

海底混濁流によって形成される界面波

Boundary waves formed by submarine turbidity currents

北海道大学工学部環境社会工学系 ○学生会員 萩澤さくら (Sakura Hagizawa)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 泉 典洋 (Norihito Izumi)

1. はじめに

海底面上に高濃度の浮遊土砂を含んだ水塊が発生すると、周囲の海水との密度差によって海底面上を流下する密度流が形成される。この密度流は混濁流と呼ばれ、海底を流下する際に、底面からの土砂の巻き上げや底面への堆積、上層からの水の連行によって、その浮遊土砂濃度を変化させる。浮遊土砂濃度が増加すると重力の流下方向成分が増減するため、混濁流は海底面上を加速もしくは減速しながら流れるという特性を持つ。すなわち、流下に伴って底面からの土砂の巻き上げが生じ、密度を増加させることによって混濁流は継続的に加速するという自己加速性を有しているのである。このような特性によって、混濁流は大きな侵食力を有しており、海底峡谷や海底河川の成因となっている。

混濁流によって侵食性河床には図-1 に示すような界面波が形成されることが知られている¹⁾。界面波の一種にはデューンや、アンチデューン、またはサイクリックステップといった河床形態が存在する。流れと底面との間に生じた擾乱によって、流速の大きな部分と小さな部分が生じ、底面の侵食速度に空間的な差が生じることで、それが発達して形成されるのである。しかし、混濁流は深海で起こる間欠的現象であることや、流速が非常に大きくなる可能性があることから観測が困難であるため、その実態はほとんどわかっていないのが現状である。これまでも混濁流の頭部の自己加速性を示す実験²⁾や、パイプ内で侵食的な混濁流を作成する実験³⁾などがなされているが、混濁流によって形成される界面波に関する検討は不十分である。

そこで本研究では、混濁流を実験水路で再現し、それによって河床上に形成される界面波の形状特性および発生過程の解明を試みる。

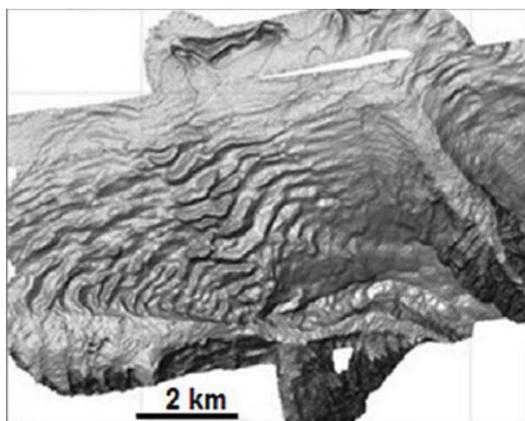


図-1 アルジェリアの沖合で形成された界面波¹⁾

2. 実験

2.1 実験の概要

実験には図-2 に示すような、幅 30cm、長さ 200cm、深さ 60cm のアクリル製水槽を用いた。この水槽内に幅 2cm、長さ 180cm の、勾配を変化させることができる水路が設置されており、水路下流端には高さ 5cm の堰が設けられている。水槽内は海底を再現するために水で満たしてあり、混濁流が流下しながら周囲の水を取り込むことが可能となっている。上流部には容積 200l のミキシングタンクを有し、バルブを開けて重力により水路内に土砂と水との懸濁液を供給するものとし、その供給量をバルブにより調節した。混濁流は数時間から数週間にわたって流れが持続するため、定常流と仮定できる。よって、ミキシングタンクから懸濁液を一定時間流し続けた。排水は下流側の水槽の底に設けたバルブにより行った。

混濁流の浮遊土砂には粒径 $d=0.12\text{mm}$ 、粒子密度 $\rho_s=1480\text{kg/m}^3$ の塩化ビニル粉末を用い、実験室スケールの流れであっても粒子の移動が容易になるようにした。

実験は河床勾配、初期濃度、および流量の異なる 4 ケースについて行い、水路内の底面変化の過程を 10 秒間隔でカメラに記録することにより、比較検討した。

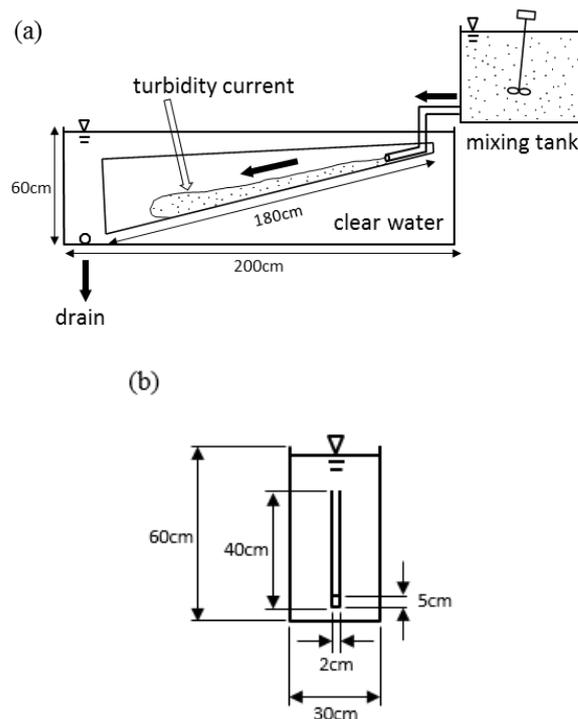


図-2 実験装置 (a)側面図, (b)断面図

表-1 実験の条件および結果

Case	河床勾配	継続時間 (min)	初期濃度 (%)	流量 (cm ³ /s)	初期流速 (cm/s)	流れの厚さ (cm)	密度フルード数	底面形状
1	0.28	24	12.0	62.5	6.8	12.0	0.26	平坦床
2	0.28	51	2.7	83.0	10.7	8.5	1.03	アンチデューン
3	0.09	32	2.3	55.6	5.9	6.5	0.71	デューン
4	0.20	10	1.8	120.0	23.8	6.0	3.33	堆積しなかった

2.2 実験の条件

表-1 に実験の条件および結果を示す。初期濃度はミキシングタンク内での体積パーセント濃度を示す。流量はミキシングタンクのパルプの調節できる範囲で設定し、流入口から出る懸濁液の体積と時間とを測定することで算出した。初期流速は懸濁液が流入口から水路の下流端まで流下するのにかかった時間とその距離から算出した。流れの厚さは流下中の混濁流の層の厚さを計測した。また、形成された界面波の区分のための参考として、混濁流を常流と射流に分類することができる密度フルード数をこれらの初期値から算出した。密度フルード数は式(1)で定義することができる。

$$F_{rd} = \frac{U}{\sqrt{RCgH}} \quad (1)$$

ここで U は流速、 R は土砂の水中比重($=(\rho_s - \rho)/\rho = 0.48$, ρ_s は浮遊砂の密度、 ρ は水の密度)、 C は浮遊砂濃度、 g は重力加速度($=980\text{cm/s}^2$)、 H は流れの厚さである。この密度フルード数が1よりも小さい場合、流れは常流になり、1よりも大きい場合、射流になる。

河床勾配は 0.09–0.28、流れの継続時間は 10–51min、初期濃度は 1.8–12.0%、流量は 55.6–120.0cm³/s の範囲で設定し、Case1 から Case4 の 4 ケースについて実験を行った。

2.3 実験結果と考察

予備実験として、ミキシングタンク内の懸濁液がどのように斜面上を流下するか観察した。その様子を図-3 に示す。ミキシングタンクのパルプ開放後、混濁流は水路の途中で停止することなく、斜面下方向へ流れ下った。これは、懸濁液が水槽内の水よりも浮遊土砂分だけ密度が高く、この密度差によって流れが駆動されたためである。このことから、本実験の水路内で混濁流を再現することができたものと考えられる。

(1)底面形状

図-4 に各ケースの実験終了後に観察された底面形状を示す。

Case1 は図-4 (a)に示すように、底面には厚く、平坦な堆積物が観察された。この底面への堆積により、混濁流内の浮遊土砂は減少し、それに伴い、流れの密度も減少したことが分かる。

Case2 および Case3 はそれぞれ図-4 (b), (c)に示すよう



図-3 混濁流が水路内を流下する様子

に、いずれも4つのステップをもつ界面波が観察された。Case2 の各ステップは上下流方向に左右対称のなめらかな波形であるのに対し、Case3 は各ステップの上流側は緩やかな斜面であるが、下流側は安息角をもつ非対称の波形である。

Case4 は図-4 (d)に示すように、底面には堆積物がほとんど見られず、下流側に設けた堰により下流で少し堆積が見られる程度であった。そこで、底面の侵食を確認するために、追加実験として Case4 の条件で、あらかじめ水槽中の水路内に同様の塩化ビニル粉末を一樣に敷いて同様の実験を行うと、底面の塩化ビニル粉末を混濁流が巻き上げて、底面を侵食させながら流下する様子が観察された。その侵食される前後の底面形状を図-5 (a)および(b)に示す。(a)で見られる底面上の堆積物が、(b)では混濁流により上流側で侵食されていることが分かる。この底面の侵食により、混濁流内には底面の浮遊土砂が巻き込まれ、それに伴い、流れの密度が上昇したことが分かる。

これら実験の再現性を確認するために、同条件で再度実験を行ったところ本結果と同様な傾向を示した。

以上より、混濁流によって形成される海底面は、濃度、勾配、および流量に支配されることが分かる。弱い流れで、高濃度な混濁流である場合、混濁流は浮遊土砂を底面へ堆積させやすい。この堆積的な流れの混濁流は、底面の浮遊土砂を多く巻き上げながら海底峡谷を流れ下った後の海底扇状地地形を形成する自己減速混濁流であるといえる。混濁流の流量が大きい場合、混濁流は浮遊土砂を底面から巻き上げながら流下する。この侵食的な流れの混濁流は海底峡谷中を流れ下るような自己加速混濁流であるといえる。また、侵食と堆積を繰り返すステップ状の地形も観察され、混濁流は加速と減速を繰り返し、底面上に界面波を形成することも示された。

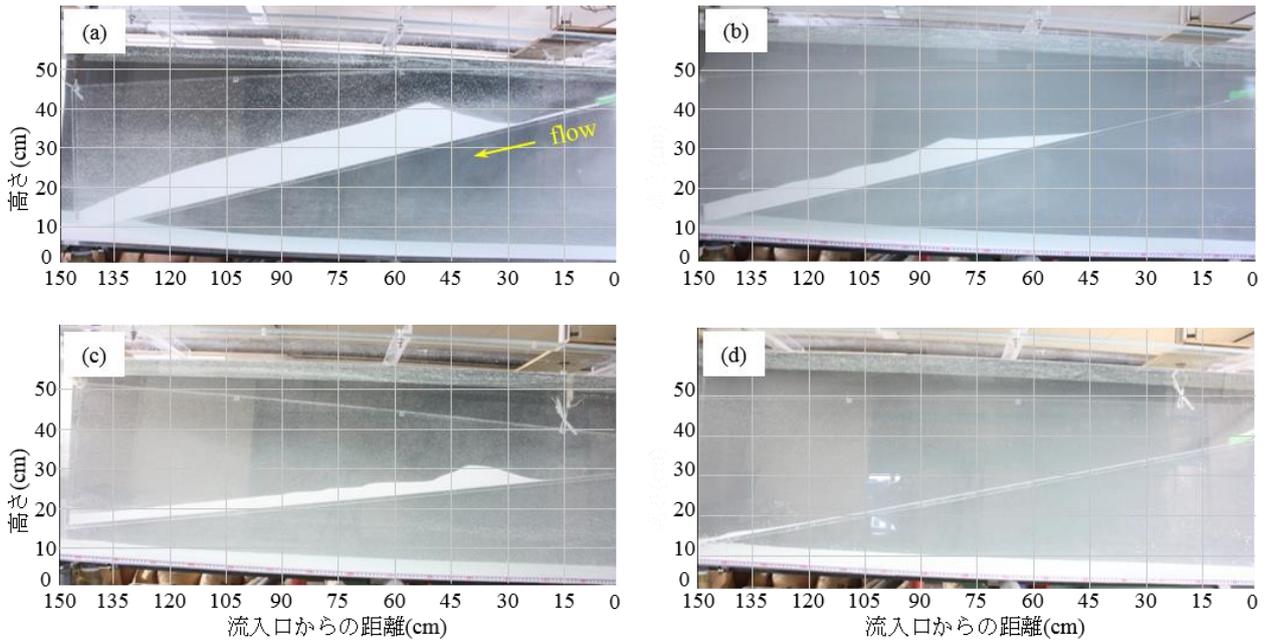


図-4 実験結果 (a)Case1 の通水開始 24 分後の底面形状, (b)Case2 の通水開始 51 分後の底面形状, (c) Case3 の通水開始 32 分後の底面形状, (d) Case4 の通水開始 10 分後の底面形状. (a)の底面は平坦に堆積, (b)および(c)は界面波が形成, (d)は堆積なし.

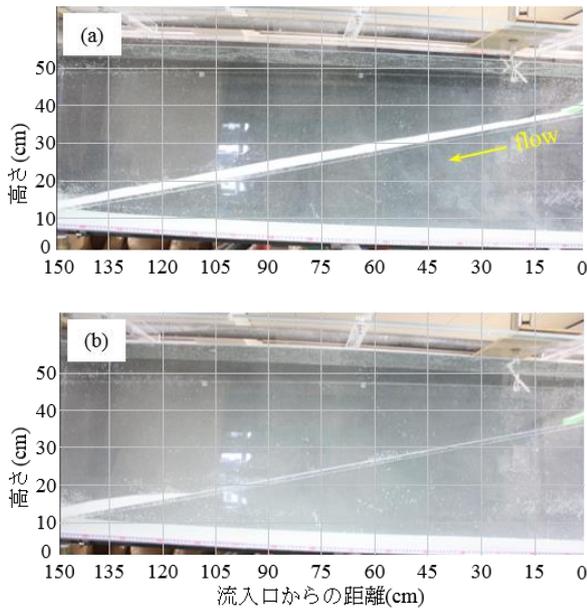


図-5 Case4 の追加実験結果 (a)通水前の底面形状, (b)通水開始 3 分後の底面形状. 通水前に底面に敷いた塩化ビニル粉末が混濁流により侵食された.

(2) 界面波の発生過程および区分

界面波が形成された Case2 および Case3 の底面形状の経時変化の過程を述べる.

図-6 (a), (b)に Case2 の通水開始後 27 分および 51 分の底面形状を示す. 通水を開始して平坦に堆積したのち, 10 分後に目視で確認することができる小さな擾乱が発

生した. 時間が経過するにつれ, はっきりとしたステップに発達し, 下流に伝搬した. 流れは上流端にある混濁流の流入口の影響を受けている可能性があるため, 2 つ目以降のステップで平均をとると, 実験終了後のステップの平均波長は 13.7cm, 平均波高は 4.3cm であった. ミキシングタンクから流出する際の混濁流の密度フルード数が 1 以上であり流れは射流であること, またステップの波形が対称であることから, この界面波はアンチデューンであると判断される.

図-7 (a), (b)に Case3 の通水開始後 10 分および 32 分の底面形状を示す. 通水を開始して平坦に堆積したのち, 4 分後に上流付近に小さな擾乱が発生した. 時間が経過するにつれ, はっきりとしたステップに発達し, 下流に伝搬した. Case2 と同様に, 2 つ目以降のステップで平均をとると, 実験終了後のステップの平均波長は 12.0cm, 平均波高は 2.8cm であった. 混濁流の密度フルード数が 1 以下であり流れが常流であること, ステップの波形が非対称であること, 下流に伝播したことから, この界面波はデューンの特性を有している.

この結果から, 混濁流によって, 河床に形成される河床波と類似した界面波が形成されることが分かった. しかし, 海底で発生する混濁流は射流である場合が多く, アンチデューンや, 今回は発生しなかったがサイクリックステップが形成される場合が多いと予想される. アンチデューンは通常, 上流に伝搬するが, 実験水路内で上流に伝搬するアンチデューンは見られなかった. 今回形成された下流進行アンチデューンは密度フルード数が 1 に近かったため, もう少し大きい値となるような条件で実験を行う必要があるかもしれない.

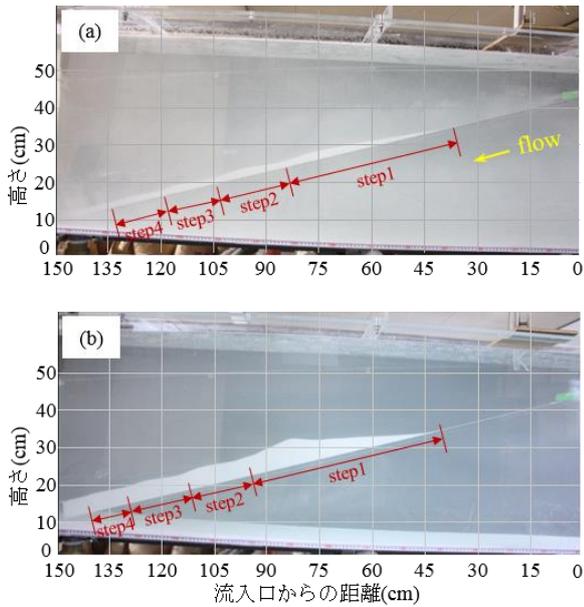


図-6 実験結果 (a)Case2 の通水開始 27 分後の底面形状, (b) Case2 の通水開始 51 分後の底面形状. 界面波が下流側へ伝播.

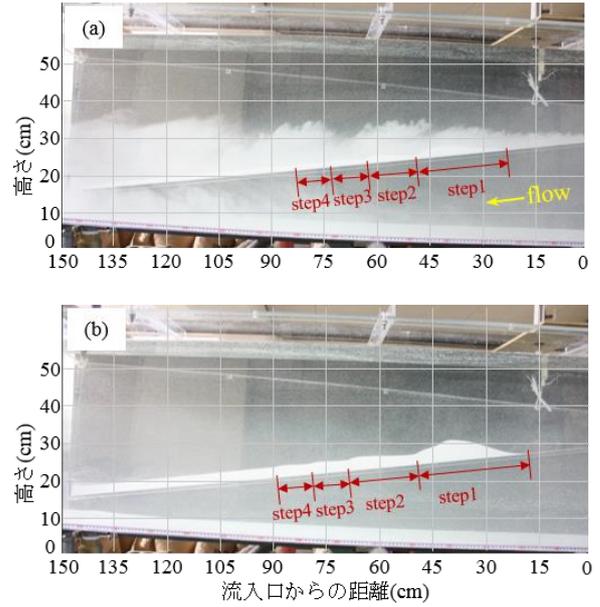


図-7 実験結果 (a)Case3 の通水開始 10 分後の底面形状, (b) Case3 の通水開始 32 分後の底面形状. 界面波が下流側へ伝播.

3. まとめ

本研究では海底で発生する混濁流の再現実験を行い、混濁流によって形成される界面波の形状特性および発生過程の考察をした。実験は河床勾配、初期濃度、および流量の異なる4ケースについて行った。海底面上は、混濁流による浮遊土砂の堆積や侵食によって、界面波が形成されることが示された。この界面波の形状は主に河床勾配や混濁流の濃度、または流量などに支配される。

今後は、上流に進行するアンチデューンや、サイクリックステップの発生をめざし、さらに混濁流によって形成される界面波の解明を試みる。

参考文献

- 1) Svetlana Kostic: Modeling of submarine cyclic steps: Controls on their formation, migration, and architecture, *Geosphere* 2011;7:294-304, doi: 10.1130/GES00601.1, 2011.
- 2) Octavio E. Sequeiros, Hajime Naruse, Noritaka Endo, Marcelo H. Garcia, and Gary Parker: Experimental study on self-accelerating turbidity currents, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 114, C05025, doi:10.1029/2008JC005149, 2009.
- 3) 成瀬元: 混濁流のオートサスペンション:その意義と課題, *地質学雑誌* 第117巻 第3号 pp.122-132, 2011.