

流路形成における流量の横断方向分布の重要性 及びそれに基づく拡縮流路の形成機構の解明

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

これまでに著者らは、自然河川の普遍的な平面形状は広く知られる蛇行流路の他に、拡縮流路もその一つであることを指摘している¹⁾²⁾。蛇行流路は縦断方向の流路幅の変化が小さいうえ流心軸に対して左右岸は概ね平行の平面形状をなす一方、拡縮流路は縦断方向に流路幅が周期的に変化して、流心軸と左右岸が平行となることのない平面形状をなすものである。

蛇行流路では流下方向に川幅を概ね一定として扱えることから、現在まで行われている川幅や横断面の安定形状を探る研究³⁾⁴⁾⁵⁾では、一つの水理や地形に関する境界条件に対しては一つの安定形が得られるとされている。また、蛇行の発達理論においても基本的に川幅を一定とする前提のもとで理論が構築されてきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。流路形成や変動に関する既往の研究では、自然河川における川幅の流下方向への変化は流路形成を考える上で重要性が大きいと見なされてきたことが推測される。

既往の多くの流路形成に関する研究の境界条件と実河川の水利条件を比較すると、横断方向の流量フラックスの分布が全く異なることにまず気付く。一般に砂州の数理解析では、直線かつ非侵食性河岸を有する流路に上流端の境界条件として横断方向に一様分布の流量フラックスを与えている。一方で、実河川には人工構造物や巨礫等、流量フラックスの横断方向分布に影響を与え得る要因は河道内に幾らでも見られる。つまり、実河川において横断方向に流量フラックスが均等に分配されるケースは極めて例外的で、ほとんどの場合その分布は一様でない。この上流端境界条件としての流量フラックスへの着目により、これまでの研究で実河川における砂州形状や流路形状の動態が正しく理解されなかった原因の一つはここにあると考えられる。また、河川地形の形成は偏微分方程式により記述できるとされ、境界値問題として解かれてきた。この数学システムの本質に立ち返ると、非定常の2次元解析なら境界条件として空間の x 、 y と時間の t の3つが等しい自由度で設定できるにもかかわらず、 y の取扱いに十分な配慮がなされてこなかったと言える。このことは、河床波や流路形成のすべての変動要因が流れの不安定性から生み出される卓越波数だけで理論的に決定されることが保証されない以上、重大な見過ごしである。

本研究では、現在まで著者らが行ってきた拡縮流路を用いた河床変動計算の結果に対して流量フラックスの横断方向分布の観点から再考察することから始める。続いて、その結果を受け、流量フラックスの横断方向の偏在が河床形態、流路形状に与える影響および、拡縮流路の形成機構を明らかにするための数値実験を行った。

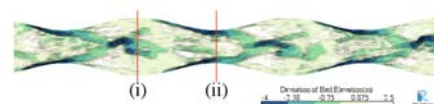


図-1 拡縮流路を用いた河床変動計算結果 (200,000sec)

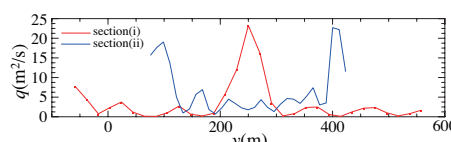


図-2 各断面における横断方向の流量フラックス分布 (赤が拡幅部の断面 (i)、青が狭窄部の断面 (ii))

2. 拡縮流路を用いて行った河床変動計算結果の 流量フラックスの横断方向分布

ここでは著者らが現在まで行ってきた拡縮流路を用いた河床変動計算の結果¹⁾²⁾を再考察する。

図-1に河床変動計算の結果を示す。計算条件の詳細は文献を参照されたい。示したコンター図は通水開始から200,000秒後のものであり、この時刻から河床形状はほぼ動的平衡状態となった。

図-1を見ると流路の拡幅部では流心付近が洗掘し、河床高が著しく低くなっていることがわかる。一方で、狭窄部では明瞭な波数2の複列砂州が形成され、その形態を維持し、両岸側壁付近の2箇所河床高が低くなっている。拡縮流路の拡幅部と狭窄部ではそれぞれ異なる流量の横断方向分布を有する。そこで、図-1中に示した通り、拡幅部を断面 (i)、狭窄部を断面 (ii) として、各断面での同時刻の流量フラックスの横断方向分布を見る。その結果を図-2に示した。横軸 y は横断方向の距離で、図の左側が左岸、右側が右岸である。また、縦軸 $q(\text{m}^2/\text{s})$ は横断方向の各格子上的流量フラックスであり、その算定は水深 $h(\text{m})$ と合成流速 $U(\text{m}/\text{s})$ の積として求めた。図-2内に赤線で示した断面 (i) での分布を見ると、流心付近の河床高が低くなっている箇所に流量が一点で集中していることがわかる。一方で、青線で示した断面 (ii) での流量フラックスの横断方向分布は、断面 (i) で見られた分布形と全く異なる結果が得られた。断面 (ii) では流路中央に形成された複列の砂州を避けるように、コンターの着色通り両岸の側壁付近2箇所に流量が集中していることが確認される。

紙面の都合上掲載は省くが、同流路内にて他の拡幅部と狭窄部でも同様に流量フラックスの横断方向分布を見たところ、形成される砂州が周期形状であることから容易に想像はつくが、拡幅部と狭窄部でそれぞれ断面 (i)、断面 (ii) と同様の結果が得られた。この結果から、著者らが用いてきたような拡縮流路で形成される複列砂州上の流れには、図-2に示したような流量フラックスの横断

表-1 河床変動計算に用いた計算条件

$Q(\text{L/sec})$	$B1(\text{m})$	$B2(\text{m})$	i_b	$d_s(\text{mm})$	$Bi^{0.2}/h$	τ_c
3	1.8	1	1/164	0.5	31.6	0.082

方向分布の偏在の存在に気付かされる。以降では、断面(i)で見られるような流心に1箇所流量が集中するような流量フラックスの横断方向分布を分布の波数1、断面(ii)のような両岸側壁付近に2箇所流量が集中する横断方向分布を波数2と呼ぶ。

3. 流量フラックスの横断方向の偏在が河川地形の形成に与える影響

この項では、以下の2種類の数値実験を行う。

- 前項の考察から得られた流量フラックスの横断方向分布である分布の波数1と波数2を上流端境界条件として与えた河床変動の数値実験
- 流路内に構造物を設置し、流れを分離させることで人工的に流量フラックスの横断方向分布を与える河床変動の数値実験(波数2に相当)

以上計3つの数値実験により、流量フラックスの横断方向分布が河床形態と流路の平面形状に及ぼす影響を調べる。

(1) 数値解析モデル⁹⁾

以下で実施した河床変動計算はiRIC2.0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(V4.0)を用いた。流れの支配方程式は水深方向に積分された流速を用いる浅水流方程式である。河床変動には流砂の連続を用いる。

(2) 計算条件

ここでは、表-1に示したような複断面流路を用い、河床変動計算を行った。この条件は永多ら¹⁰⁾の移動床水理実験を参考に決定している。B1は計算区間の全幅、B2は低水路幅を意味し、低水路の平面形状の変動を調べるため、その両岸にそれぞれ0.4mの幅の高水敷を設けた。高水敷の高さは等流計算をもとに0.015mの高さに設定した。初期条件では3(L/sec)の流量をすべて低水路内に与える。この水理条件から川幅水深比と無次元掃流力を計算すると、それぞれ表-1の後半に示した値となり、砂州の領域区分図に適用すると複列砂州の卓越条件下になる。流路全長は30mである。初期河床については、全体を平坦床にした後、河床全体に乱数により河床材料粒径程度の擾乱を与えた。この条件で前述した3つの河床変動の数値実験を行う。なお、上流端境界条件として波数1と波数2を与える場合の流量フラックス分布の波形には正弦波を用いた。正弦波の振幅は平均値から±100%としている。また、構造物を設置する場合は、上流端から3mの位置の流心に直径0.4mとなるような不透過の円柱を設置することで構造物と見なした。どの条件でも下流端境界条件は等流水深を与えた。このため下流端付近ではこの影響を強く受け、以降の議論の対象には出来ない。

比較のため、同条件下において一様分布で流量フラックスを与えた場合の河床変動計算の結果を最終時刻の36,000秒のもののみ図-3(a)に示す。

(3) 上流端境界条件として流量フラックス分布の波数1を与えた場合の結果

図-3(b)に計算結果を示した。左列は河床形状を示しており、初期に白で着色されている箇所が高水敷に相当する。右列は流線で、着色が赤に向うほど合成流速 U が大きくなることを意味する。

通水開始から1,000秒の河床形状を見ると、上流端付近に平面的にV字型の複列砂州が形成されていることがわかる。また流線の形状から、側壁へ向かおうとする流れが発生していることがわかる。

以降は、このV字型複列砂州がきっかけとなって河床形態と流路形態が決定されていくようである。まず、V字型複列砂州の周辺の形状を見ると、初期に直線を与えた低水路の平面形状が徐々にV字に沿って狭まっていくことが見て取れる。また流線の形状からも上流端付近で側壁へ向かった流れがこの複列砂州にそって流心に集中していくことはわかる。これは拡縮流路の拡幅部から狭窄部へと移り変わる部分に相当する。最終的にこのV字型複列砂州は流下方向に約4m伸び、幅0.6m程度の川幅で狭窄部を形成することで安定化した。

次に狭窄部の直下流に注目すると、波数2の複列砂州が形成されていることが分かる。流線の形状からも一度集中した流れが再び分離していることが確認できる。それに伴い低水路の平面形状も複列砂州を避けるように、楕円形に狭窄部から拡幅部、そして再び狭窄部へと変化している。狭窄部から次の狭窄部までの長さを拡縮の波長と定義すると、この場合は5.5mの波長で安定する。また、拡幅部の川幅は1.5mほどで、その下流の狭窄部は上流の狭窄部とほぼ同じく0.7m程度である。しかし、これより下流では単列砂州が卓越し、蛇行流路に近い形の流路となって安定した。

(4) 上流端境界条件として流量フラックス分布の波数2を与えた場合の結果

複断面流路上流端の境界条件として流量の横断方向分布の波数2を与えた場合の河床変動計算の結果を図-3(c)に示した。

1,000秒には低水路の両岸から流心に向かって砂州が形成されている。この砂州は流量フラックスの横断方向のばらつきを与えたことが主因となって形成されるため、強制砂州の一種だと考えられる。2つの強制砂州の間では流線形状からも明らかであるように、流れが一本に集中し、波数1を与えた場合とほぼ同じ状態となっている。一方で、強制砂州の外側を回る流れも河床形状と流線形状から確認できる。この強制砂州は波数1を与えた場合と異なり流下方向に伸びにくく、約2mの長さで安定形状となった。

強制砂州の下流には波数1を与えた場合と同様に明瞭な複列砂州が形成されていく。流線形状からも判断できるように流れも同様に複列砂州を避け、8の字流路となる。この複列砂州は波数1を与えた場合より小さく、流下方向に2m、横断方向に0.8mの波長で安定した。これらのことから、形成されていく河床形状と流線形状は近いものの、定量的に評価すると砂州波長は異なることがわかる。

低水路内の複列砂州の形成に伴い、その平面形状は拡縮形状となっていった。形成される拡幅部の川幅は約1.5m、狭窄部の川幅は約0.7mと波数1と近い結果が得

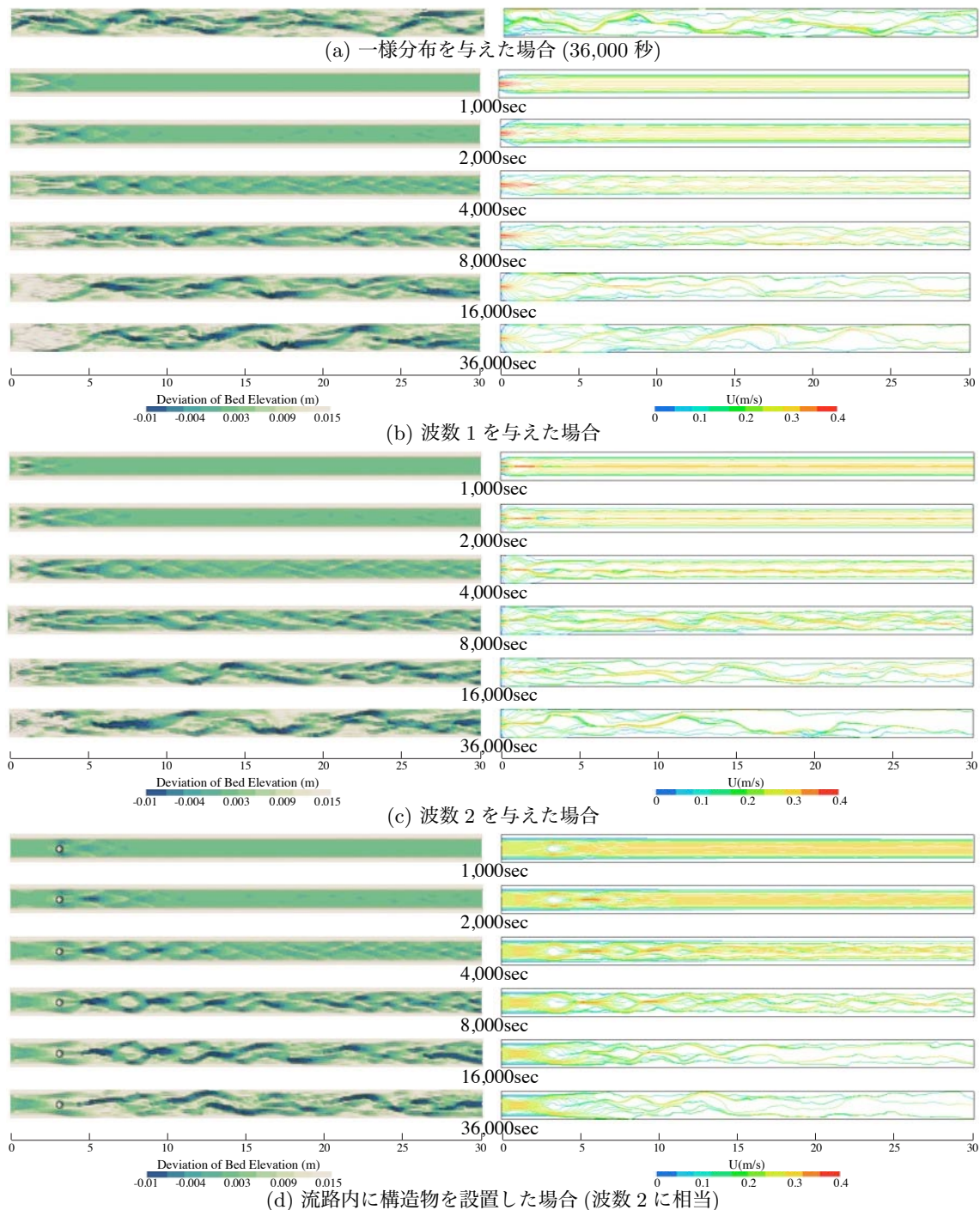


図-3 河床変動計算の結果 (各時間あたり、左列が河床形状、右列が流線)

られた。しかし、拡縮の波長は波数1に比べ短く、3.5mで安定した。

(5) 流路内に構造物を設置した場合の結果

図-3(d)にその結果を示す。2,000秒を見ると、構造物が複列砂州の役割をなし、波数1や2を与えた場合と同様な河床形状が形成されていることがわかる。流線の形状と着色を見ても、構造物により一度分離した流れがその下流で集中し、さらに下流で再び分離している。つまり、この場合に発生する砂州形態も上流端境界条件として流量フラックス分布に波数1, 2を与えたと同様に強制砂州由来であることが推測される。

構造物の下流に形成される複列砂州は約1mの長さで安定形に達した。また、流心付近での複列砂州の形成に伴い、平面形状も波数1, 2を与えた場合と同じく拡縮形状となった。流れの形状からも明らかである。拡縮部の川幅は約1.5m、狭窄部の川幅は約0.3mとなった。他の2つの条件と比べると、拡縮部の川幅は同程度であるのに対し、狭窄部の川幅は半分程度であることがわかる。一方で、形成される拡縮形状の波長に注目すると、2.5m程度と3つの条件のなかでは最も短い波長で安定した。さらに、波数1, 2を与えた場合に比べて、砂州形状と流路形状ともに周期性が強く、より下流へ流量フラックスの横断方向分布の効果が伝わっていると推測できる。

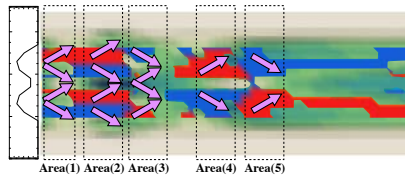


図-4 河床形状と横断方向水面勾配の影響で発生し得る流れの対応分布図 (波数 2 を与えた場合, 2,000sec)

(6) 拡縮流路の形成に対する河床形状と横断方向水面勾配の関係

以上 3 つの数値実験では、明瞭さに違いは出たものの、どの結果も拡縮流路と複列砂州形態が形成された。ここでは、その主因について横断方向の水面勾配の観点から議論する。図-4 に例として波数 2 を与えた場合の通水開始から 2,000 秒後の河床形状、横断方向水面勾配の分布とそれにより発生し得る流れの対応分布図を示した。横断方向水面勾配は、1/500 以上となる部分を着色し、青が右岸方向に下りの傾斜、赤が左岸方向に下りの傾斜を意味する。

まず、Area(1) について、上流端に左図のような波数 2 の流量フラックスの横断方向分布を与えたため、その付近では横断方向水面勾配も同様に二つの山を持ち、低水路の右岸から青→赤→青→赤と着色される。一つの山はそれぞれの水面勾配に従い、右と左へ分裂しようとするため、上流端付近では Area(1) 内に示したように右岸へ衝突しようとする流れ、左岸へ衝突しようとする流れ、流心でぶつかり合おうとする二つ流れの計四種類の流れが発生し得る。この横断方向の水面勾配は Area(2) まで続いていき、この流れの発生によって両岸から強制砂州が形成されていくことが対応図からわかる。

しかし、Area(3) では、その上流まで見られた横断方向水面勾配の分布と逆転した分布となっている。まず、Area(2) において右岸と左岸に向かっていった流れはそれぞれの側壁に衝突するため、横断方向の水面勾配が逆となり、外向きの流れから内向きの流れと変化する。このため、Area(3) は拡幅部になる。また、流心でぶつかり合おうとしていた二つの流れは衝突によって一つの山となり、外側へ分裂しようとする流れへと変貌していく。これらは Area(2) と Area(3) での横断方向水面勾配の着色の変化からも明らかである。

Area(4) では Area(3) で発生する流速が二箇所ですべて再び衝突する。この衝突では横断方向水面勾配の着色から分かるように、内側から外側へ向う流れの成分がより大きいようで、衝突後は内向きの水面勾配は失われ、二種類の外側へ向う流れへと変わる。この流れ発生によってその間に土砂が溜まり複列砂州が形成されていくことが確認できる。

その後、Area(5) において外側へ向かっていった流れは再び側壁に衝突し、水面勾配が反転し内向きの流れとなる。ここでの両岸への衝突が主因となり、Area(5) も後に拡幅部となる。また、それにより発生する内向きの流れが土砂を側壁付近に溜めていき、拡幅部の下流に狭窄部を形成する。

この理論に則ると、流量フラックスの横断方向の波数とそれを拘束する川幅の関係性が複列砂州の波数や拡縮流路の波長に密接に関連することが示唆され、網状流路

の存在形態の理解への応用も見込める。

4. 得られた知見の実河川への応用

今回行った 3 つの河床変動計算では、どの条件においても流量フラックスの横断方向の偏在により、形成初期に上流端付近で波数 2 の複列砂州、つまり中州が形成され、その波及によって下流側に複列砂州と拡縮流路が形成されていった。中州はこれまでの議論の通り、その断面に流れる流量を強制的に側壁付近に二分し、横断方向水面勾配を生むきっかけとなる。すなわち、上流側に何らかの要因で中州が形成され維持されている場合、もしくは橋脚等の横断構造物が存在する場合には、その効果の伝達により複列砂州や拡縮流路が流下方向に連続して形成されていく可能性があることを意味している。つまり、河道変動において、中州や横断構造物は河床形態や流路形態を概形から大きく変えるほどの役割を担うと考えられる。この知見は現在まで不明なまま残されてきた実河川における河道の拡縮形状や複列砂州形態の維持要因と河岸侵食の理解に有用なものとなり得る。

5. おわりに

実河川において流量フラックスが横断方向に一樣に分布しているケースは極めて稀である。本研究はその着実に始まり、著者らの研究の再考察と新たに流量フラックスの横断方向分布の偏在を与えた河床変動の数値実験を行った。

強制砂州由来の複列砂州を形成する拡縮流路上で見られた流量フラックスの横断方向分布を強制条件として与えた 3 つの河床変動の数値実験を行ったところ、明瞭さに違いは出るものの、どの条件でも拡縮流路と複列砂州が形成された。また、横断方向の水面勾配に着目することで複列砂州と拡縮流路の形成過程、対応関係の解明の糸口を掴んだ。

謝辞

本研究は、科研費若手研究 (A) (代表者 安田浩保) の助成を受けて行われました。またデータ整理等で新潟大学工学部 五十嵐拓実君の熱心な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 高橋玄, 安田浩保, 複列砂州の維持条件に関する一考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I-961-I-966, 2012.
- 3) 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.
- 4) 渡邊康玄, 早川博, 青治真人, 安定解析に基づく川幅の自律形成機構, 水工学論文集, Vol.53, 2009.2.
- 5) 福岡捷二, 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅断面形の検討方法, 河川技術論文集, Vol.16, 2010.6.
- 6) 長谷川和義, 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道学位論文, 1983.
- 7) S.Ikeda and G.Parker, River Meandering, *Water Resources Monograph*, Vol.12, pp.485, 1989.
- 8) Seminara G and M.Tubino, Weakly nonlinear theory of regular meanders, *J. Fluid Mech*, Vol.244, pp.257-288, 1992. 2006.2.
- 9) 河川シミュレーションソフト iRIC2.0 : <http://i-ric.org/>
- 10) 永多朋紀, 渡邊康玄, 安田浩保, 伊藤丹, 砂州地形に誘発された蛇行発達, 水工学論文集, 第 57 巻, 2013.2.