

# 節腹連続河道形状の発達過程に関する実験

## EXPERIMENTS ON THE DEFORMATION PROCESS OF CHANNEL PLANE FORM WITH NODES AND ANTI-NODES

山口里実<sup>1</sup>・渡邊康玄<sup>2</sup>  
Satomi YAMAGUCHI and Yasuharu WATANABE

<sup>1</sup>正会員 博(工) 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1番34号)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

Movable bed experiments using a wide laboratory flume without influence of fixed side walls were carried out in this study in order to observe the long-term deformation process of channel plane forms. The channel plane form deforms with bank erosion, braided streams and bed geometry in the channel. In this experiment, the initial straight channel changed to the plane shape with narrow parts (nodes) and wide parts (anti-nodes) finally. The plane shape with narrow parts and wide parts was seen several times during the deformation process. The formations of the former watercourses were also seen in the process that the channel plane shape shifts to a renewed plane shape with different phase.

**Key Words :** braided bars, bank erosion, channel plane formation, experiments

### 1. はじめに

河道平面形状の発達過程を把握することは河道の維持管理上重要である。河道平面形状の形成過程に関しては、近年、理論的な研究が行われている<sup>1),2)</sup>。しかし、図-1に示した札内川のように河道幅が変化する河道平面形状の発達過程は未だ明らかになっていない点が多い。

札内川のような河床勾配が比較的急な河道の平面形状は、主に河道内の複列砂州と網状の流路の発達により特徴付けられる。渡邊ら<sup>3)</sup>は、網状河川では図-1に示されるように、流路が収束し川幅が狭くなっている箇所(節)と流路が分散し河原が広く存在している箇所(腹)が交互に存在することによって河道平面形が構成されている点に着目し、その形成機構を線形安定解析により理論的に説明することを試みている。しかし、理論では十分な発達過程を説明できない。また、側岸侵食性の直線河道を用いた従来の実験<sup>3),4),5)</sup>では、河道拡幅に伴って流路が網状化する過程で上述のような節と腹の特性が表れることが示されている。しかし、いずれも長期的な河道平面形を観測した実験ではない。

図-1をよく見ると、節の箇所に白破線で示すような旧流路の存在が確認でき、このような旧流路の形成も、河道平面形状の変動過程における特徴の一つである。図-1に見られるような河道平面形の形成過程を実験的に再現し、長期的な河道平面形状の変動過程を明らかにするこ

とが本研究の目的である。本研究では、幅広水路上に整形した側岸侵食性の低水路に長時間通水する実験を実施し、河道平面形状の発達過程を観測するとともに、発達した平面形状における流況特性について検討した。

### 2. 側岸侵食性水路における実験

#### (1) 実験概要および実験条件

実験には、寒地土木研究所が所有する全幅3m延長26mの実験水路を使用した。河床勾配は1/100とし、河床材料には東北硅砂4号(平均粒径0.765mm, ほぼ均一粒径)を使用した。実験水路全体に厚さ0.1mmになるように河床材料を敷設した後、水路中央に幅0.45m高さ0.02mの低水路



図-1 札内川に見られる河道平面形状

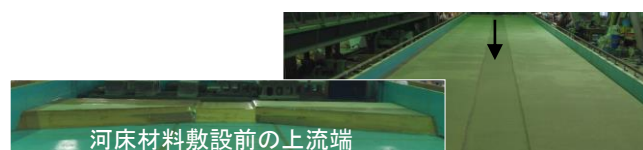


図-2 実験に使用した水路端 (初期低水路整形後)

を図-2のように整形し、これを初期河床とした。上下流端では初期河床形が変化しないように固定堰と固定壁をそれぞれ設けた。ただし、上流端では急激な拡幅の影響を避けるために、図中に示したように水路幅を徐々に拡幅させるための固定床部を両岸に設置した。

実験は、異なる二つの流量下において、それぞれ一定流量を10時間通水した。これらの実験条件を表-1に示す。Case1は初期の掃流力が限界掃流力の2倍程度、Case2は初期の掃流力が限界掃流力を少しだけ上回るように水理条件を設定した。中規模河床形態の区分<sup>6)</sup>によると、初期水路幅0.45mにおいてCase1は交互砂州、Case2は複列砂州の発生領域となる。ただしCase1は、通水中に水路が拡幅すると条件が変化し、水路幅が約0.7m以上になると複列砂州の発生領域へと移行することになる。また、上流からの給砂は、上流端の動的平衡が維持されるように注意しながら実施した。

各ケースでは、10時間の通水後に河床形状を乱さないように慎重に水路内の水抜きを実施した上でレーザー砂面計により河床形状を計測した。計測は、延長26m水路中の下流より4m地点から22m地点までの延長18mの区間とし、横断方向に5mm間隔、縦断方向に0.1m間隔で河床データを取得した。また、水路上空にカメラを設置し、通水開始から実験終了まで約2分間隔で静止画の撮影を実施した。この撮影では、下流より9.5m地点から16.5m地点までの延長7mの区間の画像が得られている。通水を止める直前には、流水の状況把握のため上流から塗料を流入させ、その軌跡を撮影した。

表-1 実験条件

Case	流量 (m <sup>3</sup> /s)	初期水深 (mm)	初期 $\tau^*$
1	0.00276	14	0.11
2	0.00087	7	0.055

## (2) 実験結果

通水後の河床形状計測の結果を図-3に示す。図のコンターは水路勾配1/100を差し引いた比高を示している。

Case1を見ると、濃紺色で示される深い洗掘の箇所が縦断方向に約4.5~5mの間隔で水路中心付近に並んで生じているのがわかる。これらの洗掘箇所では複数の流路が合流している。また、これらの下流側には水路中央に比較的大規模な堆積域が見られ、その両側に流路が形成されている。これらの流路は、いずれも水路中心部に形成された深い洗掘箇所のやや下流側で分岐している。このように、上述の洗掘箇所では、その下流の堆積箇所でも腹となるような平面形状がほぼ流下方向に等間隔で連続して現れる結果となった。一方、Case2の河床形状にはCase1のような明確な節腹の平面形状は見られない。砂州や流路が不規則に乱れて発生している。

図-4は、通水を止める直前に塗料の軌跡を撮影したものの一部である。Case1では、節で流れが合流し、その下流で分流が生じている。しかし、図-3では縦断的に洗掘を示す青色の帯が流路状に示されている箇所であっても、図-4では白破線で示すように塗料が流れていないか色が薄くなっている箇所がある。腹に位置する両岸に分岐した流路では、場所によっては常にどちらの流路にも強い流れが生じているわけではないことがわかる。Case2の塗料の軌跡を見ると、河床形状をみても明確でなかった節と腹のような平面形状が確認できる。

## 3. 考察

### (1) 側岸侵食による河道幅の拡幅過程

実験では側岸侵食によって、徐々に河道幅が拡幅した。カメラ撮影範囲（下流より9.5m地点から16.5mの区間）

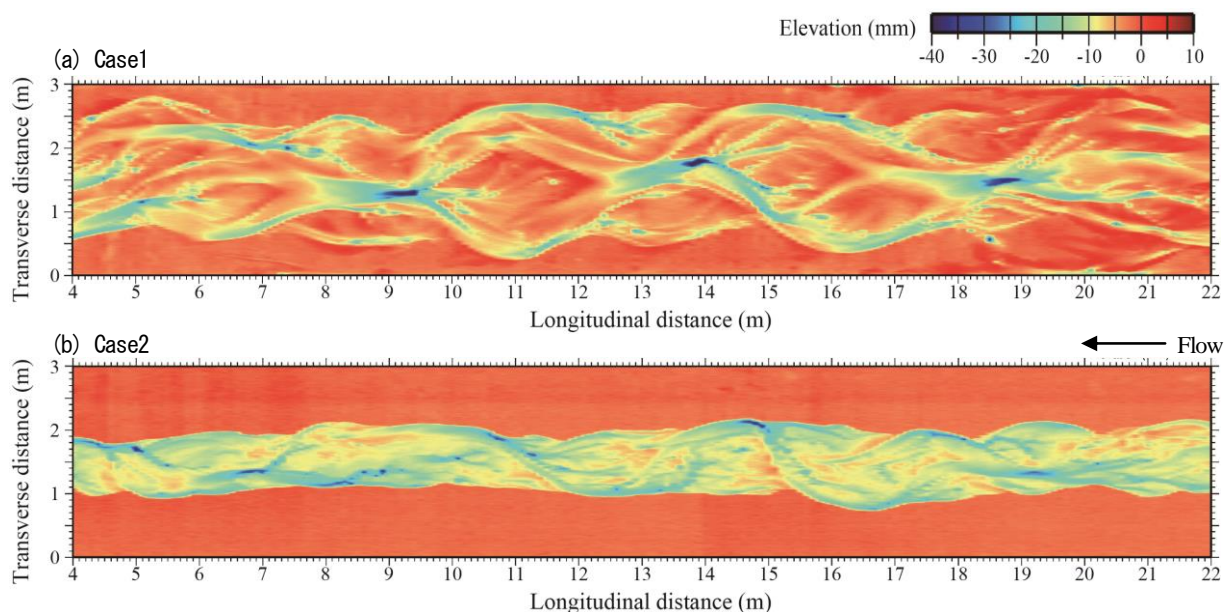


図-3 10時間通水後の河床形状計測結果（コンターは水路勾配を差し引いた比高）

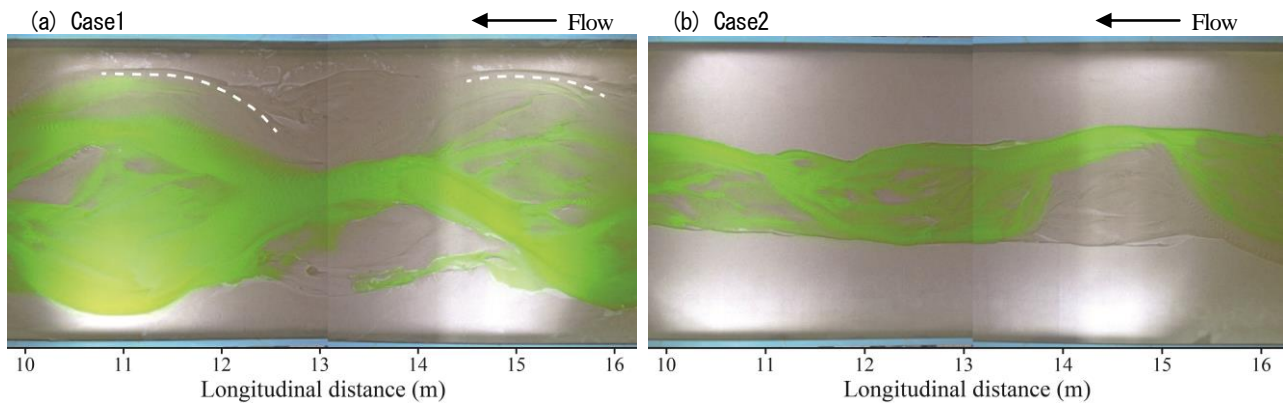


図-4 通水終了直前に上流端から流入させた塗料の軌跡

における最大河道幅の時間変化を図-5に黒線で示す。また、同範囲における右岸および左岸の最大侵食幅の時間変化を図-5にそれぞれ赤線および緑線で併記している。Case1では、通水開始後約150分まで急速に拡幅が進行し、その後、拡幅は遅くはなるが断続的に進行している。左右岸の侵食過程を見ると、拡幅が急速に進行している実験初期150分位までは、左右岸はほぼ同様に侵食が進行しているが、約250分後から左右岸の侵食が同時には進行せずに交互に進行していることがわかる。Case2でも、通水開始後約220分まで比較的速く拡幅が進行し、その間は左右岸でほぼ同時に侵食が生じている。その後ほとんど侵食は生じていないが、実験終盤に右岸だけに断続的な侵食が見られ、これによって拡幅がわずかではあるが進行していた。

## (2) 河道平面形状の発達過程と連続した節腹形状の出現

図-6および図-7に通水中の各時刻における河道平面形状を示す。各時刻に撮影された画像を基に、河岸を黒実線、砂州の前縁線を黒破線でトレースした。主流路を青線で示し、側岸侵食が進行している箇所を赤線で示した。また、侵食によって一度は河岸が後退した箇所に堆積が生じて陸地化することによって再度形成された河岸を白破線で示した。図-5中のアルファベットで示された時間が図-6(a-j)および図-7(a, b)の時刻に対応している。

Case1(図-6(a-j))の河道平面形状をよく見ると、次の三つの特徴が挙げられる。一つ目は、連続した節腹の平面形状が最終形状(j)だけでなく、(d)-(e)と(g)にも見られ、平面形の発達過程で何度も現れる形状である。二つ目は、節腹の平面形状が現れる時((d)-(e), (g)および(j))の河道拡幅過程を図-5(a)で確認すると、拡幅がほとんど進行していないか比較的緩やかである。つまり、節腹の平面形状が乱されて新たな節腹の平面形状に移行する間に(例えば(h)-(j)の過程に見られるように)河道幅の拡幅が急激に進行している。そのため拡幅が断続的に進行するのではないかと考えられる。三つ目は、節腹の平面形状の(d)-(e)から(g)への移行と(g)から(j)への移行がいずれも蛇行流の位相が約半波長ずれることをきっかけとして生じている点である。そして、その約半

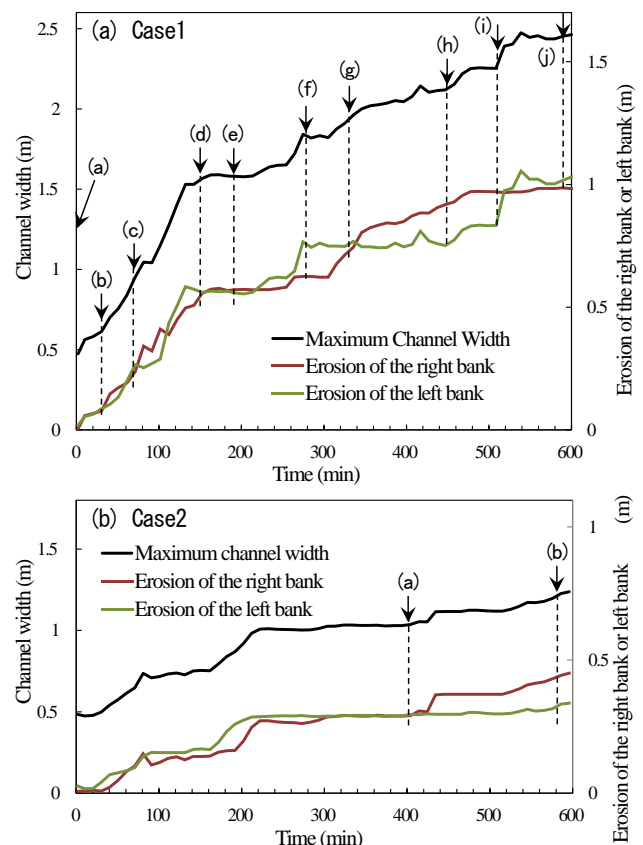


図-5 最大拡幅と左右岸の最大侵食幅の時間変化

波長ずれた位相で新たな節腹の平面形状が現れている。新たな節腹の平面形状の位相が旧平面形状からずれることによって、旧節腹形状で形成された流路が新たに形成された節の外岸側に取り残されることになる。図-6(g)および(j)に見られる旧流路を黄破線で示している。(g)に見られる旧流路は(d)-(e)の節腹形状の時に形成された流路であり、(j)に見られる旧流路は(g)の節腹形状の時に形成された流路であることがそれぞれ図-6により確認できる。

Case2では、Case1に比べて平面形状の変化が遅く、10時間の通水時間内では十分な発達過程は見られなかった。しかし、通水開始後250分から400分位までの間、図-7(a)に見られるような節腹の平面形状が継続して現れていた。この間は河道の拡幅がほとんど生じていないこと



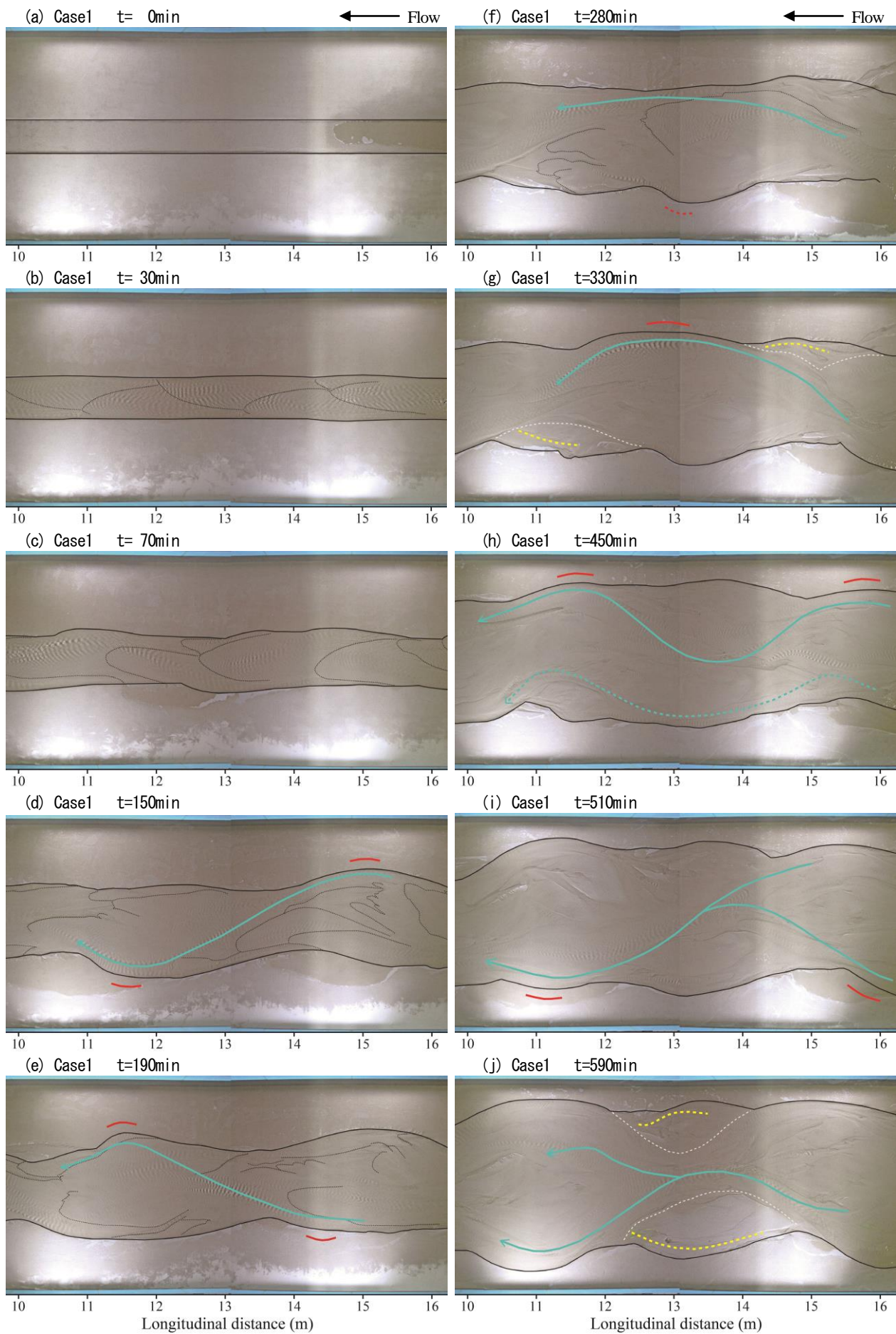


図-6 通水中の各時刻における河道平面形状 (Case1)

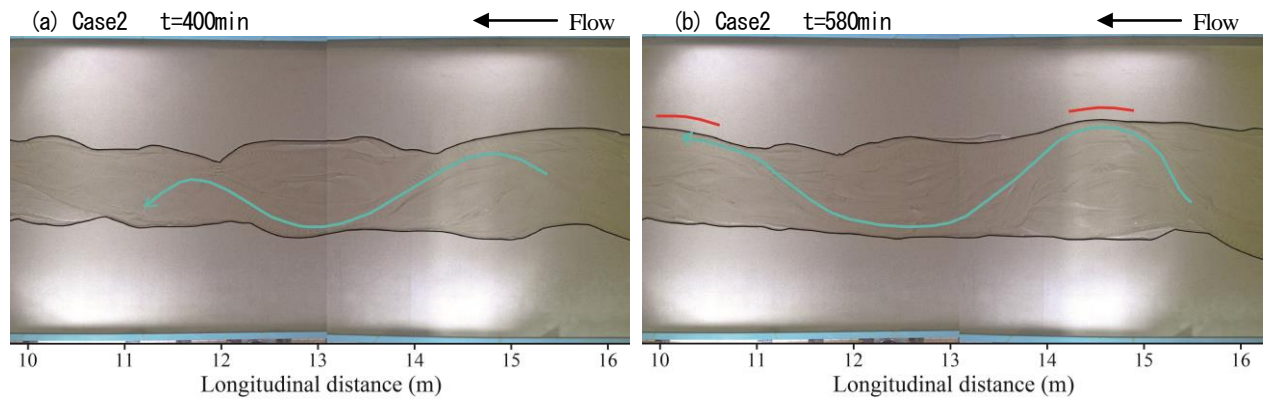


図-7 通水中の各時刻における河道平面形状 (Case2)

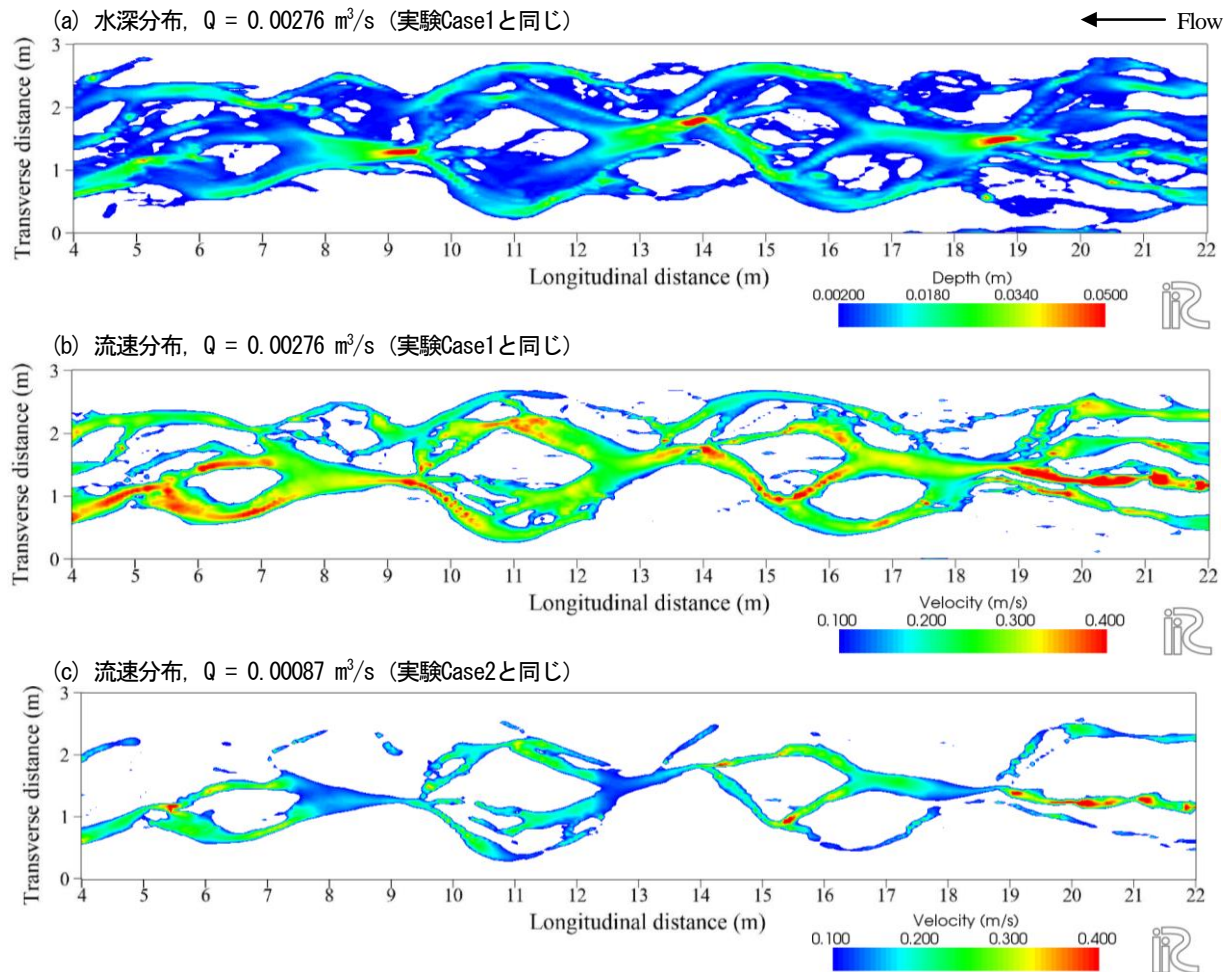


図-8 本研究の実験Case1で計測した河床地形上の流況 (iRIC Nays2DFloodを用いた計算結果)

が図-5 (b) から確認でき、Case1で見られた三つの特徴の内、二つ目の特徴と一致することは確認できる。通水後約450分以降には、図-7 (b) に見られるような右岸を侵食する蛇行流によって、それまで維持されていた節腹形状が乱され始めている。しかし、本実験の通水時間内ではその後の変化を確認できなかった。流路の固定化や河道内樹林化などに対応した河道維持管理のためにも小規模流量下における河道平面形状の変動過程を理解することは重要であるが、今後の課題である。

Case1およびCase2ともに、側岸侵食が進行する過程で節腹形状が現れており、節腹形状の形成には側岸の侵食

性が大きく寄与していることがわかる。また、節腹形状は側岸侵食による拡幅の進行が比較的緩やかな段階で現れており、節腹形状が形成される段階では拡幅によって掃流力が限界掃流力程度まで低下していると考えられる。腹の箇所への堆積によって流れが分岐することで節腹の平面形状が特徴付けられていることから、平面形に応じた堆積が容易に生じるような比較的小さい掃流力の条件下で節腹形状が形成されると考えられる。また、前出のように節腹形状の位相は断続的に変化しているが、拡幅に伴って掃流力が低下するほど位相が変化するまでに長い時間を要するものと考えられる。



### (3) 実験で得られた河道形状を用いた流況再現計算

#### a) 流況計算の概要

本研究の実験結果より、発達した節腹の平面形状は網状流路を特徴付ける平面形状の一つであることがわかる。このような流路の流況の把握は河道の維持管理上重要であるが、網状流路のような浅く広がった流れを面的に計測することは実験水路であったとしても非常に難しい。本研究では、発達した節腹の平面形状における流況特性を把握することを目的として、本研究の実験で得られた地形データを用いて流況の再現計算を行った。

流況計算には、iRIC<sup>7)</sup> Nays2DFlood v5 を用いた。図-3(a)に示される本研究の実験Case1で得られた河床地形データを基に計算格子を作成した。横断方向格子サイズを0.01m、縦断方向格子サイズを0.02mとした。マンニングの粗度係数は、マンニング-ストリクラー式より求めて0.014と設定した。

#### b) 発達した平面形状における流況特性

まず、実験のCase1と同じ流量条件で流況の再現計算を行った。再現された水深分布と流速分布を図-8(a, b)にそれぞれ示す。図-4(a)と図-8(b)を比べると、塗料が濃い箇所では流速の値が大きくなっており、流れの特性がある程度再現できている。下流から9m、14mおよび19m地点に見られる節で流路が集中し、その下流側で分岐することが示されている。流速分布は、節に流れ込む流路で流速が著しく大きくなっており、節で合流した流れも比較的高速なまま下流側の流路へ流れ込んでいる。このような節の上下流側の激しい流れによる河床変動が河道平面形に大きな影響を与えていると考えられる。

次に、大規模な流量下で形成された河道平面形において頻度が高い小規模な流量下での流況特性を検討した。河床形状は上述の計算と同様にCase1で計測された形状を用いて、水理実験におけるCase2の流量での流況計算を行った。Case1の流量は河道が変動するような大規模出水に該当する。例えば、本実験条件は粒径と勾配から杣内川上流部の約1/100スケールに相当すると考えられ、その場合、Case1は1/20年確率規模の出水に該当する。これに対して、Case2の流量は毎年生じるような小規模出水または融雪出水規模に該当する。この小規模流量下で計算された流速分布を図-8(c)に示す。節に流れ込む流れが比較的高速なのに対して、節で合流した途端に流速が著しく低下しているのがわかる。これは、節に形成された深掘れによって節より下流側は河床勾配が著しく緩やかになるためである。流量が小規模なほど、このような局所的な河床勾配の影響がより大きくなると考えられる。図-8(c)の流速分布を縦断的に見ると、節の上流側の流速が速いところと節の下流側で流速が著しく遅いところが交互に現れていて、連続した瀬淵の流れが計算されている。小規模流量下におけるこのような瀬淵を有する流況特性の形成も節腹の平面形状の発達過程における特性の一つであると考えられる。

### 4. おわりに

本研究では、節腹が連続するような河道平面形の形成過程を再現し、長期的な河道平面形状の変動過程を明らかにするために侵食性の水路における実験を実施した。本実験の結果、次のようなことが明らかになった。

- ・節腹が縦断方向に連続して現れるような河道平面形状が形成された。
- ・連続した節腹の平面形状は最終形状だけでなく、平面形の発達過程で何度も現れる形状であることがわかった。
- ・実験中、節腹の平面形が乱れた後に新たな節腹の平面形状が現れる変動過程が2度見られた。本実験では、節腹の平面形が乱される時に河道が拡張していた。
- ・新たに形成される節腹の平面形状が旧形状と異なる位相で現れることによって、節の外岸側に旧流路が取り残される過程が実験で確認された。
- ・実験で計測した地形データを用いて流況特性を検討し、節腹の平面形状が発達する過程で連続した瀬淵が形成されることを確認した。

**謝辞：**本研究の移動床実験では、(株)水工リサーチ牛山智夫氏にご協力いただいた。また、本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野「河川景観ネットワークの連続性と時空間変化（代表：中村太士）」及び科研費「節腹連続河道の形成機構の解明（代表：渡邊康玄）」の助成を受けて行われた。ここに謝意を記す。

#### 参考文献

- 1) 渡邊康玄, 長谷川和義, 吉川泰弘, 早川博: 節腹連続河道の形成に関する線形安定解析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.4, I\_991-I\_996, 2014.
- 2) Uddin M. J., 泉 典洋, 長谷川和義, Pompromin A.: 砂州が誘起する擬似蛇行現象, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I\_1021-I\_1026, 2015.
- 3) Ashmore, P.E.: Laboratory modelling of gravel braided stream morphology, Earth Surface Processes and Landforms, Vol.7, pp.201-225, 1982.
- 4) 藤田祐一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄: 複列砂州と網状流路の形成過程に関する実験, 京都大学防災研究所年報B, 29 (B-2), pp.451-472, 1986.
- 5) 渡邊康玄, 島絵梨子, 山口里実: 侵食性河岸を有する水路を用いた中規模河床波の形成実験, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I\_1009-I\_1014, 2015.
- 6) 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.
- 7) <http://i-ric.org/ja/>

(2015. 9. 30受付)