

砂州形状の特性と平水時の流路構造

RELATIONSHIP BETWEEN CHARACTERISTICS OF BAR MORPHOLOGY AND RIFFLE-POOL STRUCTURE

寺本敦子¹・辻本哲郎²

Atsuko TERAMOTO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 松江工業高等専門学校助手 環境・建設工学科
(〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

²正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

Riffle-pool structure gives important habitat to various organisms in a river. Although many types of riffle-pool structure are previously defined by ecologists, the deciding factors of types are unfound. We focus on riffle-pool structure based on alternative bars and indicate the deciding factor of it though the investigation of typical feature types of alternative bars

Firstly, we conducted flume experiments and numerical simulations and investigated the existence of two types of alternative bars, which formed from flatten bed by steady discharge. One is developing from flatten bed; the other is formed after multiple bars are developed. And they have different features. Then, we indicated the change of bar morphology caused by different discharge from the discharge that initial bar forms. As results, the existence of three types of bar feature is indicated, and it is clear that riffle-pool structure based on these types of alternative bars is different from each other.

Key Words : *alternative bars, riffle and pool structure, bar migration, numerical simulation
flume experiment*

1. はじめに



図-1 交互砂州河道の事例A(富山河川国道事務所提供)



図-2 交互砂州河道の事例B(富山河川国道事務所提供)

近年、河道内砂州が河川における生態系や物質循環に対して様々な場を提供することで重要な役割を担っていることが着目されている。図-1,2で示す交互砂州の様子

が異なるように、実際の河川においては、様々な特徴を持つ砂州が存在しており、砂州形状、構成材料などの砂州の物理的特性によって河道内環境に果たす役割が異なることが考えられる。しかし、現段階では、砂州の特徴を決める要因など詳細は未だ明確になっていない。

一方で、砂州上に形成される平水時の流路、流路内のできる瀬と淵に着目すると、これもまた河道内生態系に重要な役割を果たしている。これまでに瀬と淵の形態やその配置の違いにより瀬淵構造の分類が行われてきた¹⁾が、様々な形態が現れる機構について十分な知見がないのが現状である。瀬淵構造は交互砂州地形と深く関係しているが、交互砂州を基盤とする低水時の流路に着目した場合、砂州によって水際環境が異なることが指摘されていたり²⁾、図-1,2のように砂州の前縁線(図中の黒線)と低水時の流路位置の関係が異なったりしている。したがって、同じ交互砂州上にできる低水路でも、瀬淵構造の特徴が異なることが考えられる。

沖積地河川では、一般的に、平均年最大流量で形成される砂州を基盤として平水時の流路が形成されていると考えられている³⁾。しかし、河川には様々な流量が流れており、これがどのように砂州形状に影響を与えている

表-1 実験ケース(単位: m, s)

Case	A	B	C	D	E
Q	0.0008	0.0010	0.0015	0.0020	0.0030
h	0.0062	0.0070	0.0090	0.0107	0.0136
B/h	81.275	71.090	55.738	46.902	36.774
τ_*	0.042	0.048	0.062	0.073	0.094
Fr	1.059	1.083	1.128	1.161	1.209
mode	2-3	2	1	1	1
L	0.8	1	1.5	1.5	1.5-2.5

*mode: 線形不安定解析による初期発達砂州モード数

*L: 線形不安定解析による初期発達砂州波長

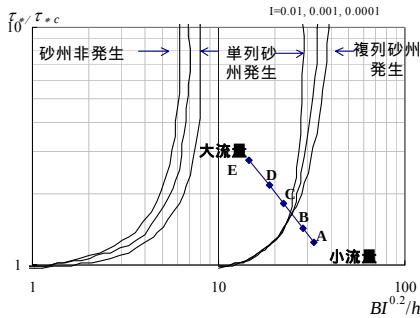


図-3 砂州の領域区分図(黒木・岸⁴⁾を修正)と実験条件

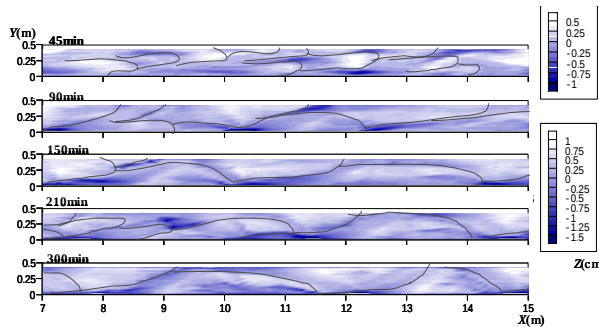


図-4 砂州形成実験ケースBにおける河床高時間変化

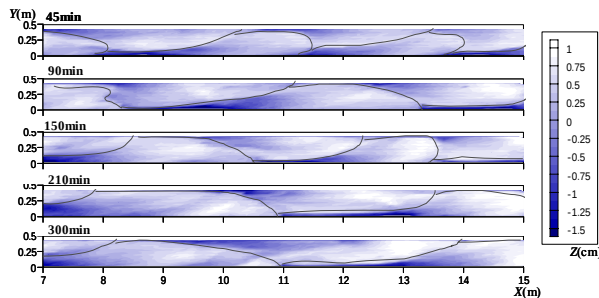


図-5 砂州形成実験ケースDにおける河床高時間変化

かは明らかになっていないし、出水時の流量、平水時の流量の変化によってどのように瀬淵構造が変化するかも明確でない。従って、一概に平均年最大流量で形成される砂州を瀬淵構造の基盤と考えてよいかは疑問である。

これらを踏まえて、本研究では、交互砂州の特徴を決める要因から交互砂州の特徴による瀬淵構造の違いについて調べる。まず、一定流量通水時に形成される砂州の特徴を数値解析および室内水路実験を用いて示し、その後、平衡状態の砂州上に砂州形成流量とは別の流量を通水した時の砂州地形の変化について数値解析を用いて検討する。砂州の地形変化を検討することにより典型的な

砂州地形を見出し、これらについて平水時の流路構造を調べる。

2. 一定流量通水時における砂州地形形成過程と砂州の平衡形状

ここでは、一定流量通水時の砂州地形の形成過程及び平衡状態到達時の特徴について検討する。検討にあたり、水路幅50cm、水路勾配1/100、河床材料の平均粒径0.88mmの条件下で流量を変化させ、表-1に示す砂州形成条件内の5ケースを用いる。ケースAからEは、複列砂州から単列砂州形成領域内にあり、修正した黒木・岸⁴⁾の領域区分図上には図-3のようにプロットされる。

本章では、実現象を見出すために水路実験を、また、実験結果と比較し有用性を確認した上で実験結果を補足するために数値解析を行った。ただし、水路実験を行う流量が大きくなると、通水初期に水路に形成された砂州のうち上流部分の砂州は下流へ流下し、上流区間のある程度の範囲には新たな砂州が形成されない。その区間は砂州を形成し続けるために必要な助走区間と言え、実験においても数値解析と同様に⁵⁾流量が大きくなるほど長く必要となる。今回用いた名古屋大学大学院の実験水路長は20mであるが、交互砂州の形成について実験できる流量はCaseDが限界であったため、本検討の最大流量であるCaseEは、数値解析のみの検討となっている。

実験では、水位と河床形状をKEYENCE製の超音波式変位センサ、CCDレーザ変位センサを用いて計測し、さらに水路上部からデジタルカメラを用いて砂州の様子を撮影した。

また、本研究で用いる数値解析は、名古屋大学大学院水工学講座において著者らが開発してきたNH2Dモデルを用いた。本モデルの砂州形成過程の再現性は、著者らの論文⁵⁾を参照されたい。

本研究において、砂州波長と波高は、隣接する砂州前縁線下流端間の長さや横断方向高低差の最大値を各砂州で算出した上で、波長については対象区間内の砂州の平均値とし、波高については平均値と最大値の両方を算出している。

(1) 砂州形成過程

結果の一部を図-4, 5に示すように、CaseA, Bは、線形不安定解析の結果と同様に数値解析、水路実験ともに通水初期に複列砂州の形成され、砂州の発達と共に最終的に交互砂州への移行が確認された。それに対し、CaseC, D, Eは通水初期から交互砂州の発達が見られた。

結果の一部を図-6, 7に示すように、砂州波高の時間変化を見ると、CaseC, D, Eは砂州波高がすぐに発達し平衡状態へ到達するのにに対し、CaseA, Bでは、複列砂州が形成されている間、波高は低い値を保ち、その後発達することが確認された。数値解析は、実験に比べ砂州

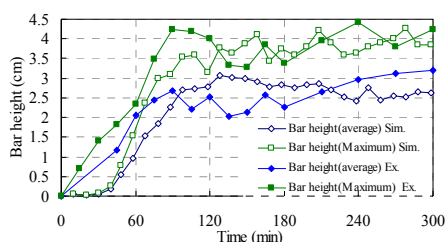


図-6 砂州形成実験ケースBにおける河床高時間変化

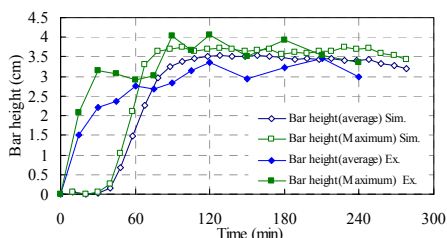


図-7 砂州形成実験ケースDにおける河床高時間変化

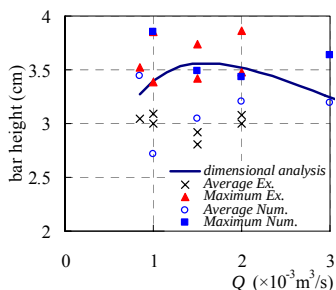


図-8 流量と砂州波高の関係

が発達し始めるまで多少の時間を要するが、発達し始めてからは、波高、波長ともに実験と同じであることを確認している。

(2) 砂州の平衡形状

流量を一定で流し続けたとき、流量によって個々の砂州の値にばらつきがあるものの、砂州波高、波長の平均値はおおよそ一定値に到達する平衡状態に到達する。ここでは、平衡状態での交互砂州形状の特徴を検討する。

各流量通水時の砂州波高の数値解析結果および実験結果を図-8に示すと、流量間に大きな違いが見られないことがわかる。本実験条件下では、池田⁶⁾の次元解析による式を用いて算出した波高値も同様な値を示し、流量による砂州波高の差がないことがわかる。また、平均波長を検討した結果も、流量による違いが見られなかった。

そこで、波長、波高以外の砂州形状の違いを見出すために、藤田⁷⁾が砂州形成実験で見出したかまぼこ型形状に着目し縦断方向に平均した横断地形の特徴を水深で無次元化して調べた。ただし、河床高を縦断方向に平均するにあたり、数値解析においては砂州形成領域が長く多数の砂州が形成されているため長い領域で行い、実験においては砂州形成領域が短いため、隣り合う砂州二個分の領域で行った。その結果を図-9に示すと、実験および数値解析ともに、同じ交互砂州でも、最初から交互砂

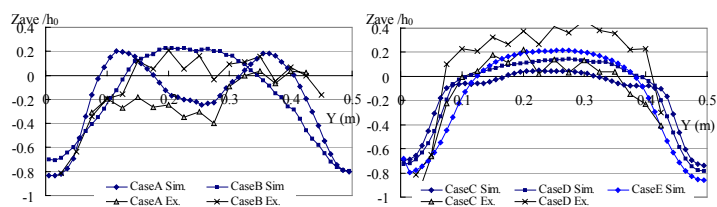


図-9 縦断方向平均無次元横断河床

表-2 実験ケース(流量: m^3/s)

Case	BD	BE	DB	DE	EB	ED
初期地形形成流量	0.0010	0.0020	0.0020	0.0030	0.0030	0.0030
通水流量	0.0020	0.0030	0.0010	0.0030	0.0010	0.0020

州が発達したものと複列砂州の発達後移行してできたものでは縦断方向平均横断河床の特徴に違いがあることがわかった。前者は、壁際付近の狭い範囲が両側ともに掘れているのに対し、後者は、そのような特徴を持っていない。特に流量が多いほど局所的に壁際が掘れている傾向があることが分かる。無次元量で示した縦断方向平均横断河床高の高低差は流量により変化しないが、流量によって波高に違いがないことを考えると、流量が少なく水深が浅いほど横断河床形状の高低差は小さくなっているため、砂州形状に対して縦断方向に平均した横断形状が果たす役割は、流量が大きいほど大きくなると言える。

3. 流量の変化が及ぼす砂州地形への影響

次に、流量の変化に伴う砂州地形の変化を調べるため、数値解析を用い、2章で示したCaseB, D, Eの平衡状態の砂州を初期地形として砂州形成流量とは異なる流量を通水して地形の変化を調べた。ここでは、表-2に示すような流量の組み合わせを用いる。

(1) 流量増加ケース

図-10, 11に例を示すように、流量が増加する場合、10分後には砂州は進行するとともに流量に見合った形へと変化する。また、図-12, 13に示すように、砂州波高は時間が経過してもあまり変化しないのに対し、縦断方向平均横断河床形状は、流量に見合った特徴へと変化した。例えば、複列砂州から交互砂州へ発達したCaseBD, BEの初期河床は、縦断方向平均横断河床形状における壁近傍での洗掘が見られないが、時間が経過するとともに砂が水路中央部に集まり壁近傍が洗掘される。CaseDEにおいても、初期河床の縦断方向平均横断河床形状における壁近傍の洗掘が顕著であるにもかかわらず、流量の増加に伴いその特徴が強く現れるようになる。従って、初期状態がそれより小さい流量で形成された砂州ならば、すぐにその流量にตอบสนองし通水流量に応じた砂州の平衡状態へと遷移すると言える。ただし、ここでは、通水流量が交互砂州形成領域内にあるため、通水流量が複列砂州形成領域内の場合の検討が別途必要である。

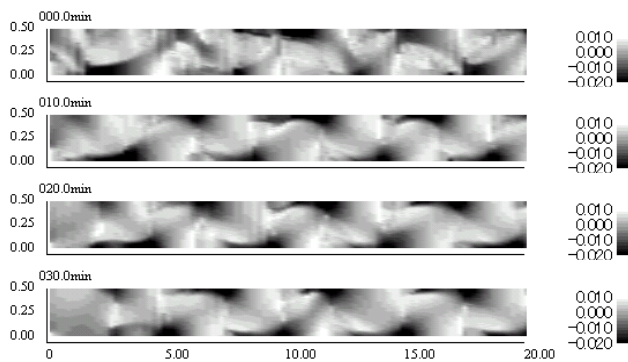


図-10 河床高時間変化 (CaseBD) (単位: m)

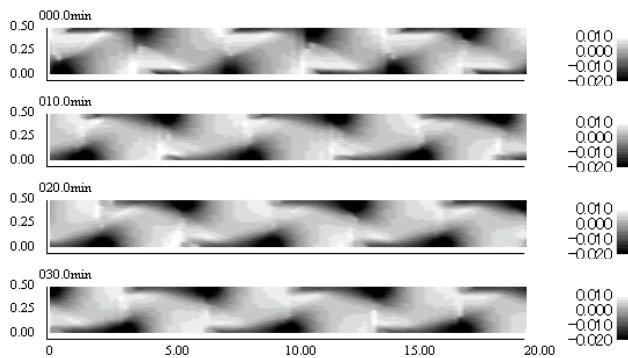


図-11 河床高時間変化 (CaseDE) (単位: m)

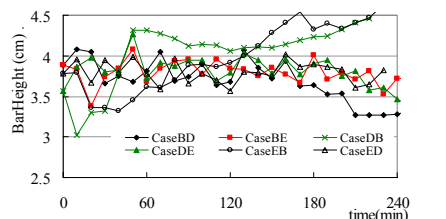


図-12 最大砂州波高時間変化

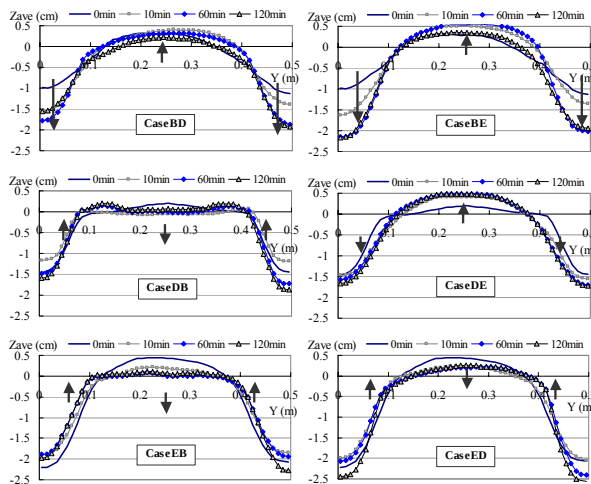


図-13 縦断方向平均横断河床形状の時間変化

(2) 流量減少ケース

図-14～16に河床高時間変化を示すように、初期河床形成流量より通水流量が少ない場合、通水流量がどのような流量なのかで砂州地形の変化傾向が異なる。

CaseDB, EBのように通水流量が複列砂州形成条件に入っている場合にCaseD, Eの単列砂州形成条件下で形成された交互砂州を初期河床とすると、図-17, 18にあ

るように流路は砂州の一部に限定され、砂州前縁線と交差する。砂州が進行する場合も流線は砂州前縁線と交差するが、砂州全体で砂が動き、砂州前縁線付近に砂が堆積する。流量が減少したことにより流路が限定されかつ砂が動く部分が限定されてしまうケースでは、前縁線よりも上流部分に堆積域ができており、このことにより、砂州は進行せずにゆっくりと後退しているように見える。また、図-13に示す縦断方向平均横断河床形状は、壁近傍の洗掘の埋め戻しが起こり、蒲鉾型形状が明確でないCaseBの特徴にやや近づくような変化が見られる。

これに対し、CaseEDでは、図-16の河床高時間変化、図-13の河床形状特性の変化から見られるように、砂州形成流量より通水流量が少ないにもかかわらず、砂州は進行し、通水流量に見合った砂州が形成されている。このとき、流線は図-19のようになっており、砂州の前縁線と交差し多少陸化している部分があるがほとんど水面下であるため、結果として砂州は進行している。CaseEで作られた砂州地形の特性は、CaseDの平衡形状の特性と似ているため、このような変化が起こると考えられる。

(3) 流量の変化に対する砂州地形の変化

(1), (2)の結果を通して、次のことが言える。今回対象とした流量によって砂州波高が変化しない河道条件下では、一定流量通水時、平坦河床から形成される平衡河床形状特性によって、初期河床として他の流量下での平衡河床形状を用いるときの変化が決まる。通水流量が交互砂州形成条件下となる流量の場合、初期河床形状がどのような交互砂州でもすぐに流量に見合った砂州へと移行する。それに対し、通水流量が複列砂州形成条件下となる流量の場合、初期地形の影響を強く受ける。初期河床形状が通水流量より大きな流量で形成された交互砂州である場合、砂州の上流側に土砂を堆積し砂州を後退させ砂州の形状特性を大きく変化させる。

したがって、実河川における交互砂州地形は、単列砂州形成条件下の出水が頻繁に起こる河道と、複列砂州形成条件下の出水が頻繁に起こる河道と、その中でもまれに単列砂州形成条件下の出水を経験する河道でその特徴を分けることができると考えられる。

4. 平水時の流路の特徴

ここでは、簡単に河道内砂州を捕らえるため、出水後の砂州地形は、出水時の流量ハイドロによらずピーク流量で砂州地形が決まると考え、これまでに見出した砂州地形に対する平水時の流路構造の変化を議論する。

(1) 検討ケース

第3章の結果をうけ、本研究で検討した交互砂州地形のうち典型的なものとして次の3ケースから得た砂州形状を選出し、平水時の流路構造を検討する。一定流量通

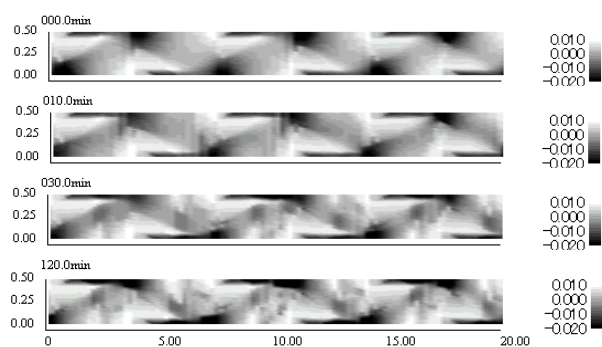


図-14 河床高時間変化 (CaseDB)

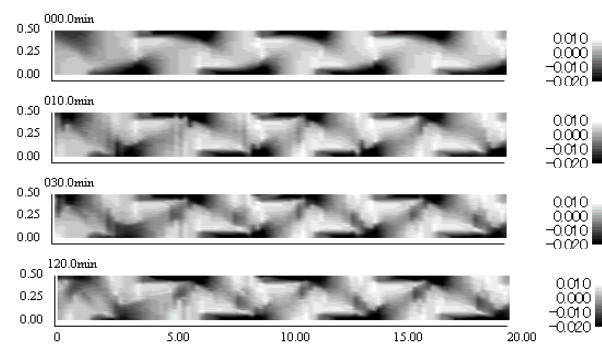


図-15 河床高時間変化 (CaseEB)

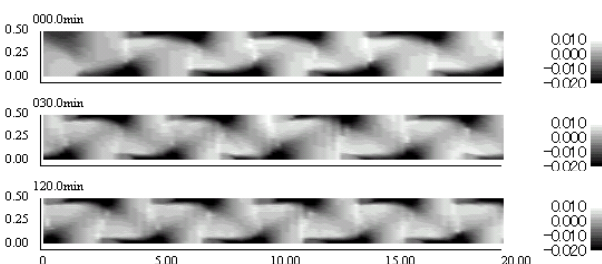


図-16 河床高時間変化 (CaseED)

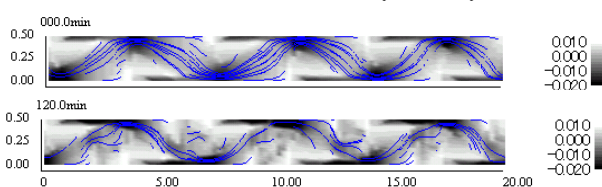


図-17 河床高と流線 (CaseDB)

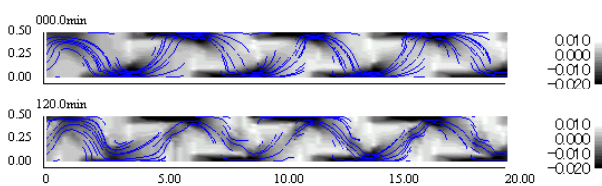


図-18 河床高と流線 (CaseEB)

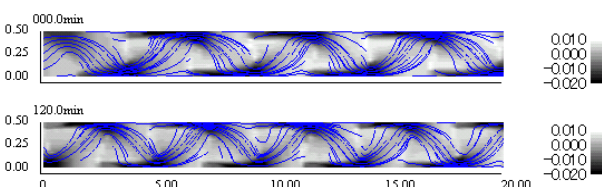


図-19 河床高と流線 (CaseED)

水時に平坦河床から形成される交互砂州のうち、明確な蒲鉾型形状を有するものとしてCaseEを、そうでないものとしてCaseBを、蒲鉾型形状の砂州上に複列砂州形成

条件下の流量が流れた地形としてCaseEBを用いる。

平水時の流量は、砂州上の砂がほぼ動かない流量 $0.00015\text{m}^3/\text{s}$ とその倍の $0.0003\text{m}^3/\text{s}$ を用い、流量の増加に伴う流路構造の変化についても検討を行う。

(2) 流路の特徴

図-20～22に各ケースのフルード数およびベクトル図を、図-23に低水路に沿った河床高と水位、フルード数の変化を示す。これらのグラフを見ると、平水時の流路となる位置は、どの砂州地形を用いても低水流量によって流路幅は異なるが同じ位置に形成されることがわかる。

CaseEの砂州上の流路は深ぼれ部で幅が狭く、砂州前縁線を分断して浅い場所から深ぼれ部へ落ち込み、前縁線付近におけるフルード数が幅広い範囲で高い値を示している。これに対し、CaseBの砂州上の流路は砂州の前縁線に沿っており、フルード数は、隣り合う砂州前縁線が交差する点付近の比較的幅が狭い場所で高い値を示す。また、CaseEBの砂州上の流路は、砂州前縁線と低水路位置の関係はCaseEに近いものの、CaseBの砂州上に形成される流路の特徴に近くなり、川幅は狭く、長い範囲でフルード数が高い値を示しているのがわかる。

上記の結果より、水深が比較的浅くフルード数が1以上の射流で、淵は水深が深くフルード数が1以下の常流であるとする、砂州の形成履歴、砂州形状により瀬淵のパターンは変化すると言える。また、瀬淵が現れるパターンは、低水時の流量によってあまり変化しないが、CaseEB、Bの砂州上に形成される流路に沿ったフルード数が流量の増加に伴って全体的に1に近づくことを考えると砂州形状によって瀬淵構造が明確に現れる流量には限界があることが考える。

5. 結論

本研究により次のことが明らかになった。

- 平坦河床から発達した交互砂州は、複列砂州を経由したものとそうでないもので形状の特徴が異なり、後者は藤田らが見出した蒲鉾型形状を明確に有する。
- 平衡形状の砂州に砂州形成流量より大きな流量が流れたときには、すぐに通水流量の平衡状態へ遷移する。
- 平衡形状の砂州に砂州形成流量より小さな流量が流れたときには、その流量次第で変化が異なる。交互砂州形成条件下の流量では砂州が進行して通水流量の平衡状態へ遷移するが、交互砂州形成条件下の流量より少ない複列砂州形成条件下の流量になると砂州は進行せず、砂州の上流側に堆積域ができ、砂州は後退する。
- 低水時の瀬淵構造は、砂州形状に依存し、蒲鉾型形状を有するか否か、有していてもその上に他の砂州形成条件の流量を経験したか否かで特徴が変化する。蒲鉾型形状を有すると砂州前縁線と低水路位置の関係は、半波長ずれた形になり、そうでない場合は、低水路は

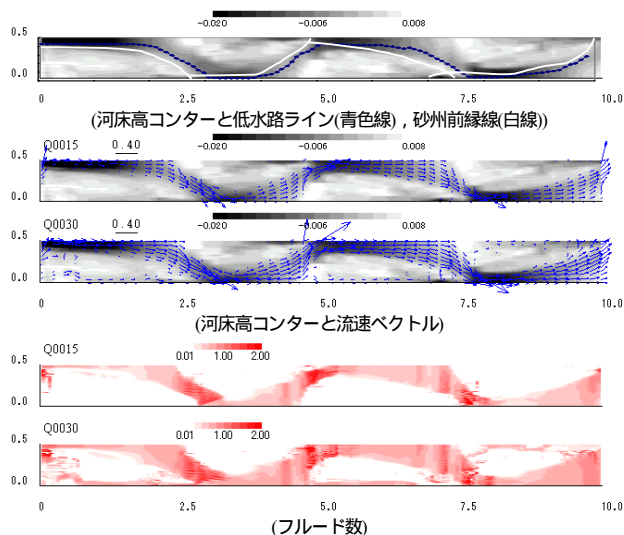


図-20 低水流路の特徴 (CaseB) (単位: m)

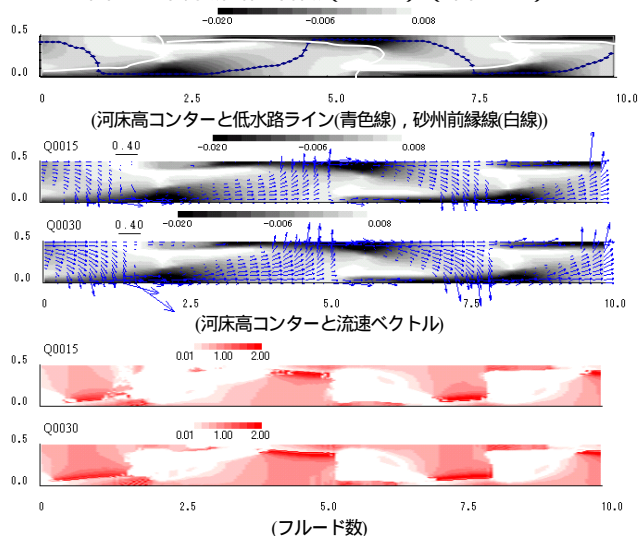


図-21 低水流路の特徴 (CaseE) (単位: m)

前縁線に沿って形成される。また、複列砂州形成条件下の流量が流れたか否かで流路幅が比較的狭い瀬ができるか否かが異なる。

b), c)を踏まえると、実際の河道内砂州の地形は、出水ごとに变化し、必ずしも平均年最大流量程度で形成される砂州の特性で瀬淵構造が決まっているとは限らないとわかる。特に年最大流量や頻繁に発生する出水が砂州形成条件のどれに該当するかが重要となる。単列砂州条件下の出水が頻繁に起こる場合、せいぜい複列砂州形成条件下の出水しか起こらない場合、その中でも単列砂州形成条件下の出水を経験しているか否かで砂州地形の特徴、低水時の流路の特徴が変化する。

今回の検討は各流量時の平衡砂州波高に相違がないケースを取り扱っており、条件が限定された場での議論となっている可能性がある。そのため、今後、流量間で波高に違いがあるケースも取り扱い一般的な議論に発展させる必要がある。また、出水時の流量ハイドロの影響を考慮せず一定流量で形成される砂州形状で議論を行っているため、流量ハイドロの考慮の必要性についても検

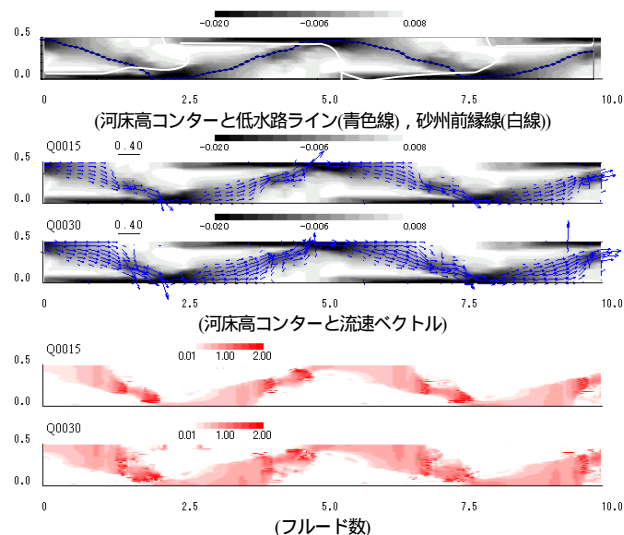


図-22 低水流路の特徴 (CaseEB) (単位: m)

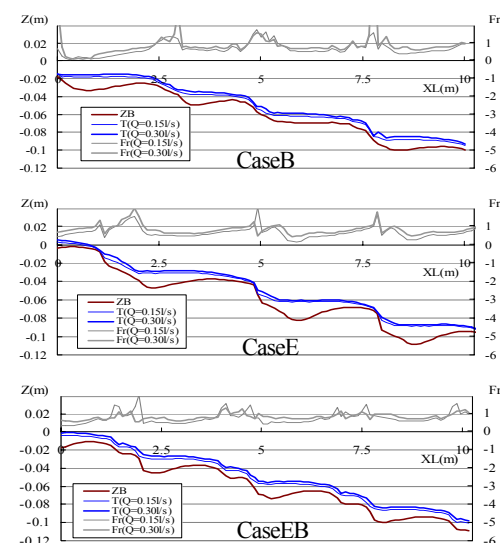


図-23 低水流ラインに沿った水面形とフルード数の変化

討し、実際の河道への議論の適用性を高める予定である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（若手研究(B)）の助成のもと行われた。また、実験については名古屋大学大学院博士前期課程（現・奥村組）の松井宏充君に協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、水野信彦、御勢久右衛門・沼田誠 監修：河川の生態学補訂版、築地書館、pp.4-13、1993。
- 2) 知花武佳、佐々木学、辻本哲郎：交互砂州が形成された河道に生じる水際環境に関する研究、応用生態工学学会第七回研究発表会講演集、pp.231-234、2003。
- 3) 山本晃一：構造沖積河川学-その構造特性と動態-、山海堂、pp.149-154、2004。
- 4) 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、第342号、pp. 87-96、1984。
- 5) 寺本敦子、辻本哲郎：砂州の形成過程に関する数値計算手法、応用力学論文集、第7巻、土木学会、pp.975-982、2003。
- 6) 池田駿介：単列砂州の波長と波高、第27回水理講演会論文集、pp.689~695、1983。
- 7) 藤田裕一郎・村本嘉雄・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、第24号B-2、pp.411~431、1981。

(2005.9.30受付)