非定常流れにおける duneの消失過程 に関する水理実験

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PROCESS OF DUNE TRANSITION UNDER UNSTEADY WATER FLOW

平井康幸¹・川村里実²・清水康行³・木村一郎⁴ Yasuyuki HIRAI, Satomi KAWAMURA, Yasuyuki SHIMIZU and Ichiro KIMURA

¹正会員 土木研究所寒地土木研究所(〒0626-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科(同上)
⁴正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科(同上)

In this study, a hydraulic experiment of mobile bed was conducted with focus on the process of dune fading and bed resistance fluctuation during a transition state under unsteady flow. The process was observed under two discharge hydrographs of three hundred minutes and sixty minutes. The experiment results revealed that the bed resistance began to decrease in the discharge increasing period. The height of dune decreased as the time of unsteady flow hydrograph. The bed resistance decreased in accordance with the height of dune. Dune completely disappeared in the three hundred minutes hydrograph, however, did not disappear completely in the sixty minutes hydrograph. The dune was reformed again in the discharge recession period in sixty minutes case. A bivalency of water depth to the discharge was observed in three hundred minutes case. Flow velocity coefficient in three hundred minutes case much increased than in sixty minutes case. Comparison of the two hydrographs suggested that there was a delay of the riverbed and resistance response in following the discharge curve during the transition process.

Key Words: Dune, mobile bed experiment, transition process, unsteady flow, resistance fluctuation

1. はじめに

小規模河床形態は流れの抵抗の支配的要因であり,河 川水位に大きな影響を与える.そのため河川工学上及 び防災上,小規模河床形態の形成・消失機構を明らか にすることは重要である.特に河床波の形成・消失と いった遷移現象は洪水時に現れるため,洪水時に見ら れるような流量の非定常性が河床形状の変化に対して どのような影響を及ぼすのかを明らかにする必要があ る.さらに,近年では地球規模気候変動による降雨パ ターンの変化が指摘されている.これは流量ハイドロ グラフ特性の変化をもたらし,これまで蓄積してきた 河床抵抗則の知見の適合性が下がる懸念もある.この ため,河川防災上,非定常流量下における河床抵抗及 び水位の予測は重要課題となっている.

河床波は流れや流砂,河床形状の相互作用によって 発生する現象であることが知られている.しかし,実 河川のように時間的な流量変化に対する河床形状の応 答に関してはいくつかの実験が行われている¹⁾ものの, 河床波の形成・消失といった遷移現象に関しては定量 的にはほとんど解明されていない.なかでも,遷移過 程において同流量時であっても流量増加過程と減少過 程では異なる河床形状が現れる現象が報告されている ^{2,3)}. 流量増加過程では河床波が形成されるため抵抗お よび水位は高い値を示すのに対して,減少過程では河 床波が形成されないため抵抗および水位は低い値を示 すといった現象である.

このような非定常流量下における河床形状の遷移現 象を予測することは容易ではなく,これまでにも非定 常流れの河床波の変形過程についていくつかの実験が 行われてきた^{1,2,4,5)}.これらの実験により,流量変化 に対する河床形状変化の時間的な遅れの影響がある程 度明らかになっているものの,未だ定量的には明らか になっていない.近年,移動床数値モデルによって非 定常流量下における河床 dune の遷移現象を再現し,流 れの抵抗の変動過程を定量的に予測しようという試み がなされている(音田・細田^の, Giri ら^{7,8)}).このよ うな移動床数値モデルによる抵抗予測の精度向上とい う観点からも,より現実的な条件下における河床形態 の遷移現象の再現実験および詳細なデータの蓄積は重 要である.

duneから平坦遷移過程に着目した実験は,澤井⁴⁾,山 口ら⁵⁾,外山ら²⁾が行なっており,河床波の変形過程 や水理量が再現されている.しかし,澤井の行った実験 では流量の代わりに水路勾配を時間的に変化させ,擬 似的な非定常流れで河床波の変形過程を再現している.



図-1 実験水路の概要



山口らや外山らの実験では水深に対する水路幅が小さ く、流量ハイドログラフが階段状であり、側壁抵抗や 急激な流量変化による攪乱が河床形態に及ぼす影響を 無視できないと考えられる.そこで本研究では,平均 河床勾配(および水面勾配)一定および水路幅水深比 B/h = 5 - 6の条件において、急激な流量変化による撹 乱の影響を排除するために滑らかな流量ハイドログラ フの非定常流量下における移動床実験を行った.また, 岸・黒木⁹は河床形態に対する抵抗則を径深・粒径比 R/d によって分類しており,遷移条件が R/d によって 異なることを説明している.彼らによると, R/d > 500 の領域では遷移条件や遷移過程における抵抗値がある 程度明確なのに対して R/d < 500 では実験値のばらつ きが大きいというように, R/d = 500 を境に遷移過程 における傾向が異なることも示唆されている.本研究 でも R/d が実験スケールを表わす重要なパラメータの 一つと考えており、山口らや外山らの実験では R/d が 100程度と比較的小さい値であったのに対して、本研究 では R/d > 500 の条件における遷移過程の再現実験を 試みた.

2. 実験概要

図-1 に実験に用いた水路の概要を示す. 長さ 25*m*, 幅 100*cm* のガラス製側壁を有する水路を使用し, dune

表-1 実験における測定項目

測定間隔	測定項目
1分ごと	時間,流量,水位(超音波及び目視),
	画像撮影(近景:水平及び垂直)
30分ごと	Dune の位置,波長,波高,画像撮影
	(遠景)
適宜	浮遊砂濃度(流量上昇期,ピーク時,
	下降期)

発生条件の水理量に合わせるため、表面を塗装した木 製側壁で幅 70cm に仕切り、測定部とした.河床勾配は 0.0015 で設定し、河床材料は平均粒径 0.18mm のほぼ 均一粒径を用いた.水路の上下流端にはそれぞれ長さ 2.4m 及び 2m,高さ 30cm の固定床を設置した.さらに 上下流端の給水部、放流部それぞれ 1m を除いた、水路 中央部の 18.6m を移動床測定区間とした.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界 に注意を払って上流端側から行なった.図-2 に実験で 用いた流量ハイドログラフを示す.ハイドログラフは 渡邊ら³⁾ により示されている次式で与えられる波形と した.

$$D_0 = \left\{ \frac{\delta(t_* + \alpha)^2}{t_*^2 + \beta} - \gamma \right\}^{\frac{3}{2}}$$
(1)

ここで, D_0 :初期水深 h_0 で無次元化した水深 $(D_0 = h/h_0)$, t_* :ハイドログラフの継続時間Tで無次元化した時間 $(t_* = t/T)$, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は定数.

α,β,γ,δ は,北海道の河川の実績洪水波形(昭和 56 年 8 月豊平川など)に適合するように設定し,α=0.5, β=0.125,γ=1.2,δ=1.1とした.300分,60分流量ハイ ドログラフともにこの値を用いた.

表-1に本実験での測定項目を示す.予備実験の結果 から,初期平坦河床に流量 401/s を通水し, dune が安定 的に形成された時点を初期条件として、ピーク流量を 601/sとする, 300分及び 60分の2種類のハイドログラ フにより dune の消失過程及び河床抵抗の変動過程を測 定した. 流量ハイドログラフの形成には1分毎に流量 調節が可能な装置を用い、流量の急激な変化による攪 乱の河床形態への影響を抑えた.また、河床形状の時系 列変化過程を解析するため、上流側から9m-19mの区 間でデジタルカメラを用いて1分毎に測定区間の垂直 方向,水平方向から画像撮影を行なった.9m 及び 19m 地点に超音波水位計を横断方向にそれぞれ3台設置し, 水位の測定を行なった.基本的に、結果諸量の算出には この水位を使用した.実験期間中の水面勾配を一定に 保つ目的で,実験水路上流端から 5m, 9m, 19m, 23.5m の位置にゲージを設置し、1分毎の水位を目視により補 完測定した.

3. 実験結果及び考察





$$C_f = \left(\frac{u_*}{\overline{u}}\right)^2 \tag{2}$$

$$u_* = \sqrt{gRi_e} \tag{3}$$

(1) 河床形態区分

図-3に実験条件の最小流量40l/s,中間流量50l/s,最 大流量 601/s における河床形態区分を示す. 縦軸は径 深粒径比 R/d, 横軸は無次元掃流力 τ*である. 流量の 設定については、河床材料の粒径 d = 0.18mm に対し て, 芦田・道上及び Garde-Raju の河床形態区分で dune 発生域となり、かつ実験水路の最大給水能力 180l/sの 範囲内で R/d >500 を満たす組み合わせとして,河床 勾配 i_b=0.0015, 流量 Q = 40 - 60l/s を設定した. こ の条件で平坦河床に実際に通水したところ、601/sで は平坦河床のままであり、501/s では ripple が卓越し、 401/s では明確な dune の安定形成が見られた. このた め, duneの安定形成と非定常流量ハイドログラフの初 期値を 401/s とし, 平坦河床となる 601/s を最大流量と して設定した.実験条件は、芦田・道上の河床形態区 分では Lower Regime, Garde · Raju の河床形態の区分 ¹⁰⁾ では Transition 領域に属した. また,実験条件下の フルード数は概ね F_r = 0.55 – 0.7 で常流であった. 粒 子レイノルズ数は Re = 6 前後であり, ripple の発生領 域であるが、本実験の条件では ripple の波長は 54mm~ 270mm(粒径の300~1500倍)となり、本実験で観測 された dune の波長 1.2m~1.5m とは明らかに異なるた め ripple と dune の区別は明確であった.

(2) dune 形成の再現性について

dune 形成の再現性については、定常流れによる dune 形成の予備実験を 2 回行ない、河床抵抗係数の時系列 変化により検証した.この目的は、外観上は dune が時 間とともに発達して定常状態に達し安定していく様子 が観測されたものの、定性的な評価にとどまるため、河 床抵抗係数という具体的な数値を用いて再現性を定量 的に評価、確認するためであった.河床抵抗係数 C_f は 以下の式により求められる¹¹⁾. ただし, *u*_{*}: 摩擦速度,*ū*: 平均流速, *R*: 径深, *i*_e: エネル ギー勾配 で, ここではエネルギー勾配の代わりに水面 勾配を用いて算出した.

図-4 に河床抵抗係数 *C_f* の時系列変化を示す. *C_f* の 算出には超音波水位計で計測した水位から求めた水面 勾配を用いた. 超音波水位計は水面付近のノイズ的な 波を観測し,算出された水面勾配及び河床抵抗係数 *C_f* にばらつきが見られたことから, *C_f* の移動平均により 評価した. 図中の線は *C_f* の移動平均線を表しており, 移動平均 *MA* は下式により定義される.

$$MA = \frac{P_m + P_{m-1} + \dots + P_{m-n+1}}{n}$$
(4)

ただし、 P_m, P_{m-1}, P_{m-n+1} は直近n個の平均値であり、ここではn = 10とした.

予備実験1回目,2回目ともに平坦河床から dune が 発達していくに従い C_f が上昇した.途中,両ケースで 河床抵抗係数 C_f の上昇過程に時間差があるものの,両 ケースとも 180 分を過ぎた辺りで C_f の上昇が緩やかに 止まり,180 – 210 分にかけて C_f =0.007 – 0.009 付近 で収束する挙動を示した.このことから,通水開始後 180 – 210 分程度の時間で dune の発達が定常状態に達 し安定形成されていると判断し,通水開始後 210 分 (3 時間 30 分)を今回の dune 消失過程に関する水理実験 の非定常ハイドログラフの開始時点とした.

(3) 河床形態の時系列変化

dune が消失していく過程を, dune の最大波高で評価 した.最大波高は,各時点で最も高い頂部と最も低い 底部の差とした.





図-5 及び図-6 に初期条件の dune が消失していく過 程における最大波高の変遷を示す. 図には流量波形の 上昇期, ピーク期, 減少期を示した. 初期条件とした dune は ripple との混在が見られ, dune 自体の波高は明 瞭に測定できなかった. 300 分ケースでは, 非定常開始 後 30 分頃までは dune と ripple がやや混在し, 40 分過 ぎには ripple が消えて明確な dune が観測されるように なった. 60 分ケースでは, 非定常開始後 15 分頃までは dune と ripple がやや混在し, 20 分過ぎには ripple が消 えて明確な dune が観測されるようになった. 両ケース とも, 流量増加とともに ripple が消失して dune 形状が 明確に観測される過程で, dune 波高が増大する現象が 見られた.

300 分ハイドログラフのケースでは,流量ピーク期直 前から波高の増大が止まり,その後時間をかけて徐々に 波高が低下して最終的に平坦床へと遷移していく様子 が観測された.平坦床へと遷移する間も,水路上流端で は新たな dune が発生し続けていた.水路上の dune が 流下していく過程で波高が低下すると同時に,上流端 で新たに発生する dune の波高も低下していくというよ うに,水路上の dune の波高自体が時間とともに徐々に 低下して,120 分付近で dune が完全に消失し水路全体 が平坦床へと遷移する過程が観測された.この間,波 高の低下が観測されたのに対して,波長については大 きな変化は無かった.



図-7 dune の移動状況(t=55 から 70min まで 3 分間隔)



図-8 dune が消失し平坦になった状況 (t=150min)

60 分ハイドログラフのケースでは, 300 分ケースと 同様に dune の流下にしたがって波高が低くなり、上流 端で発生する dune の波高自体も時間とともに徐々に低 下していく過程が観測された.しかし,dune の完全な 消失と平坦河床への遷移までには至らず、図-6に示さ れるように、非定常開始30分を過ぎた頃から低くなっ た dune 波高が再び上昇し始めて明確な dune が再形成 されるようになった. この間, dune 波高は低下と上昇 を示したのに対して、300分ケースと同様、波長に大 きな変化は見られなかった. 図-7 及び図-8 に 300 分流 量ハイドログラフ実験時の dune の移動状況と平坦河床 になった状態を示す. dune は時間とともに波高は低く なったが、波長についてはほぼ一定値を保ちながら下 流に移動している様子が確認された. なお, この写真 は dune の側面部の断面形状を表している.実験で形成 された dune は横断方向には直線形状を取らず、曲線で 角度がついていたため、側面形状のみから dune の全体 形状を計測するのは困難であった.



(4) 水位流量曲線について

非定常流れにおける河床抵抗値の多価性、河床形態 の追従遅れを検証するため、水位~流量曲線による評 価を行なった. 図-9 及び図-10 に 300 分, 60 分非定常 ハイドログラフにおける水位~流量曲線を示す. 図中 の矢印は非定常ハイドログラフの時間に沿った動きを 示す. 300 分ハイドログラフは,流量上昇とともに水位 が上昇し、ピーク流量 601/s で dune が消失した時点で 水位が低下した. その後, 流量減少の期間は水位の低 減が継続した. 601/s から 581/s にかけて水位が一時的 に上昇しているが、目視では明確な河床波は確認され なかった.300分の時間内では、同流量に対する水位が 2つある二価性を示している. これに対して, 60分ハ イドログラフでは, dune の消失過程で水位が低下した が、流量減少の期間に dune が再形成されており、それ に対応して再び水位が上昇するループを描いた. 図-9 に示すように、300分ケースの最後の部分では水深が 徐々に上昇しており、より長い流量ハイドログラフを 用いた場合は河床抵抗値が非定常開始時の初期値に戻 るループを描く可能性もある. 図-9 に見られる二価性 が非定常ハイドログラフの継続時間の不足、すなわち



河床の追従遅れにより生じるものか,水理学的な本質 解であるか,今後さらに長いハイドログラフで検証を 行なう必要がある.また,300分ハイドログラフで水位 が急低下した直後に急上昇をすることについては,実 験技術上 dune が消失した際の急激な水位低下に下流端 の水位調節操作が対応し切れず,時間差を生じて水位 が戻ったように見える可能性もあるが,具体的な機構 は不明である.今後,この水位変動の機構解明に向け てさらに検証していきたい.

(5) 流速係数の時系列変化による河床形状の評価

非定常流量ハイドログラフによる河床形状及び河床 抵抗の変化について,流速係数による評価を試みた.流 速係数は以下により定義される¹²⁾.

$$\varphi = \frac{\overline{u}}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s} \tag{5}$$

ただし, φ: 流速係数, ū: 平均流速, u_{*}: 摩擦速度, R: 径 深, k_s: 相当粗度である.

図-11に流速係数の時系列変化を示す.図は木下¹³に ならい,横軸には径深の代わりに平均水深を用いた.図 中の矢印はハイドログラフの時系列を示している.300 分ハイドログラフでは,duneが発達している初期には 流速係数は相当粗度 5.4mm (粒径 0.18mm の 30 倍相 当)付近であり,duneの消失過程とともに流速係数が 上昇し,粒径の1倍相当まで上昇した後,再び低下し, 相当粗度 0.9mm (粒径の5倍相当)付近から低下が緩 やかになった.60 分ハイドログラフについては,流速 係数が上昇したものの, dune が完全には消失しなかったことから,相当粗度 0.9mm (粒径の 5 倍相当)までには到達せず,再び低下を始めた.60分非定常ハイドログラフでは相当粗度は粒径の 5 倍以上の範囲で推移していた.

4. 結論

本研究では、dune が遷移し消失する過程とそれに対応した河床抵抗の変動過程に着目した非定常流量波形による移動床実験を行った.径深粒径比 *R/d* > 500 で、側壁の影響を極力軽減するため水路幅水深比が *B/h* = 5-6の浅水条件で、かつ流量の急激な変化による攪乱が河床に与える影響を軽減するため、流量を微調節できる装置を用いて、非定常流れにおける dune と遷移河床間に見られる現象を再現した.本研究の結果、以下のことが明らかになった.

- dune 波高の減少・上昇の時系列変化に対応して河 床抵抗係数 C_f も同じトレンドで減少・上昇の変化 をした.
- 300 分流量ハイドログラフでは dune が完全に消滅 しその後平坦河床を保ったが、60 分流量ハイドロ グラフでは dune が完全に消失せず、不完全な消失 状態から再び dune が形成され始めた。
- 300 分流量ハイドログラフでは流量全体に対して 水位の二価性が見られたが、60 分流量ハイドログ ラフでは水位が戻るループを描いた。
- 300 分流量ハイドログラフでは流速係数は粒径の 30 倍相当から1 倍相当まで低下し,再び上昇して 5 倍相当付近で緩やかになった.
- 60 分流量ハイドログラフでは,流速係数は粒径の 5 倍以上までしか上昇せず,duneの再形成に伴っ

て上昇に転じた.

参考文献

- 1) 芦田和男・澤井健二:河床波の変形過程に関する実験的 研究,京都大学防災研究所年報,第23号 B-2, pp457-473, 1980.
- 外山明宏・清水康行・山口里実・木村一郎:非定常流場に おける dune の形成消滅過程に関する実験とシミュレー ション,水工学論文集,第53巻,pp727-732,2009.
- 渡邊康玄・Tubino M. and Zelezzi G.: 掃流砂により形成 される交互砂州の非定常流下での挙動,北海道開発土木 研究所月報, No.576, pp4-12, 2001.
- 4) 澤井健二:水理量の時間変化に伴う河床波の変形過程に 関する研究,第31回水理講演会論文集,647-652,1987
- 5) 山口里実・泉典洋・五十嵐章:デューンの遷移過程に関 する実験,水工学論文集,第47巻,pp613-618,2003.
- 6) 音田慎一郎・細田尚:水深積分モデルによる小規模河床 波の発生・発達過程と流れの抵抗則の数値解析,水工学 論文集,第48巻,pp973-978,2004.
- Giri, S., Shimizu , Y.: Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, *Water Resources Research*, Vol.42, w10422, doi:10.1029/2005WR004588, 2006.
- 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.
- 9) 岸力・黒木幹男:移動床流における河床形状と流体抵抗 (I),北海道大学工学部研究報告,第67号,pp1-23,1973.
- Garde, R. J., Ranga Raju, K. G.: Regime Criteria for Alluvial Streams, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, No.HY-6, Nov., 1963.
- 11) 関根正人:移動床流れの水理学,共立出版,2005.
- 12) 吉川秀夫:流砂の水理学,丸善株式会社, 1985.
- 13) 木下良作:石狩川河道変遷調查,科学技術庁資源局資料, 36 号, 1961.

(2009.9.30 受付)