

課題別総括：水路実験

Summary of Studies on Flume Experiments

関口 智寛*

Tomohiro SEKIGUCHI*

I はじめに

陸域環境研究センターでは、前身の水理実験センター時代より、大型水路実験施設をはじめとする水理実験施設を用いて地形変動・土砂輸送過程の実験的研究、実験手法開発を行ってきた。陸域環境研究センターへの改組後、水理実験棟が新設され（2007年）、二次現造水路の更新（2008年）、二方向振動板装置（2008年、第1図）および造波機付き小型循環水路の導入（2009年）など浅海プロセス実験に対応した設備が強化・拡張された。これにより、河川・斜面プロセス実験を中心とした研究から浅海プロセス実験を含めた多角的な研究への移行が進んだ。

近年、土木工学分野を中心に、堆積物輸送の流体力学と粒状体動力学の視点からさまざまな地球表層地形の形成過程と動態を考察する「モルフォダイナミクス」が盛んになっている。一方、地質学分野では堆積系の大規模オートジェネシスと非平衡応答の理解に根差した新しい成因論的層序学「オート層序学」が誕生した。また、これらを基に地形と地層の形成過程を統合的かつ包括的に解明する力学ベースの新しい地層学枠組み「ストラトダイナミクス」の開拓を進める国際的な動きがある。このような流れを受け、本センターではこれらの関連グループと連携をとりながら研究を進

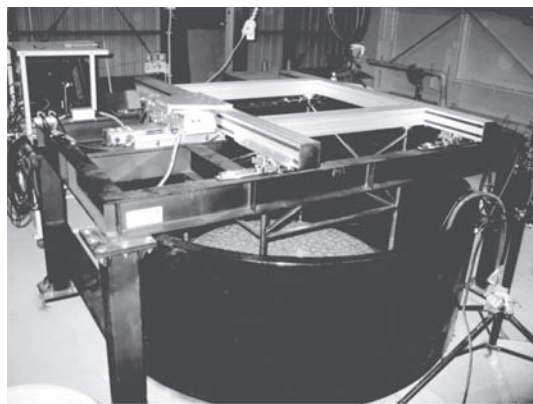
めてきた。

以下、本稿では本センター水理実験施設を活用した研究を中心に、水路実験研究の成果について①河川プロセスに関する研究、②浅海ベッドフォームに関する研究、③浅海プロセスと地層形成に関する研究に分けて概説する。

II 河川プロセスに関する研究

1. 河川形状に対する植生の影響

河床に存在する植生は、底面粗度を増加させて河川流に影響を及ぼすほか、根系の発達により砂礫を保持するなど、河道形状に影響を及ぼし得る



第1図 二方向振動板装置（関口, 2008）

* 筑波大学陸域環境研究センター

ことが指摘されている。目代ほか（2003）は、その実証として、大型水路内の河床に植生を繁茂させて通水実験をおこなった。それにより、植生が河川流に影響し、結果的に河道形状に影響すること、および堆積物の平面的分級に影響することを確認した（第2図）。この研究について、国際講演会「河畔植生が網状流河道の形状に及ぼす影響」を開催し、同様の実験を行っていたミネソタ大学のグループと情報交換した。

2. 岩盤河川の侵食

岩盤河川においては、侵食作用により地形変化が起き、環境変動の痕跡が刻み込まれる。岩盤侵食の素過程の理解を深めるため、滝つぼを形成する小型水路実験を行った（井口，2008；井口・関口，2008；井口，2010）。その結果、河川水内の碎屑物粒子の有無により侵食速度が大きく異なることを確認した。特に細粒碎屑物が含まれる場合、

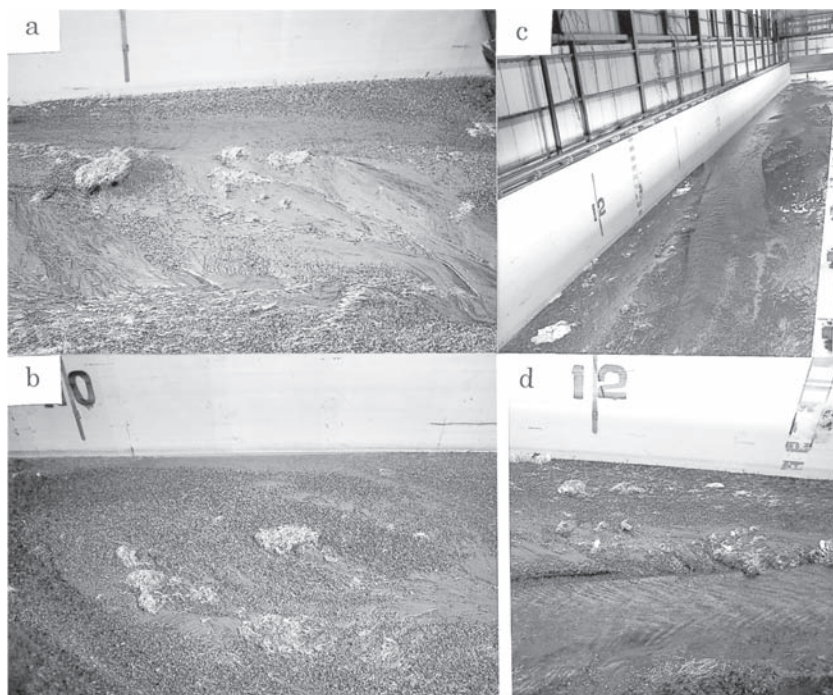
滝つぼ周辺のみが侵食を受け、水の作用角が碎屑物粒子の侵食への寄与に影響することが示唆された。

3. 河床礫の磨耗

河床礫のサイズは河川の縦断形に影響すると考えられているなど、河川地形を支配する重要な要因の一つである。河床礫のサイズに影響する磨耗作用については、回転ドラムなどを用いた実験が一般的であり、河床礫の流下そのものによる磨耗に関する実験事例は乏しい。新井（2009）は大型水路を用いた河床礫の流下実験を行い、河床礫の磨耗速度が河床礫の形状と流下様式に強く依存することを示した。

III 浅海ベッドフォームに関する研究

ベッドフォームとは非固結堆積物に、一方向



第2図 植生影響下で形成された河道（目代ほか，2003）

流、波浪（振動流）、風といった流体運動が作用して形成される地表形状の総称である。ベッドフォームは、流体運動、土砂輸送に影響するほか、地層中の堆積構造から過去の水理環境を読み解くための鍵となる。このため、特に、安定な流体運動下で形成される定常ベッドフォームについて、流体運動や堆積物の特性との関係が古くから議論されており、一方向流や一次元振動流がつくるベッドフォームの理解が深められてきた。本センターにおいては、複合流や干渉波下の二次元振動流など、既往研究では扱われてない複雑な流体場、および流体運動条件の変化に対応したベッドフォームの遷移に注目し、モルフォダイナミクスの観点に立って、ベッドフォーム研究を進めてきた。

1. 複合流下における定常ベッドフォーム

浅海域においては、沿岸流、離岸流、潮流、海流、吹送流、堆積物重力流といった一方向流が存在し、それらが波浪に生起する振動流と共存して複合流をなすのが一般的である。このため、浅海域のベッドフォームの特性を理解し、底面粗度を適切に予測するためには、純粋な振動流によるベッドフォームだけではなく、複合流ベッドフォームの特性を明らかにする必要がある。

複合流実験は、装置上の制約により、一方向流と振動流（波浪）の進行方向が平行な条件で行われることが多い。そのような複合流下では、ベッドフォームの断面形状が一方向流と振動流の強度比に依存することが既往実験により指摘されているが、実験データの蓄積は不十分であり、さらなる研究が求められている。造波機付き小型循環水路を用いた当センターの短周期複合流研究では、一方向流・振動流強度比による断面形変化の程度が波浪周期に依存することを明らかにし（Sekiguchi and Yokokawa, 2008）、複合流ベッドフォームの粒径依存性について検討した（沼田, 2010）。また、複合流ベッドフォーム上の渦流の

特徴について計測した（Takagawa *et al.*, 2010）。さらに、イリノイ大学バン・テ・チョウ研究所の大型複合流トンネルを用いて中周期複合流実験を行い、ベッドフォームの特性を明らかにした（Yokokawa *et al.*, 2009；Perillo *et al.*, 2010；Yokokawa *et al.*, 2011）。

これに対し、Lacy *et al.* (2007) は、当センターの大型水路内に振動板装置を設置することで、一方向流に対して砂床を任意の角度で振動させることを可能にし、一方向流と振動流が斜行する複合流実験を行った。この研究により、複合流リップルのオリエンテーションが、振動流向とベッドフォームの移動方向に強く依存していることを明らかにするなど、複合流ベッドフォームの理解が深められた。

2. 重複波下における定常ベッドフォーム

天然の波浪は複数の波浪成分の重ね合わせからなり、各波浪成分の進行方向、周期、波高が異なる場合、底面付近には複雑な水平軌跡を描く振動流が発生する。そのような複雑な振動流は、ある種の規則的三次元リップルの形成に寄与する可能性が指摘されているものの、その実証に適した実験機器が存在しなかった。そこで本センターでは、新たに二方向振動板装置（関口, 2008；第1図）を開発し、複雑な振動流によるベッドフォームのアナログ・シミュレーションをおこなった。これにより、二次元振動流と三次元定常リップルの関係が明らかにされつつある（関口, 2011b；Sekiguchi, 2011）。また、二次現造波水路を用いて、入射波と反射波が 180° をなす部分重複波下のベッドフォームについて検討し、各所に出現する振動流リップルがそれらの直上の振動流条件と整合的であることを確認した（Yamaguchi *et al.*, 2007；Yamaguchi and Sekiguchi, 2011）。

3. ベッドフォームの遷移に関する研究

自然界において水理条件は変化し続けるため、

ベッドフォームは定常状態から別の定常状態へと断続的に遷移を繰り返す。つまり、ベッドフォームは常に定常状態にあるわけではなく、ベッドフォームを動的に理解するためにはベッドフォーム遷移の研究が不可欠である。この研究では、アロジェニックな観点に立ち、水理条件の変化に対応したリップル遷移について研究した。それにより、ベッドフォームのサイズの増加と減少のプロセスが異なり、それらの過程において遷移前のリップルと流れ場、堆積物特性を反映した特徴的な遷移ベッドフォームが見られることを示した (Sekiguchi and Sunamura, 2005 ; Sekiguchi, 2009 ; 関口, 2011a ; Sekiguchi, 2012 ; 新井, 2012)。特に新井 (2012) では、二方向振動板装置を用いて振動流の方向変化による三次元遷移リップルの形成条件を明らかにした。また、堆積構造中の遷移ベッドフォームの痕跡に注目することで、過去の水理条件の変動をとらえられる可能性を指摘した (Sekiguchi, 2005)。

IV 浅海プロセスと地層形成に関する研究

地形変動には、外的条件の変動に対する地形の応答 (アロジェニックな変動) と、外的条件が一定にもかかわらず系内の緒作用が変化して生じる変動 (オートジェニックな変動) の2種類に大別され、自然界の地形変動はこれらが組み合わせとして解釈できる。このため、地層に記録される地形変動の履歴を適切に解明するためには、アロ

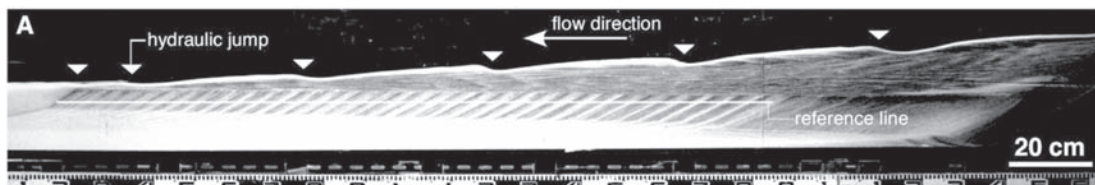
ジェニックな変動、オートジェニックな変動双方への理解が不可欠である。本センターにおいては、浅海域における地形・地層形成プロセスの解明 (岡崎ほか, 2004 ; 竹上, 2010) と合わせ、地形変動と地層形成に関する研究を進めた。

1. 急激な相対的海水準変動に対する浅海堆積相のアロジェニックな応答

波浪卓越型海岸の沿岸域では、営力変動に対するアロジェニックな地形応答によって、前浜、上・下部外浜に特徴的な構造を示す堆積相が形成される。海岸の前進により形成される一連の堆積シーケンスは、過去の相対的海水準変動の履歴を反映した浅海堆積相の空間分布を示すと考えられており、相対的海水準変動の復元が試みられている。山口・関口 (2012) は、パラメータを単純化した造波水路実験により、急激な相対的海水準低下が浅海堆積相にどのように記録されるかを検討した。結果、急激な相対的海水準変動は、前浜相-上部外浜相境界の高度変化として記録されるのに対し、上部外浜相-下部外浜相境界には明瞭には記録されない場合があることを示した。

2. デルタ前置層に見られるオートジェニックな変動

デルタ前置層にはしばしば周期的な粒径変動が見られ、それらは潮汐や周期的なイベント発生などと関連づけてアロジェニックに解釈されることが多い。しかし、Muto *et al.* (2012) は、外的条



第3図 サイクリック・ステップの遡上により形成されたデルタ前置層の周期的粒径変化 (Muto *et al.*, 2012)

件を小型水路実験により、サイクリック・ステップの発生・遡上という一連のオートジェニックな地形ダイナミクスによっても、デルタ前置層の粒径変動が形成されうることが明らかにした（第3図）。このような地形ダイナミクスと地層形成ダイナミクスの関連性は、ストラトダイナミクスの観点の重要性を改めて示したものと見える。

V まとめ

モルフォダイナミクス、オート層序学と、それらを融合させたストラトダイナミクスの研究において、モデル実験はその中核をなす。本センターにおける一連の実験的研究はこれらの研究分野の発展に一定の役割を果たし、本センター水理実験施設がストラトダイナミクスという新研究分野の確立を目指す国際的な流れの中で、中核実験拠点の一つとなりうることを示した。今後、水理実験施設を利用した研究をさらに発展させ、関連分野のトランスディスプリナリな実験拠点となることを期待したい。

参考文献

- 新井賢造（2009）：大型水路を用いた人口岩石の摩耗実験。筑波大学卒業論文，39p.
- 新井賢造（2012）：振動流の方向変化によるリップル遷移に関する振動板実験。筑波大学修士論文，39p.
- 井口達也（2008）：滝つぼ形成実験：流量・落差の影響。筑波大学卒業論文，42p.
- 井口達也（2010）：滝つぼ形成実験：細粒研磨材・流量の影響。筑波大学修士論文，55p.
- 井口達也・関口智寛（2008）：人工岩石を用いた滝つぼ形成実験に関する予察的報告。筑波大学陸域環境研究センター報告，9，43–48.
- 岡崎浩子・池田 宏・目代邦康・飯島英夫（2004）：更新統ギルバート型三角州前置層の形成過程推定のための基礎実験。筑波大学陸域環境研究センター報告，5，41–50.
- 関口智寛（2008）：二方向振動板装置の開発。筑波大学陸域環境研究センター報告，9，25–28.
- 関口智寛（2011a）：ウェーブリップルの遷移過程。地質学雑誌，117，141–147.
- 関口智寛（2011b）：浅海域の多角形リップル地質学雑誌，117，VI.
- 竹上 秀（2010）：デルタの発達における波浪の影響。筑波大学卒業論文，60p.
- 沼田慎吾（2011）：極細粒砂を用いた複合流ベッドフォーム実験。筑波大学卒業論文，65p.
- 目代邦康・池田宏・飯島英夫・小松陽介・斎藤健一（2003）：河床形状に及ぼす植生の影響に関する大型水路実験。筑波大学陸域環境研究センター報告，4，129–134.
- 山口直文・関口智寛（2012）：造波水路実験で形成された前浜一上・下部外浜相の空間分布。日本堆積学会，北海道大学。
- Muto, T., Yamagishi, C., Sekiguchi, T., Yokokawa, M. and Parker, G. (2012): The hydraulic autogenesis of distinct cyclicity in delta forest bedding: flume experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 82, 545–558.
- Perillo, M. M., Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Hasegawa, Y., Pedocchi, F., Garcia, M. H., and Best J. (2010): Bedform morphology under combined flows. The American Association of Petroleum Geologists 2010 Annual Convention & Exhibition.
- Sekiguchi, T. (2005): Ripples with secondary crests as a possible indicator of palaeo-wave direction: a laboratory experiment. *Journal of the Geological Society of Japan*, 111, 182–186.
- Sekiguchi T. (2006): A dataset of wave-flume experiments of the threshold for ripple formation on beds with perturbations.

- Bulletine of the Environmental Research Center the University of Tsukuba*, **7**, 125–133.
- Sekiguchi, T. (2009): Transient 3D-patterned ripples appear during deformation of a 2D ripple field under wave-induced oscillatory flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**, 839–847.
- Sekiguchi T. (2011): Ripples under two-dimensional oscillatory flow: a two-directional oscillatory-bed experiment. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 433.
- Sekiguchi T. (2012): Dataset of a Wave-Flume Experiments of the Ripple Deformation. *Bulletine of the Environmental Research Center the University of Tsukuba*, **12**, 41–53.
- Sekiguchi, T. and Sunamura, T. (2005): Development of characteristic ripple patterns in response to the change in wave conditions: a laboratory experiment. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **26**, 29–45.
- Sekiguchi, T. and Yokokawa, M. (2008): Effects of wave period on combined-flow bedforms a flume experiment. *Marin and River Dune Dynamics III*, 281–284.
- Takagawa, T., Yokokawa, M., Sekiguchi, T., and Azuma, R. (2010): Vorticity distributions over combined-flow ripples. 18th International Sedimentological Congress, Mendoza.
- Yamaguchi, N., Sekiguchi, T. and Masuda, F. (2007): Cross-shore ripple variations under laboratory partially standing waves: a possible clue to paleo-wavelength. *Journal of Sedimentological Socicety of Japan*, **64**, 15–19.
- Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T. (2011): Ripples under laboratory partially standing waves. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 433.
- Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Perillo, M. M., Hasegawa, Y., Pedocchi, F., Garcia, M. H. and Best, J. (2009): Bedform morphology under combined flows with a 6-second oscillation period. Paper presented at American Geophysics Union 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA.
- Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Perillo, M.M., Garcia, M.H., and Best J., Pedocchi, F. (2011): Bedform morphology and their sedimentary structures under combined flows with 4- and 6-second oscillation periods. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 498.