

流路平面形状の拘束条件が中規模河床波にもたらす影響

新潟大学工学部建設学科社会基盤工学コース
新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所
新潟大学大学院自然科学研究科

学生員○五十嵐拓実
学生員 星野 剛
正員 安田 浩保
学生員 高橋 玄

1. はじめに

著者ら¹⁾は、縦断方向に流路幅が周期的に変化する拡縮流路においては中規模河床波の動態は大きな影響を受け、このような拡縮流路に複列砂州が形成されるとされる大きな川幅水深比を与えると、強制砂州成分と自由砂州成分の相互作用によって実河川で見られるような複列砂州が安定に維持されることを示している。これらの成果は、既往の固定壁の直線水路において得られた土砂水理学の知見に対して極めて重要な示唆を与える。すなわち、自由砂州の成分だけから作り出される中規模河床波に焦点を当てるために固定壁の直線水路を用いたにもかかわらず、結果的に得られた平衡状態の中規模河床波には固定壁を起因とした強制砂州成分が多分に含まれているものとの解釈が妥当であろう。つまり、固定壁の流路においてはその平面形状の如何に関わらず、中規模河床波の側方への伸展を拘束する固定壁を契機とした強制砂州の成分が中規模河床波の形成に対して極めて多大な役割を果たしていることが推測される。

本研究は、著者らの拡縮流路に関する研究を端緒として、中規模河床波に対する側方伸展の拘束条件が中規模河床波の動態に及ぼす影響を明らかにしようとするためのものである。そのために、まず、実河川における平面形状が中規模河床波の形成に対して与える影響について調べる。つぎに、側方への拘束条件を解放した場合の中規模河床波の動態を調べる。さらに、実河川における部分的な低水護岸に相当する拘束条件が中規模河床波の伸展に及ぼす定性的な影響について調べる。

2. 数値実験Ⅰ(平面形状が中規模河床波に与える影響)

(1) 対象とした実河川

本研究では、まずはじめに実河川における平面形状が中規模河床波に与える影響について調べるため、北海道十勝川水系の一般河川である札内川を解析対象とした。この河川は1980年代には、単列砂州に比べて複列砂州が卓越していたのに対し、現在では単列砂州が卓越して、低水路内の樹林化が問題となっている。札内川では1990年代に低水護岸と水制工の設置が進められた。

図-1に1987年と2007年の対象区間の川幅の流下方向の分布を示した。実線が1987年、破線が2007年の川幅を表している。これらを比較すると、実線(1987年)に比べ、破線(2007年)は高周波の成分が消去して低周波成分で構成されていることがわかる。このことは、1987年にはこの区間は低水路幅が拡縮を繰り返す流路形状を成していたのに対し、2007年には低水護岸や水制工の設置によって平面形状が単調化して、直線流路に近い形状へ変貌したことを意味する。以上のことから、札内川のKP0/32からKP0/36の区間では1987年と2007年の間に流路の平面形状と卓越河床形態がどちらも変化したことがわかる。本研究では、低水護岸の設置により流路の平面形状が変化し、かつその間に卓越砂州形態が移行した実河川の一例として、以上に述べた札内川の

表-1 河床変動計算に用いた計算条件

	$Q(\text{m}^3/\text{sec})$	$B(\text{m})$	i_b	$d(\text{mm})$	$B\tau^{0.2}/h$	τ .		
1987	a) 1800	220	1/135	34	41.2	0.26		
	b) 900				63.4	0.17		
	c) 450				95.0	0.11		
2007	d) 1800	270			61.3	0.22		
	e) 900				92.9	0.14		
	f) 450				140.0	0.09		

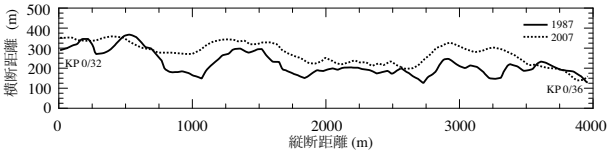


図-1 札内川 (KP0/32-KP0/36) の低水路幅

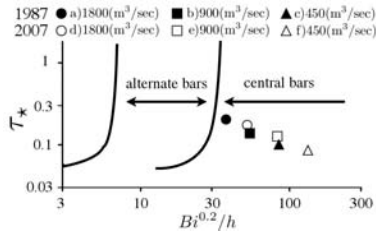


図-2 中規模河床波の領域区分図

KP0/32 から KP0/36 の約 4km を対象とした河床変動計算を行った。

(2) 計算条件

河床変動計算に用いた計算条件を表-1に示した。与えた流量 Q は等流計算より逆算した低水路満杯流量である $1800(\text{m}^3/\text{sec})$ および $900, 450(\text{m}^3/\text{sec})$ の3パターンに設定した。これを1987年、2007年の各地形に上流端境界条件として与えることで計6パターンの河床変動計算を実施した。1987年、2007年の各平面形状を用いた場合の平均川幅 B はそれぞれ220m、270mである。平均河床勾配 i_b と河床材料粒径 d_s はこの区間の代表値を用い、一定とした。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。

これらの条件から、中規模河床形態を規定するとされる²⁾川幅水深比 $Bi^{0.2}/h$ と無次元掃流力 τ_* を求めると表-1後半に示したような値が得られた。これを中規模河床波の領域区分図に適用すると図-2のようになり、それぞれ相違はあるものの6つすべての条件で複列砂州の卓越領域となる水理条件であることがわかる。

(3) 数値解析モデル³⁾

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。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。

(4) 計算結果の各流量での比較

6パターンの河床変動計算を行うことによって得られた河床形状を図-3a)～f)に示した。これらはすべて各

1987

2007

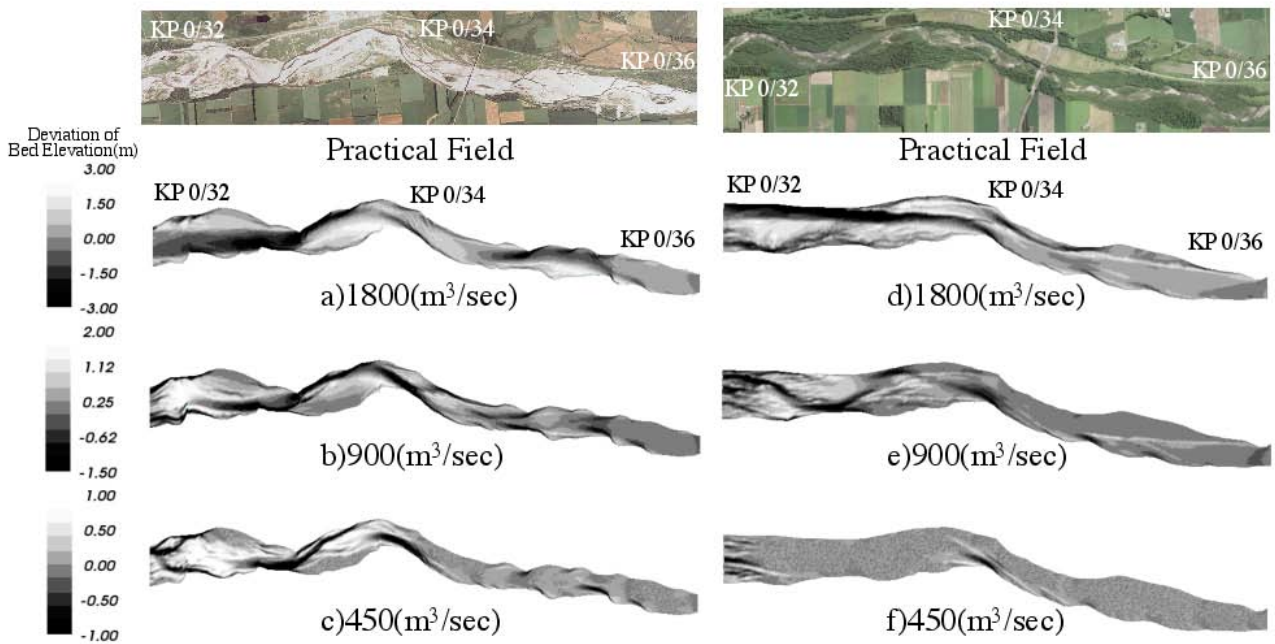


図-3 札内川 (KP0/32-KP0/36) の実地形と計算結果

条件下にて最終的に得られた河床形状である。ここでは1987年と2007年の計算結果を比較する。

a) $Q = 1800(\text{m}^3/\text{sec})$

図-3a), d) は実施した解析の中では最も交互砂州領域に近い複列砂州領域の水理条件が与えられている。両地形とも最終的に得られる平衡河床形態としてはどちらも区間内全域で単列砂州に近い形状となる。紙面の都合上掲載は省くが、形成過程では複列砂州が卓越する時間帯が見られた。これはいわゆる複列砂州のモード減少であり、札内川において低水路満杯流量程度の水理条件では、1987年と2007年のいずれの地形でも最終的に単列砂州が形成されるようである。

b) $Q = 900(\text{m}^3/\text{sec})$

図-3b) を見ると、区間下流部の KP0/32 から KP0/34 では $Q = 1800(\text{m}^3/\text{sec})$ の a) と同じく、単列砂州が形成されている。一方で、区間上流部の KP0/34 から KP0/36 では、下流部と異なりモード減少をすることなく少モードの複列砂州が形成されていることが確認できる。上流と下流でこのように異なる河床形状が得られることの要因としては、各区間における平面形状の影響が考えられる。1987年の札内川の KP0/32 から KP0/36 の平面形状は、KP0/34 の地点を境として明らかに異なる。流路の拡縮形状が卓越する KP0/34 より上流では、平面形状の拡縮の影響により複列砂州が形成され、KP0/34 より下流では流路全体としての蛇行形状が卓越し、一般的に言われている蛇行部内岸の固定砂州が形成したと推測できる。

e) の KP0/32 から KP0/34 では b) と同様に単列砂州が形成されたのに対し、KP0/34 から KP0/36 の上流部区間では初期形状として与えた擾乱が消え、砂州は発生しなかった。b) と e) を比較すると、b) は流路の拡縮形状の影響で両岸の湾曲部に強制砂州が形成されるが、湾曲の影響が弱い e) は強制砂州が発生し難く、砂州の発生は自由砂州成分のみで規定される。つまり、流路の平面形状は形成される河床形態に影響を与えるのみならず、結果的に砂州の有無にも関与することが理解できる。

c) $Q = 450(\text{m}^3/\text{sec})$

c) は $Q = 900(\text{m}^3/\text{sec})$ を与えた b) ほど明瞭ではないものの、b) とほぼ同じく KP0/32 から KP0/34 では単列砂州が形成され、KP0/34 から KP0/36 では複列砂州に近い形状の砂州が形成された。一方で、f) は他の条件に比べ、河床変動を開始する時間が圧倒的に遅く、ほぼ初期形状のままだった。c) と f) の結果を踏まえると、平面形状は無次元掃流力と同等に砂州の発達時間に影響を与えることが推察される。

(5) 計算結果と実地形の比較

図-3 の最上段に1987年と2007年の札内川の KP0/32 から KP0/36 の区間の航空写真を示した。図-3b) と1987年の実地形は酷似した河床形状であることがわかる。KP0/32 から KP0/34 では実地形と図-3b) どちらも流れが一本に集中している。河床変動計算で複列砂州が形成された KP0/34 より上流では、流れが集中している箇所と砂州形状が一致していることがわかる。

1987年の札内川の KP0/32 から KP0/36 の4km区間の河川地形の概形を形成したのは、低水路満杯流量の半分程度の洪水であったことが推測でき、また上流部の複列砂州形態の形成には流路両岸の拡縮形状が極めて大きな影響を与えていたことがわかる。すなわち、上述の結果に基づくことで、実河川における河川地形を把握するためには、著者らが主張するように¹⁾ 既往の川幅水深比に基づく領域区分図の概念のみでは不十分であることが改めて確認された。

3. 数値実験 II (川幅拘束の有無が中規模河床波に与える影響)

前項において、低水護岸設置前後の平面形状で形成される砂州形態が大きく異なることが確認された。しかし、前項で行った数値実験はあくまで平面形状の影響のみ議論しており、低水護岸の設置について川幅の拘束の有無については議論されていない。ここでは、低水護岸設置による川幅拘束の効果をより詳しく調べるため、さらに以下の理想形状を用いた数値実験を実施した。

表-2 河床変動計算に用いた計算条件

$Q(L/sec)$	$B1(m)$	$B2(m)$	i_L	i_c	$d_s(mm)$	$Bi^{0.2}/h$	τ_*
3	1	5	1/164	3/200	0.5	31.6	0.082

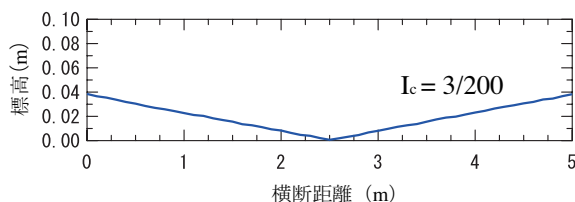


図-4 横断面図

(1) 計算条件

この数値実験では、地形条件、水理条件を永多らの移動床模型実験⁴⁾を参考に決定した。条件を表-2に示す。流路の横断面形状を図-4に示したV字型断面とすることで川幅の拘束を解放した。表中の i_c はV字型断面の横断方向の勾配を意味し、永多らの実験で見られた単列砂州の横断方向勾配を参考に決定した。水路全長を30m、 $B1$ は初期に冠水状態にする低水路に相当する部分の幅で $B2$ が計算領域の全幅である。つまり、この条件下では初期条件から右岸、左岸方向にそれぞれ最大で2m分広がることができる。

部分的に拘束条件ありの場合にはこのV字断面流路に長方形構造物を設置することで低水護岸の役割をさせた。長方形構造物は上流から10m地点の低水路両岸にそれぞれ設置した。長方形構造物の長さは11.4mで非冠水の条件とする。

この水理条件から拘束条件なしのV字断面流路の川幅水深比と無次元掃流力を求めることは容易でないが、低水路を矩形と仮定して概算すると表-2中で示した $Bi^{0.2}/h$ 、 τ_* 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となる。

また初期河床には全体に、乱数により河床材料粒径程度の擾乱を与えた。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。計算時間は試行錯誤の結果、100,000秒に設定した。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。

(2) 計算結果

a) 川幅の拘束なしの場合

図-5(a)に計算結果を示す。2種類のコンター図のうち上段は河床形状、下段は流線の変化の過程を示している。流線の着色は赤へ向かうほど合成流速 U が大きくなることを意味する。通水開始から5,000秒で流路内に砂州の形成が見られ始めた。20,000秒の河床形状を見ると複列の砂州が卓越していることが確認できる。その時の流線の形状を見ると、川幅の拘束がないため形成された複列砂州をさけるように8の字に水面幅の拡縮を繰り返す形状となっていることがわかる。100,000秒の計算結果を見ると、この時刻もなお複列砂州形態を維持している。流線形状も8の字を維持していることが確認できる。以上の結果から、川幅の拘束を解いた場合、既往の研究が指摘する単列砂州形態までのモード減少はなく、初期に形成される複列砂州が維持されることがわかった。

b) 川幅の部分拘束ありの場合

川幅を部分的に拘束した場合の計算結果を図-5(b)に示した。この場合も拘束なしの場合と同様に通水開始から5,000秒ほどで砂州の形成が見られる。5,000秒の河床形状を見ると、流路全域にて複列砂州が形成されていることがわかる。特に拘束ありの部分にはなしの部分に比べてより周期的な複列砂州が形成されている。これは流

線の形状からも確認できることである。

しかし、それ以降の時間では拘束なしの箇所とありの箇所では砂州の動態が異なることがわかる。まず、拘束なしの箇所に注目すると、100,000秒に達しても複列砂州を維持していることがわかる。構造物の直下流の流線形状をみると、拘束されていた水面が解放され、拡縮形状になっている。一方で、拘束ありの箇所では複列砂州のモード減少が発生している。20,000秒ではまだ複列の砂州であったのに対し、100,000秒では単列の砂州が卓越している。流線もそれに応答して、構造物の縁に寄り、流れが集中している。

4. 考察

(1) 川幅の拘束条件の影響

以上2つ数値実験の結果から、部分的な拘束条件の有無により形成される河床形態に明らかな違いがあることが確認された。拘束条件がない場合は、水面幅は河床形状に応答して変化していく。また、河床形状も水面幅に応答して変化する。このことから、川幅の拘束条件がない場合は、河床形態と水面幅は相互に影響を与え合っており変化すると言える。その一方で、川幅の拘束がある場合、本来拡大や縮小しようとする水面幅を強制的に固定するため、自由度が1つ失われ、この場合もそれに応答した河床形状が形成される。これが川幅の拘束の有無により河床形態の違いが見られた最大の要因と考えられる。以上のことから、部分的に川幅を拘束した箇所で見られた複列砂州から単列砂州へのモード減少は、水面幅を一定値に固定する低水護岸の設置に対応した結果であると推測できる。

(2) 複列砂州のモード減少に関する考察

数値実験Iで行った1987年の札内川の河床変動計算のように流路の両岸が湾曲した河道内では、複列砂州は湾曲形状に応答して、モード減少せずに維持されることが確認された。また、数値実験IIで行った川幅の拘束がない流路においても同様に複列砂州が形成され、維持されることがわかった。

ここで、複列砂州のモード減少が確認された既往の研究⁵⁾⁶⁾の設定条件に振り返ると、それらはすべて直線で川幅を拘束した流路を用いて行われてきたことに気が付かされる。本研究の数値実験IIで行った川幅を拘束した箇所と全く同じ条件であると言える。つまり、これらのことを総合すると、複列砂州のモード減少は、川幅を一定に拘束した流路で見られる特有の現象といった新たな知見が導かれる。

5. おわりに

本研究では、低水護岸等の設置による流路の平面形状の変化、及び川幅の拘束の有無が河床形態に与える影響について数値実験に基づき調べた。その結果、どちらも河床形態の概形を変えるほどの効力があることが確かめられた。これは既往の川幅水深比に基づく砂州の領域区分図の概念だけでは河床形態を的確に説明できないことを意味する。

既往の研究で見られる複列砂州のモード減少は、平面形状の直線化、川幅を一定値で拘束するという2つの条件が与えられた場合に生じる現象であるといった新たな解釈が得られた。この2つの条件が重なることで実河川では河道の単調化を引き起こされると考えられる。これは実河川での河道の単調化を引き起こす根本的な要因を指摘するものであり、河床形態の能動的な制御の可能性を見出したと言える。

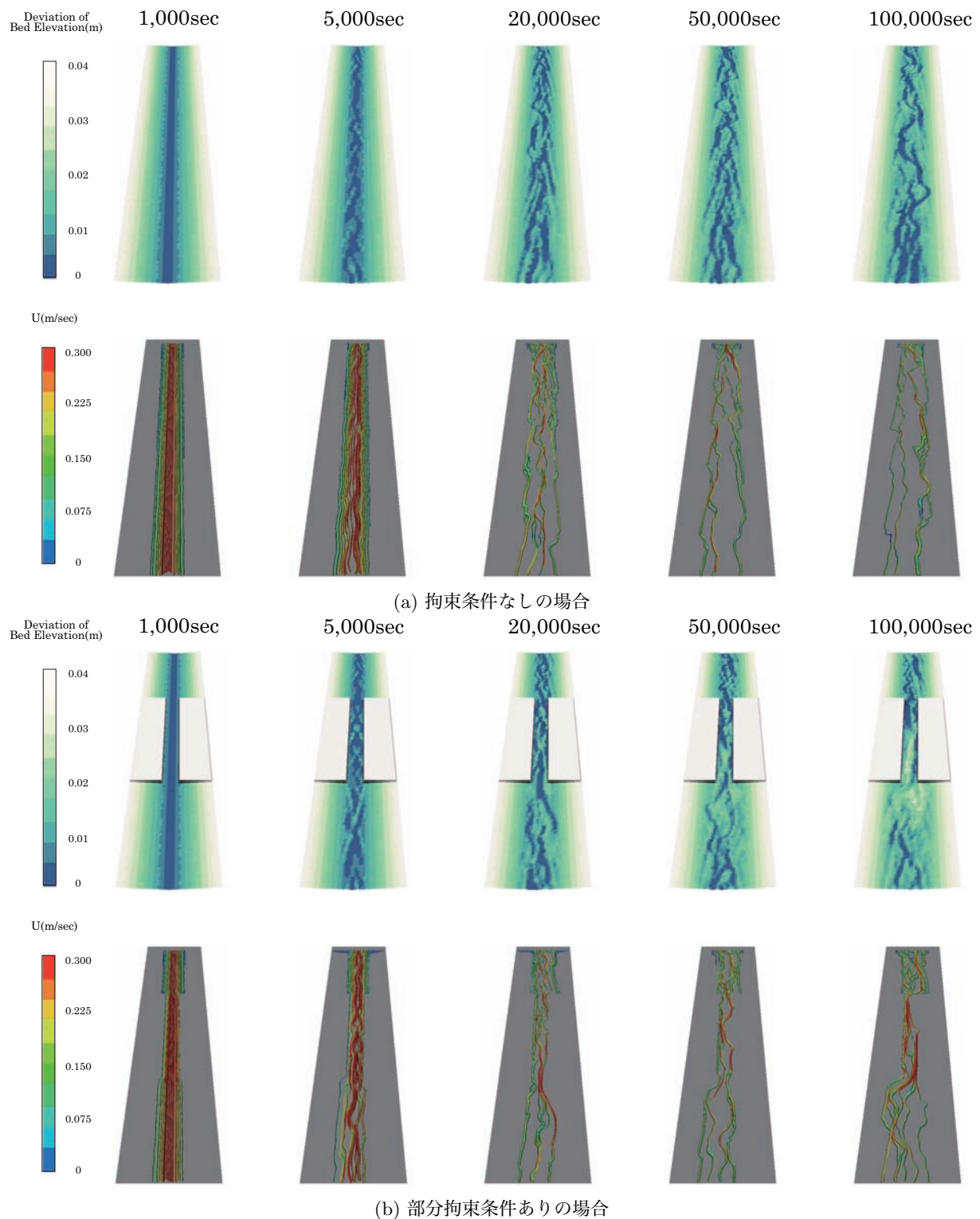


図-5 河床変動計算の結果 (各時間あたり，上段が河床形状，下段が流線)

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、本研究を行うにあたり北海道開発局帯広開発建設部に札内川の河道データ提供をして頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 河川シミュレーションソフト iRIC : <http://i-ric.org/>
- 4) 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, 土木学会論文報告集, Vol.342, pp.87-96, 1984.
- 5) 渡邊康玄, 桑村貴志, 砂州のモード減少過程水理実験への安定解析の適用, 水工学論文集, Vol.49, pp.175-180, 2005.2.
- 6) 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.