# デューン-遷移床過程にみられるヒステリシス現象に関する実験

# EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERESIS PHENOMENON OBSERVED BETWEEN DUNE AND TRANSITION BED UNEDER UNSTEADY FLOW

北海道大学大学院工学研究科 北海道大学大学院工学研究科 北海道大学大学院工学研究科

(Akihiro Toyama)	外山明宏	○学生員	
(Satomi Yamaguchi)	山口里実	正 員	
(Yasuyuki Shimizu)	清水康行	正員	

### 1. はじめに

河床波は流れの抵抗に支配的な影響を有しており,河 川工学上河床波の形状を明らかにすることは重要である. 実河川のように時間的に流量が変化する場合において, 流量や流砂,河床形状は複雑な相互作用を有しており, 河床形状の変化の予測は容易ではなく,これまで多くの 研究が盛んに行われてきた.特に河床波の形成と消滅間 では,同流量時でも流量増加過程ではdune,減少過程で は平坦床であるなど,異なる河床形状が形成されるため 流れの抵抗が異なり水深が異なる<sup>122344</sup>.

近年では、Giri & Shimizu<sup>5</sup>によって提案された河床変 動モデルでは、河床波の形状が良好に再現されduneと平 坦床間にみられる現象も再現されている. Giriらによる と同じ最大流量を持っていても流量が急に変化する場合 では、流量がゆっくりと変化する場合に比べ、ヒステリ シスループが顕著に現れることが確認されている. しか し、 dune-遷移床間を対象とした、流量継続時間が異な る実験は行われていないため、この現象について確認と 検証は行われていない.

そこで本研究では勾配を一定に保ち流量継続時間を変 化させることで,流量の増加・減少傾向を変化させた実 験を行い,河床形態と水深の変化に着目し実験を行った.

### 2. 実験

#### (1) 実験概要

実験で用いた水路は長さ 10m,幅 20cmのアクリル樹 脂製の側壁を有する水路で,河床勾配を0.0034と設定し, 平均粒径 0.505mmのほぼ均一粒径を使用した.水路の上 下流端にはそれぞれ長さ 2m と 1m,厚さ 5cmの固定床 を設置し,水路中央部の 7m を移動床部とした.給砂は 河床の平均勾配が変化しないよう,固定床と移動床の境 に注意を払い行った.流量は図-1に示すような,同じ最 大流量と左右対称の形を持ち,流量継続時間が 3.5,7, 13時間と異なるハイドログラフを与えた.実験結果を解 析する際には,上流端の固定床より 4.3m 下流地点から 1.4mの区間を対象とした.予備実験によって,この区間 は,河床波や水理条件に及ぼされる上下流端の影響が十 分に小さいことをが確認されている.

本研究では非定常流量を対象としており,非定常流量では、等流状態を保つため、側壁と底面に粗度係数n=0.012の粗度を持つ長さ1mの水路を下流端に取り付けた.

(2)	) 実験結	ī果
14		コント

a) Case-1

図-2にCase-1で各流量時に観測された河床形状を示す. 図に示される各河床形状は,流量を変化させる直前に観測 されたものである.また,図-3および図-4にはそれぞれ各 流量に対応した水深および河床波の波長・波高を示す.図 -3には,各単位幅流量で観測された最大および最小水深を 示す.中塗りの記号および中抜き記号はそれぞれ河床形状 がduneおよび遷移河床状態を示している.個々の波の波 高・波長は,初期河床の平坦床を零位としたゼロアップク ロス法によって定義した.







図-2 各流量時に観測された河床形状 (Case-1)

# 平成20年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第65号



図-3 各単位幅流量に対応する平均水深 (Case-1)



図-4 各単位幅流量に対応する波長と波高 (Case-1)

Case-1 では、各単位幅流量を 30 分後間隔で変化させて おり、河床形状は平衡状態には達していなかったため、 すべての流量で、dune と遷移床が混在する河床形状が観 測された.特に流量増加過程の単位幅流量 1300cm<sup>2</sup>/s で は、河床形状が dune と平坦床の間で頻繁に変化する様子 が観察され、結果として水深の最大値と最小値に大きな 差が見られた.また図-4 に示されるように、流量減少過 程では流量の減少に伴い波長・波高の減少が見られた.

# b) Case-2

図-5 に Case-2 で各流量時に観測された河床形状を示 す. 図に示される各河床形状は, Case-1 と同様に流量を 変化させる直前に観測されたものである. また, 図-6 お よび図-7 にはそれぞれ各流量に対応した水深および河 床波の波長・波高を示す.

流量増加過程では単位幅流量を900cm<sup>2</sup>/sと1100cm<sup>2</sup>/s, 1300cm<sup>2</sup>/sまで増加した段階でduneの形成と発達が観察 され、単位幅流量1500cm<sup>2</sup>/s時には、河床形状がduneから遷移河床状態となった.一方、流量減少過程では、単 位幅流量を1500cm<sup>2</sup>/s,1300cm<sup>2</sup>/sと減少させた段階では 遷移河床状態が観測され、単位幅流量を1100cm<sup>2</sup>/sまで 減少させた段階でduneが観測された.水深について、流 量増加時には、単位幅流量1300cm<sup>2</sup>/s時まで流量増加と 共にduneの発達と水深の増加が観察された.しかし、単 位幅流量1500cm<sup>2</sup>/s時には河床形状がduneから遷移河床 状態となり、流量は増加したが水深の減少が見られた. 流量減少過程について、単位幅流量が1500cm<sup>2</sup>/sから 1300cm<sup>2</sup>/sへ減少すると、河床形状が遷移河床であるため 水深の減少が見られたが、単位幅流量1100cm<sup>2</sup>/sではdune



図-5 各流量時に観測された河床形状 (Case-2)



図-6 各単位幅流量に対応する平均水深 (Case-2)



図-7 各単位幅流量に対応する波長と波高 (Case-2)

が形成され水深が増加した.

**図-7**から流量減少過程の dune が形成されている単位 幅流量 1100cm<sup>2</sup>/s と 900cm<sup>2</sup>/s では,流量増加時に比べ波 長・波高共に大きな値を示しているのがわかる.

このように流量増加および減少過程の水深と河床波に 着目すると,同流量時でも異なる水深が観測され河床形



### 図-8 各流量時に観測された河床形状 (Case-3)

状と同様なヒステリシス現象がみられた.

#### c) Case-3

図-8 に Case-3 で各単位幅流量時に観測された河床形 状を示す.また,図-9および図-10にはそれぞれ各流量 に対応した水深および河床波の波長・波高を示す.

河床形状についてみると単位幅流量 0.09~0.13cm<sup>2</sup>/s では dune, 0.14~0.15~0.14cm<sup>2</sup>/s 間では遷移河床, 0.13cm<sup>2</sup>/s 以降は dune が形成されており, Case-1,2 とは異なり河床 形状のヒステリシスは観測されなかった.

水深についてみると河床形状と同様に,流量増加,減 少時の同流量時には,あまり相違は見られなかった.水 深の増加量についてみると,流量増加過程について,単 位幅流量が1200cm<sup>2</sup>/sまで上昇する傾向が見られるが, それ以降の水深に変化は見られなかった.流量減少時に







図-10 各単位幅流量に対応する波長と波高 (Case-3)



図-11 各単位幅流量に対応する平均水深 (Case-1,2,3)

も 1500~1200cm<sup>2</sup>/s 間では水深に変化は見られなかった. また,単位幅流量0.12cm<sup>2</sup>/sと0.15cm<sup>2</sup>/s間では流量増加, 減少過程共に波長と波高は大きく変化している.

### 3. 考察

芦田らの研究によると、実河川と比べ、水路勾配と粒径 が大きく水深が低い実験水路の条件化では、比較的早く 平衡状態が得られることが示されている.そのため、本 実験の条件化では、Case2,3の各流量で観察された河床は 平衡状態に達していると考えられる.しかし、Case1で は、流量を30分間隔で変化させているため、河床は平衡 状態に達することができず、不安定であったと思われる.

図-11 に各 Case の平均水深の変化を示す,図-11 から 単位幅流量が 900~1200cm<sup>2</sup>/s 間の低流量時では,Case-3 における水深の増加量が case-1,2 に比べて大きいこれは Case-3 では流量を変化させるまでの時間が十分に長く, dune が十分に発達し形状抵抗が増加したためであると 考えられる.

Case-1のような,流量の増加・減少の変化が比較的早い場合,水深のヒステリシスループは顕著が現れた.しかし, Case-3のような,流量の増加・減少の変化が比較的遅い場合では,ヒステリシスループは見られなかった. これは Giri らが数値計算によって再現したものと一致する.

Case-2 では、単位幅流量 1300cm<sup>2</sup>/s において、流量増 加時と減少時で異なる河床形態が現れている.これは流 量の変化にともなう河床形態の変化が要する時間に対し て、流量を変化させるまでの時間が十分ではなかったた めであると考えられる.

## 4. 結論

本研究では、同じ最大流量を持つハイドログラフの流量 継続時間を変化させ、流量の増加・減少の変化の速度の違 いが、河床形状と水深に与える影響について実験を行った. その結果、以下のことが確認された.

- Case-1のように流量継続時間が短い場合,水理量の変化に河床形態は平衡状態に達することができず,河床形態は不安定であった. Case-2のような流量継続時間では,河床形状のヒステリシス現象が観測された.また,Case-3では流量継続時間が長いため,河床形態が十分に発達し,ヒステリシス現象は現れなかった.
- ・ 河床形状の変化にともない水深も変化し、同単位幅流

量でも異なる河床形態が現れたCase-2では、水深にも ヒステリシス現象がみられ、同単位幅流量で同じ形態 を形成したCase-3では、水深のヒステリシス現象は観 測されなかった.

 Case-2の流量継続時間では河床形状と水深にヒステ リシス現象が顕著に観測された.これは、Case-2のよ うな流量継続時間では、各単位幅流量に対応する河床 形状はある程度平衡状態に達っしたと考えられるが、 河床形態の変化が要する時間に対しての時間が十分 ではなかったため、河床形状のヒステリシス現象が現 れたと思われる.

#### 参考文献

- 芦田和男・澤井健二・加藤均:河床波の変形過程に 関する実験的研究(2),京都防災研究所年報,第24 号 B-2, pp283-295, 1981.
- 泉典洋・山口里実:デューン 平坦床遷移再考,土 木学会論文集 B, Vol.62 No.4, pp360-375, 2006.
- 中川博次, 辻本哲郎:砂礫の運動に伴う移動床砂面 の擾乱発生過程, 土木学会論文報告集, 第 291 号, pp53-62, 1979.
- 山田正・池内正幸・植松正伸:小規模河床波の発生 発達に関する研究,水理講演会論文集,第 31 回, pp665-670, 1987.
- Giri, S., Yamaguchi, S., Shimizu, Y., Nelson, J.: Simulating temporal response of bedform characteristics to varying flows, *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics., RCEM2007*, pp939-947, 2007.