

河床の力学的平衡状態に基づく 樹林化回避地形の推定

ESTIMATION OF FORESTATION AVOIDANCE TOPOGRAPHY ON DYNAMIC EQUILIBRIUM STATE OF BED

石原道秀¹・安田浩保²・齋藤 選³

Michihide ISHIHARA, Hiroyasu YASUDA and Suguru SAITO

¹学生会員 修士 (工学) 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2102 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050)

²正会員 博士 (工学) 新潟大学 災害・復興科学研究科 (〒 950-2102 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050)

³学生会員 学士 (工学) 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2102 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050)

In this study, we tried to estimate forestation avoidance topography from vertical agitation to horizontal agitation of riverbed based on dynamic equilibrium state of riverbed, and suggested effectiveness of the method. Discussions on forestation in previous studies have mainly focused on destruction mechanisms such as forest runoff in forested rivers. On the other hand, for two rivers of the forested river and the non-forested river, we extracted the feature quantity of the forestation topography and the forestation avoidance topography from the difference of vertical agitation and horizontal agitation of riverbed.

Key Words: Estimation, Forestation avoidance topography, Dynamic equilibrium state

1. はじめに

一定流路幅かつ直線流路に人工改修された河川の河床には、交互砂州や複列砂州と呼ばれる周期的な底面起伏が普遍的に存在する。この周期的な底面起伏には、近年では河川管理者が意図しない樹林が繁茂し、その領域が拡大（以下、樹林化）している。樹林化は、その樹林群による河積阻害¹⁾や洪水流の偏流による護岸や根固めの安全性の低下要因となる。このため、その動態を解明・予測することは治水安全上の重要な課題となっている。

樹林化の主な要因は、1) ダム建設による河床低下に起因する河道内氾濫原（河川敷・中洲）の比高増大、年最大流量の低下³⁾、2) 河道掘削や砂利採取に起因する比高増大による高水敷の掃流力の低下²⁾とされている。河道内の樹林化を予測する上で、洪水による樹木の破壊形態について研究^{4),5),6)}されており、それぞれの破壊形態に対する破壊限界を把握する試みが実施されている。それぞれの破壊形態は、主に破断・倒伏、転倒、流出といったものに分類され、破断・倒伏、転倒は抗力モーメントで評価⁷⁾、流出は無次元掃流力で評価できる⁸⁾など、樹林の破壊条件についての解明は進んでいる。

上述のように既往の研究における樹林化に対する議論は、樹林化河川における樹林の流出などの破壊機構

に関したものが主だった。しかし、既に河道内に樹林が繁茂した河川における検証であるため、将来の洪水による樹林の破壊についての議論が中心となっていた。これ以外の河川管理の観点としては、樹林の生育場となる河川地形と樹林繁茂の関係性への着目が挙げられ、現状では樹林繁茂を回避している河川の理解も本来は必要である。

著者らは、既往の研究⁸⁾より樹林化との関係が示唆される無次元掃流力による土砂移動の有無に加え、鉛直方向と水平方向の土砂移動の攪拌度合いが樹林化を回避している河川地形と対応関係があると推測している。そこで本研究では、樹林化河川として小田川（岡山県）、また、非樹林化河川として能生川（新潟県）の各々を対象として、力学的平衡状態に基づき、河床面の土砂の新陳代謝を意味する土砂の攪拌度合いを評価し、樹林化回避地形の特徴量を推定した。なお、本研究では、二期間の写真を比較して、樹林が繁茂してない地形が変化しない場合を樹林化回避地形と呼称した。

2. 対象河川の概要

(1) 小田川

岡山県倉敷市を流れる小田川は、高梁川水系の支流で広島県東北部から岡山県西部を流れる国直轄河川である。同河川は、代表粒径 3mm、河床勾配が 1/2300 の

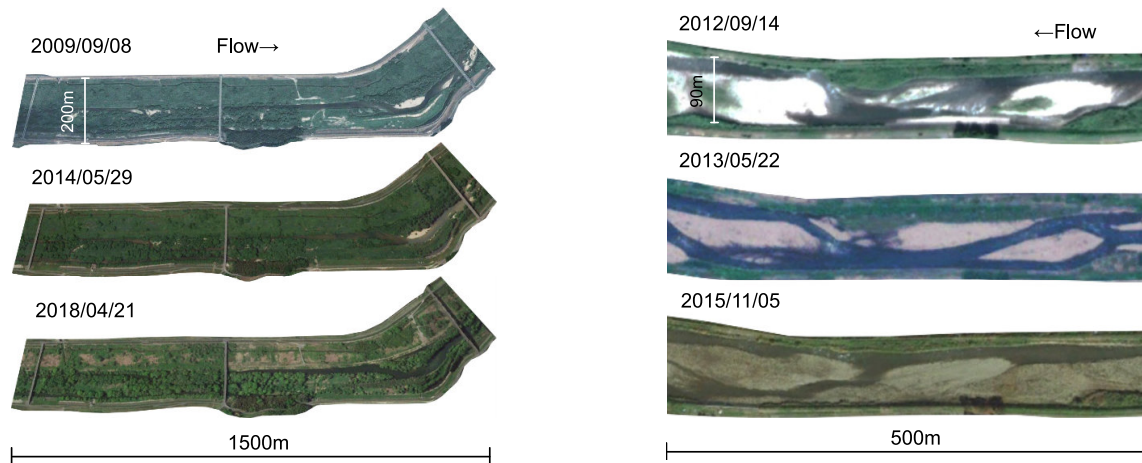


図-1 左図：小田川，右図：能生川の航空写真の経年変化⁹⁾

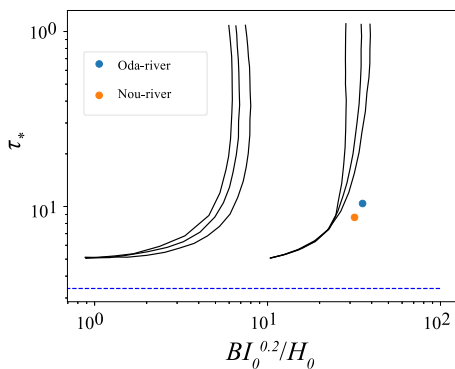


図-2 黒木・岸の中規模河床波の領域区分図

比較的緩勾配な河川であり，川幅が 150 から 200m ほどの複断面型の緩やかに蛇行を繰り返す河道となっている．同河川は，平成 30 年 7 月の西日本豪雨により，左岸 3.4km 地点と左岸 6.4km 地点の 2 箇所において越流破堤が発生し，倉敷市真備町の 9km² が浸水した．この越流破堤の要因として，1) 高梁川の水位上昇を要因としたバックウォーター（背水）現象による小田川の水位上昇，2) 左岸 3.4km 地点と左岸 6.4km 地点の堤防高が前後よりも低かったこと，3) 河道内の高密度な樹林繁茂が水位上昇を助長したことが推測される．

(2) 能生川

新潟県糸魚川市を流れる能生川は，新潟県が管理する中小河川である．能生川は，川幅が一律 80m ほどで高水敷が殆どなく，単断面に近い一定流路幅の直線的な河道である．同河川は，代表粒径 8cm，河床勾配が 1/80 の非常に急勾配な河川であり，平成 29 年 7 月豪雨および同年 10 月台風による出水で，わずか 10km も

ない区間において 8 箇所も堤防が侵食等により被災した実績がある．出水時の河川の様子から堤防満杯時の水位よりも低く，越水するほどの流量でなかったことが推察される．また，図-1 に示す能生川の航空写真の経年変化⁹⁾ から砂州の顕著な移動が確認できることから河床変動が容易に起きやすい河川であることがわかる．

(3) 両河川の特徴の比較

図-2 に黒木・岸の中規模河床波の領域区分図¹¹⁾を示す．この領域区分図のうち，青丸は小田川の過去 30 年間における年一回の洪水規模 200m³/s¹²⁾ を参考にプロットした点，赤丸は平成 29 年 7 月豪雨の出水時の河川の様子から推定した流量 250m³/s を参考にプロットした点である．小田川の無次元掃流力は 0.104，川幅水深比は 35.4 であり，能生川の無次元掃流力は 0.99，川幅水深比は 29.4 である．

両河川を比較すると，わずかに川幅水深比が異なるがどちらも複列砂州の領域であり，無次元掃流力の大きさも同じであることから似た河川であることが伺える．しかし，図-1 に示す航空写真の経年変化から，小田川は樹林化が進行しており，2009 年から 10 年以上も地形の顕著な変化はないことが読み取れる．これに対して能生川は地形が顕著に変化しており，河道内に目立った樹林化は進んでいないことが特徴である．

3. 河床波の流下現象を表す理論式および河床の力学的平衡状態の推定方法の導出

著者らは，河床波の流下が敏捷な場合と緩慢な場合があり，これらの流下状態を数理的に表す理論式を構

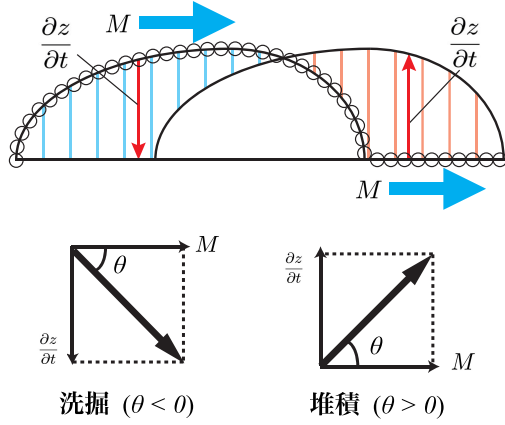


図-3 水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いの評価の概念図

築している。模型実験において得られた様々な流下速度の交互砂州に対して、構築した同理論式の優れた適用性を確認している¹⁰⁾。本研究では、同理論式を応用することで、河床面の土砂の攪拌度合いを力学的平衡状態から評価する手法を試みた。

(1) 河床波の流下現象を表す理論式

河床変動は、流水についての 1) 連続の式と 2) 運動の式、流砂についての 3) 連続の式と 4) 流砂関数の 4 つを連立させることで解析できる。流水についての連続の式と運動の式との和を考えると、2 階の双曲型の偏微分方程式が得られ、連続の式は偏微分方程式の観点から波動方程式と見なせる。このことから、河床波の流下速度の理論式の導出には主に河床連続式に掃流砂のみを考慮した式 (1) Exner 式、流砂量式、水面形方程式を用いる。本研究では、河床波の流下速度の理論式の導出にあたって、流砂関数には式 (2) Meyer-Peter and Müller 式 (以下、M.P.M 式) を用いた。また、無次元掃流力については式 (3) を用いている。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \sqrt{sgd^3} \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{n^2 u^2}{sdh^{1/3}} \quad (3)$$

ここで、 z は底面高、 λ は河床空隙率、 q_B は掃流砂量、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は限界無次元掃流力、 s は砂粒子の水中比重、 g は重力加速度、 d は粒径、 n は粗度係数、 u は流下方向成分の流速、 h は水深、 x は流下方向の距離、 t は時間である。また、式 (1) 中の $\partial q_B / \partial x$ は合成関数の関係から以下ようになる。

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = \frac{\partial q_B}{\partial \tau_*} \frac{\partial \tau_*}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

式 (4) 中の各偏微分の結果は以下の通りである。

$$\frac{\partial q_B}{\partial \tau_*} = 12(\tau_* - \tau_{*c})^{1/2} \sqrt{sgd^3} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tau_*}{\partial h} = -\frac{1}{3} \frac{I_e}{sd} \quad (6)$$

また、式 (4) 中の $\partial h / \partial x$ は本研究で構築した式 (7) の非定常項を考慮した水面形方程式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{i_0 - I_e}{1 + \frac{4}{3} Fr^2} \quad (7)$$

ここで、 i_0 は河床勾配 ($-\partial z / \partial x$)、 I_e はエネルギー勾配、 Fr はフルード数である。式 (1),(2),(3),(4),(7) を整理すると以下の一階の波動方程式が得られる。導出した方程式の内、 M が河床波の流下速度を表している。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + M \frac{\partial z}{\partial x} = -M I_e \quad (8)$$

また、河床波の流下速度は以下のような式になる。

$$M = \frac{4(\tau_* - \tau_{*c})^{1/2} \sqrt{sgd^3} I_e}{sd(1-\lambda)(1 + \frac{4}{3} Fr^2)} \quad (9)$$

(2) 水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いの評価

前節より、式 (8) に示す河床波の流下現象を表す一階の波動方程式を導出した。式 (8) を以下のように変形すると、

$$\frac{\frac{\partial z}{\partial t}}{M} = i_0 - I_e \quad (10)$$

左辺は、分母が河床波の流下速度、分子が河床変動量の無次元量の分数の形となる。右辺は、エネルギー勾配と河床勾配の差であり、エネルギー勾配と河床勾配が同等であれば、等流の力学的平衡状態であることを表し、土砂移動があっても河床の鉛直方向の変化は生じない。同式の左辺は力学的平衡状態を表し、樹林化回避との関連が推測される河床面の水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いの指標となる。

式 (10) の左辺より、底面起伏の水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いを表す評価指標を式 (11) に構築した。図-3 に式 (11) の概念図を示す。左辺の分数のうち、分母の河床波の流下速度は、図中の青色の矢印で示す底面起伏の水平方向の攪拌度合いを表している。分子側の河床変動量は、図中の赤色の矢印で示す底面起伏の鉛直方向の攪拌度合いを表している。本研究では、水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いを位相角で表現し、

$$\theta = \arctan \frac{\frac{\partial z}{\partial t}}{M} \times 180 / \pi \quad (11)$$

この位相角は、正であれば堆積傾向、負であれば洗掘傾向を示し、樹林化回避地形との対応関係が推測される。

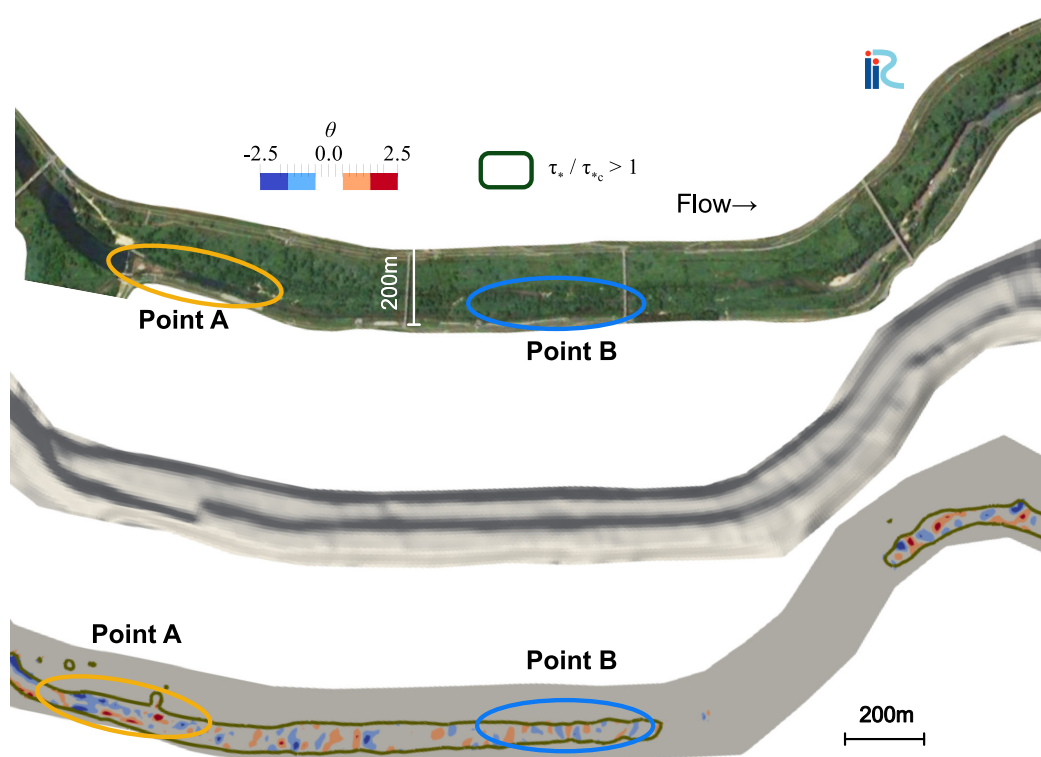


図-4 小田川の上図：航空写真⁹⁾，中図：計算に使用した地形，下図：流下速度と河床変動量から得られる位相角

4. 樹林化回避地形の特徴量の推定

本章では，前章にて導出した河床波の流下速度の理論式から得られる水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いから樹林化回避地形の推定を行う。

(1) 検証設定および検証方法の概要

本研究では，樹林化回避地形の推定に用いる河床波の流下速度および河床変動量を平面二次元水理解析から得られる水理量より算出する。この水理解析には一般座標による境界適合を導入した平面二次元解析のソルバーである iRIC に同梱される Nays2DH¹⁴⁾ を用いて定常の固定床計算を実施した。両河川ともに，計算点の配置間隔を縦横断方向ともに 5m とし，時間分割の間隔は 0.05 秒とし，計算に用いる河床形状は，国土地理院の電子国土 web として一般公開されている地理空間情報¹⁵⁾ を取得し，水理解析に用いた。今回の水理解析では，小田川および能生川共に 5m 間隔の DEM データ (計測日:平成 28 年 10 月 1 日) を用いた。

a) 小田川

小田川における水理量の設定については以下の通りである。小田川は平成の初期から現在にかけて樹林化が進行しており，樹林化の傾向が確認され出した平成 6 年から西日本豪雨までの 26 年間の間に $600\text{m}^3/\text{s}$ を超

える洪水が 6 回ほど経験している。また，同期間において年 1 回の頻度で流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ の洪水が発生している。佐貫らの研究¹³⁾ により，ヤナギ類やハリエンジュが伐採および徐根後に水国調査で高木林の基準としている 4m まで到達するにかかる年数が 2,3 年程度であることがわかっている。このことを踏まえ，本研究では頻度が少なくパルス的なイベントである流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ の出水よりも，このため，2,3 年以内の流量を基準として決定した。樹林が繁茂するまでの 2,3 年以内で発生する流量が樹林化を決定するものであると推測し，小田川では，過去の実績流量より年 1 回の頻度で発生する流量を $200\text{m}^3/\text{s}$ と見積もった。また，河床材料の粒径は，小田川の河道管理の資料を参考に¹²⁾ 平均粒径の 3mm とした。上流端境界条件に流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ を与え，下流端境界条件は高梁川との合流部のせき上げを考慮し，流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ 時の観測水位を参考に 10.21m を与えた。また，Manning の粗度係数に小田川の計画粗度係数とされる 0.020 を空間で一様に与えた。

b) 能生川

能生川の場合，国直轄河川の小田川に対して県管理区間の能生川は，時系列の水理観測情報が乏しい。そのため，樹林化に起因する頻度の高い流量をどのように決定するかが問題となる。本研究では，能生川の河道満杯程度の水位よりも低い平成 29 年 7 月豪雨で発生

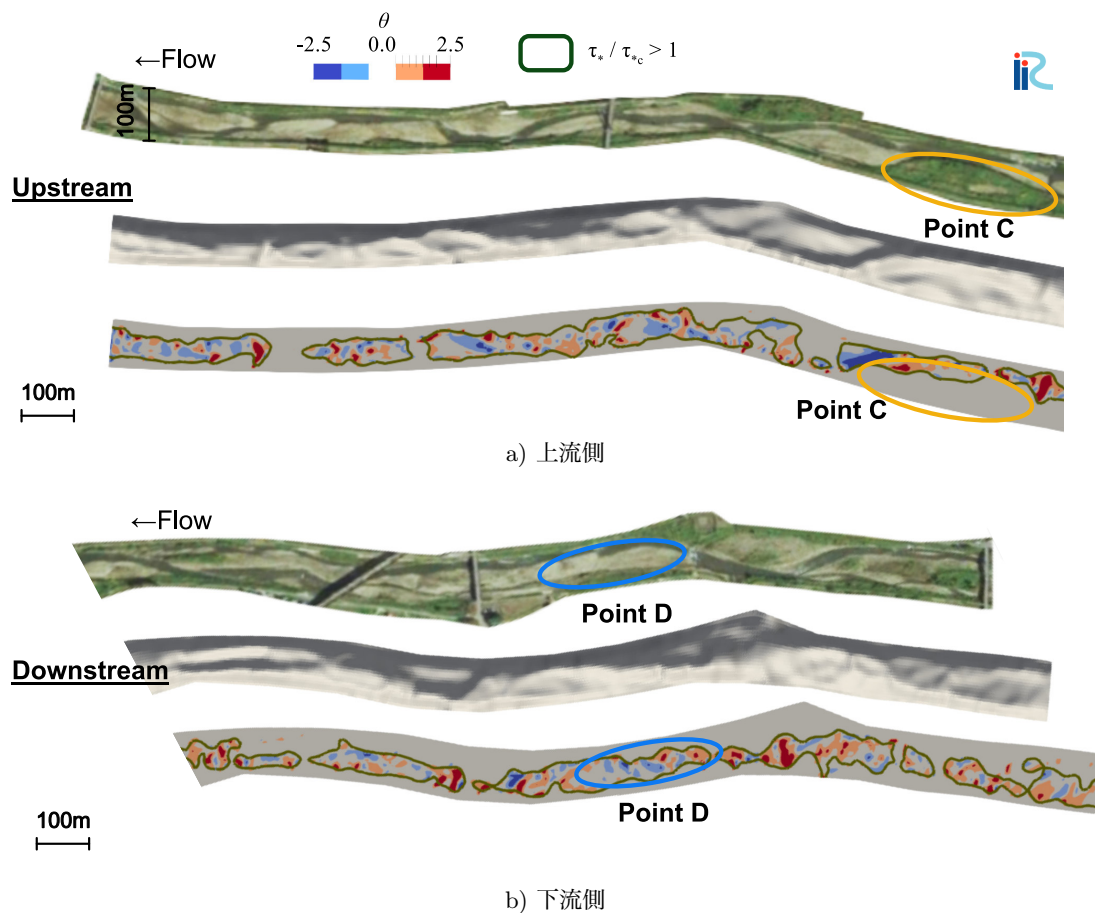


図-5 能生川の上図：航空写真⁹⁾，中図：計算に使用した地形，下図：流下速度と河床変動量から得られる位相角

した流量を試行錯誤により $250\text{m}^3/\text{s}$ と推定し、これを樹林化に影響する頻度の高い流量として用いることとした。また、河床材料については、平均粒径の 8cm とした。上流端境界条件に流量 $250\text{m}^3/\text{s}$ を与え、下流端境界条件は下流端の水位を急勾配の河川であることを考慮して自由流出とした。また、Manning の粗度係数に Manning-Strickler 式から求めた 0.027 を与えた。

(2) 樹林化回避地形の推定

図-4、5 の上図に小田川および能生川における航空写真、中図に計算に使用した地形、下図に流下速度と河床変動量の位相角 (以下、位相角) のコンターを示す。小田川の上図の航空写真の撮影時期は平成 28 年 12 月 25 日に対して、中図の計算に使用した地形の観測時期は平成 28 年 10 月 1 日で時期に少し差異がある。しかし、航空写真と地形を比較して殆ど変化がないことから両者は同時期のものとして扱い、樹林化回避地形の推定には航空写真を用いて考察する。能生川の場合、地形データは小田川と同様であるが、航空写真の撮影時期が平成 27 年 11 月 5 日であるため、地形と航空写真にズレが生じている。しかし、地形に対応する航空写真が他にないため、樹林化回避地形の推定の考察には

同写真を用いる。下図中の緑色の線で囲んでいる範囲は、無次元掃流力を限界無次元掃流力で除した有効無次元掃流力が 1 を超えている領域を示しており、流砂が発生している領域を示している。逆に囲まれていない範囲は流砂が発生していない領域を示している。

a) 小田川

図-4 の小田川の下図に着目すると、右岸側の緑線で囲まれた領域を除いたほとんどにおいて有効無次元掃流力が 1 を超えず、流砂が未発生であることがわかる。そのため、位相角は 0 度となっている。上図の航空写真と同図を比較すると、流砂が未発生箇所と樹林繁茂地が対応していることがわかる。つまり、河床変動が起きにくい地形であることから樹林が繁茂しやすい領域であることが推測される。有効無次元掃流力が 1 を超える領域の位相角に着目すると、およそ -2.5 度以下の洗掘傾向、 2.5 度以上の堆積傾向で分布していることがわかる。鉛直方向の攪拌と水平方向の攪拌が同等であれば位相角が 45 度となることから、小田川における位相角の空間分布より、鉛直方向の攪拌よりも大きな水平方向の攪拌が生じていることが推測される。樹林繁茂していない A 地点と樹林繁茂している B 地点における位相角を比較すると約 5 度の僅かな違いとなって

いる。A 地点においては-1.5 度以下、1.5 度以上のように相対的に大きな位相角となっている。これに対して、B 地点では-1.5 度から 1.5 度の範囲であり、相対的に小さな位相角である。小田川では、位相角が-1.5 度から 1.5 度程度の範囲であれば樹林化地形であり、-1.5 度以下の洗掘傾向もしくは 1.5 度以上の洗掘傾向になれば、樹林化回避地形であることが推測された。

b) 能生川

図-5 の能生川の 1) 上流側および 2) 下流側の下図に着目すると、計算領域の半分程度が有効無次元掃流力が 1 を超えており、流砂が発生していることがわかる。有効無次元掃流力が 1 を超える領域における位相角の値に着目すると、小田川と同様に、およそ-2.5 度以下、2.5 度以上の範囲で位相角が分布しており、鉛直方向の攪拌よりも水平方向の攪拌が卓越していることが推測された。同図中の樹林繁茂している C 地点に着目すると、有効無次元掃流力が 1 を超えておらず、位相角が 0 となっている。次に樹林繁茂していない D 地点に着目すると、D 地点において位相角が-1.5 度から 1.5 度の範囲となっている。小田川では、この規模の位相角では樹林化地形となっていた。能生川において樹林化回避地形となっていた理由について、著者らは、比較的大きな有効無次元掃流力が空間的に連続していることとの重畳により、このような違いにつながったものと推測している。つまり、樹林化回避地形の推定には局所的な位相角の値に着目するだけでなく、位相角が-1.5 から 1.5 度の箇所でも、その箇所の付近の有効無次元掃流力が 1 以上の箇所が空間的に連続し、かつ位相角が-1.5 以下もしくは 1.5 以上であれば、樹林化回避地形となりうることが推測される。

小田川および能生川における検証結果を整理すると、両河川ともに鉛直方向の攪拌よりも水平方向の攪拌が卓越している。しかし、鉛直方向の攪拌度合いが比較的大きい場合、つまり位相角で表すと-2.5 以下、2.5 以上となれば堆積や洗掘傾向にかかわらず、樹林化回避地形であることが示唆された。また、鉛直方向の攪拌が大きくなることは、式 (10) から考えると、等流の力学的平衡状態から乖離し、不等流強度が強まり、樹林化の回避に有利となる洗掘か堆積の河床変動を生じる箇所となることが推測される。

5. 結論

本研究では、水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いから河床の力学的平衡状態を評価し、樹林化回避地形の推定を行った。得られた成果の概要は以下の通りである。

1) 本研究で対象とした能生川および小田川の両河川

において、鉛直方向の攪拌よりも水平方向の攪拌が卓越していることが推定された。

- 2) 水平方向に対する鉛直方向の攪拌度合いを位相角で評価した結果、位相角が-2.5 度以下もしくは 2.5 度以上であれば、河床変動が堆積や洗掘の傾向に関わらず、樹林化回避地形となることが示唆された。
- 3) 樹林化回避地形は、等流の力学的平衡状態から乖離し、河床材料の新陳代謝が容易に生じるような河床面での鉛直方向の攪拌がある状態であることが示唆された。

謝辞： 本研究は、新潟県土木部の全面的な支援および一般財団法人国土技術研究センターの研究開発助成 (2018 年度) による支援を受けている。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 石原篤，末次忠司：河道内樹木群の治水上の効果・影響に関する研究，平成 17 年度国土交通省国土技術研究会指定課題，2005。
- 2) 末次忠司：河道・洪水特性と洪水攪乱，日本生態学会誌，pp.275-pp279, 2002。
- 3) 辻本哲郎，村上陽子，安井辰弥：出水による破壊機会の減少による河道内樹林化，水工学論文集，第 45 巻，pp.1105-1109, 2001。
- 4) 北川明，島谷幸宏，小栗幸雄：川辺の樹木に関するフィールドワーク，第 33 回水理講演会論文集，pp.625-630, 1989。
- 5) 渡邊康玄，渡邊康玄，市川嘉輝，井手康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界，水工学論文集，第 40 巻，pp.53-58, 1996。
- 6) 砂田恵吾，河野逸朗，田中総介：出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究，水工学論文集，第 46 巻，pp.947-952, 2002。
- 7) Tanaka, N. and Yagisawa, J.: Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding, Landscape Ecol. Eng., Vol.5, pp.59-70, 2009。
- 8) 田中規夫，八木澤順治，福岡捷二：砂礫州上における繁茂場所の相違が樹木の洪水時流失限界に及ぼす影響，水工学論文集，第 53 巻，pp.631-636, 2009。
- 9) Google Earth : <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>
- 10) 石原道秀，安田浩保：交互砂州の流下状態の理論的評価，第 36 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，pp.100-pp.103, 2018。
- 11) 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，No. 342, pp.87-96, 1984。
- 12) 国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所，小田川の多自然川づくり 参考資料 1，小田川柳井原地区川づくり検討協議会，2017。
- 13) 佐貫方城，大石哲也，三輪準二：全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察，河川技術論文集，第 16 巻，2010。
- 14) 北海道河川財団 iRIC Software, <https://i-ric.org>
- 15) 国土地理院 電子国土 web, <http://maps.gsi.go.jp>

(2019. 4. 2 受付)