

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21540474

研究課題名(和文)フラッシュ洪水による射流領域の堆積作用およびその地層記録への保存ポテンシャル

研究課題名(英文) Supercritical flow sedimentation of flash floods and its preservation potential in rock records

研究代表者

前島 渉(Maejima, Wataru)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20173700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：フラッシュ洪水堆積物中には射流領域の堆積作用の記録がよく残されていることが、インドの石炭-ペルム系タルチール層、エジプトの完新世段丘堆積物、越前海岸地域の新第三系国見層の検討から明らかとなった。また、射流領域で形成された内部層理には多様性があり、それは反砂堆の形態の多様性を反映しているとみなされる。水路実験により、反砂堆の波高/波長比が水深に規制され、水深が浅いほど反砂堆の波高/波長比が大きくなることが確認された。国見層において、河川洪水流とシート洪水流で形成された反砂堆の形態を比較したところ、後者の方が波高/波長比が大きく、実験結果と調和的である。

研究成果の概要(英文)：Studies of several sedimentary successions revealed that records of supercritical flow sedimentation are well preserved in flash flood deposits. The form of internal stratification of supercritical flow deposits shows wide variability, especially in its amplitude/wave length ratio. This variability in stratification is attributed to the morphological differences in antidune bedforms. The flume experiments show the amplitude/wave length ratio of antidunes is dependent with flow depths; shallower the flow depth, higher the amplitude/wave length ratio. Comparison of forms of internal stratification of in-channel flood deposits and sheet flood deposits in the Neogene Kunimi Formation revealed that the values of amplitude/wave length ratio of antidunes in the latter are consistently larger than the values in the former. This result is compatible with the results of the flume experiments.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：射流 反砂堆 堆積作用 堆積環境 堆積構造 堆積相 シート洪水流

### 1. 研究開始当初の背景

山地と平野の接合部においてカタストロフィックな洪水が発生した場合、洪水流は通常の流れ(常流)とちがって慣性力が重力の作用を上回る射流領域のシート洪水として山麓に広がるのが予想される。カタストロフィックな洪水は、自然状態においては大地震時の山地崩壊による河川のせき止め湖の決壊、気候の温暖化による氷河湖の急速な拡大と決壊、数百年に1回程度の規模の集中豪雨等々によって発生する。地質学的な時間スケールでは、こういった事象の方が定常的なプロセスよりも地層形成に重要な役割を果たしているともいえる。

近年確立されてきた、堆積相の解析による堆積環境や堆積プロセス復元の方法論は、現世堆積作用の知見を基礎として確立されてきた。この基本的なスタンスの妥当性はこの分野の研究の進展により実証されてきたが、一方でカタストロフィックな堆積作用の意義を充分に取り込めてこなかったことも確かである。本研究の研究代表者は、国内外において古生代～新生代にわたる様々な地質時代、造構環境、古気候環境のもとでの扇状地堆積物の堆積相を研究し、古環境の復元や堆積盆の解析に役立ててきた。また、扇状地形成に関わる各種堆積プロセスとその産物、それらの地層記録への保存ポテンシャル等についても意識的に検討を進めてきた。その中で、いくつかの地層では射流領域の大規模なシート洪水が扇状地形成に大きく寄与していたらしいことが明らかとなってきた。シート洪水自体は扇状地形成営力の1つとして古くから知られているが、その役割は河川流や土石流の作用に比べてマイナーなものと捉えられてきた。また、射流領域の流れについては現世からの報告は数多いものの、地層中において認定された例はいまだ少ない。しかもそれらのほとんどはごく小規模な、広がり限定された射流領域の流れによる堆積物である。カタストロフィックな洪水に関連するような、大規模な射流領域の流れのもとでの堆積作用が地層記録から解析された例はない。

射流領域の流れのもとでの安定砂床形は反砂堆であるが、反砂堆および反砂堆起源の内部成層構造について重要な検討課題の一つとして反砂堆の形態がある。反砂堆起源の内部層理の形態には多くのバリエーションが認められることが最近の Fielding (2006) や Maejima et al. (2009) の研究によって明らかにされてきている。反砂堆の形態上の多様性については水路実験においても従来認識されていない。反砂堆の形態を規制する要因を解明することにより、射流領域の大規模シート洪水流の堆積プロセスをより正確に再現でき、堆積環境をより性格に復元できるようになるに違いない。

### 2. 研究の目的

フラッシュ洪水では射流領域の流れが重

要な役割をになうことが予想されるが、射流領域での堆積作用と堆積相についての知見、とくに地層の解析からの知見が現状ではきわめて乏しいといわざるを得ない。射流領域での安定砂床形は反砂堆であるが、地層記録から反砂堆の報告はあるものの、それらは断片的で、射流領域での地層形成を統一的に解明する試みはまだない。射流領域での堆積作用の解明のために、反砂堆および反砂堆起源の内部層理について次の3点が重要な検討課題としてあげられる。

(1) これまで地層から報告されている反砂堆および反砂堆起源の内部層理は水路実験によって造り出される反砂堆に比較しうる小規模なものが主体で、規模の大きな層理構造はほとんど知られていない。しかし、現世環境では規模の大きなフラッシュ洪水時に大規模な反砂堆が形成されることが知られている。大規模な反砂堆起源の内部層理はその全体像を把握しづらいこともあり、常流領域での水平層理と誤解釈されている可能性が高い。地質時代の地層中に大規模な反砂堆起源の内部層理を的確に認定し、水平層理との差違を明確にしなければならない。

(2) 反砂堆起源の内部層理は浅海域におけるストーム起源のハンモッキー斜交層理と類似しており、その識別は層理そのものからはむつかしく、他の識別基準が必要とされている(Yagishita, 1994 など)。しかし、本研究申請者のこれまでの調査研究では、いまだ識別困難な場合があるものの、層理自体から両者の識別を可能にしつつある。さらに検討事例を増すとともにそれぞれの堆積環境解析の裏付けのもとで、両者の差違をいっそう明確にする必要がある。

(3) これまで報告されている反砂堆起源の内部層理はいずれもトロコイド波で近似できる典型的な形態の反砂堆に対応している。しかし本研究申請者のこれまでの調査研究によると、反砂堆起源の内部層理の形態には多くのバリエーションが認められる。反砂堆の形態上の多様性については水路実験においても従来認識されていない。射流領域のシート洪水流では既存微地形、堆積による砂床のかさ上げなどによる流速や水深のわずかな変動により流れ特性が容易に変化し得るにちがいない。このような変化が反砂堆起源の内部層理の形態上のバリエーションを生み出している可能性がある。地層の解析とともに水路実験により、反砂堆の形態を規制する水理要因を明らかにする必要がある。

### 3. 研究の方法

野外調査研究を主体とし、実験研究を合わせて行なう。野外調査研究では、これまでの検討によりフラッシュ洪水による射流領域の堆積作用を記録しているとみなされる地層を重点的に取り扱う。具体的には、国内では福井県越前海岸地域の新第三系国見層、国外ではインド東部のタルチール・ゴンドワナ堆積盆のペルム-石炭系タルチール層、エジ

プト、ファイユーム盆地の完新世段丘堆積物を対象とする。これらの地層について、堆積物の内部および外部堆積構造、単層形態、累重パターン、堆積相の側方変化などを検討し、射流領域の洪水流堆積物の認定基準の確立を目指す。

実験研究では、循環式水路を用いて射流領域の流れのもとでの反砂堆の形成過程、形態上のバリエーション、安定性などを流れの諸特性を変えて検討し、反砂堆起源の内部層理の多様性をもたらす要因を解明する。

#### 4. 研究成果

(1) タルチール層はインドの下部ゴンドワナ累層群最下部の地層で、石炭紀末からペルム紀にかけてのゴンドワナ氷床の消滅過程で形成されたとみなされている。氷床の衰退の初期段階において、大量の粗粒物質の供給によって氷縁湖に形成された急斜面性ファンデルタでは、氷河の崩壊や山間の氷河湖の決壊に起因する大規模なシート洪水流が頻発し、射流領域での堆積作用が起こったと考えられている (Maejima et al., 2004)。急斜面性ファンデルタ堆積物は土石流起源の礫岩や水流堆積物であるトラフ型および平板型斜交層理を示す礫岩・砂岩などから構成される。この中に、平行層理および低角度の斜交層理を示す厚さ 7 m 程度の砂岩層がはさまれる。低角度斜交層理はおおむね  $10^\circ$  以下の傾斜をもつ、ゆるやかに湾曲したラミナからなる。ラミナの傾斜にめだつた優先方向はなく、形態・規模ともにハンモッキー斜交層理と同様の構造を示す。ただし、下位を浸食する凹型のラミナは比較的少なく、凸型に盛り上がるラミナが良く観察される。このような凸型のラミナは数 m から 10 数 m の波長をもつことが普通で、比高は 20cm から 40cm 程度のことが多い。立体的にはやや延びたマウンド状の形態をなしていることが、ラミナ面が広く露出するところで確認できる。ハンモッキー斜交層理に酷似した構造は河川成堆積物など一方向流のもとで堆積した地層からも知られており、反砂堆の堆積構造とみなされている。タルチール層中の低角度斜交層理も反砂堆起源の構造と考えることができる。凸型に盛り上がるマウンド状のラミナは反砂堆のベッドフォームが保存されたものであり、波長 10 数 m におよぶ大規模な反砂堆が形成されていたことがうかがえる。

反砂堆起源の内部層理は形態上の特徴から大きく 4 種に類別できる。それらは バックセットラミナをとまなう、波長に比して起伏の大きなマウンド状の層理、上方に凸の低角度斜交層理、長波長で緩やかに湾曲する低角度斜交層理、緩やかな凹部と比較的急峻な凸部からなる二次元ベッドフォームである。これらは内部層理を形成した反砂堆の形態に多様性があったことを意味する。

(2) エジプト、ファイユーム盆地の完新世段丘堆積物の研究においては、反砂堆起源の内部層理を的確に認定し、その成因を解明する

ことができた。

ファイユーム盆地はエジプトの西部砂漠の東端近くにある低地帯で、その北部は海拔 0 m 以下の標高となっている。盆地の北縁にあるカルン湖はもともとナイル川の増水期に氾濫水が流路を形成してファイユーム盆地に流入することによって形成されたのであるが、紀元前 20 世紀に中王国第 12 王朝のアメンエムハト I 世が運河を掘削・整備してナイル川の水をカルン湖に引き入れたことにより湖域が一気に拡大し、海拔 -2 m 程度であった湖水位は海拔 +18 m にまで上昇した。この高湖水位は紀元前 3 世紀初頭まで続いたが、その後の運河の人為的改変などによりナイル川からの流入がなくなるとともに、蒸発により湖水位は下降を続け、現在の湖水位は海拔 -45 m となっている。

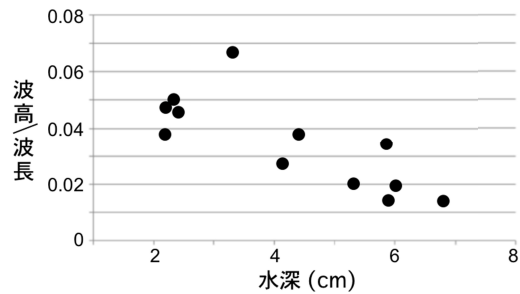
カルン湖の最拡大期に湖縁辺に堆積した地層が湖の北側の古第三系からなる後背山地との境界に段丘をなして断片的に残されている。これらの完新世段丘堆積物は厚さ 10 m 前後で、中～下部は主としてデルタのフォアセット～ボトムセット、上部はバハーダ (bajada) ～デルタのトップセット起源の堆積物とみなされる。段丘堆積物の分布の西端部では、トップセット、フォアセット、ボトムセットが明瞭なギルバート型デルタが保存されている。

バハーダ～トップセット堆積物は砂および礫まじり砂を主体とし、薄い砂質シルト、シルト、粘土をとまなう。土壌化をうけている層準がいくつか確認できる。また、植物の根や根跡が密集することもある。砂層および礫まじり砂層は厚さ 10～60 cm でシート状の形態をなしており、側方への層厚変化は小さい。礫まじり砂層は正級化もしくは逆級化-正級化を示し、礫の配列や濃集度のちがいによる弱い成層構造をもっており、ハイパーコンセントレーテッド流からの堆積物と考えられる。砂層の内部構造として水平層理、緩く湾曲した低角度斜交層理がよく観察されるほか、平板型斜交層理、リップル葉理、ところによりトラフ型斜交層理も見られる。このうち、緩く湾曲した低角度斜交層理はハンモッキー斜交層理に類似しているが、下位を浸食する凹型のラミナは少なく、凸型に盛り上がるラミナが特徴的で、反砂堆起源の堆積構造とみなされる。フォアセット堆積物は砂を主体とし、一部に礫まじり砂をとまなう。内部成層構造として水平層理やリップル葉理、反砂堆起源とみなされる低角度斜交層理が認められる。また、フォアセットをはい登るバックセット層理がところによりはさまれており、シュート・アンド・プールによって形成された構造と考えられる。ボトムセット堆積物は主として砂からなり、まれに砂まじりの泥がはさまれる。砂層の内部成層構造としては水平層理やリップル葉理がよく観察されるほか、ところにより反砂堆起源とみなされる低角度斜交層理も確認できる。

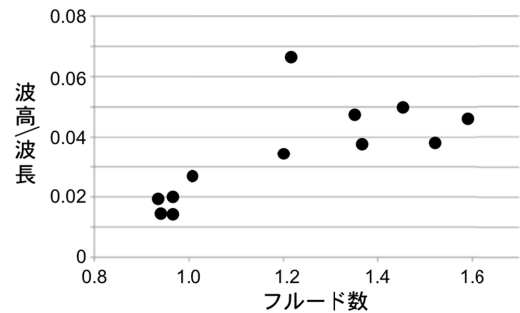
バハーダ〜トップセット堆積物中にはチャネル堆積物が認められず、砂や礫まじり砂は側方によく連続するシート状の形態をもっていること、水平層理や反砂堆起源の低角度斜交層理が普遍的に認められることから、このデルタの形成には河川の定常的な水流作用ではなくシート洪水流が深く関わっており、射流領域の流れも頻繁に発生していたと考えられる。反砂堆起源の低角度斜交層理が普遍的にみられることは流れの流速が極めて速く、かつ流れの深さが浅かったこと、また流れの継続時間が短く、流れの減衰過程で反砂堆相堆積物が修飾・破壊をうけなかったことを意味しており、突発的なシート洪水流がデルタの形成に重要な役割を果たしていたことがうかがえる。また、ハイパーコンセントレーテッド流からの堆積物と考えられる礫まじり砂層が頻繁にはさまれることもこのような考えと調和的である。カルン湖の北側では後背山地が湖に近接しており、フラッシュ洪水流が山地麓からシート状に広がって湖に流入し、ギルバート型デルタを形成していったと考えられる。フォーセット堆積物中にも反砂堆起源の低角度斜交層理がよく見られるが、これらは湖水位が低下したときに洪水流がフォーセット斜面を流下したことを示唆する。また、バックセット層理の存在は洪水流がフォーセット斜面を流下する際に流速が増し、反砂堆よりもさらに高領域の砂床形であるシュート・アンド・プールが形成されたことを示す。

(3)実験研究では、全長約 12 m の大型水路の上・下流端を除いた長さ約 6 m 部分にアクリル板を設置し、水路幅を 12 cm に狭めて実験を実施した。使用した砂は平均粒径 0.087 mm の豊浦砂である。射流領域の水流実験を合計 11 回おこなった。作りだした水流の流速の範囲は 62.9~100.0 cm/s、水深の範囲は 2.2~6.8 cm、フルード数の範囲は 0.94~1.59 である。

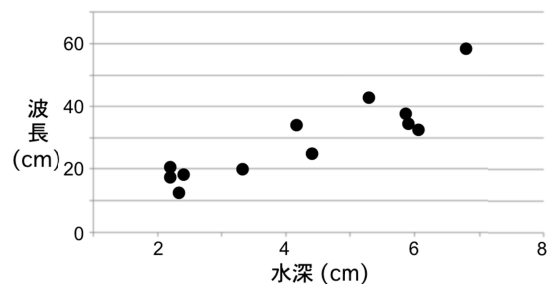
形成された反砂堆は形態的に同一ではなく、多様である。波長の長い、きわめてゆるやかな波形をもつものから、波長が短く、起伏の大きいものまで、バリエーションに富む。反砂堆の波高/波長でみると、0.014~0.067 の範囲で連続的な分布を示す。波高/波長の値が広い範囲に連続的に分散することは、何らかの水理因子が反砂堆の波高/波長を規制していることを示唆する。波高/波長の違いが何に起因するのかを考察するために、波高/波長とフルード数、流速、水深との関係を見てみると、水深が深いほど波高/波長の小さな、つまり、より緩やかな波形を示す反砂堆が形成されていることがわかる(第 1 図)。波高/波長とフルード数も強い相関を示しており、フルード数のより大きな流れほど波高/波長の大きな、つまり、よりうねりの強い波形の反砂堆が形成されている(第 2 図)。一方、波高/波長と流速との間には有意な相関関係はみられない。次に、波高/波長の連



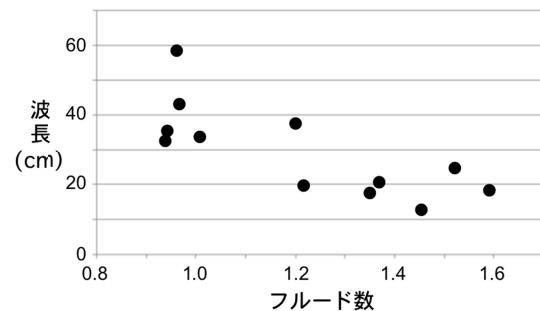
第 1 図 波高/波長と水深との関係



第 2 図 波高/波長とフルード数との関係



第 3 図 波長と水深との関係



第 4 図 波長とフルード数との関係

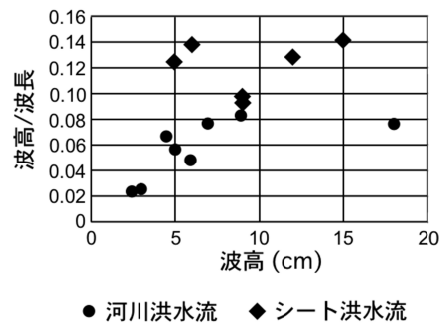
続的な系列分布が波高のちがいによるものか、波長のちがいによるものか、あるいは両方によるものかを検討してみると、波高は流速、水深、フルード数とは関係をもたないことがわかる。波長に関しては、流速とは関係性が認められないが、水深およびフルード数との間に強い相関がみられる(第 3, 4 図)。すなわち、水深が深いほど、またフルード数が小さいほど、波長の長い反砂堆が形成されている。波高/波長と水深、フルード数との関係は波長と水深、フルード数との関係と良く対応しており、波高/波長の値は主として波長によって決まるといえる。

本研究において作りだされた反砂堆では

その波長が水深およびフルード数に規制されていること、波長のちがいによって反砂堆の形態上の多様性の指標となる波高/波長の値が決まることがわかった。では、波長そして波高/波長が水深とフルード数のどちらに依存しているのだろうか。開水路の流れにおけるフルード数は慣性力と重力の比であり、水深がフルード数の一つのファクターとなっている。そのため、水深とフルード数のどちらが反砂堆の波長あるいは波高/波長に関わっているのかを速断することはできない。フルード数を決定するファクターとしては水深のほかに流速がある。波高/波長と水深、フルード数の間には有意な関係がみられるものの、波高/波長と流速との間には関係性が認められない。このことから、反砂堆の波高/波長は直接的には水深に依存しており、その反映としてフルード数とも関係性を示しているとみなされる。ただし、本研究で作り出した反砂堆は波高/波長ともに限定された範囲内である。そのため、反砂堆の波高/波長に関わる水深が、絶対的水深であるのか、波高あるいは波長に対する相対水深であるのかは不明である。

(4)福井県の新第三系国見層の大味砂岩泥岩部層上部は扇状地起源の堆積物から構成されており、大きく3つの堆積相組み合わせが認定・識別される。堆積相組み合わせAは礫岩を主体としており、土石流と河川流が運搬・堆積の主な作用であるとみなされ、上部扇状地で堆積したと考えられる。堆積相組み合わせBは上方細粒化シークエンスをなす砂岩とシルト岩薄層から構成されており、中部扇状地において網状河川によって堆積したと考えられる。堆積相組み合わせCはおおむね厚さ50 cm以下で成層する砂岩から構成される。ところにより砂岩層間に薄い泥岩がはさまれ、砂岩優勢の砂岩泥岩互層となる。この堆積相組み合わせは中部扇状地から下部扇状地にかけて、チャネルからあふれ出た洪水流が扇状地表面をおおってシート洪水流となって流下することにより形成されたとみなされる。

堆積相組み合わせBと堆積相組み合わせCにおいて、緩やかに湾曲する上方に凸型の形態をもつ内部成層構造が確認できる。このようなラミナは反砂堆起源のものであると考えられる。この反砂堆起源の内部層理は二つの異なる堆積作用によって形成された砂岩層中にみられる。1つは網状河道での堆積を示す上方細粒化シークエンス上部の砂岩層で、他の一つはチャネル末端から広がるシート洪水流によって堆積した砂岩層である。今回の調査対象とした露頭断面はほとんど全て古流向に対して平行である。そのため、層理面に直交する断面において、反砂堆起源の内部層理を古流向に対して直交する方向から観察することが可能である。そこで、反砂堆起源の内部層理の形態の違いを波高/波長の値に着目して検討した。緩やかに湾曲する



第5図 堆積作用別の反砂堆の波高/波長比

ラミナの波長は40~240 cm、波高は3~18 cmである。波高/波長の値は0.025~0.143と変化に富んでおり、国見層で見られる反砂堆起源の内部層理の形態に多様性があることを示している。この波高/波長の値が小さくなるにつれてゆるやかな内部成層構造が、大きくなるにつれて相対的に振幅の大きな内部成層構造がみられることを表している。

河川洪水流による堆積作用と、シート洪水流による堆積作用の2種類の堆積作用によって形成された反砂堆起源の内部成層構造の形態の違いがあるかどうかを波高/波長の値を基に検討した。前者の波高/波長の値の範囲は0.025~0.082、後者の波高/波長の値は0.098~0.140で、両者に有意な差が認められる。つまり、河川洪水流によって形成されたものの方がシート洪水流によって形成されたものに比べて相対的に緩やかな内部層理を形成しているといえる。波高/波長の値が広い範囲に連続的に分散することは、何らかの因子が反砂堆起源の内部層理の波高/波長を規制していることを示唆する。前島・小川(2012)は水路実験の結果に基づき、反砂堆の波高/波長は水深に規制され、水深が深いほど波長が長く波高/波長の小さなゆるやかな形態をもつ反砂堆が、水深が浅いほど相対的に振幅の大きな形態をもつ反砂堆が形成されると報告している(本研究成果の(3))。地層中に認められる反砂堆起源の内部成層構造の多様性は砂床形としての反砂堆の波高/波長を反映している可能性が高く、このような多様性は水深の違いによって生み出されていると考えられる。シート洪水流は先述した通り非常に浅く、水深は一般的に50 cmよりも低いという特徴をもつ。実際に流れるシート洪水流の水深は10 cm~20 cm程度のことが多いであろう。一方、河川チャネルを流れる河川洪水流はそのチャネルによって流れが側方規制されているため、中州頂部においても、一般的にシート洪水流と比べると深い流れであると考えられる。これらのことから、本研究で見られる反砂堆起源の内部層理は、堆積作用を受けた当時の水深が浅いほど波高/波長の値の大きな起伏の大きい反砂堆が形成され、水深が深いほど相対的にゆるやかな波形を示す反砂堆が形成されていたことを示している。つまり、国見層にみら

れる反砂堆起源の内部成層構造の多様性は反砂堆が形成された当時の水流の水深の違いを反映している可能性が高いと考えられる。反砂堆起源の内部層理に多様性があることはFielding(2006)やMaejima et al.(2009)によって指摘されているが、その多様性がどのような水力学的意味をもっているのかについてはこれまで全く議論されてこなかった。本研究によりその一端が解明されたといえる。

#### 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 1 件)

Maejima, W., Hota, R. N. and Mishra, B., Antidunes and antidune stratification in the Permo-Carboniferous Talchir Formation, Talchir Gondwana basin, Orissa, India, Journal of Geosciences, Osaka City Univ., 査読有, Vol. 52, 2009, pp.11-20

[学会発表](計 1 件)

前島 渉、小川尚真、反砂堆の形態の多様性 特に波高：波長比について、日本地質学会第119年学術大会、平成24年9月16日、大阪府立大学

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

前島 渉 (MAEJIMA, Wataru)  
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：20173700