

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340140

研究課題名（和文） 強い堆積物分散営力のもとで発達する陸棚デルタ系の実験オート層序学

研究課題名（英文） Experimental autostratigraphy of shelf deltas growing under intense sediment-dispersive forcing

研究代表者

武藤 鉄司 (MUTO TETSUJI)

長崎大学・大学院生産科学研究科・教授

研究者番号：70212248

研究成果の概要（和文）：モデル実験の手法により、陸棚デルタ系のオート層序学的性質の一端を解明した。特に重要な新知見は次の3点である。(1)海水準上昇・下降期に陸棚デルタが必然的に経験する大規模決定論的オートジェネシスは強い堆積物分散営力下のもとでも実現しうる。(2)海岸線近傍からの跳水の周期的遡上とデルタ前置部の成層構造の形成には同期性があり、波浪はそれを鮮明化する働きがある。(3)堆積物供給量と河川流量の比率は陸棚デルタ上のチャネル変遷パターンを決定付け、デルタ海岸線の平面形状を規制する。

研究成果の概要（英文）：Autostratigraphy of shelf deltas growing under intense sediment dispersion has been explored by means of model experiments. The following particular notions are noteworthy. (1) Even in an open shelf setting where sediment is intensely dispersed but is not removed far away from the coastal system, large-scale deterministic autogenesis inherent to river deltas can go functionally. (2) There exists conspicuous synchronism between periodical recession of hydraulic jumps and discrete cyclic sedimentation of delta foreset. The action of coastal waves functions to bring distinct bedding. (3) The ratio of sediment supply rate to water supply rate controls a long-term pattern of channel avulsion and thereby shoreline configuration too.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：堆積地質学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：地層、モデル実験、陸棚、デルタ、海水準変動、オート層序学

1. 研究開始当初の背景

1970年代以降の堆積地質学を主導してきたのはシークウェンス層序学である。シークウェンス層序学が堆積盆スケールでの地層成因論の発展に大きく貢献したことは紛れもない事実で

あるが、それが特異な地層観の上に展開されてきたことはあまり知られていない。それは、(1)堆積系は定常的フォーシングのもとで平衡形態を獲得する方向へ進化する(平衡応答の仮説)、(2)堆積系の挙動の定常的な変遷は定常的な堆

積盆条件を反映し、非定常的な変遷は堆積盆条件の非定常的な変化を反映する(線形応答の仮説)といった考え方である。しかし、定常的フォーシングが作用していても河川デルタは非定常的にふるまうのであり(非線形応答)、特定の平衡形態を獲得する方向へ進化するわけではない(非平衡応答)ことが、代表者らによる一連の研究で近年明らかになってきた。定常的フォーシングに対して堆積系がオートジェニックにどのように応答するかが理解できていないと層序記録から過去の非定常事件を検出することは困難であるが、シークウェンス層序学ではまさしくその理解が疎かにされていた。

この問題認識のもと、代表者の研究グループは堆積系のオートジェニックな変遷過程の理解に根差した新しい成因論的層序学を構築することが重要であると考え、新たな枠組み「オート層序学」を提唱した(2007年)。ただし、研究開始当時のオート層序学では、河川系が著しく卓越する系のみが対象とされ、また河川からの供給物質のすべてがデルタに付加されその近傍から離れないという設定がア prioriに採用されていた。現実には、いったんデルタ上もしくはその近傍海底に定置した堆積物は波浪・潮汐・沿岸流などの分散的営力によって少なからず再移動する。その影響を取り入れたオート層序学の構築が望まれるところである。オート層序学は基本的にあらゆる堆積環境で組み立てることができると考えられ、その方向性での拡張が求められていた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、強い堆積物分散営力のもとで成長する陸棚デルタ系を対象にそのオート層序学を開拓することを構想した。イメージしたのは波浪卓越系であるが、デルタの成長期間($>10^3$ 年)と波浪概況($<<10^0$ 年)とを同一スケールでモデル化することはできないため、敢えて「強い堆積物分散営力」という表現を用いた。重要なのは波浪(潮汐も)そのものではなく、それが長期間作用することによる堆積物輸送の実質量とデルタ形態の変遷に他ならないという理解であった。

堆積物分散営力が全く作用しない場での陸棚デルタ系であれば、海水準上昇および海水準下降それぞれに対して特徴的な非平衡応答を生じ、特徴的な地形と特徴的な層序構造を地層中に遺す。このことはすでによく理解されている知見である。それでは、強い堆積物分散営力が定常的に作用し続ける陸棚デルタ系が定常的な海水準変動を経験した

ならば、それを反映する地形や地層はいかなるものなのだろうか。本研究の第一の目的はこの問題を解くことであった。

海水準変動を考慮しない、静止海水準のもとでの陸棚デルタを考察する場合には、波浪それ自体を分散営力の実体として扱うことが可能である。デルタ断面形態における成層構造に波浪がいかなる影響を及ぼすのかを明らかにすることはオート層序学上の重要な課題でもある。そこで、波浪が作用しているときとしていないときで陸棚デルタの成層構造にどのような違いが顕われるのかを解明することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

オート層序学はモデル実験と理論を主な方法論とする演繹的層序学である。本研究においても、実験水槽・水路を用いてミニチュアの河川・デルタ系を生成することを基本的手法とした。

(1) プランジャー造波装置が付随する組立式実験水槽マルジ4号(6m×3m×深さ60cm)を新たに導入し(長崎大学環境科学部)、この装置を用いた二次元実験をおこなった。水槽の一端に設置した横幅2.5m×深さ45cmの三角柱状プランジャーの昇降運動により発生する定常的な波を成長過程にあるデルタの前縁に作用させた。同時に、水槽内水位(海水準)を一定速度で上昇もしくは下降させた。初期波浪の周期・振幅を変えた条件のもとで、全37ランを実行した。この実験作業は当時長崎大学大学院生であったArti Tomer氏(研究協力者)の協力を仰いで行われた。

(2) 筑波大学陸域環境研究センターのピストン式造波水槽(20m×50cm×深さ50cm)を用いて波浪作用下の陸棚デルタの成層構造を調べた。この実験作業は連携研究者である筑波大学・関口講師および大阪工業大学・横川准教授との共同研究として行われた。また、その対照実験を長崎大学環境科学部の二次元実験水槽マルジ6号を用いておこなった。

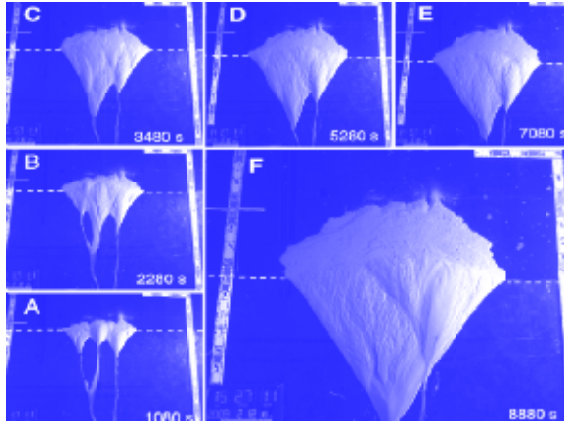
(3) 陸棚デルタのオートジェニックな海岸線形状に与える波浪営力の影響を調べるため、それと比較されるべき無波浪状態の海岸線形状を、長崎大学環境科学部の二次元実験水槽マルジ5号を使用して調べた。この実験作業はテキサス大学オースチン校ジャクソンスクールオブジオサイエンス助教授 Wonsuck Kim氏(研究協力者)との共同研究として行われた。

4. 研究成果

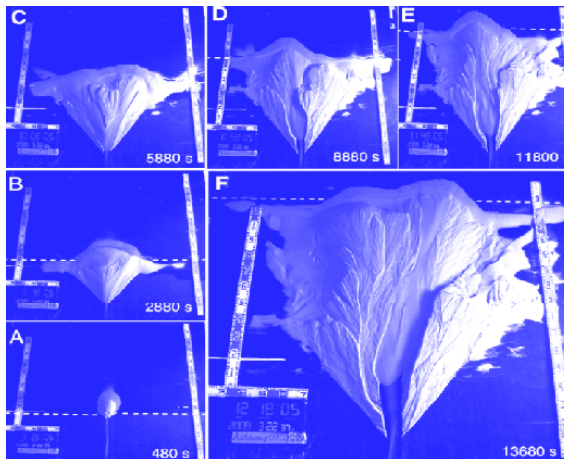
(1) 海水準上昇および海水準下降のもとでの陸棚デルタのオート層序学的挙動

① 河川が著しく卓越する環境で陸棚デルタが経験する大規模決定論的オートジェネシ

ス（海水準上昇期の海岸線自動後退，デルタのエスチュアリ化，バックステッピング；海水準下降期のオートインシジョンとオートジェニックな河岸段丘の形成，etc）は，適当に強い分散営力が長時間作用してもやはり実現しうることが確認された。



波浪作用下のデルタの進化(海水準上昇実験)



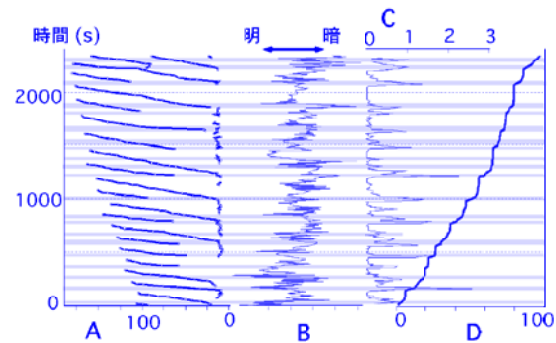
波浪作用下のデルタの進化(海水準下降実験)

②系軸部(主チャネルの位置)で観た場合，強い堆積物分散営力は，大規模決定論的オートジェネシスの進行を格段に加速する。初次的に河口域へもたらされる堆積物が側方に分散・均等化されることにより，軸部での実質的な堆積物供給量が減少するためである。一方，河口域から離れた側辺部は分散された堆積物の二次堆積場となり，分散営力が作用したことにより実質的な堆積物供給量が増加する。堆積物分散営力はオート層序学的時間スケールおよび長さスケールを系軸部と系側辺部とで差別的に作用する。

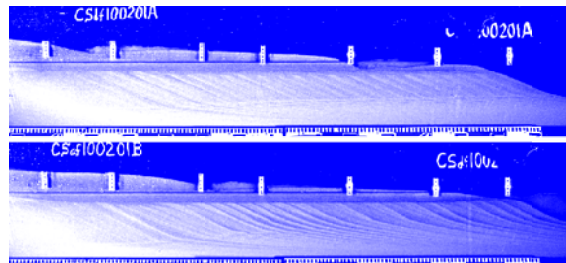
上記①②は国内外に先行研究のない新知見である。37 ランに及ぶ実験で十分なデータが得られており，早期論文化の方向で後続作業を迅速に進展させる必要がある。

(2) 波浪営力下のデルタ成層構造

①浮遊砂量と水流量が適度に大きな陸棚デルタ系ではその河川チャネル内に高流階河床形サイクリックステップがしばしば発達する。その場合，デルタフォーセットの成層構造の生成とサイクリックステップの遡上とは明らかな同期性が存在する。サイクリックステップを構成する跳水が河口を離れる際に，河口からの噴流が斜流から常流へと急変することを反映した現象である。



デルタフォーセットの成層構造の生成とサイクリックステップ(跳水)の遡上に存在する同期性。(A) 河口近傍の移動参照点から測った跳水位置の上流側距離距離(cm)，(B) グレースケール，(C)デルタの前進速度(mm/s)，(D) 固定参照点から測ったデルタの前進位置(cm)。



上は無波浪，下は定常的波浪が作用。波浪はデルタ成層構造を鮮明化するように機能する。

②無波浪条件のもとでは，サイクリックステップ出現時に生成する地層の保存は，サイクリックステップが生成しえない流量の継続時間および交互周期の長さ依存する。

③陸棚デルタの河口域に波浪営力が強く作用すると，河口域から放出される堆積粒子のうち細粒な浮遊砂が粗粒堆積物から分離しやすくなり，これを反映してデルタフォーセットの層理構造が鮮明化する。ただし，層理の生成周期はサイクリックステップを構成する跳水の生成周期を反映し，それよりも格段に短い波浪周期には依存しない。

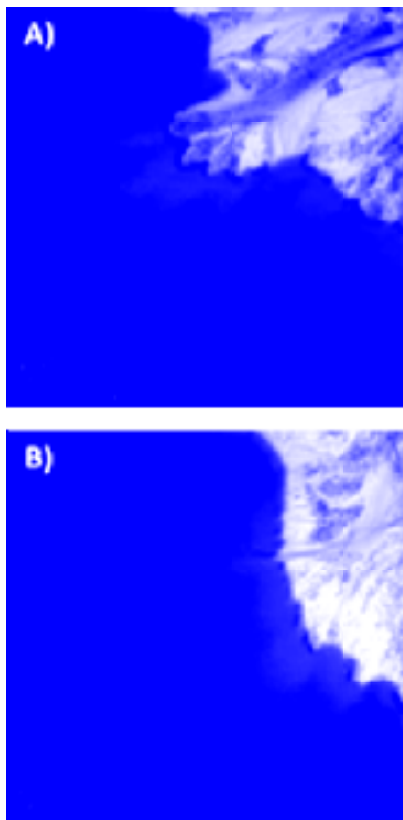
近年，サイクリックステップの実験的研究が日米の複数の研究拠点で進められており，

本研究の遂行も一部でその流れを汲む。しかし、(波浪関与の有無に関わらず)サイクリックステップの層序痕跡の問題に関して明瞭な解をもたらしたのは本研究が初めてである。上記実験例のようなデルタ断面は層序レコード中にきわめて普遍的に存在するが、従来それらはアロジェネシスを基調とするまったく別の視点から説明されていた。外的条件が時間的に不変であっても、サイクリックステップが生成する水理条件が整いさえすれば同様の層序構造が生じることが本研究で初めて示された。

(3) 無波浪環境下における陸棚デルタの海岸線形状(9 ランの対照実験)

①デルタ海岸線の形状は滑らかな円弧状から起伏に富んだものまで多様である。堆積物供給量と河川流量の比率(qs/qw)はこの海岸線形状の主要因の一つとなりうる。

② qs/qw が大きくなるほど、デルタ上における堆積物の一時的貯留・一時的解放のコントラストが強くなり、海岸線は起伏に富む傾向を強める。



qs/qw 値を変えておこなった2つの実験の対照。(A) $qs/qw=0.015$, (B) $qs/qw=0.06$ 。 qs/qw が小さいほど海岸線は起伏に富む。各枠は1辺100cm。

海岸線形状とデルタトップセットに置ける堆積物の一時的貯留・解放の問題に関しては、米国研究者による先行研究(一部は研究協力者が実施)がある。しかし、 qs/qw 値を系統的に変化させてその機能の全体像を描いたのは本研究が最初であろう。この研究の先には、波浪作用条件下での実験シリーズが期待されるが、本研究期間においては使用する設備の時間的制約により、とりあえず無波浪条件下での実験を先行して実施した。波浪を取り入れた実験はごく近い将来に必須である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① 武藤鉄司, 新しい平衡河川観: モデル実験が描く下流域沖積河川系の海水準応答. 地質学雑誌, vol. 117 (2011), pp. 172-182. 査読有.
- ② Tomer, A., Muto, T., Kim, W., Autogenic hiatus in fluviodeltaic successions: geometrical modeling and physical experiments. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 81 (2011), pp. 207-217, doi: 10.2110/jsr.2011.19. 査読有.
- ③ Tomer, A., Muto, T., Emergence and drowning of fluviodeltaic systems during steady rise of sea level. *Journal of Sedimentological Society of Japan*, v. 69 (2011), no. 2, pp. 63-72. 査読有.
- ④ Petter, A., Kim, W., Muto, T., Steel, R., Comment on "Clinof orm quantification for assessing the effects of external forcing on continental margin development". *Basin Research*, vol. 23 (2011), pp. 118-121. doi: 10.1111/j.1365-2117.2010.00472.x. 査読有.
- ⑤ Yokokawa, M., Okuno, K., Nakamura, A., Muto, T., Miyata, Y., Naruse, H., Parker, G., Aggradational cyclic steps: Sedimentary structures found in flume experiments. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment (2009), pp.5547-5554. 査読有.
- ⑥ Lorenzo-Trueba, J., Voller, V.R., Muto, T., Kim, W., Paola, C., Swenson, J., A similarity solution for a dual moving boundary problem associated with a coastal-plain depositional system. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 628

(2009), p. 427-443, DOI:
10.1017/S0022112009006715. 査読有。

- ⑦ Kim, W., Dai, A., Muto, T., Parker, G.,
Delta progradation driven by an advancing
sediment source: Coupled theory and
experiment describing the evolution of
elongated deltas. *Water Resources
Research*, v. 45 (2009), W06428,
doi:10.1029/2008WR007382. 査読有。

[学会発表] (計16件)

- ① Powell, E. J., Kim, W., Muto, T.,
Quantifying the fluvial autogenic
processes: Tank experiments. *American
Geophysical Union 2010 Fall Meeting*, San
Francisco. (2010.12.16)
- ② Muto, T., Sekiguchi, T., Yokokawa, M.,
A stratigraphic sign of alluvial cyclic
steps preserved in delta foreset beds:
Flume experiments. *2010 Geological
Society of America Annual Meeting*, Denver.
(2010.11.2)
- ③ 武藤鉄司, 関口智寛, 横川美和, ギルバー
ト型デルタのフォーセットに記録される河
川サイクリックステップの痕跡: 水路実験.
日本史地質学会第17年学術大会(富山大学).
(2010.9.18)
- ④ Muto, T., Steel, R. J., Swenson, J. B.,
Petter, A. L., Principles of
autostratigraphy: Large-scale
autogenesis of river deltas in response to
dynamic sea level forcing. *Norwegian
Petroleum Society Conference "From
Depositional Systems to Sedimentary
Successions on the Norwegian Continental
Shelf"*, Stavanger. [Keynote address].
(2010.5.6)
- ⑤ Petter, A. L., Steel, R. J., Mohrig, D.,
Muto, T., Olariu, C., Robinson, P. L.,
Reinterpretation of the Lower Castlegate
Sst (Book Cliffs, Utah) based on
autostratigraphic ideas of spatial
sedimentation patterns. *Norwegian
Petroleum Society Conference "From
Depositional Systems to Sedimentary
Successions on the Norwegian Continental
Shelf"*, Stavanger. (2010.5.6)
- ⑥ Muto, T., Steel, R. J., Swenson, J. B.,
Petter, A. L., Autostratigraphic
Responses of Deltaic Clinoforms to Sea
Level Forcing. *American Association of
Petroleum Geologists 2010 Annual*

Convention and Exhibition, New Orleans
[Invited]. (2010.4.13)

- ⑦ Muto, T., Furubayashi, R., Kim, W.,
Parker, G., Seaward protrusion of a graded
alluvial channel-lobe system: 2D
experiments. *American Geophysical Union
2009 Fall Meeting*, San Francisco.
(2009.12.17)
- ⑧ Muto, T., Kim, W., Parker, G.,
Autogenic alluvial grade attained with
falling sea level: A 2D experiment. *2009
Geological Society of America Annual
Meeting*, Portland. (2009.10.18)
- ⑨ 武藤鉄司, Wonsuck Kim, Gary Parker, 二
次元水路実験で生成するオートジェニック
な平衡河川. *日本史地質学会第116年学術大
会*, 岡山大学. (2009.9.5)
- ⑩ Tomer, A., Muto, T., Autodrowning and
Phased Evolution of Fluviodeltaic System
During Steady Rise of Relative Sea Level
[2008 AGU Annual Convention and
Exhibition, San Antonio]. (2008.12.16)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 鉄司 (MUTO TETSUJI)
長崎大学・大学院生産科学研究科・教授
研究者番号: 70212248

(2) 連携研究者

遠藤 徳孝 (ENDO NORITAKA)
金沢大学・大学院自然科学研究科・助教
研究者番号: 60314358
横川 美和 (YOKOKAWA MIWA)
大阪工業大学・情報科学部・准教授
研究者番号: 30240188
関口 智寛 (SEKIGUCHI TOMOHIRO)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・講
師
研究者番号: 90400647
成瀬 元 (NARUSE HAJIME)
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 40362438

(3) 研究協力者

トマー アーティ (TOMER ARTI)
長崎大学・大学院生産科学研究科・院生
キム ウォンスク (KIM WONSUCK)
テキサス大学オースチン校・ジャクソンス
クールオブジオサイエンス・助教