

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

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON DEVELOPMENT PROCESS OF DUNE UNDER UNSTEADY FLOW FIELD

外山明宏¹・清水康行²・山口里実³・木村一郎⁴

Akihiro TOYAMA, Yasuyuki SHIMIZU, Satomi YAMAGUCHI, Ichiro KIMURA

¹学生員 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)

²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (同 上)

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 the field of microscale bedforms study, there has been a great deal of analysis and numerical studies on bedform evolution processes from a dune to a transition bed. However, there is not a lot of experiments that dealt with the extinction of a dune due to a change of discharge. This study is carried out both of experimental study and numerical simulation study using a morphodynamic model proposed by Giri and Shimizu (2007), in order to clarify the evolution processes of bedforms between dune and transition bed under unsteady discharge condition. As the result of the comparison between the experimental and the numerical calculation results, it is found that the empirical constant of step length is indicated smaller than the value suggested by Giri et al (2007). The empirical constant of step length under unsteady discharge condition was evaluated using a morphodynamic model. It is confirmed that the coefficient when transition is formed get bigger than dune is formed.

Key Words : dune, transition bed, bedform hysteresis, step length, vertical 2D numerical model

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と言える。特に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。そのため防災工学上、河床波の形成・消滅機構の解明が重要である。

近年では、数値計算によって小規模河床形態の再現計算が行われるようになり^{1) 2)}、関根³⁾はSaltation Modelを用いて河床波の形成に成功している。また、Giri & Shimizu⁴⁾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、流量増加時と減少時に、

duneと平坦床間の遷移過程にみられる現象も再現されている。

河床波の変形過程について多くの実験が行われてきた⁵⁾。duneから平坦遷移過程に着目した実験は、澤井⁶⁾と山口ら⁷⁾が行っており、河床波の変形過程や水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ることで、河床波の変形過程を再現している。また、山口らの実験では水路勾配を一定とし流量を時間的に変化させているが、粒子レイノルズ数が20以下と、Rippleの影響を受けた実験である可能性がある。従って澤井、山口らの行った両実験は実現象を十分に再現しているとは言い難い。

そこで本研究では勾配を一定に保ち非定常流量の下、粒子レイノルズ数がdune領域となるような条件で、duneと遷移河床間に見られる現象に着目した実験を行った。また、従来のGiriら⁴⁾の河床変動モデルを用いた実験の再現計算を行い、実験と計算結果を比較することにより河床波の形成・消滅機構の解明を試みた。

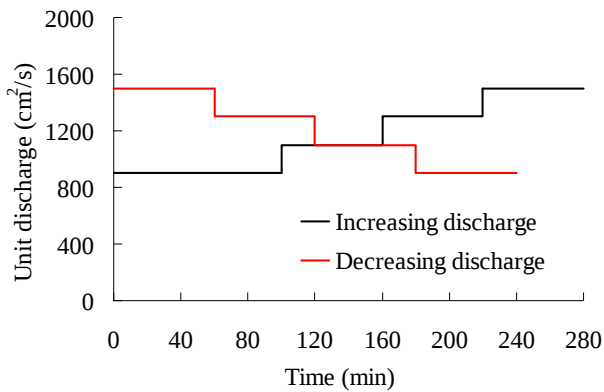


図-1 流量増加および減少過程に与えた流量変化

2. 実験概要

実験で用いた水路は長さ10m、幅20cmの亚克力樹脂製の側壁を有する水路で、河床勾配を0.003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に示すように単位幅流量を900, 1100, 1300, 1500cm²/sと段階的に与え、各流量で形成される河床形状が次の段階の河床形状に及ぼす影響に着目し、河床形状が平衡状態に達するように60分間通水を行った。流量増加過程では、初期の河床形状である平坦床から形成される河床波が、平衡状態になるまでに時間がかかるため100分間通水した。実験の解析は予備実験によって上下流端が河床波や水理条件に与える影響が最も少ないとされる、上流端の固定床から4.3mの地点から1.4m区間で行った。

3. 実験結果および考察

(1) 河床形状

図-2および図-3に流量増加および減少過程に観測された各流量の河床形状を示す。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り、それぞれの河床形状は平衡状態に達していた。

図-2に示されるように、単位幅流量が900cm²/s、1100cm²/sおよび1300cm²/sまで増加された段階で河床波の形成と発達を観察された。(D)に示される単位幅流量1500cm²/s時には、平坦床と河床波が混在する河床が観測された。観測された河床波は単位幅流量1300cm²/s以前に観測された河床波とは異なり波長・波高が不規則かつ、河床波のクレスト部は不明瞭であった。水面と河床波が同位相となるantiduneも時折観測された。

図-3に示される流量の減少過程では、初期の河床形状

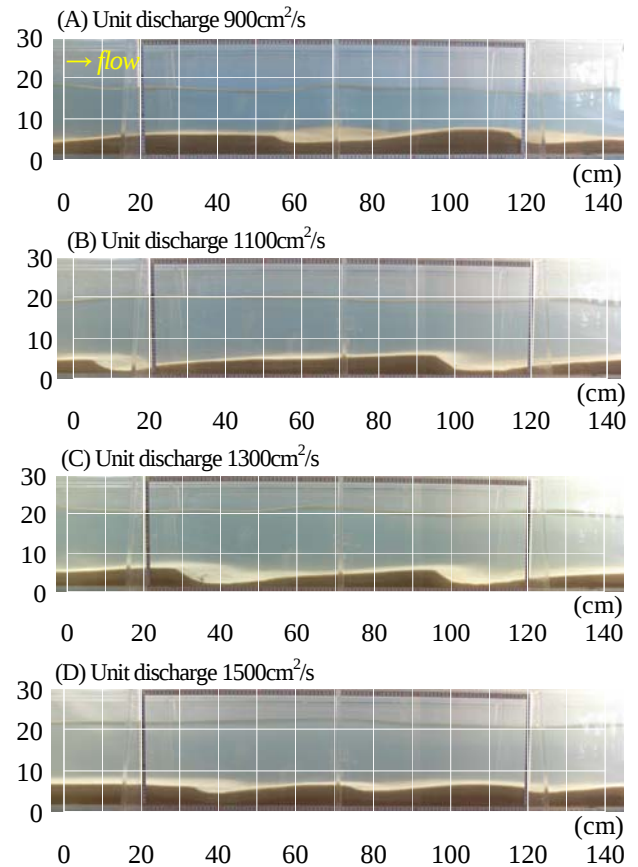


図-2 流量増加過程において各流量で観測された河床形状

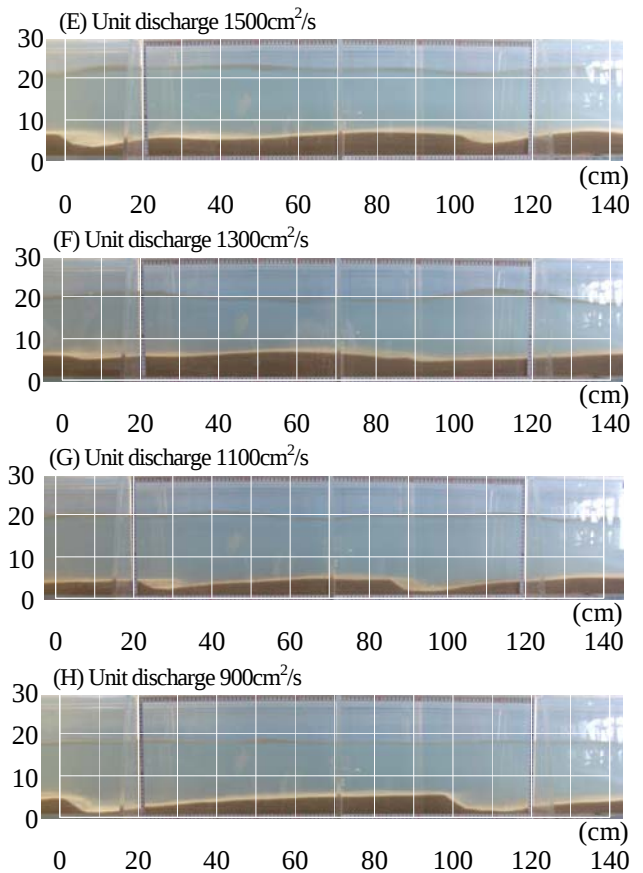


図-3 流量減少過程において各流量で観測された河床形状

表-1 各流量における粒子レイノルズ数とフルード数及び河床区分

Increasing discharge					Decreasing discharge				
Unit discharge (cm ² /s)	Figure	Sand Reynolds	Froude	Bedform	Unit discharge (cm ² /s)	Figure	Sand Reynolds	Froude	Bedform
900	(A)	19.5	0.61	dune	1500	(E)	20.4	0.74	transition
1100	(B)	20.3	0.57	dune	1300	(F)	20.1	0.73	transition
1300	(C)	20.7	0.59	dune	1100	(G)	20.3	0.57	dune
1500	(D)	20.6	0.70	transition	900	(H)	19.8	0.55	dune

を平坦床にし、単位幅流量1500cm²/sを通水した。通水後は図-2の(D)と同様に、波長・波高が不規則かつ、クレスト部が不明瞭な河床波と平坦床が混在し、単位幅流量を1300cm²/sに低下させた時でも、河床が遷移している状態が観察された。さらに流量を減少させ単位幅流量1100cm²/s時には、(G)に示されるように河床波が形成され、単位幅流量900cm²/s時には河床波の減衰が観察された。また、この実験の再現性について確認するため、再度同条件で実験を行ったところ本実験と同様な傾向が示された。

(2) 河床形態の区分

河床形態の区分について表-1に流量増加および減少過程の各流量における粒子レイノルズ数、フルード数の値を示す。表-1より各流量時のフルード数の値が0.8以下であるため実験値はlower regimeの領域であることが確認される。また、各粒子レイノルズ数の値はほぼ20以上であるため、観測された河床波はduneであると判別される。遷移河床はGarde-Raju⁸⁾によって提案された、 R/d と I/s をパラメーターとする河床形態の区分によって確認された。ここで、 R は径深、 d は砂の粒径、 I は河床勾配、 s は砂の水中比重である。

(3) 河床形状のヒステリシス

図-2に示されるように、流量増加過程では単位幅流量を900cm²/sと1100cm²/s、1300cm²/sまで増加した段階でduneの形成と発達を観察され、単位幅流量1500cm²/s時には、河床形状がduneから遷移河床状態となった。一方、図-3に示される流量減少過程では、単位幅流量を1500cm²/s、1300cm²/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1100cm²/sまで減少させた段階でdune形状が観測された。図-2(C)および図-3(F)に着目すると、単位幅流量がいずれも1300cm²/sと同流量であるにも関わらず異なる河床形態の現われていることがわかる。流量増加時である図-2(C)ではdune形状が現われているのに対して、流量減少時である図-3(F)では遷移河床が現われている。

このように実験では同流量でも、流量増加過程と減少過程では河床形状が異なり、河床形状のヒステリシス現象が観測された。

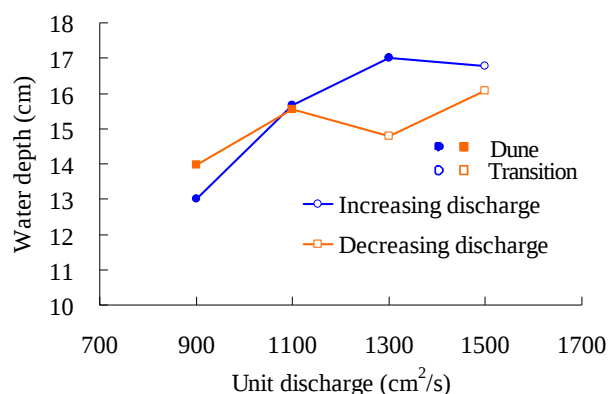


図-4 各単位幅流量に対応する平均水深

(4) 水深と河床波について

図-4に各単位幅流量に対応する平均水深を示す。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。流量増加時には、単位幅流量1300cm²/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1500cm²/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1500cm²/sから1300cm²/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1100 cm²/sではduneが形成され水深が増加した。

このように流量増加および減少過程の水深に着目すると、同流量時でも異なる水深が観測され河床形状と同様なヒステリシス現象がみられた。河床波の波長と波高、波速は次節にて検討を行う。

(5) 数値シミュレーションとの比較

a) 移動床モデル

本研究で用いたGiri & Shimizu⁴⁾によって提案された数値計算モデルでは非線形k-εモデルを用いた鉛直二次元流れに中川・辻本⁹⁾の確率過程モデルを用い河床変動を再現している。以下に中川・辻本によって提案されているpick-up rate P_s とdeposite-rate P_d の式を示す。

$$P_s = \frac{0.03\tau_* (1 - 0.035/\tau_*)^3}{\sqrt{d/\{(\rho_s/\rho - 1)g\}}} \quad (1)$$

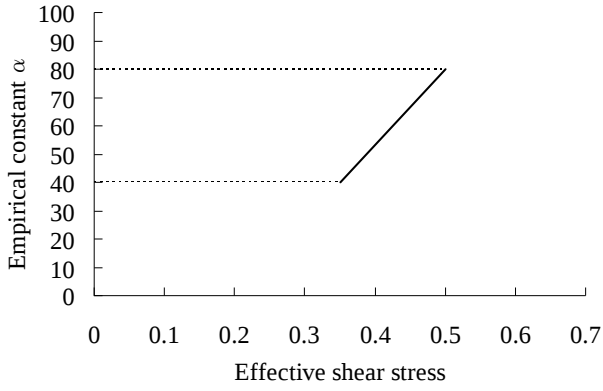


図-5 有効せん断力と平均step-lengthの係数 α の関係

$$p_d = \int_0^{\infty} p_s(x-s)f_s(s)ds \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ρ_s は砂粒子の密度、 τ_* は局所の Shields せん断応力である。 $f_s(s)$ は以下のような指数分布で表される¹⁰⁾。

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{s}{\Lambda}\right) \quad (3)$$

ここで、 Λ は平均step-lengthであり、砂の粒径の整数倍($\Lambda = \alpha d$)と表される。

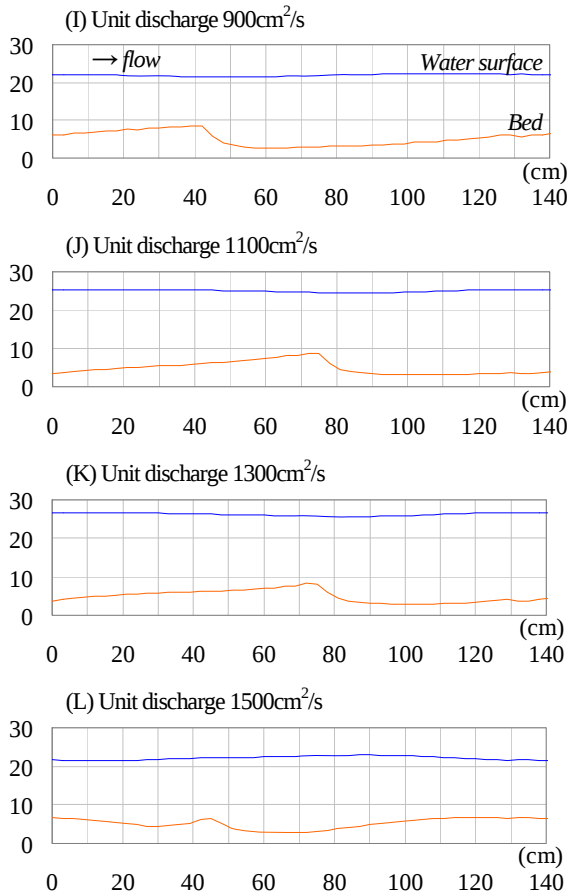


図-6 流量の増加過程の各流量時に再現された河床形状

b) 平均step-lengthについて

平均step-lengthの係数 α の値について、中川・辻本⁹⁾によって粒径の40から250倍程度であることが確認されている。また、Nelsonら¹¹⁾の研究では、有効せん断力の値が砂粒の限界掃流力の2倍から4倍の間では、粒径の15倍から50倍であると確認されている。しかし、非定常流量下において、step-lengthの α の値は局所的な水理条件の違いによって変化すると考えられている。そのため、Giri & Shimizuによって提案された河床変動モデルでは、単位幅流量に見合った等流水深から求められる Shields せん断応力（無次元）を有効せん断力とし、その有効せん断力の働きによりstep-lengthの係数 α の値が変化するように線形で与えている。これにより流量の変化に伴い、平均step-lengthの係数 α の値も変化している。なお、Giriらは平均step-lengthが粒径の50から250倍に変化するように設定している³⁾。本研究ではこれらの研究を参考とし、合わせて本研究の実験結果との適合性を考慮し、図-5に示されるような係数 α と有効せん断力の関係を線形で与えた。

c) 計算結果および実験との比較

数値計算の計算領域は1.4mとし、上下流端の断面には周期境界条件を適用している。図-6および図-7に数値シミュレーションによって再現された流量増加および減少過程に再現された各流量の河床形状を示し、図に示され

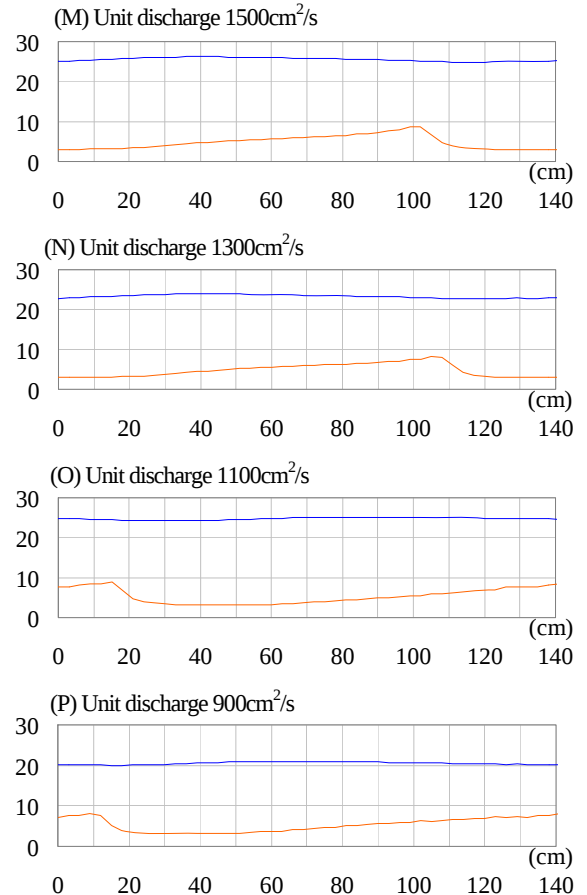


図-7 流量減少過程の各流量時に再現された河床形状

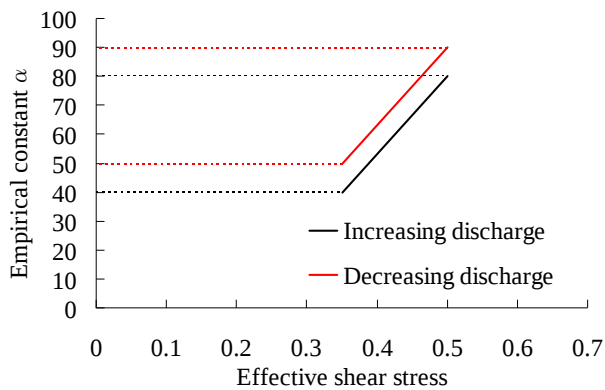


図-8 流量増加過程と減少過程それぞれの底面せん断力と平均step-lengthの係数 α の関係

る各河床形状は、実験と同様に流量を変化させる直前の結果である。流量の減少過程について、実験と同様に初期の河床条件を平坦床として単位幅流量 $1500\text{cm}^2/\text{s}$ を通水した。図-6に示される流量増加過程の河床形状の変化は、実験と同様に単位幅流量が $900\text{cm}^2/\text{s}$ と $1100\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $1300\text{cm}^2/\text{s}$ まで増加された段階でduneの形成と発達が再現され、(L)に示されるように単位幅流量 $1500\text{cm}^2/\text{s}$ 時には遷移河床が再現され、duneの発達や遷移過程について実験と良好な一致が見られた。図-7に示される流量減少過程をみると、(M)に示されるように、単位幅流量 $1500\text{cm}^2/\text{s}$ 時にはすでにduneが形成された。その後、単位幅流量 $1300\text{cm}^2/\text{s}$ ではduneは減衰し、単位幅流量 $1100\text{cm}^2/\text{s}$ 時に一時的なduneの発達が見られたが、単位幅流量 $900\text{cm}^2/\text{s}$ でもduneの減衰が見られた。

このように流量減少過程の単位幅流量 $1500\text{cm}^2/\text{s}$ 時には既にduneが再現され、実験と相違が表れた、これには数値計算で設定した平均step-lengthの値が最も影響していると考えられる。このため、次節でstep-lengthに関する検討を行った。

d) 平均のstep-lengthの検討

数値シミュレーションにより流量増加および減少過程を再現した結果、流量増加過程では実験と良好な一致が見られたが、流量減少過程では、実験と相違がみられた。関根³⁾は河床上の凹凸の規模が増大すると砂粒の飛躍距離が低下することを示しており、遷移河床はduneに比べ凹凸の規模が小さく、平均step-lengthの係数 α はdune形成時に比べ大きな値を示すと考えられる。これより、流量減少過程において、図-8に示されるように流量増加過程よりも大きな平均step-lengthの係数 α の値を適用した。その結果再現された各流量の河床形状を図-9に示す。

図-9の(Q)に示される単位幅流量 $1500\text{cm}^2/\text{s}$ 時の河床形状に着目すると、図-3の(E)に示されるような実験で観測された河床形状と同様の遷移河床が再現された。また、単位幅流量 $1300\text{cm}^2/\text{s}$ 時にも遷移河床が形成されており、単位幅流量 $1100\text{cm}^2/\text{s}$ 時には(S)に示されるように、duneが再現され、単位幅流量 $900\text{cm}^2/\text{s}$ 時も(S)と同様のduneが

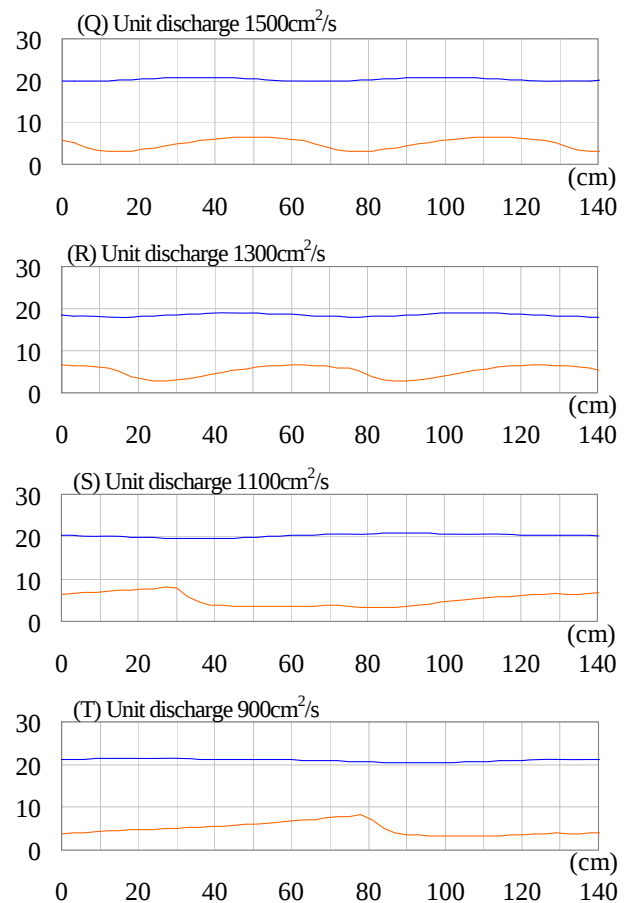


図-9 流量の増加過程とは異なった α の変化を与えた、流量の減少過程の各流量時に再現された河床形状

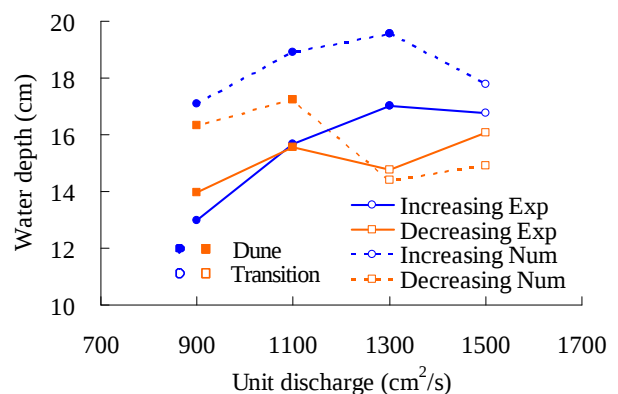


図-10 実験および数値計算の各流量における平均水深

見られた。このように、流量増加過程および減少過程に異なった平均step-lengthの係数 α の変化を適用した場合、duneと遷移河床間に実験と同様な河床形状のヒステリシス現象が再現された。以上のように数値シミュレーションの流量減少過程に増加過程よりも大きな α の値を適用すると実験と良好に一致した。

e) 水深と河床波の比較

図-10は実験と数値計算の各単位幅流量におけるの平均水深を示したものであり、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

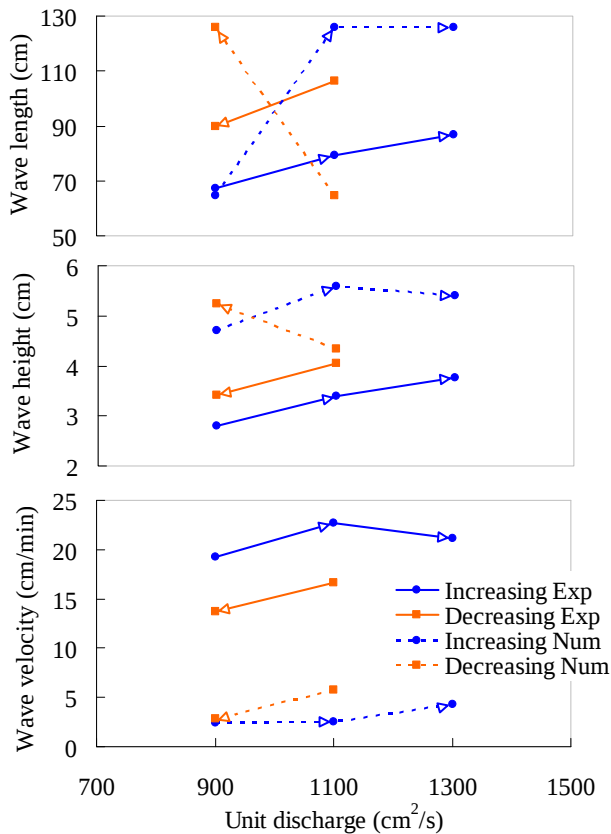


図-11 波長と波高、波速について実験値と数値計算値の比較

している。また、図-10の水深の変化に着目すると、流量増加過程においてduneの発達に伴う水深の増加や、duneの消滅に伴う水深の減少、さらには流量減少過程においてduneの形成に伴う水深の上昇など、流量の変化による河床波のヒステリシスと、それに伴う水深のヒステリシスの傾向は良好に再現された。しかし、duneが形成されている単位幅流量での水深を比較すると、数値計算によって再現された水深は、実験値よりも10~30%ほど大きな値を示している。これは数値シミュレーションで再現されたduneが、実験で現れたduneに比べ形状抵抗が大きいためであると考えられる。また、図-11に実験で観測された河床波と数値計算で再現された河床波の波長と波高、移動速度を示す。実験と数値計算を比較すると、数値計算で再現された河床波の方が、波長と波高が大きく、移動速度は小さいため、duneがより発達していることを示している。このことから、数値計算で再現された河床波は実験に比べ形状抵抗が大きいことが確認できる。

このように、duneの発達が実験より数値計算でより顕著に見られる一因として、実現象において河床波、特にduneが形成された場合、duneのクレスト頂部とクレスト頂部の下流側とでは水理条件が異なり、砂粒の飛跳距離が変化するが、数値シミュレーションでは砂粒の飛跳距離を一定と仮定していることが考えられる。この点について今後さらに検討していきたい。

4. 結論

本研究では、河床波の形成・消滅機構の解明を目的として、duneの遷移過程に着目した非定常流量下の実験を行った。粒子レイノルズ数の値がほぼ20以上(dune領域)となる条件において実験を行い、duneと遷移河床間に見られる現象を再現した。また、Giriら⁴⁾の河床変動モデルとの比較・検討を行った。本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 本実験で再現したduneの遷移過程では、河床形状と水深のヒステリシス現象が観測された。

Giriら⁴⁾の河床変動モデルによって本実験のシミュレーションを行った結果、流量増加時と減少時の平均step-lengthに同じ値を用いると実験で観測されたヒステリシスは再現できない。これは、河床形状によるstep lengthの変化を考慮していないためと考えられる。

参考文献

- 1) 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，973-978，2004。
- 2) 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
- 3) 関根正人：土砂粒子の運動の解析を基礎とした河床波の形成過程シミュレーションの試み，土木学会論文集，No.691/II-57, 85-92, 2001。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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
- 7) 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，613-618, 2003。
- 8) Garde, R. J., Ranga Raju, K. G.: Regime Criteria for Alluvial Streams, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, No. HY-6, Nov., 1963。
- 9) Nakagawa, H., and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bedload motion, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 106, 2029-2051, 1980。
- 10) 中川博次・辻本哲郎：掃流過程に対する確率モデルとその一般化，土木学会論文集報告書，第291号，pp73-83, 1979。
- 11) Nelson, J. M., Logan, B. L., Kinzel, P. J., Shimizu, Y., Giri, S., Shreve, R. L., McLean, S. R.: Bedform Response to Flow Variability, Marid2008, keynote lecture。

(2008. 9. 30受付)