中規模河床波の低流量時における形状変化過程 に関する水理実験 HYDRAULIC EXPERIMENTS ON CHANGING PROCESS OF BAR

SHAPE IN SMALL DISCHARGE PERIOD

渡邊康玄¹• 安田浩保¹ • 島田友典² Yasuharu WATANABE, Hiroyasu YASUDA and Tomonori SHIMADA

¹正会員 博(工学) 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目) ²正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

Hydraulic experiments were conducted to clarify a changing process of bar shape formed during flood at usual time. Double-row bar-like shape appeared and reaching a meandering style channel was observed. It became clear that the component which has wavenumber 1 and 0 in the transverse and longitudinal directions respectively with formation of a meandering style channel increases as a result of the wave number analysis of bed forms. Furthermore, although it was examination near the limit of theory, weak nonlinear analysis considering the interference between (1,1) and (2,2) components was carried out, and the same result as an experiment result was obtained.

 $Key \ Words$: Channelized process, bed forms, hydraulic experiment, alternate bars, weakly nonlinear analysis

1. はじめに

中規模河床波の形状特性については、災害防止や河 川環境の面からこれまでにさまざまな研究が行われて きており、流量一定の条件における平坦床からの砂州 の発達過程における現象はかなり明らかとなってきて いる.しかし実際の河川では、流量が時々刻々と変化 するとともに、それ以前に形成された河床形状の影響 を受けて中規模河床波が変形している.さらに、流量 の変化だけに着目してみても、洪水中の短時間の急激 な変化もあれば、洪水期と非洪水期の違いなどある程 度時間スパンの長い変化も存在する.このような中規 模河床波の変化特性には未だ未解明の部分が多数存在 し、災害や河川環境に直結することからも早急な解明 が待たれている.

洪水時の砂州の変化については,洪水ハイドロを想 定した条件で三輪ら¹⁾,渡邊ら²⁾が実験的に,Tubino³⁾, 渡邊ら⁴⁾が理論解析をそれぞれ行っており,洪水中に砂 州が履歴効果を伴って変化することを指摘している.ま た,長期的時間スパンの流量変化による変化は,上流 からの土砂供給の変化の視点で三輪ら⁵⁾が,自己形成流 路という立場から竹林ら⁶⁾が,砂州と平水時流量との関 係から寺本ら⁷⁾がそれぞれ実験あるいは数値計算を用い て検討を行い,条件によって様々な変形過程をとるこ とを示している. 本研究では、出水時に形成された中規模河床形態が その後の小規模な出水時にどのような変化過程を示し て蛇行流路にいたるかに着目し、水理実験を行った.そ の結果および渡邊ら⁸⁾が行った複列砂州から単列砂州へ のモード減少過程を見た水理実験の結果をも使用し、出 水時に形成された中規模河床形態が小規模な出水での 河道形状の形成に与える影響について考察を行った.

2. 水理実験の条件

出水時に形成された中規模河床形態がその形成流量 よりも小規模な流量時にどのように変形するかを把握 する目的で,出水時および小規模出水時(平常時)の流 量をそれぞれ2種類設定し水理条件としては4種類(シ リーズ)の水理実験を実施した.**表**-1にそれぞれの実 験条件をとりまとめた.各流量は,平坦河床からの中 規模河床波の発達過程が把握されているもの⁸⁾を用いる こととした.平坦河床から通水した場合,これらの流 量ではすべての場合で限界掃流力以上の流れが生じる ことを確認している.平坦河床から出水時に形成され る河床波を想定した初期河床形状を形成させるために 用いた流量 *Q_p* は,単列砂州が形成されるもの(S-50; シリーズ C-1 および 2)と初期に複列砂州が形成され単 列砂州へ移行するもの(S-30;シリーズ C-3 および 4)

	初期河床形成		河床変形					初期河床形成		末変形	
	流量	通水時間	流量	通水時間			流量	通水時間	流量	通水時間	
実験名	Q_p	T_p	Q_s	T_s	備考	実験名	Q_p	T_p	Q_s	T_s	備考
	$\rm cm^3/s$	min.	$\rm cm^3/s$	min.			$\rm cm^3/s$	min.	$\rm cm^3/s$	min.	
C-1-1	10239	450	1612	0	S-50	C-3-1	5134	630	1612	0	S-30
C-1-2	10239	240	1612	120	$S-50 \rightarrow S-10$	C-3-2	5134	510	1612	120	$S-30 \rightarrow S-10$
C-1-3	10239	240	1612	480	$S-50 \rightarrow S-10$	C-3-3	5134	600	1612	480	$S-30 \rightarrow S-10$
C-1-4	10239	240	1612	1680	$S-50 \rightarrow S-10$	C-3-4	5134	630	1612	960	$S-30 \rightarrow S-10$
C-2-1	10239	240	3177	0	S-50	C-4-1	5134	630	3177	0	S-30
C-2-2	10239	210	3177	120	$S-50 \rightarrow S-20$	C-4-2	5134	600	3177	120	$S-30 \rightarrow S-20$
C-2-3	10239	720	3177	480	$S-50 \rightarrow S-20$	C-4-3	5134	540	3177	480	$S-30 \rightarrow S-20$
C-2-4	10239	390	3177	840	$S-50 \rightarrow S-20$	C-4-4	5134	600	3177	990	$S-30 \rightarrow S-20$
S-10	0	0	1612	960	S-10	S-20	0	0	3177	840	S-20
S-30	0	0	5134	600	S-30	S-50	0	0	10239	240	S-50

表-1 水理実験条件および計算条件



図-1 河床波の波長,波高および波速の比較

の2種類である.小規模出水時(平常時)を想定した流 量Q_sは、平坦河床からの中規模河床波の発達過程が把 握されているもののうち流量が少ない2種類(S-10;シ リーズ C-1,3 および S-20; シリーズ C-2,4) を選定した. さらに、河床形状の変遷を把握するため同一水理条件 (シリーズ)で通水時間 T。を変えた実験をそれぞれ3 ケース行っている.たとえば実験ケース C-1-1. C-1-2. C-1-3 および C-1-4 は小規模出水時(平常時)を想定し た流量の通水時間のみが異なるシリーズ C-1 の実験群 である.なお、表-1の備考欄に、平坦河床からの中規 模河床波の発達過程が把握されている渡邊ら⁸⁾が実施し た同一水理量の実験ケース名を記載した.比較のため, 平坦床から小規模出水時(平常時)を想定した流量を 同程度の時間通水したケースについても併記している. 以降の記述では、洪水時を想定した流量を「洪水時流 時流量」とする.

実験に用いた水路は、長さが 50m, 幅が 0.9m の直線 水路である.なお、河床は粒径が 0.76mm の均一な硅 砂を勾配が1/80になるように敷均して初期河床とし, 水路の上下流端には初期河床高と同じ高さとした固定 堰を設けている.小規模出水時の河床形状変化につい ては土砂の細粒成分が重要な働きをすると考えられる が、ここでは簡単のため単一粒径の実験とした.実験 中に下流端の固定堰を落下する掃流砂を計量し、同量 の砂を上流端から給砂している.所定の時間を通水し

た後,水路下流端の 10.5m 上流から 26.25m 上流まで の縦断距離で約15mの区間について、縦横断方向それ ぞれ 15cm および 5mm 間隔で河床を測定した.測定さ れた河床における水面および流れの状況を把握するた め、セメント粉を河床にふりかけ固定させた後再度通 水して水面および流況を測定した、このため、同一の 水理条件でも通水時間の異なる実験を実施する場合に は、河床を再度平坦に均して最初から通水することと した. すなわち, 各ケースとも途中で通水を停止する ことなく所定の時間まで通水を継続したものとなって いる. 各シリーズは同じ流量条件で通水したものであ るが、連続したものではない. 河床形状の変化過程を 検討するに当たって再現性が問題となるため、通水中 は上記河床高の測定範囲において、30分毎に水面上か ら砂州の前縁線の位置を,また透明のアクリル製であ る側壁を通して局所最大洗掘深および局所最高河床高 とその発生位置についてそれぞれ観測を行った.

実験結果 3.

(1) 各実験の再現性

同一シリーズにおける各河床形状の再現性をみるた めに、河床波の波長、波高および波速の変化を見たも のが図-1である.時間の経過とともに砂州の前縁が明 確でなくなるため、ここでは便宜上、河岸近傍の洗掘 部の位置を基に砂州1波長とすることとした.また,波





(2) 砂州形状変化過程

高は,側壁から観察を行った局所最大洗掘深とそれに 隣接する局所最大河床高との差として算出した.なお, 測定範囲内に複数の砂州が存在するためこれらの平均 値を用いている.同図の横軸は通水時間としているが, 各ケースで平常時流量のための初期河床を形成するた めの洪水時流量 *Q_p*を通水する時間 *T_p*が異なることか ら,流量変化時点を0として比較できるようにとって いる.同一シリーズ内では,一部砂州波長の伸縮に伴 う再現性が高くない部分も存在するが,ほぼ同様の傾 向を示しており河床形状の変形過程を考察するには十 分の結果が得られている.なお,砂州波長の伸縮につ いては別途検討する必要がある.

各ケースで測定された河床コンター図(初期平坦床 からの変動量)をシリーズ毎に示したものが図-2であ る.図中の実線は水面上から観察された砂州の前縁線 を,破線の矢印は通水中に撒かれたトレーサーが集中 して移動する方向を,また点線の閉曲線は浮き州状と なっている個所をそれぞれスケッチしたものである.す べてのシリーズで小流量に変化させた当初は,初期河 床の砂州上では幾筋にも分かれて,初期河床形状の単 列砂州の淵部へ流れ込んでいる.また,この単列砂州の 淵では流れが集中しており,下流へ流掃される河床材料 が多く,直下流部やや水路中央寄りに図中に Bt と記し



た舌状の前縁を形成する(C-1-2, C-2-2, C-3-3. C-4-2). これが淵の対岸に位置する元の交互砂州の前 縁とで複列砂州状の形状となる. C-1を除くすべてのシ リーズでこの現象を経た後、C-2-3.C-3-4 および C-4-3 に見られるように側壁に接続した浮州が成長し、蛇行 流路状の流れを示す状態に至る. この時点では,砂州 の前縁はほぼ消滅し、明らかに砂州とは異なる河床形 状となっている. なおシリーズ C-1 において, C-1-3 で は蛇行流を示しているが、C-1-4では砂州の前縁がほぼ 消滅しているものの流れは蛇行流路状ではなく, 網状 となっている.また,蛇行流路状の流れにいたる時間は シリーズ C-2 および C-4 に比較して C-3 は遅く, C-3-3 においても砂州の前縁はほぼ消滅しているものの複列 砂州状の流れが見られる.

以上をまとめると、出水時に形成された単列砂州は、 小規模の流量時に複列砂州状の地形を経て蛇行流路状 の形状に移行していく.なお、移行の時間は流れの規 模によって大きく変化することも示唆される.

次に、砂州の変化過程を波長、波高および波速の変 化で見ることとする. 図-3は、各シリーズの中でもっ とも長く通水したケース(C-1-4, C-2-4, C-3-4および C-4-4) における変化を示したものである. なお、比較 のため、それぞれのケースにおいて対応する平坦河床 からの変化を見た実験結果(S-10, S-20, S-30 および S-50) についても併記している. 波速以外は, すべての シリーズで平坦河床から実験を開始した値(S-10 およ び S-20) ではなく、洪水時流量通水時に形成された河 床波の値を維持している.一方波速に関しては,平坦河 床から実験を開始した結果と同じ値を示している.特 に、平常時流量として S-20 の流量を通水した C-2 およ び C-4 では、浮州がかなり発達しているにもかかわら ず、浮州がほとんど発生しなかった平坦河床から実験を 開始した S-20 と同程度の波速を有している. なお, 浮 州の発生により通水後しばらくしてから砂州の前進が 停止した S-10 の流量を流した C-1 および C-3 では,流 量減少と同時に河床波の移動は見られなくなっている.

このように、河床形状は複雑に変化しているものの、 その諸元である波長や波高については洪水時に形成さ れている河床波に強く影響を受けている.

小流量時の流れは通水初期の河床形状に支配される との寺本ら7)の指摘から、洪水時流量により形成され た河床形状について、縦横断方向の河床の勾配の関係 が明確になるように測定下流端の高さを基準とする標 高のコンター図も図-2に併記した. 平坦河床からその まま単列砂州が形成された C-1-1 と複列砂州が初期に 形成され単列砂州に移行した C-3-1 では、交互砂州の 淵部近傍の等高線が C-1-1 では斜めに描かれているの に対し C-3-1 では横断方向にそれほど角度を持たずに 描かれている.低流量時には河床の勾配の方向と流水 の方向が一致すると仮定すると、C-1-1では砂州の前縁 を横切るように縦断方向に、C-3-1では砂州の前縁に沿 うように横断方向にそれぞれ流れが生じることとなる. これは、洪水流量時に複列砂州を経ないで単列砂州が そのまま形成された初期河床に対しては低流量時の流 れが前縁線から離れて砂州の中央を分断する形で流れ, 洪水流量時に複列砂州を経て単列砂州が形成された初 期河床に対しては低流量時の流れが前縁線に沿って流 れるとする寺本らの指摘⁷⁾と一致する.しかし,今回の 結果では C-1-1 と C-3-1 で砂州の形成を支配する川幅 水深比が大きく異なっていないためか明確な違いは見 られなかった.

4. 河床の形状特性変化

(1) 河床の波数解析

河床形状の特徴を定量的に表現するため,式(1)で あらわされる長谷川ら⁹⁾が用いた河床波の波数解析を行 うこととした.

$$\eta = \Sigma \Sigma \alpha_{i,j} \sin\left(i\frac{2\pi}{2B}y - \frac{\pi}{2}\delta_{ie}\right) \cos\left[j\frac{2\pi}{L_b}\left(x - \delta_{ij}\right)\right]$$
(1)

ここで、 η は河床勾配を考慮した基準面からの平均水深 で無次元化された河床高さ、波数 *i* および *j* はそれぞれ 横断方向 *y* および縦断方向 *x* の波数、 $\alpha_{i,j}$ は波数 *i*、*j* の波成分の振幅、 δ_{ij} は波数 *i*、*j* の位相であり、 δ_{ie} は 式 (2) で表される.

$$\delta_{ie} = \frac{1 + (-1)^i}{2}$$
 (2)



図-4 波数解析結果

各河床形状を解析した結果, さまざまな成分が存在し ていたが、ここでは砂州形状を特徴付けるといわれて いる (1,1), (2,0), (3,1), (2,2) および (4,0) を抽出して 検討を行うこととする.また、解析で(1.0)が比較的大 きな値を示したためにこれについてもあわせて検討を 行う. ただし, カッコ内の2つの数字はそれぞれ (i,j) を意味している. 解析の対象とした実験ケースは、シ リーズ C-1, C-2, C-3 および C-4 である. 解析対象区 間は、図-2に一点鎖線で示されている. さらに比較の ため、平常時流量として用いた流量での平坦床からの 変化過程に関する実験を行った S-10 および S-20 につ いてそれぞれ通水後 480 分から 960 分後への変化と通 水後 360 分から 840 分後への変化についても検討を行 うこととした、なお、河床形状を無次元化するために 使用した水深は、浮州の大きさ等が各ケースで様々な ことから、平坦河床時に現れる等流水深を用いること とした. すなわち, シリーズ C-1, C-3 および S-10 は 6mm, シリーズ C-2, C-4 および S-20 は 9mm をそれ ぞれ無次元化するための水深とした.結果を図-4に示 す. C-1-1, C-2-1, C-3-1 および C-4-1の河床は、無次 元化で用いた水深となる流量 S-10 あるいは S-20 の流 量より大きい S-50 あるいは S-30 と同じ流量を通水し て形成されたものであることより、各波数成分の振幅 が大きな値となっている.シリーズ C-1,2 および 3 の 各実験において (1,1) や (2,0) の波数成分は, 平常時流 量にとって極めて影響のあるものであることがわかる.

平坦床からの変化を見た S-10 および S-20 では, 浮州 が顕在化するか否かで大きく傾向が異なっている.すな わち, 顕在化しない S-20 では,時間の経過により単列 砂州を表す成分 (1,1) および (2,0) が卓越する傾向を示 すのに対し,顕在化した S-10 では,これらがむしろ低 下し代わりに (1,0) が大きくなっている.シリーズ C-2, 3 および 4 でも時間の経過とともに (1,0) の値が上昇傾 向を示し S-10 の場合と同様である.なお,網状流路と なったシリーズ C-1 の (1,0) については時間の経過とと もに若干の変動はあるものの他のシリーズに比較して 変化は少ない.平常時流量にとっては影響の強いと考 えられる (1,1) および (2,0) は,いったん大きく減少す るものの,最終的には大きく減少した値からはむしろ S-20 の場合と同様に増加する傾向を示している.なお, シリーズ C-1, C-2 および 3 では洪水時流量通水時に形 成された河床の (1,1) および (2,0) の値に対して最終的 な値は小さくなっているものの,シリーズ C-4 では逆 に同等あるいはむしろ大きくなる結果を得た.

単列砂州を表す (1,1) および (2,0) の変化について, 平常時流量通水初期は舌状の前縁の形成が原因で相対 的に減少し,最終段階での低下は洪水時流量通水時に 形成された河床である単列砂州の前縁の消滅とも関係 しているものと判断される.

蛇行流の形成と(1,0)の増加との関係は,波数解析を 行った区間の選定とも関係しており現段階では明確で はないが,洪水時流量通水時に形成された一対の単列 砂州の片側が発達し片側が小規模になるようでもあり, 今後さらに検討を要する.

(2) 弱非線形解析の利用

渡邊らが用いたモード干渉を考慮した砂州発達に関 する弱非線形解析10)を用いて、砂州の挙動について検 討を行う. この解析は、平坦床からの砂州の発達過程 における単列砂州と複列砂州の相互干渉について検討 を行うことを目的として開発され、単列砂州を波高 α11 を持つ (1,1) の波, 複列砂州を波高 α22 を持つ (2,2) の 波として, α11 および α22 が時間とともにどのように変 化して行くかを調べることが可能である.今回の実験結 果において洪水時流量通水時に形成された河床に(1,1) および (2,2)の波数成分が卓越して存在していたことか ら、これらの干渉について見るためにあえて用いるこ ととした、対象としたシリーズは、摂動パラメータが それほど大きくない S-20 の流量を通水したシリーズす なわち C-2 および 4 とした. 各実験条件の下で, α_{11} お よび α₂₂ の時間発達について α₁₁ α₂₂ 平面上にプロッ トしたものが図-5である.平坦河床からの発達につい て, 原点付近 (α₁₁ = α₂₂ ≈ 0) からどのような経路を たどって point A あるいは point B にいたるかを赤線



および青線で表現している.point A および point B は それぞれ最終的に波数成分が平衡状態に至る点であり, point A は (1,1) のみ値を持ち, point B は (2,2) のみが 値を持つ点を示している. α_{11} と α_{22} の初期値のわず かな大きさの違いにより砂州の発達過程が大きく異な ることを示している. 同様に, α_{11} および α_{22} がともに 大きな値を初期値とした場合に最終的に point A ある いは point B に至る発達過程の分岐限界を,赤および 青の点線で示している.すなわち,青い線で囲まれた area I および青い点線で囲まれた area I'の領域に初期 値が存在する場合 point A に,赤い線で囲まれた area II および赤い点線で囲まれた area II'の領域に初期値 が存在する場合 point B に到達することを示したもの である.

シリーズ C-2 の場合は、平水時流量にとって初期河 床形状であるケース C-2-1 において (1,1) および (2,2) の値がそれぞれ, 0.49 および 0.14 であるため, 平水時 流量での砂州の挙動を検討する際の初期値は areaI'の point O に位置する. 図中の黒い点線が時間経過ととも に (1,1) および (2,2) の理論が示す経路であるが, point Oから最終的に point A に到達していることがわかる. このとき, (1,1) および (2,2) とも減少していく結果が 得られている.また、シリーズ C-4 の場合は、C-4-1 に おいて砂州の挙動を考える際の初期値がそれぞれ 0.28 および 0.08 であり area I に属し, point O から最終的 に point A に到達している.シリーズ C-4 の場合はシ リーズ C-2 とは異なり,理論の結果は (1,1) が増加して point A に至っている. このことは、図-4 に示した実 験結果の河床形状を波数解析した結果と一致しており, この場合においても (1,1) と (2,2) の相互干渉が働いて いる可能性が示された.かなり理論の限界に近い検討 ではあるが、理論と実験結果が一致したことは興味深 く、河床に砂州が既に存在する場合の変化過程につい てもこの解析法が利用できる可能性が示された.

5. おわりに

出水時に形成された中規模河床波がその後の小規模 な出水によってどのように変化するかを水理実験を実 施した.今後さらなる検討の余地は残しているものの, 単列砂州形状から複列砂州状の地形を経て,蛇行流路 に至る過程が示唆された.また,交互砂州の片側の砂 州が発達し対となる片側の砂州が減衰する波数解析結 果も得られた.さらに,理論の限界に近い検討ではあ るが,(1,1)の波数成分と(2,2)の波数成分の相互干 渉を考慮した弱非線形解析を実施し,実験結果と同一 の結果を得た.これらの知見を基に,更なる検討が望 まれる.

謝辞:本研究は,国土交通省北海道開発局の受託業務, 河川環境管理財団の河川整備基金助成ならびに日本学 術振興会科学研究費(基盤研究(B)(1)16360242,代表: 清水康行)による補助を受けた.また,北海道大学泉 典洋先生には取りまとめに当たり有益な情報をいただ いた.記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 三輪浩,池田香織,谷和憲:正弦波状流量変化による交 互砂州の発達・変形過程,土木学会第55回年次学術講 演会講演概要集第2部, pp.540-541, 2000.
- 渡邊康玄, M.Tubino, G.Zolezzi:非定常流における交 互砂州の安定解析, 土木学会第56回年次学術講演会講 演概要集第2部, pp.172-173, 2001.
- Tubino, M. : Growth of alternate bars in unsteady flow. Water Resources Research, Vol.27, No.1, pp.37-52, 1991.
- 5) 三輪浩,大同淳之,横川純:交互砂州河床における水み ちの形成過程に及ぼす土砂供給と砂礫の分級の影響,土 木学会水工学論文集第49巻,pp.949-954,2005.
- 竹林洋史,江頭進治:自己形成流路の形成過程と形成水 理条件,土木学会論文集,Vol.677,pp.75-86,2001.
- 7) 寺本敦子, 辻本哲郎: 砂州形状の特性と平水時の流路構造, 土木学会水工学論文集第50巻, pp.961-966, 2006.
- 渡邊康玄,桑村貴志:複列砂州のモード減少過程に関する 水理実験,土木学会水工学論文集第48巻,pp.997-1002, 2004.
- 長谷川和義,山岡勲:発達した交互砂州の性状に関する実験と解析,土木学会第26回水理講演会論文集,pp.31-38, 1982.
- 渡邊康玄:モード干渉を考慮した砂州のモード減少過程, 土木学会水工学論文集,第50巻,pp.997-1002,2006.

(2006.9.30 受付)