

混合砂河床における Dune の形成および移動機構の実験的研究

Transformation of Dunes in the experimental flume with mixed grain diameter

北海道大学工学部土木工学科 ○学生会員 萩原佳祐 (Keisuke Hagiwara)
北海道大学工学研究科 正 員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)
北海道大学工学部土木工学科 学生会員 外山明宏 (Akihiro Toyama)

1. はじめに

本研究では、小規模河床形態における Dune を対象として、混合砂河床の水路を用いた実験をし、観察を行う。実河川で洪水が発生したとき、増水期と減水期に観測される水深は、流量が同じでも異なることが知られている。これは小規模河床波によるもので、その中でも特に Dune は流れの抵抗に大きな影響を与えることが知られており、均一粒径の砂を用いた Dune に関する研究が数多く行われてきた。しかし実河川の河床材料の粒径は不均一であり、これら混合砂が流れの抵抗に影響を及ぼす現象について、均一粒径の砂を用いた実験のみでは、実河川で起こっている現象を再現することは難しい。

三輪・大同^{1) 2)}はこの点に注目し、Lower regimeでの小規模河床形態では河床波の形成により流れの抵抗が大きく変化することを確認した。さらに砂粒子の分級と河床波の発達、成長、減衰過程の相互作用について検討し、発達過程では分級によって相対的に露出した粗砂が主要な役割を担い河床波の規模を規定する代表粒径になっていること、またこの代表粒径は平均粒径の2倍ほどであることも実証している。

そこで本実験では広い粒度範囲を持つ混合砂を用い、混合砂河床における Dune の形成に対する分級効果の検証と、Dune 内部に形成される層の物理的特性の解明を行う。本研究の実験で主に観察対象としているのは分級現象と、Dune 内部に形成される層で、これらは予備実験や数値計算で存在が確認されている。分級現象とは混合砂の細砂と粗砂が砂粒子の移動特性の違いによって分離する現象で、Dune 上では粗砂が細砂より相対的に速度が速いため Dune の下流側では粗粒化し、クレスト部では細粒化する。本研究で行われた実験で Dune 内部にできる層は Dune が流下方向に移動する際の痕跡であり、はっきりと水面に平行なものと Dune の傾斜に近い傾斜を持った縞模様が確認できた。

2. 実験の概要

2-1 実験設備

実験に用いた水路を図-1 に示す。実験水路は全長 10m、幅 0.2m のアクリル製可変勾配水路で、上流端には高さ 5cm、長さ 2m のアクリル製の固定床を築けている。下流端にも低下背水による洗屈と、水深及び流速の変化を防ぐために高さ 5cm、長さ 1m のアクリル製の固定床とスルースゲートを築けた。通水時の初期条件として、砂の河床高さが 5cm 厚になるよう、水路一様に敷き詰めた。また、通水初期時に河床内に気泡ができないよう、河床材料を飽和状態にして実験を行った。



図-1 本実験で用いた実験水路

循環機には電磁流量計を有し、上流端には電磁流速計、給砂装置を有する。水路中央部には河床形状の計測地点を明確にするために、観測区間を 50cm として、下流から上流に向かい No.1 から No.9 までの区間分けを行った。給砂量と給砂方法については、通水初期時は平均の河床高さが変化しないよう、なおかつ固定床と砂層の境界部に洗屈が生じないように十分に配慮し手動で行った。

2-2 計測項目と計測方法

本実験では流速、水深、河床波の波高、波長を観測し、インターバルカメラでの撮影、排水後の鉛直方向への粒度分布測定を行う。流速は電磁流速計を用いた。水深、河床波の波高、波長は直定規を用いて計測した。またインターバルカメラの画像より Dune の移動速度を計測した。粒度分布分析は以下の方法で行った。

停水後 2 日間乾燥させ、薄い鉄板を用い河床材料を採集しさらに 2 日間乾燥機で乾燥後篩分けにて粒度分布を測定した。測定は(a)(b)(c)(d)の4種類に分けて行い、それぞれ(a) ~ は深さ約 5mm、(b) は厚さ 1cm 程度、は水路底面から 5cm、厚さ 1cm、(c) は厚さ約 1cm、(d) は深さ 1cm、は水路底面から深さ 5cm で採集した。試料の採集を行った箇所を図-2 に示す。それぞれの採集目的は以下に示す。

- (a): クレスト部分とトラフ、Dune の下流側との比較
- (b): Dune 部分と非活動層との比較
- (c): 初期河床と通水後の河床の比較
- (d): クレストから水路底面までの段階的粒度比較

表-1 実験条件

水路幅 (m)	勾配	動粘性係数 (m^2/s)	平均粒径 (mm)	単位幅 流量 (m^2/s)
0.2	0.003	0.9×10^{-6}	0.4	0.03

表-2 実験条件

平均水深 (cm)	流速(cm/s)	径深 (m)	Fr
7.5	43	0.075	0.4666
u_*	τ_*	Re	Re _s
0.047	0.3409	133333	20.87

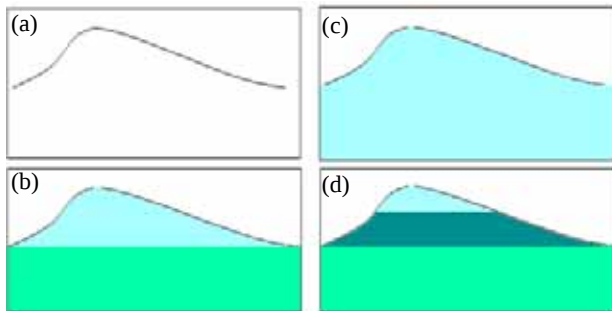


図-2 試料採集箇所

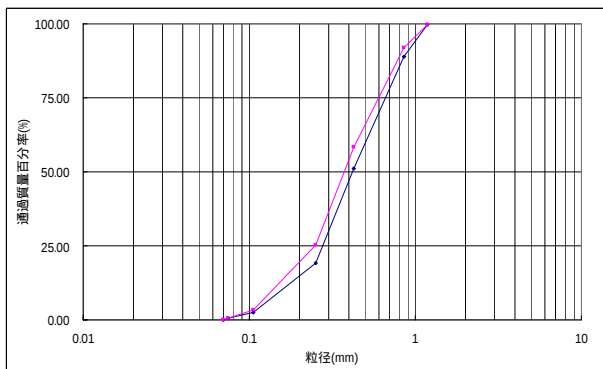


図-3 粒径加積曲線

3. 実験条件

本実験で用いた実験条件を表-1 に示す．また実験結果によって得られた諸量を表-2 に示す．初期河床に用いた混合砂を篩い分けによって粒度分布測定した粒径加積曲線を図-3 に示す．篩い分けは 2 回行った．次式を表-2 の計算に用いた．

$$u_* = \sqrt{gHI} \quad (1)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 g は重力加速度(m/s^2)、 H は平均水深(m)、 I はエネルギー勾配である．

$$\tau_* = \frac{HI}{sd_m} = \frac{u_*^2}{sgd_m} \quad (2, 3)$$

表-3 波長と波高の時間毎の計測値

	No.1	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
h(30)	1.5	1.75	1.75	1.5	1.5	1.5
h(60)	1.5	1.25	1.25	1.25	1.5	1
h(90)	-	2	2	-	-	1
L(30)	11	16	20	16	22	12
L(60)	30	20	30	21	25	30
L(90)	-	25	25	-	-	31

表-4 Dune の移動速度と波長、波高の関係

通水後時間 (min)	10-20	30-40	90-100
移動速度 (cm/s)	0.076	0.049	0.061
波高(cm)	0.89	1.05	0.90
波長(cm)	11.11	13.06	16.28

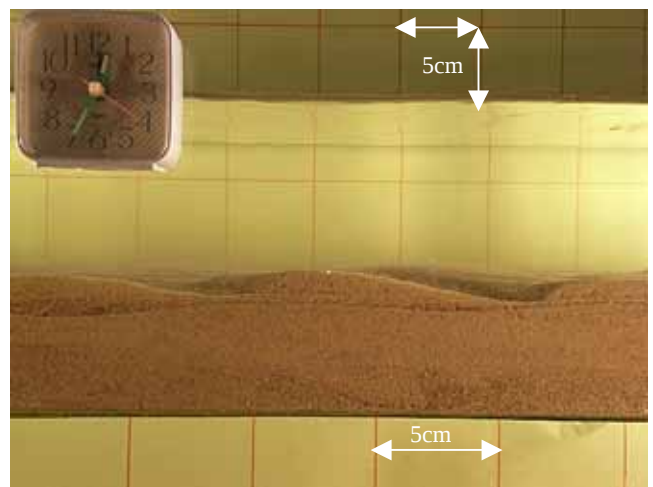


図-4 通水 2120 秒後の映像

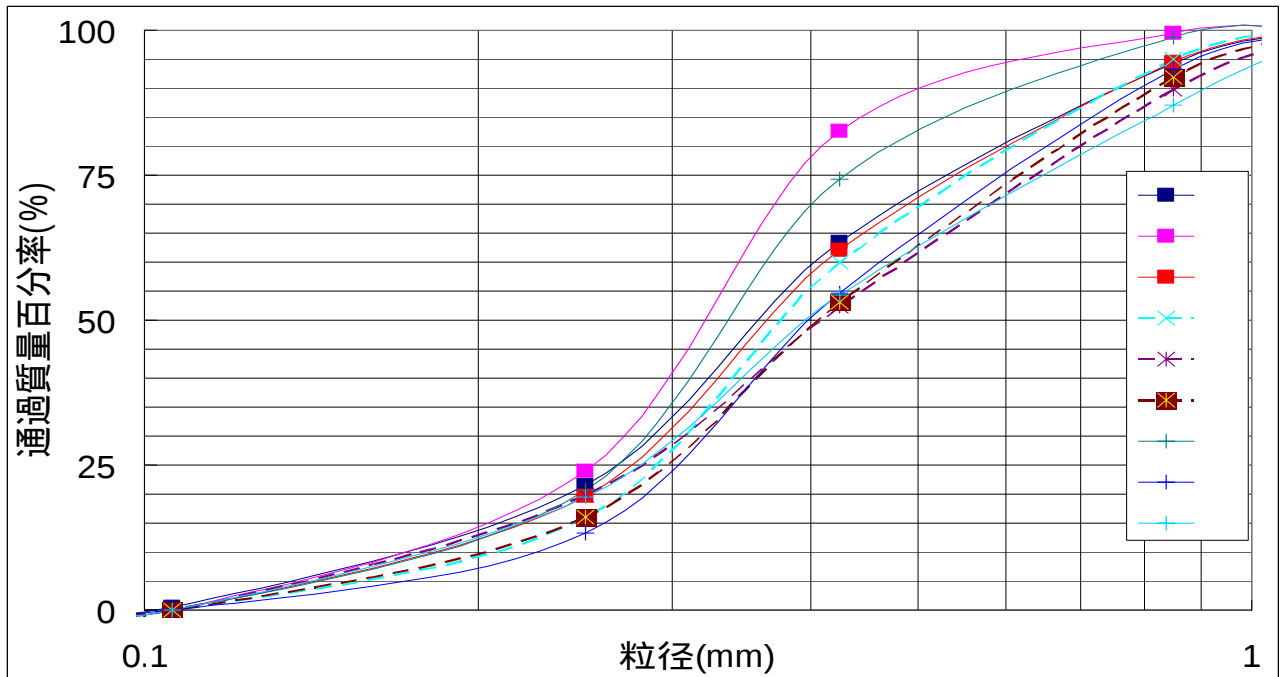
ここで、 τ_* は無次元せん断力、 d_m は平均粒径(m)、 s は水中比重でここでは 1.65 とする．

$$Re_* = \frac{u_* d_m}{\nu} \quad (4)$$

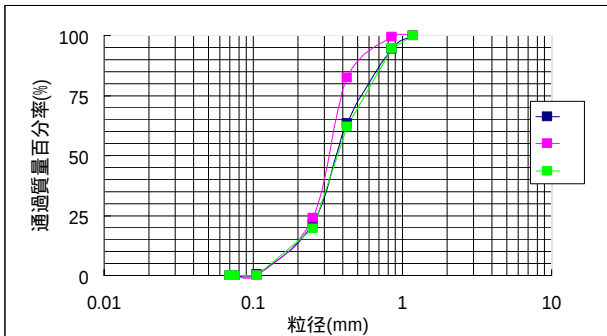
ここで、 Re_* は砂流レイノルズ数、 ν は動粘性係数(m^2/s)でここでは 20 の値を使用した．

4. 実験結果

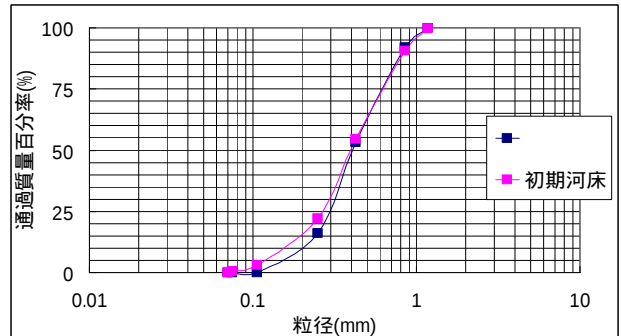
本実験で得たデータの波長と波高の時間毎の計測値を表-3 に、Dune の移動速度と波長、波高の関係を表-4 に、通水 2120 秒後の実験の状況を図-4 に、鉛直方向の粒度分布測定の結果を図-5 に示す．表-3 の h は波高(cm)、 L は波長(cm)で、() 内は通水開始後時間 (min)、— は計測不可を表す．また No. は位置番号を示す．なお No.2,3,4 はインターバルカメラでの撮影を行っていたため計測不可であった．表-4 はインターバルカメラで撮影した画像で 10 分間に 3 波長分の計測を行った結果の Dune の移動速度、波高、波長の平均値である．



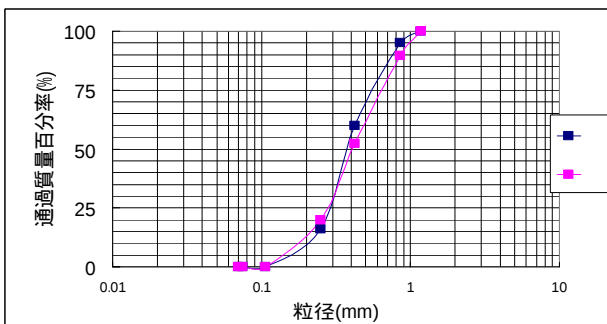
(A) ~ の比較



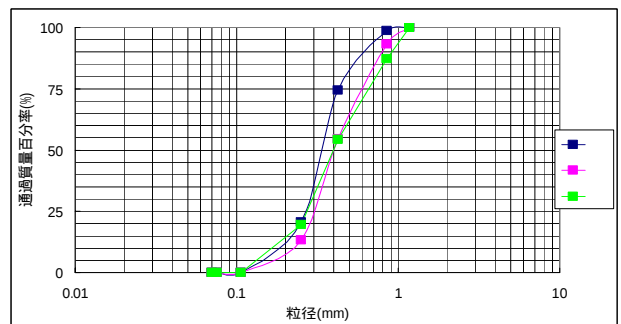
(a) ~ の比較



(c) と初期河床の比較



(b) と の比較



(d) ~ の比較

図5 粒度分布分析結果

5. 実験結果の考察

本実験では通水後すぐに河床波の形成が認められ、その後、波長、波高は成長をはじめた。最終的に波高は1～2cm、波長は20～30cmになった。波長の大きさや形、砂粒レイノルズ数 $Re_* = 20.87 > 20$ の値、また砂漣と砂堆の関係を示したグラフなどから推測しDuneが発生したことを認めることができる。ただし河床材料に混合砂を使用したためかDuneの形状が少し不安定であった。この点については今後改善の余地があると思われる。

図-4にも見て取れるが実験開始後Duneができると同時に内部に層状のものが確認できた。観察を進めていくとこれは一波長前のDuneが残した跡であることがわかり、分級によって生じた粒度の違いが肉眼で確認できる部分になっている。Duneの移動速度に関しては表-4に示したとおり波高に反比例し、波高が同じならば波長の短いほうが移動速度は速いという結果が得られた。観測データの少なさとDuneの波形の乱れにより本実験のみで結

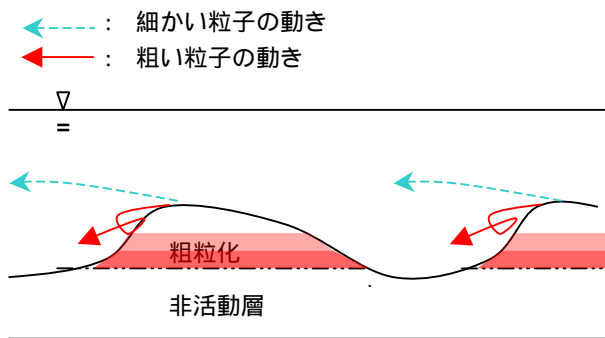


図-6 粒子の挙動モデル図

論を出すのは妥当ではないと考えられたため、今後の実験で Dune の移動速度と波長、波高等の関係については研究を進めていくこととする。

粒度分布計測で ～ について、はほぼ同じ粒度分布で はさらに細粒子の割合が多いことが確認できた。の細砂は流れによっては運ばれ掃流砂となり、粗砂はクレストから流下方向に転がり落ちる様子が確認できた。と初期河床の比較ではほぼ同じ粒度分布であったが細砂が掃流砂となってしまったためか若干のほうで粗粒化しているという結果になった。～ の比較では 頂上部は最も粗砂の割合が少なく、の Dune 内部では細かい砂は の非活動層より少なく粗い砂はより多くなって 50% 平均値としては非活動層に近い値になっている。これは活動層から飛び出した細かい砂が掃流砂になり、その浮遊砂がクレスト部分に衝突、堆積した結果クレストは細粒化し、クレストから転がり落ちた粗砂が Dune 内部の構成部品となっていることを示しており分級現象の影響がここでも証明されていると考えられる。同様のことが と の比較でもいえる。～ の全体を通してみると細粒度が最も高いのはやはり であり、次いで、… となっているが、細砂が表面付近で主に活動をしていることを考慮すると、これは当然の結果と見ることができる。粒子の挙動をモデル化したものを図-6 に示す。

6. 結論

本研究は Dune 内部で起こっている実現象を実験的に観察する目的で行われた。今回の実験で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 通水実験で、Dune 内部に層状の縞模様が現れ、縞模様は河床と平行な成分と Dune 最前部の傾斜と同等なものの 2 種類が確認できた。縞模様は分級現象によって生じた粒度の違いを表しているものである。

- (2) 主に粗粒成分はクレストから転落し、細粒成分はクレスト先端部で掃流砂となることを肉眼で確認することができた。
- (3) Dune の移動速度を画像解析によって測定することができた。10 分サイクルで 3 つの河床波を 3 回計測することで、ある程度の精度は期待できると考えられるが、Dune の波形が完全ではなかった点を踏まえると、以降の研究で改善の余地がある。
- (4) 分級現象によって生じた粒度の違いを、篩い分けによって確認することができた。
- (5) 給砂のタイミングや場所によって、河床形状に影響が出ることがわかった。

7. 今後の課題

今回の実験で給砂量は十分であったが入れるタイミングや、場所によって河床形状に影響がでてしまった。そのため給砂装置の改良や給砂方法の改善が必要である。また、水路の幅方向に 3 次元的な形状になることに関してはさらに水面の整流方法の改良の必要がある。縞模様になる方向には 2 種類あるが水理条件との明確な関連性はまだわかっていない。

今後はカラーサンドを使用した実験を予定しており、分級効果と層状の縞模様をより鮮明に捕らえること、また今回の Dune の移動速度のデータに加えることにより、混合砂河床での Dune の移動速度と波長、波高、経過時間などとの関係をより明確にし、安定した波形の画像、データを得ることを目標にしている。同時に数値計算と実験データの比較も進行させていく。

参考文献

- 1) 三輪浩・大同淳之 河床波を有する移動床流れ場の抵抗予測と流砂量 舞鶴高専紀要 No.30 p42-53
- 2) 三輪浩・大同淳之 河床波の変形に及ぼす混合砂の分級効果 水工学論文集 第 41 巻 p901-908
- 3) 三輪浩・大同淳之 混合砂河床における河床波を有する移動床流れ場の抵抗評価と河床波の移動速度の算定法 舞鶴高専紀要 No.30 p55-61
- 4) 林泰造 小規模河床形態と粗度 土木学会論文集第 411 号 招待論文 p1-11
- 5) 三輪浩・大同淳之 混合砂河床における河床波の変形過程と砂粒子の分級性状 舞鶴高専紀要 No.32 p122-132
- 6) 日刊工業新聞社 粒子径計測技術 p72
- 7) 三輪浩・大同淳之 混合砂の分級と河床波の形成過程の相互作用に関する実験的研究 水工学論文集 第 35 巻 p403-410