

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400489

研究課題名(和文)多サイクル海水準変動のもとで成長するデルタ性大陸棚系のオート層序ノルム

研究課題名(英文) Autostratigraphic norm to delta-shelf sedimentary systems growing with multiple sea-level cycles

研究代表者

武藤 鉄司 (MUTO, Tetsuji)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授

研究者番号：70212248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：多サイクル海水準変動のもとで成長するデルタ性大陸棚系のオート層序学を水槽実験と幾何モデリングの手法により開拓し、それが示唆するマクロ堆積層序の一つの類型を明らかにした。海水準の上昇と下降が繰り返されると、デルタ性大陸棚系の非平衡応答それ自体が変遷し特定のパターンに落ち着く。大陸棚の成長は上昇期における非デルタ性海進の開始を早め、無堆積面を拡大させる。下降期には、デルタ上の沖積河川がオートジェニックな平衡状態を実現しやすくなる。多サイクル海水準変動のもとで大陸棚が成長する過程で、非デルタ性海進(上昇期)と海側へ延伸する平衡河川-デルタの前進(下降期)とが繰り返すだけの堆積層序へと収束する。

研究成果の概要(英文)：An autostratigraphic framework of deltaic continental shelves that evolve with multiple sea level cycles is suggested by means of tank experiments and geometrical modeling. The framework predicts that the resulting stratigraphic architecture can have a distinct stable pattern reflecting a progressively-converging non-equilibrium response of the depositional system to the sea level forcing. The basinward expansion of a deltaic continental shelf during a rising period leads to earlier realization of non-deltaic transgression which is accompanied by the generation of non-depositional shelf surface. During sea level fall, the alluvial topset river of the prograding delta tends to attain a graded state in an earlier stage. Thus, as a continental shelf grows with multiple sea level cycles, a distinct, stable stratigraphic pattern that is composed only of non-deltaic transgressive deposits and progradational deltaic lobes fed by a graded alluvial river will be built eventually.

研究分野：堆積地質学

キーワード：大陸棚 オート層序学 非平衡応答 デルタ 沖積河川 分流チャネル 水深 海水準変動

1. 研究開始当初の背景

(1) 1970年代以降の地層成因論を牽引してきたシークウェンス層序学は「堆積系の定常的な挙動は外部フォーシングの定常性を反映し、非定常的な挙動は外部フォーシングの非定常的な変遷を反映する」といった平衡応答 (equilibrium response) の地層観に今も立脚している。しかし、そのような応答様式が一般に成り立たないことが、近年の実験層序学の発展に伴い明確になってきた。むしろ、与えられた境界条件のもとで(それが時間的に変わらなくても)必然的かつオートジェニックに特定の変遷コースを辿るのが一般的であり、それは非平衡応答 (non-equilibrium response) に他ならない。定常的な外部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ければ、層序記録から過去の環境変動や堆積事件を正確に検出することは原理的に困難である。しかし、従来の地層成因論にはこの視点が欠けていた。

このような問題認識から、報告者らは堆積系の非平衡応答とオートジェニックな変遷過程の理解に根差した地層成因論の新しい枠組み「オート層序学 (autostratigraphy)」を提唱した (Muto et al. 2007)。オート層序学はシークウェンス層序学の立場からすれば異説に映るが、提唱から6年を経た2013年当時、オート層序学は米国学界を中心に世界で着実に受け入れられつつあった。そして、今もその過程にある。

(2) これまでのオート層序学の対象は海水準の単調上昇もしくは単調下降のもとでのデルタ単体に限られていた。今後のオート層序学の展開においては、より大きな時間・空間スケールへ適用できるように、枠組みを拡張することが望まれる。なぜなら、スケールを大きく設定するほど非平衡応答はより顕著となり、オート層序学に立脚した考察が一層必須となるからだ。この拡張戦略のもと、本研究によりデルタの上位階層にあたる大陸棚系を対象にそのオート層序学を開拓することが構想された。既存の大陸棚層序モデルはシークウェンス層序学のそれであり、やはり平衡応答を基調にしている。平衡応答は物理的に可能ではあるが、それが成り立つのは一般には系内局所における短時間の現象に限られるというのがオート層序学の理解である。今後の地層成因論の発展においては系全体の非平衡応答の理解をベースとするマクロな視点からの探究が不可欠であり、それはオート層序学の主課題の一つに他ならない。大陸棚堆積系のオート層序学を確立させることにより、source-to-sink を基調とする「汎地球表層堆積系のオート層序学」の開拓へ向けた一歩が踏み出せるものと期待される。

2. 研究の目的

(1) 沖積河川上流端から大陸棚外縁までを一つの堆積系として捉え、多サイクル海水準変動のもとでのデルタ性大陸棚系のマクロな成

長過程とそれを反映するマクロな堆積層序を説明するオート層序学モデルを導き出す。とくに想定しているのは、多サイクル海水準変動のもとで海退と海進が交互に繰り返され、各海退の末期にはデルタが大陸棚外縁近傍まで到達している、という単純なセッティングである。この場合、デルタは大陸棚系の構成要素であると同時に大陸棚成長の主駆動部でもある。したがって、これまでに蓄積したデルタの非平衡応答の理解が基礎となる。その中でとくに重要な点は、多サイクル海水準変動のもとで大陸棚が成長するにつれてデルタおよび大陸棚系の非平衡応答それ自体が変貌していくと予想されることである。非平衡応答が具体的にどう変わり、そのことが大陸棚系のマクロ堆積層序にどのように反映されるのかを突き止める。

(2) この問題の解明作業を進めるにあたり、海水準の単調上昇・単調下降のもとでデルタ単体を成長させたこれまでのモデル実験で得られた次の2つの知見がとくに重要なヒントになると考えられる。

ひとつは、海水準上昇期の沖積河川にはデルタ堆積作用の実現を制限する限界長さが存在し (Tomer et al. 2011)、これが非デルタ性海進の開始のタイミングとその後の無堆積面の広がり方を決定づけることである。もう一つは、海水準下降期のデルタ系が直前の海進期に生成された無堆積面上を前進していくとき、デルタ上の沖積河川は平衡状態 (平衡河川) をオートジェニックに実現することである (Muto & Swenson 2006)。

これら二つの知見を基礎に、海水準の上昇・下降が幾度も繰り返されたなら、大陸棚系はどのようなマクロ堆積層序を生成するだろうか。特定の層序パターンへ収束するのか、あるいは何らかの破綻事件が必然的に起こって非大陸棚化へ転換するのだろうか？これらの予想と問題を解き明かす。

(3) デルタ前縁の海底は海水準上昇のもとで深くなり、海水準下降のもとで浅くなる。また、静止海水準のもとでも、大陸棚上を前進するデルタにとっては前縁海底が次第に深くなっていく。このとき、デルタ前縁海底水深の大小はデルタ系に対してどのように機能するだろうか。とくに、デルタ陸上部分で物質輸送を担う分流チャネル (delta distributary channels) の動態はデルタ前縁海底の水深に影響されるのか否か。これまでほとんど注目されていなかったこの問題は、大陸棚堆積系のオートジェニックな短時間進化を考える上で鍵の一つとなりうる検討事項であり、本研究での解決が意図された。

3. 研究の方法

(1) 本研究における主たる作業はモデル実験である。すなわち水路・水槽内にモデル堆積系を造り、ラン毎に条件を変えた比較・対照

により特定フォーシングの特定機能を実験的に解析する。本研究のモデル実験には主として長崎大学の実験水槽を使用した: マルジ5号(長さ 2.8m×幅 1.4m×深さ 65cm), マルジ6号(長さ 6.5m×幅 60cm×深さ 1.3m)。このほか、筑波大学のピストン式造波水槽(長さ 20m×幅 50cm×深さ 50cm)も使用した。

いずれの実験水槽を用いるにせよ、初期海水準サイクルでは基盤上(アクリル床)にデルタ単体が現れるだけであるが、サイクルの進行にともない、この堆積系が海退と海進を繰り返し経験することにより、デルタ性大陸棚が形づくられ成長していく。このマクロな過程を観察・記録した。コンピュータ制御のカメラでプログラム撮影して得られる静止画像が本研究の基礎データとなった。

個々の実験ランの間、海水準(水槽内の水位)の上昇速度($R_{slr}>0$)と下降速度($R_{slr}<0$)をそれぞれ時間的に不変とし、堆積物供給速度 Q_s と水流量 Q_w も一定に保った。

(2) デルタ前縁海底水深の(とくにデルタ分流通チャンネルに対する)機能を解明するため、同一堆積盆内に顕著な差別的な水深を設けた実験と、水深を堆積盆内で均一にその大きさをラン毎に変える実験を二次元水槽で実施した。報告者は本研究以前に単一粒径のもとでの実験を行っていたことから(Muto et al. 2011)、本研究では主として二粒径条件のもとでの実験を行った。

(3) もう一つの重要な作業は幾何モデリングである。平衡河川が実現時の河川縦断形は直線で精度よく近似できるため、簡便な幾何モデリングにより堆積系の成長を記述することができる。すでに二次元(断面観察)での幾何モデリングは行われており(Muto & Swenson 2005)、本研究では三次元モデルにより検討を進めた。幾何モデリングはデルタ前縁海底水深の機能を考えるうえでも有用である。

4. 研究成果

(1) 非平衡応答の変遷

海水準変動サイクルの進行とともに、海岸線は前進と後退を繰り返しつつも全体としては海側へ移動していき、デルタ性大陸棚が成長した。初期サイクルにおいては、系はデルタ性海退→デルタ性海進→非デルタ化(オートブレイク)→非デルタ性海進、のフルコースを経験した。海岸線は初め海側へ前進し、やがて陸側への後退に転じた(オートリトリート)。しかしサイクル数を経るにしたがい、海退を経ずにデルタ性海進が起こるようになり、さらには海水準が上昇に転じると同時に非デルタ性海進が起こるようになった。すなわち、多サイクル海水準変動下の河川デルタ-大陸棚系ではサイクルの経過に伴い、非平衡応答それ自体が変遷する。

デルタ系の非平衡応答の変遷はデルタに堆積物を供給している沖積河川の限界長さに関

係する。海水準上昇の下で成長するデルタ系にはデルタ堆積過程を持続することのできる沖積河川の長さに限界があり、それはオート層序学的長さスケールと近似的に等しい。すなわち、海水準下降期にデルタが十分成長して沖積河川の限界長さを超えてしまうと、後続の海水準上昇期の開始とともに非デルタ化する。このことは理論的には予測されていたが(Tomer et al., 2011)、本実験により初めて実証された(図1)。

この新知見は次のような意味をもつ。多サイクル海水準変動を経て十分に発達したデルタ性大陸棚系では、後続のサイクルのもとで非デルタ性海進(海水準上昇期)とデルタ性海退(海水準下降期)とが単調に繰り返すだけである。現在世界の多くの海岸線でデルタが発達しているが、それらの多くはすでに十分に成長しており、沖積河川の限界長さを遥かに超えている。温暖化に伴う海水準上昇が今後顕著になると、デルタは突如として非デルタ化し、非デルタ性の急激な海進を経験するところとなる。デルタの、とくに下流部に立地している都市や集落では、防災上の留意が必要である。

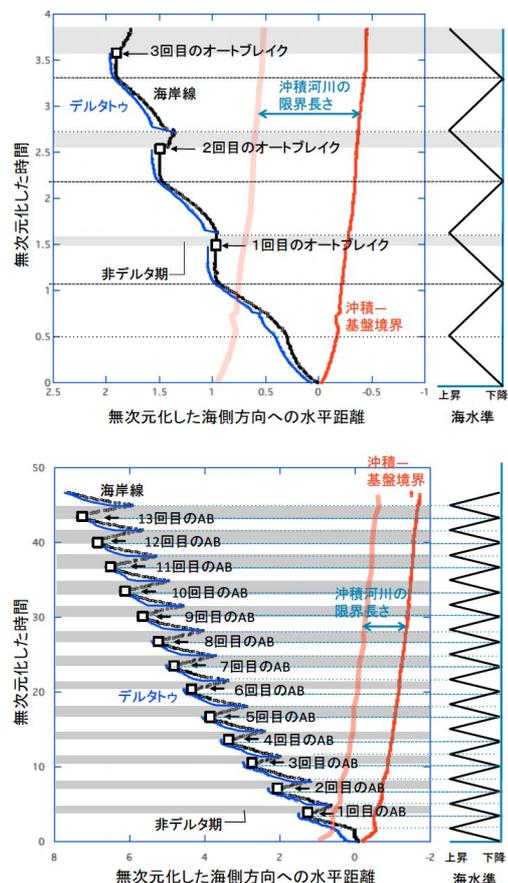


図1 多サイクル海水準変動のもとでの非平衡応答の変遷。上: 3サイクル, 下: 13サイクル。

(2) 移動境界系で実現する平衡河川

多サイクル海水準変動のもとで成長したデ

ルタ性大陸棚の外縁近傍は非デルタ性海進期に生じた無堆積面であるため、その勾配はかつての沖積河川の勾配にほぼ等しい。この地形条件のもとで海水準が一定速度で下降するとき、デルタは陸棚外縁部へのプログラデーションの過程で平衡状態に漸近する。

平衡到達前の分流チャンネルはオートサイクリックな側方移動やアバルジョンを頻繁に経験するが、いったん平衡状態を実現するとそれらの挙動は著しく抑制され、代わりに、分流チャンネル-デルタロブ系が海側方向へ直線的に延伸していく。図2は既存の実験データをこの新しい視点から再整理して得られた活動的海岸線(活動的分流チャンネルの河口部)の移動軌跡と沖積-基盤境界の移動軌跡を示している。この実験のポイントは沖積勾配と海底斜面勾配が等しい点にあるが、仮に沖積勾配が海底斜面勾配より大きければ、堆積系は早期に海岸線と乖離して沖積扇状地化し、埋積していく。逆に、沖積勾配が海底斜面勾配より小さければ、デルタ堆積系は持続するが、侵食谷の形成を伴い、削剥レジームに置かれる。沖積勾配が海底斜面勾配に等しい地形条件の重要性が理解できよう。

オープンな外洋ではないが、カスピ海に流入する現世ボルガ河は平衡への漸近過程をつい最近経験した可能性がある。カスピ海には大陸棚に類似する浅い平坦な海底地形が存在し、20世紀半ばに起こった海水準低下のもとでボルガ河の分流チャンネル-デルタロブ系が数十 km もの距離を、下刻を伴わずにプログラデーションしたことが知られている。本研究の水槽実験に基づくモデルからはボルガ河が準平衡状態を実現していた可能性が示唆される。

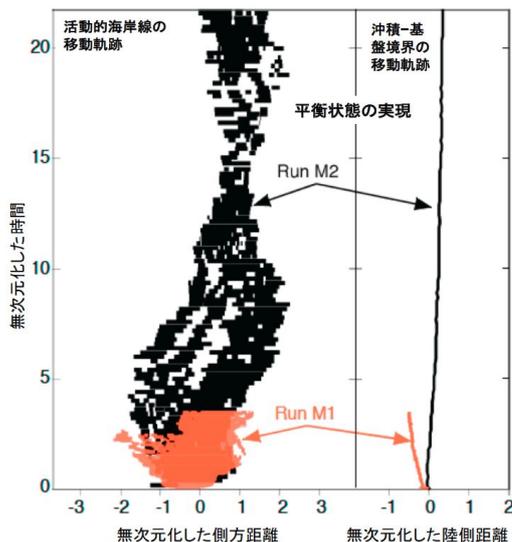


図2 移動境界系における平衡河川の生成実験で得られた活動的海岸線の移動軌跡と沖積-基盤境界の移動軌跡

(3) 固定境界系で実現する平衡河川
陸棚外縁部の沖側海底斜面が非常に深くて

デルタがほとんど前進できないような場合、デルタ上の分流チャンネルは静止海水準のもとでも容易に平衡状態を実現する。

図3は分流チャンネルが平衡状態を実現する前後での活動的海岸線の位置の変遷を示したものである。移動境界系の場合と同様に、平衡状態が実現すると、分流チャンネルはオートサイクリックな側方移動やアバルジョンをほとんど経験しなくなり、側方方向には固定される。移動境界系と異なるのはデルタが前進しないことと、平衡実現時に侵食谷が形成される点でしかない。実際には有意レベルのバリエーションが存在するが、基本的なパターンは変わらない。

天然では、幅の非常に狭い大陸棚縁辺で発達するファンデルタ系で実現しやすいと考えられる。富山海底チャンネルの南側末端の深い海に直面する北陸地域の現世ファンデルタ(e.g. 黒部川デルタ)などはこの実例の可能性がある。

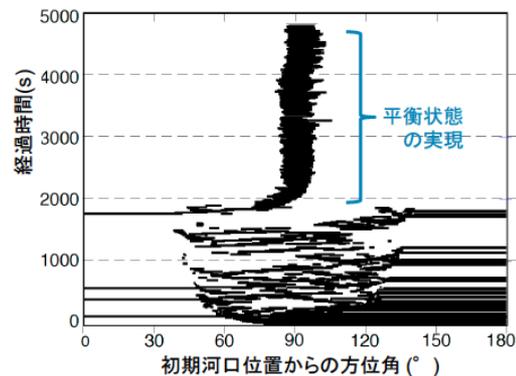


図3 固定境界系のもとで生成したデルタ分流チャンネル(活動的海岸線)の挙動。約1800秒経過した時点でデルタは陸棚外縁に到達し、デルタ上の分流チャンネルはオートサイクリックな側方移動を停止した。

(4) デルタ前縁海底水深の機能

図4は二粒径・静止基準面条件でデルタを生成した実験である。顕著な差別的な水深が存在していても、デルタは大局的には等方的かつ円弧状の海岸線を持続することを例示している。このことは、深い海に流入する分流チャンネルはその位置に長時間とどまり、浅い海に流入する分流チャンネルは短時間で他所へ移ることを意味する。すなわち、デルタ前縁海底の水深がデルタ上の分流チャンネルの挙動に影響を及ぼす。

図5は、均一水深の大きさを変えて行った比較対照実験の結果である。デルタ前縁海底水深の大小によってデルタ分流チャンネルの挙動が大きく異なることが如実に示されている。浅い海に面するデルタの分流チャンネルは不規則性が高く、その詳細なメカニズムについては現在検討中であるが、一つの有力な手がかりは、後述する平衡指数の理解を基礎とする幾何モデリングである。

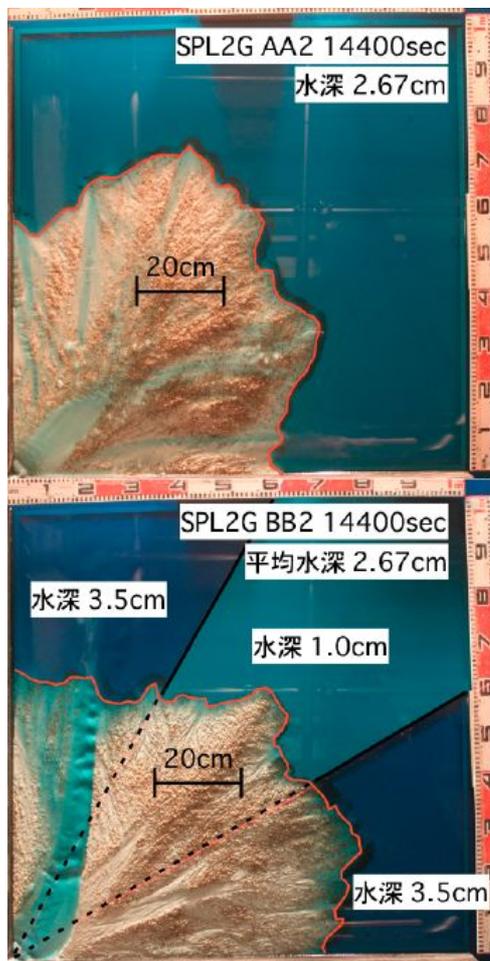


図4 二粒径・静止基準面条件のもとで生成したデルタ。上: 一様水深, 下: 差別的な水深

(5) グレードインデックスモデル

供給物質の保存と堆積斜面勾配の持続を仮定する簡単な幾何学的考察から、デルタ前縁海底水深がデルタ分流チャンネルに及ぼす影響を検討した。

すでに述べたように、深い海に流入する分流チャンネルはそこに長時間滞留し、浅い海に流入する分流チャンネルは短時間しか滞留しない。このことは、デルタ前縁の局所的水深 h が、(i)分流チャンネルの側方移動速度 R_{mig} 、(ii) アバルジョンの発生頻度 f_{avu} 、(iii)分流チャンネルの埋積速度 R_{agg} 、(iv)デルタの前進速度 R_{pro} にも影響を及ぼすことを示唆する。実際、デルタが前進できない ($R_{pro} = 0$) ほどの深い海へ流入する分流チャンネルは河川平衡を実現するとともに、オートサイクリックな側方移動を呈すことなく、同じ位置にいつまでも留まり続ける (i.e., $R_{agg} = R_{mig} = f_{avu} = 0$)。

デルタ前縁の堆積盆水深 h をデルタ陸上部分の平均半径 x と平均沖積勾配 α の積で無次元化すれば、分流チャンネルのダイナミクスに関わる堆積盆水深の相対的效果を数値で表現することができる。すなわち、無次元堆積盆水深 $h^* = h/\alpha x$ とすると、堆積盆水深の効果の

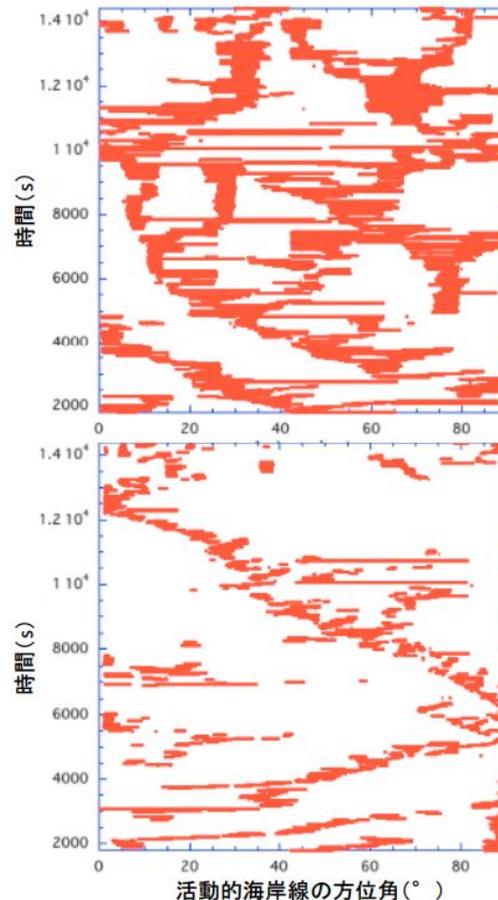


図5 均一水深条件のもとでの活動的海岸線の移動軌跡。上: 水深 1.5cm, 下: 水深 4.0cm。それ以外の条件は全て同じ。

強さは無次元数 $G_{index} = [1 + F(h^*)]^{-1}$ で示される。ただし、 $F(h^*)$ は h^* の関数で、その式は堆積盆の基盤条件により変わりうる。本研究の水槽実験で採用された特殊な基盤条件 (e.g. デルタの背後が垂直壁で堆積盆底が水平) のもとであれば $F(h^*)$ は h^* の 2 次式で与えられる。 $F(h^*)$ がどのような形であれ、 G_{index} は 0 から 1 までの値をとり、デルタ前縁海底の水深がデルタ分流チャンネルに及ぼす影響を表す。 $G_{index} = 0$ ならば河川平衡、 $G_{index} = 1$ ならば完全なる埋積に対応する。このことから G_{index} をグレードインデックス (grade index) と呼んでいる。驚くべきことに、デルタの前進速度 R_{pro} 、沖積埋積速度 R_{agg} 、分流チャンネルの移動速度 R_{mig} 、回帰周期 τ_R 、アバルジョン頻度 f_{avu} などは、水深が極めて小さい場合 ($h \sim 0$) のそれぞれに G_{index} を掛け合わせると、所定の堆積盆水深のもとでの値が得られる。

上の考察は静止海水準を前提としているが、角度パラメータで示される系のジオメトリが壊れない限り、海水準が変動する場合にも成り立つ。たとえば、海水準が一定速度で上昇する際に必然的に起こる海岸線自動後退もまた G_{index} を含む条件式で示される。分流チャンネルのダイナミクスの変遷を調べる二次元水槽実験からは、海水準上昇 (i.e. h^* の増大、 G_{index} の減少) にともなってアバルジョンが頻発す

るフェイズから連続的側方移動が優勢となるフェイズへと遷移することが判明した。分流チャネルの移動形態もまたデルタ前縁の堆積盆水深に強く影響される。

上で述べた、北陸地方における固定境界系の平衡河川の実例と解釈される河川デルタはこのグレードインデックスモデルでも説明することができる。富山湾へ流入する黒部川などの急流河川は数万年前から河岸段丘を発達させているが、これらは当該河川が海水準変動を繰り返し経験しながらも、平衡河川へと進化する過程で生成されたものと考えられる。

引用文献

- Tetsuji Muto, Ron J. Steel, John B. Swenson. 2007. Autostratigraphy: A framework norm to genetic stratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*, v. 77, p. 2-12.
- Arti Tomer, Tetsuji Muto, Wonsuck Kim. 2011. Autogenic hiatus in fluviodeltaic successions: Geometrical modeling and physical experiments. *Journal of Sedimentary Research*, v. 81, p. 207-217.
- Tetsuji Muto, John B. Swenson. 2006. Autogenic attainment of large-scale alluvial grade with steady sea level fall: An analog tank/flume experiment. *Geology*, vol. 34, p. 161-164.
- Tetsuji Muto, John B. Swenson. 2005. Large-scale fluvial grade as a non-equilibrium state in linked depositional systems: Theory and experiment. *Journal of Geophysical Research*, vol. 110 (F), F03002, DOI: 10.1029/2005JF000284
- Tetsuji Muto, Miao Hui, Gary Parker. 2011. How do deltas respond as they prograde over bathymetry that varies in the transverse direction?: Results of tank Experiments. In: Shao, X., et al. (eds.), *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, p. 563-577.

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 4 件)

- Tetsuji Muto, Ron J. Steel, Peter Burgess. 2016. Contributions to sequence stratigraphy from analogue and numerical experiments. *Journal of the Geological Society*, vol. 173, in press. DOI: 10.114/jgs2015-127 【査読あり】
- Tetsuji Muto, Ron J. Steel. 2014. The autostratigraphic view of responses of river deltas to external forcing: A review of the concepts. In: Martinius, A. W., et al. (eds.), *From Depositional Systems to Sedimentary Successions on the Norwegian Continental Margin*, International Assoc. Sedimentologists special publication 46, p. 139-148. 【査読あり】
- Alessandro Cantelli, Tetsuji Muto. 2014.

Multiple knickpoints in an alluvial river generated by a single instantaneous drop in base level: Experimental investigation. *Earth Surface Dynamics*, vol. 1, 483-501, DOI: 10.5194/esurfd-1-483-2013 【査読あり】

Yuri Kim, Wonsuck Kim, Daekyo Cheong, Tetsuji Muto, David Pyles. 2013. Piping coarse-grained sediment to a deep water fan through a shelf-edge delta bypass channel: Tank Experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 118, DOI: 10.1002/2013JF002813 【査読あり】

[学会発表](計 15 件)

- Tetsuji Muto. Avulsion vs continuous channel shifting: the dynamics of delta distributary channels controlled by basin water depth. American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, San Francisco (USA). 2015.12.13-18.
- Tomohiro Sekiguchi, Kazuho Tanabe, Tetsuji Muto. Effect of waves on delta foreset bedding in synchronism with generation of alluvial cyclic steps: 1D flume experiment. European Geosciences Union 2015 General Assembly, Vienna (Austria). 2015.4.12-17
- Tetsuji Muto. A synthetic view of delta progradation, distributary channel stability and alluvial aggradation in terms of the control of basin water depth. American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco (USA). 2014.12.15-19.
- Tetsuji Muto. The autostratigraphic view of non-uniqueness. The William Smith Meeting 2014, London (UK). 2014.9.22-24. 【招待講演・基調講演】
- Tetsuji Muto. A spatial peculiarity of graded alluvial channels in deltaic settings. 2014 International Delta Meeting: Genesis, Dynamics, Modeling, and Sustainable Development, Istomino (Russian Federation). 2014.7.21-24 【招待講演】

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 鉄司 (MUTO, Tetsuji)
長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授
研究者番号: 7 0 2 1 2 2 4 8

(2) 連携研究者

関口 智寛 (SEKIGUCHI, Tomohiro)
筑波大学・生命環境科学研究科・講師
研究者番号: 9 0 4 0 0 6 4 7

佐藤 智之 (SATO, Tomoyuki)
独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員
研究者番号: 8 0 5 5 5 1 5 2