

複列砂州の維持条件に関する一考察

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員○高橋 玄
新潟大学災害・復興科学研究所 正員 安田 浩保

1. はじめに

中規模河床波の形態や挙動については現在までに実験的研究と理論的研究を中心に解明が進められてきている。なかでもその発生の有無や形態（横断方向の波数）は川幅水深比と密接な関連性があり明瞭に領域区分が可能ながことが理論的に示されたことにより¹⁾、中規模河床波の理解は飛躍的に進展した。

横断方向の波数が1の単列砂州卓越領域下での研究は数多く行われ^{2)~4)}、その根本的な特性は概ね把握されるようになった。一方で、横断方向の波数が2以上の複列砂州については未だに十分な解明に至っていない。その代表的な問題がモード減少である。直線水路において複列砂州が形成される川幅水深比を与え続けても、時間経過に従って次第に単列砂州のような少モード砂州への遷移することが水理実験と数値解析から指摘されている⁵⁾。これに対し、自然河川においては複列砂州が長期間にわたり維持されることが少なくない。つまり、実河川とある種の理想条件下の室内実験における複列砂州の形態には領域区分の概念からは説明が困難な大きな隔たりが存在すると言える。また、安定した河道維持を工学的に考えるうえでも、複列砂州は流路の変動が活発で変動量や発生位置の把握が容易でないため、その形成や維持の条件についてのさらに踏み込んだ研究が不可欠と言えよう。

著者ら⁶⁾は図-1に示したように流路の平面形状が周期的に拡張を繰り返す場合（以下、拡張水路と呼ぶ）では、縦断的に連続した複列砂州が形成されるだけでなく、その形状が長期間にわたり維持されることを指摘した。この指摘は、モード減少の知見に相反するだけでなく、複列砂州形態が安定的に維持されるか否かの把握には、従来から用いられてきた砂州の領域区分の概念¹⁾と流路の平面形状の組み合わせが必要であることを示唆するものである。

現状では、著者らが実施した研究はあくまで現象の把握だけに留まっている。本研究では強制砂州成分の発達過程に着目した考察から流路の平面形状が複列砂州形態に与える影響の体系化をすすめ、複列砂州の維持条件の導出を試みる。

2. 強制砂州の発達過程の把握

中規模河床波の発生形態は、初期状態を平坦床としても流れの不安定性によって自然発生する自由砂州と、河道の湾曲部に見られるような流路の平面形状にตอบสนองして強制的に形成される強制砂州に大別される。

拡張水路で形成された河床形状は、その流路形状から自由砂州成分と強制砂州成分の両者から混成させていることが推測できる。そして、形成される河床形状が図-1のように湾曲形状と同じく流心で線対称となる点に着目すると、形成の主因は強制砂州成分であり、結果的に複列の砂州が形成されてその後も維持されたと考えることが妥当であろう。これは、自由砂州の平面的な配置は必ずしも流路形状に対応しないことから明瞭に理解できる。

表-1 数値シミュレーションに用いた計算条件

a) 流路形状				
流路全長	流路幅	河床勾配	蛇行波長	最大蛇行角
10,000m	500m	1/300	1,600m	15°

b) 水理量			
流量	τ_*	$Bt^{0.2}/h$	平均河床粒径
2,200m ³ /sec	0.2	130	12.3mm

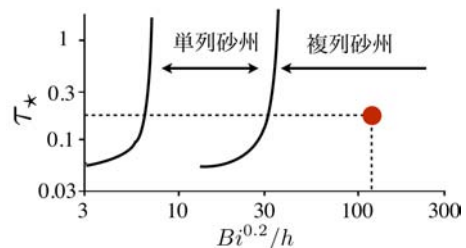


図-2 本研究の水理条件下における砂州の卓越領域

ここでは、強制砂州の発達過程や流路形状に対する応答の把握を目的とした数値実験を行う。本研究では形成される砂州の発達時間に着目することで便宜的に自由砂州成分と強制砂州成分を独立して扱えると考え、側壁形状の片側を直線、もう一方を周期的に湾曲させた流路を用いた数値実験により、強制砂州の平面的な形成範囲を調べた。以下では、この流路形状を片側直線水路と呼ぶ。

(1) 計算条件

流路形状については表-1 a)に示した。これは北海道厚別川下流区間の平野の平面形状を簡略化した値である。側壁の形状は、いくつかの実地形に対し、sine-generated curveを側壁の線形に重ねたところ、拡張水路の側壁の線形はsine-generated curveと一致することが確認された。これに従い、本来は河道の流心位置の形状を表現していると言われているsine-generated curveを本研究では流路の側壁の線形に使用した。

水理条件は表-1 b)に示した。これは厚別川流域での2003年の洪水時のデータを参考に定めた⁷⁾⁸⁾。表中の流量は洪水のピーク流量である。これを中規模河床形態の領域区分図に適用すると、図-2にあるように単列砂州領域から大きく離れた複列砂州領域であることがわかる。以降に示す数値計算の結果は、すべてこの水理条件を用いている。これは、不安定現象の数値シミュレーションで一般的に用いられる方法にならったものである。

実施した数値シミュレーションでは流れの上流端境界条件としてこの流量を与え続ける定常条件を用いた。計算の上流端と下流端の境界条件は周期境界条件とした。総計算時間は試行錯誤から河床が平衡状態に達すると判断した400,000秒に設定した。

なお、図-1に示した拡張水路を用いた計算⁶⁾では、水理条件はこの片側直線水路と同じものを用い、流路形状についても両岸にsine-generated curveを適用したことののみが異なる。この場合の拡張水路の条件を以降では河幅1倍流路と呼ぶ。

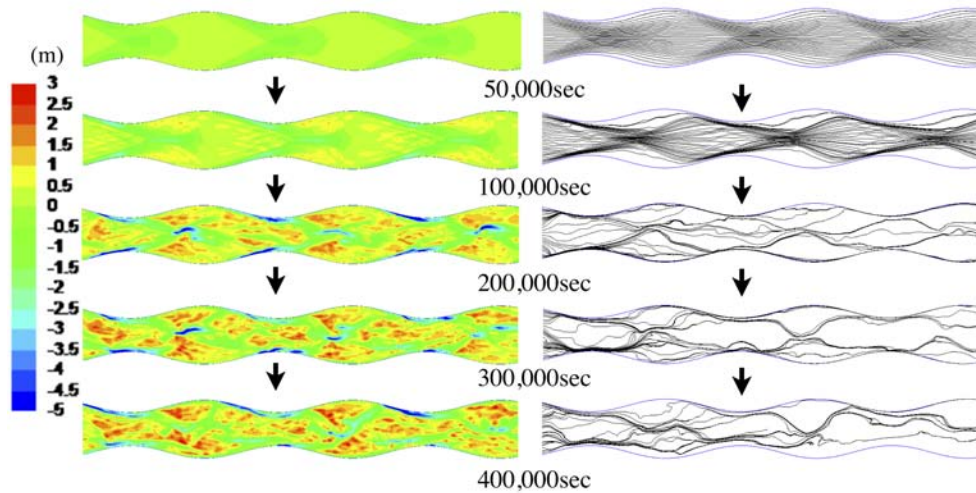


図-1 瓢箪型のような拡張水路における河床形状，流線の変化 (200,000 秒以降では複列砂州が維持)⁶⁾

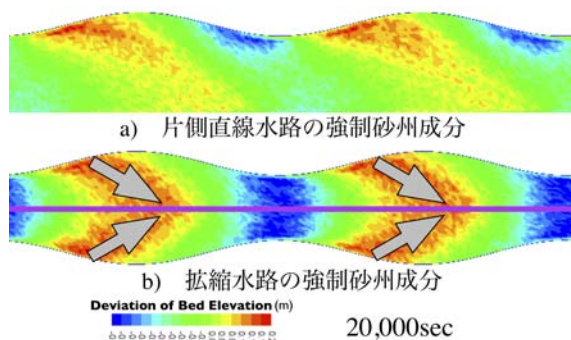


図-4 片側直線流路と拡張水路の強制砂州成分の比較

(2) 数値解析モデル⁹⁾

以下で実施した河床変動計算は iRIC に同梱される平面 2 次元河床変動計算のソルバーである Nays-2D を用いた。紙面の都合上，ソルバーの基礎式の掲載は省くが，流れの支配方程式は 2 次元浅水流方程式，河床変動量は流砂の連続式によって計算される。また，流砂量は芦田・道上の式¹⁰⁾を用いて決定している。

(3) 計算結果

計算結果を図-3 に示した。砂州形成初期の 12,000 秒には，少なくとも自由砂州は可視化の着色区分では形成が認められない。これに対し，図中の a)，b) に示したように流路左岸の湾曲部から対岸に伸びる強制砂州が形成された。全体の砂州形状としては強制砂州が卓越していることがわかる。流線の形状から，c) のようにこの強制砂州を避ける流れが発生していることが確認される。その後，36,000 秒以降は，交互砂州が卓越するようになり，流れの形状も交互砂州上の流れに酷似した形状の流線が得られた。

以上の結果から，本研究で用いている流路形状においては，砂州形成初期の河床形状に着目することで，その流路に形成される強制砂州成分を見ることができると判断した。また，その形成は a) のように流下方向に対して斜めに伸びることが確認された。

(4) 拡張水路での複列砂州の維持機構の推測

ここで，上記で実施した片側直線水路と実施済みの拡張水路の強制砂州成分を比較する。図-4 に示したように拡張水路と片側直線水路では砂州地形の形成に対する強制砂州成分の寄与は異なることが分かる。拡張水路では，両岸から流心に向かって形成される強制砂州の相互干渉によってまず幅広区間の流心に楕円状の堆積領域が

発生する。その後，急縮部分で水路壁に沿っていた流れがこの堆積領域を貫流するために分断されて，結果的に複列の砂州が形成される。つまり，拡張水路において見られた複列砂州の形成や維持は，左右岸からそれぞれに発達してきた強制砂州成分の相互干渉を契機としてもたらされたものであることが推測される。また，形成された複列の砂州が動的な平衡状態を維持して流路の幅狭部分で固定化し移動しない点からも強制砂州の寄与度が大きいことは明らかである。

3. 強制砂州の流心における相互干渉規模の把握

前章において，拡張水路では強制砂州が両岸から流心に向かって発達し，それらが流路中央で相互干渉することで複列の砂州が維持されることが示唆された。強制砂州の平面的な発達領域の規模は有限と考えることが妥当であり，強制砂州の相互干渉の強度と流路幅には密接な関係があることが予見される。

ここでは，拡張水路の河幅を河幅 1 倍の条件に比べて 2 倍にし，相互干渉の強度を緩和することで，前章で示した推測の妥当性を検証する。

(1) 計算条件

無次元掃流力，河幅水深比を前項の条件のまま固定するものの，その他の条件は河幅水深比が拡張水路の河幅 1 倍の条件と等しくなるように改めた。具体的な変更点は以下の通りである。流路形状は側壁の蛇行角と蛇行波長は同一とするものの両岸蛇行とし，河幅を 2 倍の 1,000m とした。水理条件は流量を 13,000m³/sec，平均河床粒径を 24.7mm に変更した。他の条件は表-1 に準ずる。

(2) 計算結果

河幅を 2 倍にした場合の拡張水路における河床形状，流線の変化過程を図-5 に示した。100,000 秒から，砂州形成初期には両岸で強制砂州が形成されているが，それは流路中央で相互干渉せず，流下方向にそのまま伸展している様子が確認できる。その後も河幅 1 倍の条件下での拡張水路で見られたような幅狭部分での複列砂州は形成されなかった。流れの形状も複列砂州上で見られるような 8 の字流路は形成されず，単列砂州上の流れに近い形状の流線が得られた。この結果より，両岸からの強制砂州の相互干渉によって複列砂州が維持されるといった推測の妥当性が認められる。

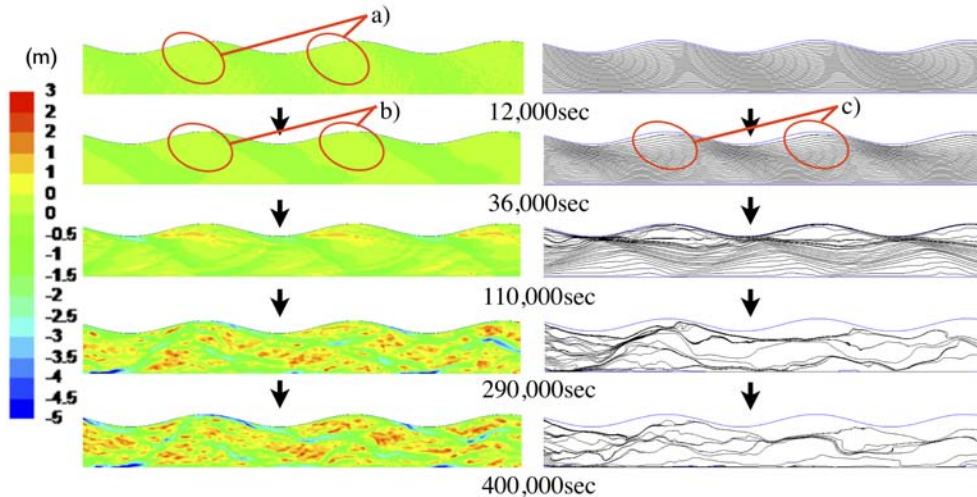


図-3 自由砂州成分と強制砂州成分の発達時間の違い

表-2 各条件での L_c の値 (m)

		最大蛇行角				
		3°	5°	10°	15°	20°
蛇行波長	500m	39.710	42.361	52.070	73.626	101.700
	1,000m	69.810	81.839	108.282	124.481	187.315
	1,600m	136.468	155.875	170.429	210.308	259.252
	2,000m	159.974	166.614	225.821	260.634	362.954

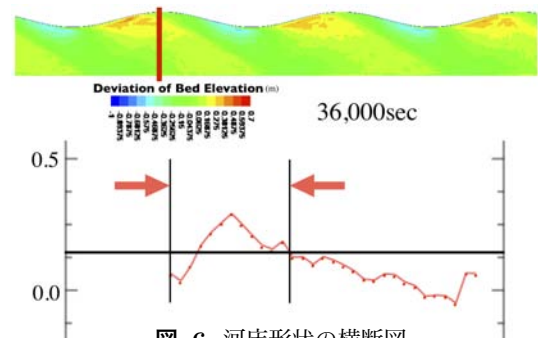


図-6 河床形状の横断図

4. 側壁形状に対する強制砂州の横断方向発達特性

前章までの結果を踏まえ、強制砂州の横断方向長さ L_c と河幅 B の関係より強制砂州の相互干渉の強度を評価できるものと考えたことにした。少なくとも拡縮水路における複列砂州の形成や維持の把握は、頻用される中規模河床波の領域区分の考え方だけでは不十分であり、これと流路の平面形状を表す L_c と B の関係を組み合わせることはじめて規定できることが見込まれる。しかし、側壁形状には蛇行の振幅や波長の組合わせが複数考えられ、それぞれの側壁形状に対して異なる応答を示すことが容易に想像される。以下では、側壁形状に対する強制砂州の横断方向の発達特性を調べるための数値実験を行った。

(1) 強制砂州の横断方向長さ L_c の算定法

強制砂州の横断方向長さ L_c については以下のように求めた。図-6 に示したように片側直線水路の幅広部分における砂州形成初期の河床形状の横断図を用いることで算定した。本研究では、左岸からその時刻での最大河床高の 60 % までの部分を L_c と定義した。

(2) 実験条件

本章では、側壁形状に対する強制砂州の横断方向の発達特性、すなわち側壁の形状が L_c に与える影響を調べるため、側壁の右岸を直線、左岸の側壁を sine-generated curve で規定し、その最大蛇行角、蛇行波長を変更した場合のそれぞれの L_c を計測した。水理条件は表-1 に準ずる。

(3) 実験結果

それぞれの条件から得られた L_c を表-2 に示した。この結果から強制砂州の横断方向長さ L_c は側壁で与えた最大蛇行角、蛇行波長に同調して増大する傾向が見られることがわかった。特に、最大蛇行角より蛇行波長による影響が大きく、 L_c は側壁の蛇行波長と同程度の倍率で増加していくことが見て取れる。

5. 拡縮水路における複列砂州の維持条件

(1) 維持条件の導出

前章において強制砂州の横断方向の発達に対しては蛇行波長と強い関係性があることを明らかにした。本章では、前章で得られた各条件下における L_c を河幅 B で無次元化し、どの程度の相互干渉の強度で複列砂州が維持されるか調べる。ただし、前章の数値実験は片側直線水路において行われたもので、本研究が焦点を当てている複列砂州が維持されたか否かの判断はできない。このため、両岸拡縮水路において、再度、前章の合計 20 パターンの条件を与えた数値実験を行った。

強制砂州の相互干渉の強度である L_c/B と複列砂州の維持との関係性を図-7 に示す。図中の赤で示した条件が複列砂州が維持されたもので、青で示した条件が複列砂州が維持されなかったものを表している。

図-7 より、今回用いた水理条件下では L_c/B の値が 0.35 以上で複列砂州が維持されることが分かった。図-1 に示した河幅 1 倍の条件では L_c/B が 0.42 で複列砂州が維持される条件下にあり、一方で、図-5 に示した河幅を 2 倍にして相互干渉の強度を弱めたケースでは L_c/B が 0.21 と維持されない条件下にあることが確かめられた。

(2) 導出された維持条件の一般性

前項から、両岸からの強制砂州の相互干渉の強度である L_c/B が複列砂州の維持条件として支配的な役割を果たすことが明らかとなった。そして、これまでの検討を総合すると、 L_c/B は複列砂州の維持条件の一つとなり、少なくとも拡縮水路における複列砂州の維持の判断には、川幅水深比に基づく領域区分の概念と L_c/B の指標を組み合わせが不可欠であることが理解できる。ただし、異なる水理条件下では、複列砂州が維持される L_c/B の値が今回の結果から変動することに留意が必要である。

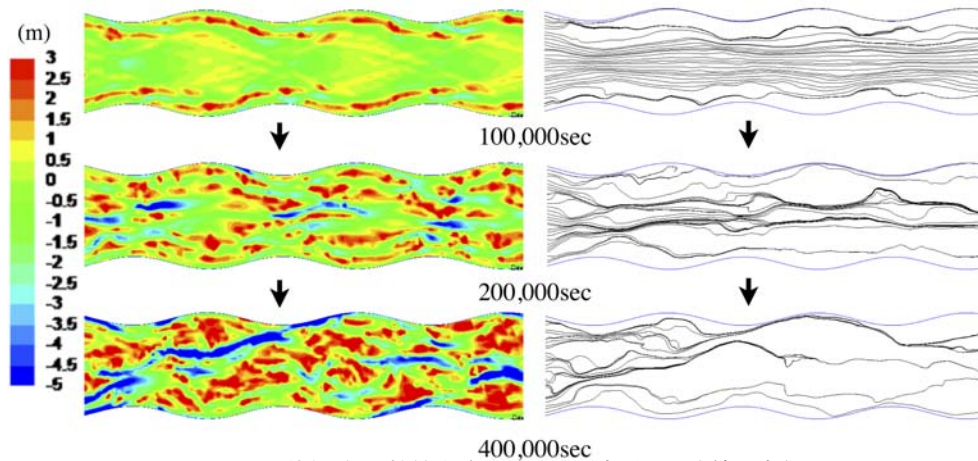
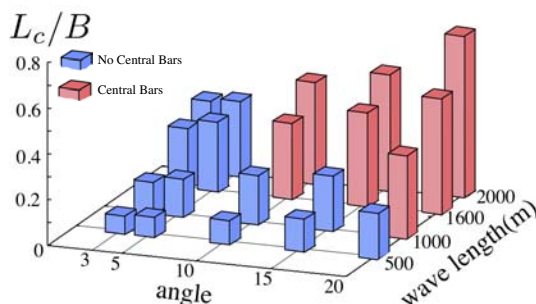


図-5 河幅2倍の拡縮水路における河床形状、流線の変化

図-7 L_c/B と複列砂州形態の維持との関係

6. 得られた知見の実河川への適用

本研究では、流路の平面形状が拡縮水路の場合、複列砂州形態が長期にわたり維持されることと、その維持条件を示した。これらの成果は、流路の平面形状は、形成される砂州形態に対して支配的な影響を与えることを示唆し、同時に中規模河床波の能動的な制御の可能性があることを意味している。図-8、図-9¹¹⁾に示したように複列砂州形態が維持されている実河川の平面形状は直線水路型ではなく、拡縮水路型を呈していることがほとんどである。このことから流路の平面形状が砂州形態に支配的な影響を与えることが逆説的に理解できよう。

形成される砂州形態が交互砂州の場合、流路の単一化から洗掘が促進され相対水深が大きくなり、砂州上に植生が繁茂してその傾向を助長する。河道維持の観点に立つと、これは洪水時に植生が粗度として働くために水位増加を招く。一方、複列砂州の場合、相対水深の増加の抑制は可能なものの、その不安定性から洪水時に流路の変動が激しく、洗掘量やその発生箇所の推定が困難である。栃木県の鬼怒川では、この複列砂州の不安定性を逆手にとり、流路の固定化を回避する試みが行われている¹²⁾。このように河床形状を根本から改変させる場合には、本研究で得られた知見は非常に有用となり得る。いずれの砂州形態が河道維持のうえで最も適当であるかは一概には言えないものの、本研究において示された砂州形態の能動的な制御の可能性は、河道設計の一つの有利なオプションになると考えられる。

7. おわりに

本研究では、流路の平面形状が拡縮を周期的に繰り返す水路では、湾曲形状がもたらす強制砂州の相互干渉によって結果的に複列の砂州が維持されることを明らかにした。従来、複列砂州は直線水路においてはモード減少



図-8 斐伊川 (島根県)



図-9 札内川 (北海道)

するものとされてきたことに対し、本研究で用いたような拡縮水路においては領域区分から決定される砂州形態が維持されることを示した。つまり、頻用される砂州の領域区分の概念と流路の平面形状による影響を組み合わせることで考慮しなければ、砂州形態は適切に把握できないと考えるべきである。これらの成果は既往研究が固定壁の直線水路で行われたばかりに見過ぎられてきた中規模河床波の基本的性質と言えよう。さらに、新たに L_c/B という無次元数を導入し、これが複列砂州形状の維持と密接に関連していることを見出した。これは横断方向に2～3程度の波数を持つ少モードの複列砂州の維持条件として有意であることを示した。

参考文献

- 黒木幹男, 岸力, 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, Vol.342, pp.87-96, 1984.
- 藤田裕一郎, 村本嘉男, 堀池周二, 交互砂州の発達過程に関する研究, 京都防災研年報, Vol.24.B-2, pp.411-431, 1981.
- 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.
- 泉典洋, 池田駿介, 直線砂床河川の安定横断河床形状, 土木学会論文集, Vol.429.2-15, pp.57-66, 1991.5.
- 渡邊康玄, モード干渉を考慮した砂州のモード減少過程, 水工学論文集, Vol.50, pp.967-972, 2006.2.
- 高橋玄, 安田浩保, 流路の平面形状が中規模河床波の形成過程に与える影響, 土木学会論文集, Vol.67, No.2(応用力学論文集 Vol.14), pp.653-660, 2011.8.
- 野上毅, 渡邊康玄, 安田浩保, 長谷川和義, 谷底平地における流路形状の分析と地形の成因, 土木学会水工学論文集, Vol.51, pp.991-996, 2007.2.
- 渡邊康玄, 豪雨災害に対する防災対策を推進するための調査研究, 河川整備基金重点課題報告書, 河川環境管理財団, 2009.
- 河川シミュレーションソフト iRIC : <http://i-ric.org/>
- 芦田和男, 道上直規, 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- Google Earth, <http://www.google.co.jp/intl/ja/earth/index.html>.
- 長内博昭, 鬼怒川中流部における礫河原再生, RIVER FRONT, Vol.71, 2011.