

混合砂河床における網状流路の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF BRAIDED STREAMS FORMED ON BEDS WITH NON-UNIFORM SEDIMENT

竹林 洋史¹・江頭 進治²・岡部 健士³

Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA and Takeshi OKABE

¹正会員 博士(工学) 徳島大学助手 工学部建設工学科(〒770-8502 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8502 徳島市南常三島町 2-1)

Dynamic characteristics of braided streams formed on beds with non-uniform sediment are discussed by means of numerical analysis. Results are summarized as follows. (1) Sediment particles are exchanged to fine ones in dry bed regions and coarse in streams, respectively, under steady flow conditions, whereas, under unsteady flow conditions, mean diameter in trough increases in the rising stage of water discharge and decreases in the falling stage. (2) If the frequency with which water covers bars decreases by reducing peak flood discharge, vegetation growth will be promoted. Furthermore, vegetation suppresses the development of small streams and grows large streams. (3) If huge amount of sediment is excavated artificially, number of streams will decrease with eroding bed in main streams.

Key words: *braided streams, non-uniform sediment, numerical analysis, vegetation, seepage flow*

1. はじめに

多様な生態系の保存・創生を目標とした河川の整備計画を作成する上で最も難しい問題が、目標とする河川像を描くことかと思われる。従来、多様な生態系を有する河川像として、過去の人為的インパクトの少ない時期の河川を設定し、河川整備計画を考えることが多い。しかし、土地利用形態が以前と異なる上に、ダム貯水池や砂防ダムなど水と土砂の流出特性をコントロールする河川構造物は既に建設され、市民の生活に不可欠なものとなっており、過去の人為的インパクトの少ない時期と同じような水と土砂の流出過程を復活させるのは困難である。さらに、過去の人為的インパクトの少ない時期の水辺空間は、非平衡系の地形形成プロセスのある一時期の水辺空間に過ぎず、それ以上に多様な物理環境を有する水辺空間が存在すると考えられる。では、どのような河川地形が生態系に対して多様な物理環境を提供できるのであろうか？非粘着性河床材料により形成された沖積河川については、網状流路がその一つの答えのように思われる。

従来の網状流路の形成機構に関する研究は、現象

の複雑さのため、現地調査^{1), 2)}や水路実験による検討^{3), 4)}が主である。このような状況の中で、近年、数値解析により流路を再現しようとする試みもなされている^{5), 6), 7), 8)}。著者らは⁹⁾、これまで非粘着性河床材料の一樣砂を対象にして、直線河道に形成される網状流路の時空間的変動特性を明らかにしてきた。それによると、川幅・水深比が大きい水理条件では、河道内に様々なスケールの浮州と流路が形成され、多様な水辺空間が形成される。しかし、これらの数値解析による研究は、河床材料を一樣砂として取り扱っており、混合砂河床の網状流路の動態を明らかにするに至っていない。混合砂河床では、砂礫の分級現象が発生し、流砂量の時空間的な分布が一樣砂の場合と異なるため、砂州の形状が一樣砂河床の場合とは異なる¹⁰⁾。

一方、日本の多くの河川では、近年、砂州の固定化が発生するとともに流路の本数が減少している¹¹⁾。砂州の固定化は、河道内で最も動植物の生産量が大きい陸水の遷移域を減少させるとともに、砂州域が陸域の動植物の生息空間となるため、水辺の物理環境が単調化する。このような、砂州の固定化及び流路本数の減少は、ダム貯水池による洪水調節と

ともに、河床掘削及び上流からの供給土砂の減少による流路内の河床位の低下及び河床材料の粗粒化の影響も大きいと考えられる。これらの現象のメカニズムを明らかにするには、河床材料の混合粒径としての取り扱いが不可欠と考えられる。

このような観点に基づき、本論文では、数値解析により、混合砂河床の網状流路の動態及び河床材料の粒度の空間分布特性を明らかにするとともに、砂州の固定化及び流路本数の減少機構を検討する。

2. 解析方法

河道内に流路が形成されると、計算領域に表面流の無い浮州が形成される。本解析では、表面流と浸透流の両方を計算し、浮州域の土中の流れの解析も行う。表面流の計算には、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる¹²⁾。ただし、以下のように、質量保存則にのみ浸透流による流入・流出を考慮し、浸透流による運動量の流入・流出は考慮していない。また、浸透流は平面二次元の飽和流れとして取り扱う。

$$\Lambda \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + \frac{\partial}{\partial x}(u_g h_g) + \frac{\partial}{\partial y}(v_g h_g) = 0 \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 x 及び y は流下方向及び横断方向の座標、 h は表面流の水深、 h_g は浸透流の水深、 u 及び v は流下方向及び横断方向の表面流の流速、 u_g 及び v_g は流下方向及び横断方向の浸透流の流速、 z は水位である。 Λ は土中の空隙率に関するパラメータであり、 $z \geq z_b$ で $\Lambda = 1$ 、 $z < z_b$ で $\Lambda = \lambda$ である。ここに、 z_b は河床位、 λ は土中の空隙率である。浸透流の運動方程式はダルシー則を用いた。透水係数は、土質を等方的と見なすとともに、0.01m/sを空間的に一様に与えた。表面流の水深が河床材料の平均粒径以下となったとき、長田¹³⁾と同様に、表面流の運動方程式として、圧力項と河床せん断力項のみを考慮して表面流の計算を行った。表面流の河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、係数値はEngelund¹⁴⁾と同様の7.0を用いている。流砂量は芦田・道上式¹⁵⁾により算出し、芦田・江頭・劉

¹⁶⁾と同様に、河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮している。粒度分布の計算は、交換層の概念による平野の方法¹⁷⁾を発展させ、交換層の下に遷移層を導入した芦田・江頭・劉¹⁸⁾による方法を用いた。交換層の厚さは、簡単のため、最大粒径と等しくしている。局所的な河床勾配は、永瀬・道上・檜谷¹⁹⁾の研究を参考に、安息角よりも小さくなるように補正している。本解析では、植生を考慮する。植生の侵入・成長・消滅および植生間の相互作用等に関する条件は、植生種や気象条件等により大きく異なり非常に複雑なため、数学モデルとしては十分に確立されていない。そこで、本研究では、清水・辻本の研究²⁰⁾を参考に、流体抵抗として植生を考慮するとともに、植生の密生度の値を変化させ、植生の侵入・成長・消滅過程を考慮する。植生の密生度は、計算点が陸域となると、最大値が0.05となるように0から線形的に増加を始める。植生の消滅については、河床低下による消滅を想定し、植生侵入時よりも河床位が下がると植生が送流すると見なして密生度を0とした。植生域内の流砂量は有効掃流力を用いて算出する。

計算領域は、固定側岸を有した長さ15mの直線矩

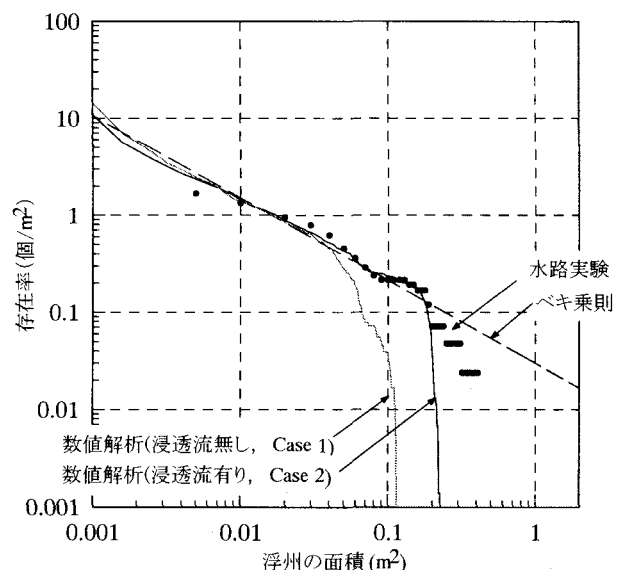


図1 浮州の面積と浮州の存在率との関係（実験結果は、文献9)より引用）

表1 数値解析に用いた水利条件

	流量 (l/s)	水路幅 (m)	河床材料	水深 (mm)	川幅/水深	無次元 掃流力	浸透流	給水条件	植生
Case 1	1.90	1.0	一様砂	65	155	0.041	考慮せず	定常	考慮せず
Case 2	1.90	1.0	一様砂	65	155	0.041	考慮	定常	考慮せず
Case 3	0.76	0.4	混合砂	65	62	0.041	考慮	定常	考慮せず
Case 4	1.90	1.0	混合砂	65	155	0.041	考慮	定常	考慮せず
Case 5	0.06~1.46	0.4	混合砂	-	-	-	考慮	非定常	考慮せず
Case 6	3.80	2.0	混合砂	65	310	0.041	考慮	定常	考慮せず
Case 7	3.80	2.0	混合砂	65	310	0.041	考慮	定常	考慮
Case 8	2.53	2.0	混合砂	58	342	0.032	考慮	定常	考慮
Case 9	2.53	1.33	混合砂	65	179	0.041	考慮	定常	考慮
Case 10	3.80	2.0	混合砂	65	310	0.041	考慮	定常	考慮

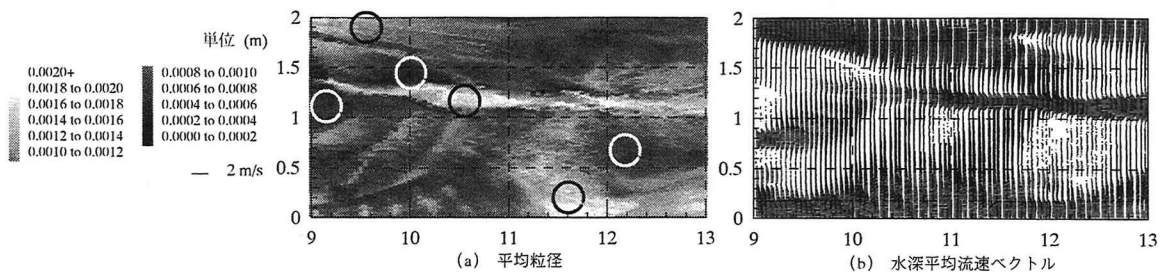


図2 河床材料の平均粒径の空間分布 (Case 6, 白丸が砂州上の細粒化, 黒丸が流路内の粗粒化)

形断面水路を想定したものである。初期河床形状は平坦床に平均粒径の 1/10 スケールの振幅を有する微少擾乱を計算区間全体に与えたものである。上流境界における流砂量は、境界における水理量をもとに、掃流砂量式により算出されたものを与える。下流端の河床は固定床とし、時間的に変化させない。計算条件を表 1 に示す。河床勾配は 1/100 で、土層厚は 0.1m とした。混合砂の標準偏差は 1.93 である。竹林・江頭¹²⁾によると、これらの条件は、全て、網状流路の形成水理条件にある。

3. 浸透流が浮州形状に与える影響

浸透流の有無により、流路の動態は変化する。ここでは、特に顕著な影響が表れる浮州形状について、検討する。図 1 は浮州の面積と浮州の存在率との関係を示したものである。ここで、浮州の存在率とは、当該面積以上の面積を有する浮州の単位面積あたりの数である。浸透流を考慮していない Case 1 では、浮州のスケールが実験値よりもかなり小さいが、浸透流を考慮することにより、面積の大きい浮州の存在率が良く再現されていることがわかる。これは、浮州への流れの侵入過程及び砂州上の水たまりの形成機構の違いによるものである。つまり、水路実験では、河床材料の透水性が非常に大きく、浮州への水の流れは、急速に浸透していく。しかし、Case 1 ではそれらが表面流として評価されるため、浮州面積が減少する。さらに、網状流路内の流れは非定常流となるため⁹⁾、流路内の水位の低下とともに、砂州上に水たまりが形成される。これらも、水路実験では急速に浸透していくが、Case 1 では水たまりのまま残る。また、図 1 に示すように、浮州の存在率の分布はベキ乗則に従い、自己アフィンフラクタルとなっていると考えられるため²⁰⁾、非常に小さな空間スケールの流路が形成される。そのような小スケールの流路の形成には、浸透流が大きく寄与するものと考えられる。

4. 河床材料の粒度の空間分布特性

図 2 に Case 6 における河床材料の平均粒径の空間分布を示す。全体的には、河床位の高い領域で細粒化、河床位の低い領域で粗粒化であり、流砂の輸送

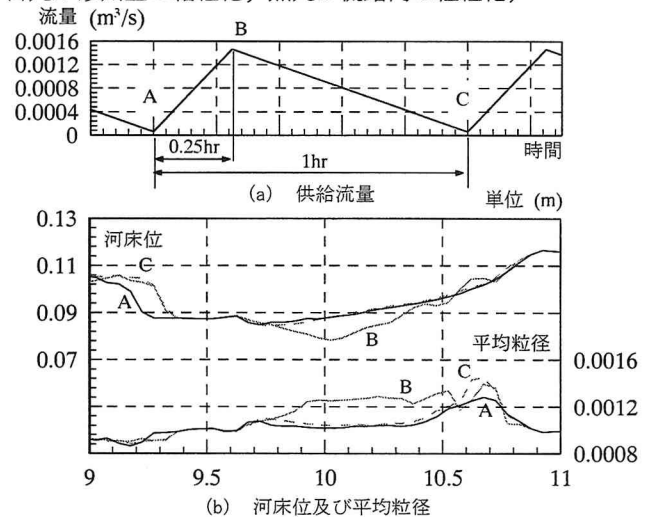


図3 非定常給水条件における淵の河床位及び平均粒径の時間変化 (Case 5)

特性に対応した分布となっている。つまり、流砂の中に占める細粒分は粗粒分よりも多いため、洗掘域で粗粒化、堆積域で細粒化が生じている。しかし、網状流路の流路内の河床材料に関する現地調査^{1), 22)}によると、淵で細粒化、瀬で粗粒化となっている。このような現地調査と解析との違いは、給水条件の非定常性によるものと考えられる。図 3(b)は、図 3(a)で示す条件で上流端から給水を行った Case 5 の水路右岸沿いの河床位及び河床材料の平均粒径の時間変化を示している。これによると、淵において、少流量時の河床位は高く平均粒径が小さいが、大流量時には河床は洗掘され、平均粒径が大きくなることがわかる。一般的に、現地調査は平水時に行われる。つまり、現地調査で得られる淵の河床材料は、本解析で少流量時の河床材料に対応していると考えられる。また、これらの結果は、平水時に測定される定期横断測量による河床位よりも洪水時の方が淵の河床位が洗掘されていることを示すとともに、洪水時の最大洗掘深は、淵のボーリング調査を行い、河床材料の粒度の鉛直分布を調べることによって、得られる可能性を示している。

5. 洪水ピーク流量の減少が流路の固定化及び流路本数の減少に与える影響

洪水ピーク流量の減少は、砂州の冠水率を低下させ、植生が流れにより流送されにくくなるため、植

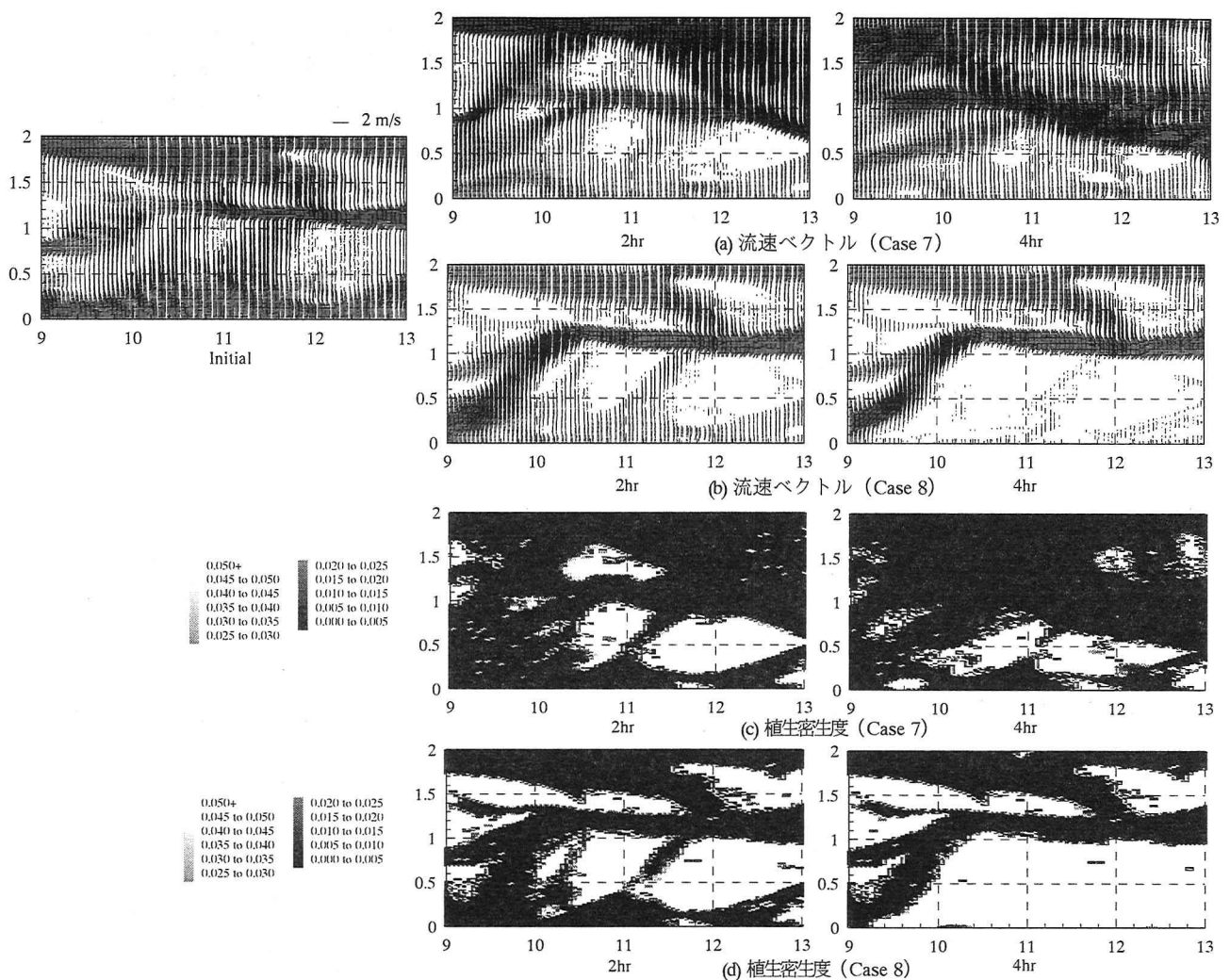


図4 水深平均流速ベクトル及び植生密生度の時間変化 (Case 7 と Case 8)

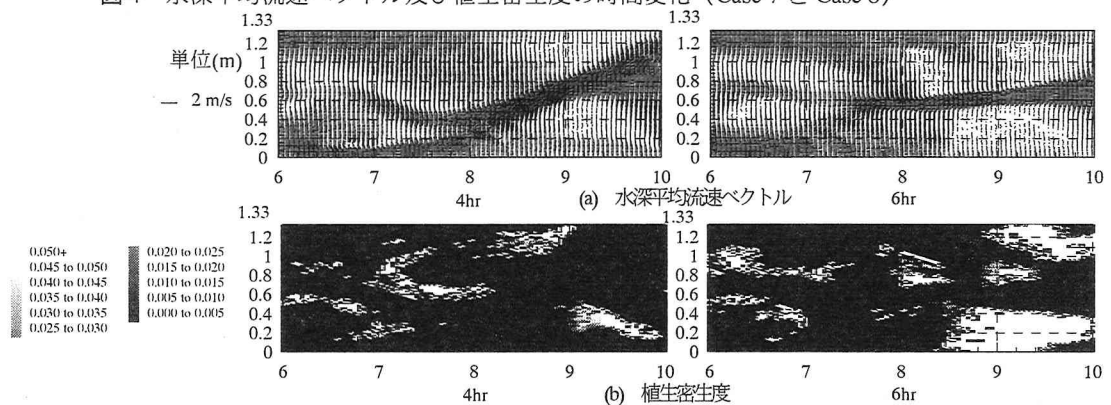


図5 水深平均流速ベクトル及び植生密生度の時間変化 (Case 9)

生の繁茂を促進する。さらに、植生は土砂を捕捉するため、砂州上の流路の形成を抑制するとともに、砂州の河床位を高めるため、砂州の冠水率をさらに低下させる。これらのメカニズムについては、現地調査により、既に多くの知見が得られている²³⁾。ここでは、これらの現象を数値シミュレーションにより再現するとともに、河道内の物理環境の多様性を創生させる一つの方法を提案する。

図4はCase 7とCase 8の水深平均流速ベクトル及び植生密生度の空間分布を示している。これら二つの解析は、Case 6の2.5時間後の解析結果を初期

条件としている。また、Case 8の上流端供給流量は、Case 7の流量の約2/3となっている。これによると、流量を減少させていないCase 7では、流路が時空間的に変動するとともに、植生が成長・消滅を繰り返しており、過剰な植生繁茂及び流路本数の減少は見られない。一方、流量を減少させたCase 8では、砂州上の植生が発達するとともに、流路本数が減少して比較的空間スケールの大きい流路に統合されていることがわかる。さらに、空間スケールの大きい流路は、初期状態からほとんど位置を変化させていないことがわかる。また、流れが流路内へ集中し、

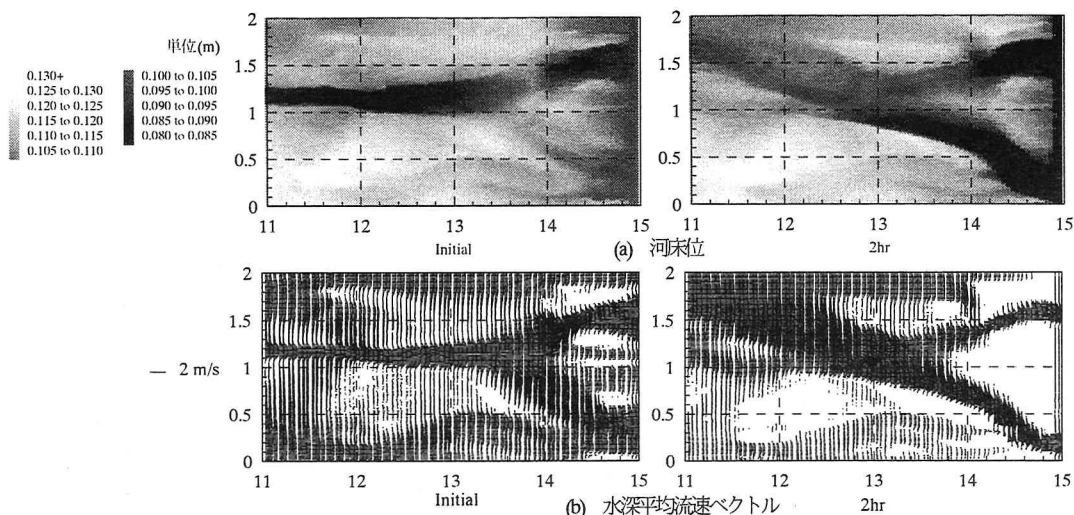


図7 下流端河床位低下による流路本数の減少過程 (Case10)

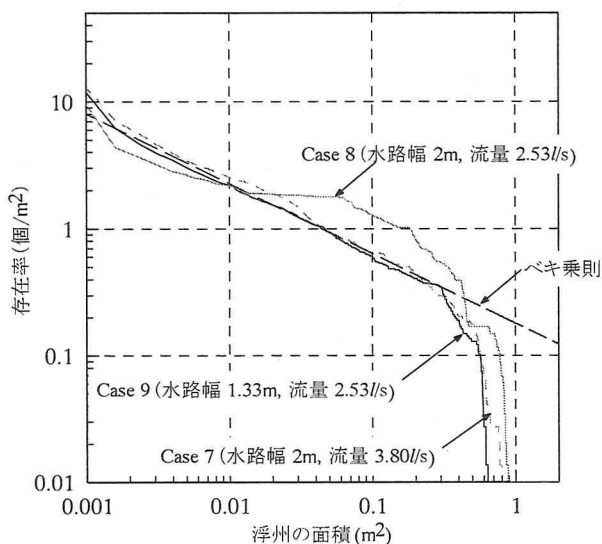


図6 浮州の面積と浮州の存在率との関係 (Case 7, Case 8, Case 9)

陸水の遷移域が減少していることがわかる。現在の日本の多くの河川は、ダムによる洪水調節により、Case 8のような状態となっていると考えられる。このような河川に河道内の物理環境の多様性を創生させる一つの方法としては、川幅・水深比を適度に調節するということが考えられる。

図5はCase 8に対して、流量をそのままとし、水路幅を狭めたCase 9の水深平均流速ベクトル及び植生密生度の空間分布の時間変化を示している。これによると、流路の時空間的な変化が復活するとともに、植生の成長・消滅が繰り返し発生していることがわかる。図6は浮州の面積と浮州の存在率との関係を示したものである。これによると、Case 8では、流量の減少により最大スケールの浮州が大きくなるとともに、面積の大きい浮州の数が増え、逆に面積の小さい浮州が減少したため、分布の勾配が緩やかとなり、場の多様性が失われていることがわかる。また、面積が 0.5m^2 付近で分布が不連続となっているのは、流路統合の結果、 0.5m^2 程度の浮州の

みが残されたためであり、これも場の多様性が失われたことを示すものである。しかし、Case 9を見ると、水路幅を狭めることにより、Case 7の分布と同一の勾配に戻り、河道内の物理環境の多様性が創生されていることがわかる。これらの結果は、ダムによる洪水調節及び土地利用形態などの水と土砂の流出特性が変化しても、川幅・水深比を適切に設定すれば多様な水辺空間を創生できることを示す。ただし、川幅を狭めたため、浮州の最大スケールは小さくなり、このスケールの物理環境を利用していた動植物は生息できなくなると考えられる。ここで川幅とは、網流させる領域の幅であり、必ずしも堤防間距離ではなく、低水路幅を想定できる場もある。

6. 下流域の河床低下が流路の固定化及び流路本数の減少に与える影響

日本の多くの河川は、最近50年間で流路内の河床位が著しく低下している。これについては、5.で検討した洪水ピーク流量の減少も砂州での植生繁茂により流路の幅・水深比が減少するので一つの原因となり得るが、ダム貯水池及び砂防ダムへの堆砂による土砂供給量の減少、砂利採取及び河積確保を目的とした河床掘削等が主要因と考えられる。これらの内、下流域の河床低下は、砂利採取及び河積確保を目的とした河床掘削によるところが大きいと考えられる。ここでは、河床掘削が流路の固定化及び流路本数の減少に与える影響を検討する。

図7はCase 10の河床位、水深平均流速ベクトルの空間分布の時間変化を示している。Case 10は、Case 6の2.5時間後の解析結果を初期条件としている。ただし、解析領域最下流端の河床位を90秒かけて線形的に 0.05m 低下させ、その後、低下させた河床位をそのまま保っている。これによると、砂州域の河床はほとんど低下しておらず、河床低下は流路内で主に発生しており、流れが比較的空間スケール

ルの大きい流路に集中していくことがわかる。さらに、比較的空間スケールの大きい流路の位置は、時間的にほとんど変化していないことがわかる。

これらの結果は、短期間で埋め戻されないような大規模な河床掘削は、主流路内の河床低下を促進し、砂州上の冠水率を低下させるため、流路の固定化及び流路本数の減少を促進することを示す。

7. 結論

本論文では、数値解析により、混合砂河床の網状流路の動態及び河床材料の粒度の空間分布特性を明らかにするとともに、砂州の固定化及び流路本数の減少機構を検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 網状流路では、浮州が形成されるとともに、自然と流れが非定常となるため、浸透流を考慮した解析が有効である。
- (2) 定常流では、流路内で河床材料は粗粒化し、砂州上で細粒化する。しかし、非定常流では、大流量時に淵の河床が洗掘されるとともに河床材料は粗粒化し、低流量時に淵で埋め戻しが発生して河床材料は細粒化する。
- (3) 洪水ピーク流量の減少は、砂州の冠水率を低下させ植生の成長を促進するため、流路の固定化及び流路本数の減少に寄与する。このような河道は、川幅を適切に設定することにより物理環境の多様性を創生することが可能である。
- (4) 短期間で埋め戻されないような大規模な河床掘削は、主流路内の河床低下を促進し、砂州上の冠水率を低下させるため、流路の固定化及び流路本数の減少を促進する。

謝辞：本研究は、平成 14 年度科学研究費補助金若手研究（B）（研究代表者：竹林洋史）の助成を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) P. J. Ashworth, R. I. Ferguson, P.E. Ashmore, C. Paola, D. M. Powell and K. L. Prestegard : Measurements in a Braided River Chute and Lobe 2. Sorting of Bed Load During Entrainment, Transport, and Deposition, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 7, pp. 1887-1896, 1992.
- 2) Thorne, C. R., Russell, A. P. G. and Alam, M. K. : Planform pattern and channel evolution of the Brahmaputra River, Bangladesh, *Braided Rivers*, The Geological Society, pp.257-276, 1993.
- 3) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄 : 網状流路の形成過程, *水工学論文集*, 第 31 巻, pp.695-700, 1987.
- 4) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文 : 網状流路における流砂量, *水工学論文集*, 第 35 巻, pp.391-396, 1991.
- 5) 道上正規, 藤田正治, 日下部重幸 : 水みちの発生・発達過程の実験とシミュレーション, *水工学論文集*, 第 39 巻, pp.613-618, 1995.
- 6) S. Egashira and H. Takebayashi : Self-formed low water channel in straight channel, *Proc. IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp. 509-518, 1999.
- 7) T. Takahashi and Y. Satofuka : Simulation model for channel variation in braided channel reach, , *Proceedings of 12th Congress of the APD-IAHR*, pp.45-54, 2000.
- 8) 倉林弘志, 清水康行 : 浮州の形成を考慮した網状流路における河床変動解析, *水工学論文集*, 第 46 巻, pp.743-748, 2002.
- 9) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士 : 網状流路の時空間的な変動特性, *水工学論文集*, 第 46 巻, pp.737-742, 2002.
- 10) 例えば, Takebayashi, H., Egashira S. and H. S. Jin : Numerical simulation of alternate bar formation, *River Sedimentation*, pp.733-738, 1998.
- 11) 須賀堯三 : 河川における蛇行のモード変化, 第 37 回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-292, pp. 583-584, 1982.
- 12) 竹林洋史, 江頭進治 : 自己形成流路の形成過程と形成水理条件, *土木学会論文集*, Vol. 677 No.II-55, pp. 75-86, 2001.
- 13) 長田信寿 : 一般座標系を用いた平面 2 次元非定常流れの数値解析, *水工学における計算機利用の講演会講義集*, 土木学会, pp. 51-76, 1999.
- 14) Engelund, F. : Flow and Bed Topography in Channel Bends, *Jour. of Hy. Div. ASCE*, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 15) 芦田和男, 道上正規 : 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文報告集*, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 16) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義 : 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, *水工学論文集*, 第 35 巻, pp.383-390, 1991.
- 17) 平野宗夫 : Armoring をともなう河床低下について, *土木学会論文報告集*, 第 195 号, pp. 55-65, 1971.
- 18) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義 : 二層モデルによる複断面河道の流れ及び河床変動の数値解析, *京都大学防災研究所年報*, 第 35 号, B-2, pp.41-62, 1992.
- 19) 永瀬恭一, 道上正規, 檜谷治 : 狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算, *水工学論文集*, 第 40 巻, pp.887-892, 1996.
- 20) 清水義彦, 辻本哲郎 : 植生帯を伴う流れ場の平面 2 次元解析, *水工学論文集*, 第 39 巻, pp.513-518, 1995.
- 21) Sapozhnikov, V. B. and E. Foufoula-Georgiou : Self-affinity in braided rivers, *Water Resources Research*, 32, pp. 1429-1439, 1996.
- 22) 江頭進治, 金海生, 竹林洋史, 池田晶, 永田徹 : 木津川下流域の河床変動と土砂収支, *水工学論文集*, 第 44 巻, pp. 777-782, 2000.
- 23) 例えば, 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志 : ハリエンジュによる動的河道内樹林化について, *水工学論文集*, 第 45 巻, pp.1099-1104, 2001.

(2002. 9. 30受付)