm}$ の sand の範囲にあり、その水平分布特性は、汀線直下および河道付近で最も粗く、delta 基部の脊梁部で細かい。河口流軸に沿っては河口から沖側へ向かって粒径が小さくなるが、前置層斜面裾で異常に粒径が大きく、またその部分だけ淘汰が悪いが、更にその沖の底置層では一層細粒化する。このような流軸方向の水平粒度分布特性を利用して、鉛直 core の Sorting-Median diagram から、delta の過去の進出状況を把握しうる可能性を見出した。また Sorting-Median diagram および Kurtosis-Median diagram 上において、delta 堆積物が堆積時の水理環境または現在に至る履歴の違いに基づく領域区分が可能であり、粒度の鉛直変動の特性を併用することにより、delta の発達および堆積環境の変遷を推定するための見通しが得られたが、この点に関しては、今後、より精細かつ広範な調査による裏づけと他の河口 delta での同様な分析による比較を行なう必要がある。
- (3) 冬の藤の木川の河道および河口における流速ならびに流量観測を行なった結果、いずれも平水時ではあるが断面平均流速は $25\sim 46\text{ cm/sec}$ 、流量は 70 l/sec 程度であった。また、河口から湖への流出は噴流の pattern を示し、流軸上の core velocity は河口からの距離にほぼ逆比例して減少する傾向がうかがわれた。この噴流の pattern は河水と湖水の密度差の影響を受けるものと思われるが、昭和 46 年 8 月 26 日の濁水流出時の濁水の分析の結果、粒径 7μ 前後のものが約 0.4 g/l 含まれており、これから河水と湖水の密度差は $4\times 10^{-4}\text{ g/cm}^3$ 程度で、当時の河水と湖水の温度差 (約 5°C) による密度差の方が 1 桁大きい。ただし、この時の流出濁水は洪水によるものではないので、大流量時の流量観測を適宜行なう必要がある。これと関連して、平水時の掃流砂の観測から、年間の排砂量の見積りを行なったが、大流量時における掃流砂観測も今後は非実行する必要がある。また、delta の変形に寄与の大きい波の影響については、波の方向性についての写真上での判定と、汀線付近での砂の横移動が周期約 2.4 sec の波によって一波ごとに約 10 cm の割で行なわれることを簡単に実測した以外に

は定量的な結果は得られていないが、波の重要性にかんがみ、昭和 47 年度には容量型波高計を設置して、波による delta 変形の考察に資する予定である。

謝 辞

この研究を遂行するにあたり、びわ湖水位ならびに藤の木川流域河川管理資料等の入手の便宜を与えられた近畿地建びわ湖工事事務所副所長荻萩珠男氏および所員の方がたならびに滋賀県河港課の方がたに深謝の意を表す。また、この研究で使用した定時自動さつ影装置は大阪電気通信大学の奥村康昭氏の御好意により製作されたものであり、同装置は京都大学大津臨湖実験所各位の御好意によって同所屋上に設置する便宜を計っていただいた。また、同装置の保守には、実験所所員松浦嬢の手をわづらわした。ここに併せて心からの謝意を表す。なお、この研究の一部は文部省科学研究費の補助金によって行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) Charles C. Bates, Rational Theory of Delta Formation, Bulletin of the American Assoc. of Petro. Geologists, vol. 37, No. 9, 1953.
- 2) A.E. Scheidegger, Theoretical geomorphology, Springer Verlag, Berlin, 1961.
- 3) P.D. Trask, Applied Sedimentation, John Wiley and Sons, Inc, London, 1950.
- 4) J.M. Coleman and S.M. Gagliano, Cyclic Sedimentation in the Mississippi River Deltaic plain, U.S. Gulf Coastal Studies, Technical Report No. 16, Part G. 1964.
- 5) J.M. Coleman and S.M. Gagliano, Sedimentary Structures, Mississippi Deltaic Plain, U.S. Gulf Coastal Studies Technical Report No. 16, Part H.