

堆積土砂の再移動を考慮した切り下げ直後の 砂礫州の再樹林化評価に関する研究

METHOD FOR EVALUATING THE RE-FORESTATION OF EXCAVATED GRAVEL BAR
CONSIDERING DEPOSITION AND WASHOUT OF FINE SAND

田中規夫¹・八木澤順治²・大塚翔平³・廣野太志⁴・竹島睦⁵

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Shohei OTSUKA, Futoshi HIRONO and Makoto TAKESHIMA

¹正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³正会員 学士 埼玉大学大学院 理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所(〒350-1124 埼玉県川越市新宿町 3-12)

⁵正会員 学士 国土交通省 四国地方整備局 徳島河川国道事務所(〒770-0803 徳島県徳島市上吉野町 3-35)

For clarifying the possibility of forestation in gravel bed bars or islands, sediment load change index (*SLI*) has been proposed considering deposition and washout of fine sand during flood discharge is declined. The applicability of this index was validated in the middle stream reach of the Ope River and the Arakawa River. Before and after typhoons in 2007, 2011 and 2012, field investigations were conducted on five gravel bars in two rivers. River flow was also analyzed by two-dimensional depth-averaged Reynolds equations, and *SLI* was calculated. In comparison with *SLI* and sand deposition situation on observed gravel bars, *SLI* has been found to express well the sand deposition situation on most of observed gravel bars. However, when this method is applied to the gravel bar which has small relative height from low channel or long distance along the flow direction, *SLI* could not express well the actual deposition situation. The effect of the excavation of gravel bar was investigated at Honda location in the Arakawa River through *SLI*. The re-colonization of the grass-type vegetation can be confirmed at the location where *SLI* becomes higher due to the excavation. This result indicates *SLI* is suitable parameter for evaluating the effectiveness of the excavation of the gravel bar.

Key Words : possibility of re-forestation, excavation of gravel bar, Arakawa River, Sediment Load change Index (*SLI*)

1. はじめに

河道内樹林化は、植生の過剰繁茂による洪水疎通能力の減少¹⁾、洪水時に流木化した樹木による河道横断工作物の破壊²⁾など治水的に悪影響を及ぼすだけでなく、単一種による場の占有が引き起こす生物多様度の減少³⁾など、環境面からも問題となっている。これまでの樹林化対策としては、砂礫州の切り下げ⁴⁾や一部掘削⁵⁾など、洪水外力の増加によって植生の流失を誘発する効果を狙った手法が中心に実施されている。これらの手法は、従来と同程度の洪水でも、植生の生育基盤に対する攪乱規模・頻度を増加させることで繁茂を抑制する点においては効果的である。しかし、洪水減水期に細粒成分の堆積も生じやすくなるため、植生の再繁茂が生じるという問題点も指摘されている⁴⁾。また、河道掘削直後に経験した洪水の規模により対策効果が大きく変化する傾向がある。樹林化の初期段階においては、細粒成分の堆積に伴う栄養塩の供

給⁶⁾や水分保持条件の変化が植生繁茂のきっかけを与え⁷⁾、その後の樹林化進行に寄与しているといわれている。

著者らは、砂礫州上に繁茂した植生の洪水外力による破壊・流失、洪水減水期の土砂堆積特性が樹林化評価に重要な要因と捉え、破壊評価指標 *BOI* と流失評価指標 *WOI*⁹⁾、細粒成分の堆積を考慮した土砂堆積指標 *SDI*¹⁰⁾を提案している。*BOI*, *WOI*については多くの河川、規模の大きく異なる洪水においてその適用性が確認されているものの、*SDI*は小さな出水で検証された指標であること、指標の物理的意味が明確でないこと等の課題がある。また、砂礫州に堆積した土砂の一部は次の洪水時や、当該洪水の減水期において再移動する場合もあるため、堆積と再移動の両方を考慮することが必要である。

そこで、本研究では砂礫州前面の河道の土砂の浮遊・掃流状態と砂礫州上の土砂の掃流状態に注目し、新たな土砂堆積指標を提案することで、切り下げ直後の樹林化傾向を判定する手法の構築を行なう。

2. 研究方法

(1)改良した土砂堆積指標 SLI の定義

土砂堆積指標 SLI (Sediment Load change Index) は、図-1 に示すように、砂礫州上への細粒成分の堆積および再移動が洪水減水期に生じるものとし、洪水ピークから平水位に戻る時間内において、ある粒径が堆積する時間 TAT から、ある粒径が摩擦速度で移動する時間 TDI を差し引いた値($SLI=TAT-TDI$)と定義した。この指標は SLI が大きければ堆積傾向が強いことを簡易に表現する意図で、第一段階として導入したものである。しかし、水流と河床面との間の土砂フラックスは時々刻々変化し、また堆積時と侵食時で同じではない。そのため、同じ重みで引くことに課題がある。本研究を踏まえ、将来的には改良していく予定である。 SLI を算出するため、砂礫州直上流の流路における基準のグリッド(以下、基準グリッド)と砂礫州上の各グリッド(以下、砂礫州グリッド)における、細粒土砂の移動形態(浮遊砂・掃流砂卓越状態)の関係から、土砂堆積が発生する時間 TAT と堆積した土砂が再移動する時間 TDI を決定した(図-1)。砂礫州グリッドで土砂堆積が発生する条件は、基準グリッドで浮遊砂が卓越し比高差のある砂礫州グリッドに土砂が供給されやすく、かつ砂礫州グリッドで掃流砂が卓越し河道の浮遊砂成分が沈降しやすい状態(図-1 の状態)とした。一方、砂礫州グリッドで再移動が発生する条件は、基準グリッド、砂礫州グリッド双方で掃流砂が卓越し、砂礫州グリッドへの土砂流入が減少し砂礫州上の土砂が抜けやすい状態(図-1 の状態)と定義した。基準グリッド、砂礫州グリッドにおける浮遊砂・掃流砂が卓越して発生する条件はそれぞれ以下の式より算出した¹¹⁾。

$$u_* / w_f > 1.67 \quad (\text{浮遊砂卓越条件}) \quad (1)$$

$$u_* / w_f < 1.08 \quad (\text{掃流砂卓越条件}) \quad (2)$$

ここに、 u_* は摩擦速度 (m/s)、 w_f はある粒径の細粒土砂の沈降速度(m/s)である。式(2)、(3)において、 W_f は Rubey 式¹²⁾を、 u_* はそれぞれ以下の式より算出した。

$$W_f = \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \right) \sqrt{sgd} \quad (3)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (4)$$

ここに、 ν は水の動粘性係数(m^2/s)、 s は砂粒の水中比重、 g は重力加速度(m/s^2)、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 τ は底面せん断力(N/m^2)である。 d は植生の繁茂の有無を分ける粒径(m)であり、八木澤ら¹⁰⁾や渡辺ら¹³⁾の既往研究において、ある粒径以下の細粒成分が存在する箇所において植生の繁茂割合が高いことが報告されている。本研究では、八木

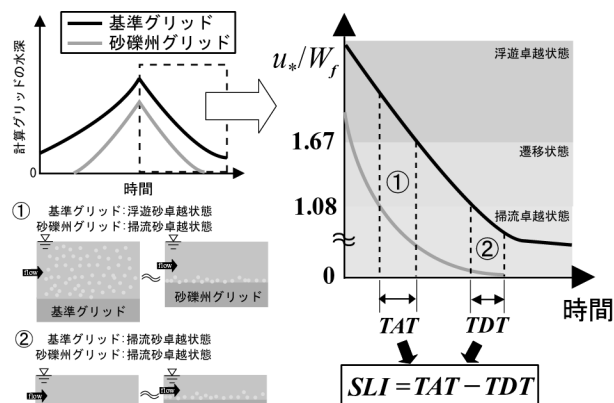


図-1 土砂堆積評価指標 SLI の算出過程の模式図

TDI 、 TAT はそれぞれ、洪水ピークから平水位に戻る時間内における、基準・砂礫州グリッドでそれぞれ浮遊卓越状態、掃流卓越状態となる時間、基準・砂礫州グリッド双方で掃流卓越状態となる時間

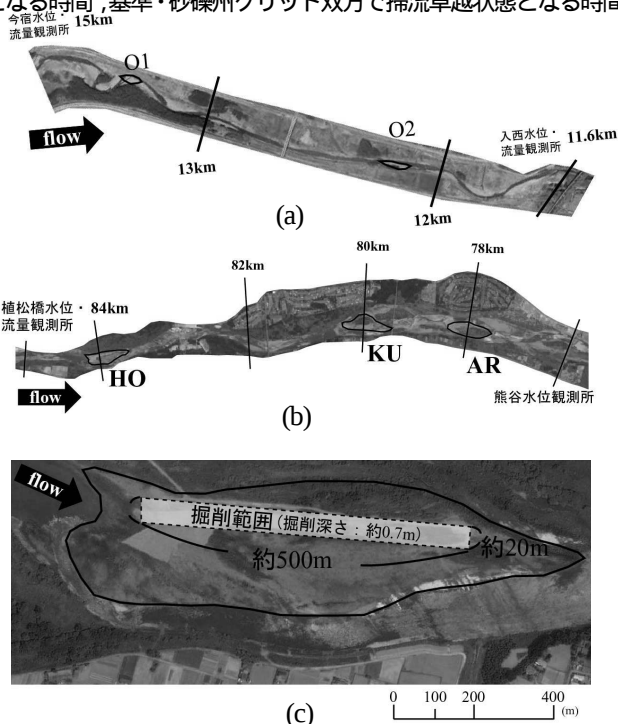


図-2 対象河川の航空写真と対象砂礫州

(a) 越辺川、(b) 荒川、(c) HO の砂礫州外形と掘削範囲

表-1 対象砂礫州の特性と解析対象洪水一覧

河川	砂礫州	河床勾配 (セグメント)	流域面積 (km ²)	粒径 (m)		平水位からの 最大比高差 (m)	解析対象 洪水
				<i>d</i> ₅₀	<i>d</i> ₉₀		
荒川	AR		891 (植松橋水位・流量観測所)	3.3	5.6	2.3	2007年9月 2012年6月
		1/375					
	KU	(セグメント1)	1000 (熊谷水位観測所)	6.5	9.0	3.8	2007年9月 2012年6月
	HO			6.9	8.4	3.4	2012年6月
越辺川	O1	1/320	85 (今宿水位観測所)	4.9	7.3	2.8	2011年8月
	O2	(セグメント1)	100 (入西水位観測所)	5.1	7.5	1.6	2011年9月

澤ら¹⁰⁾の越辺川での調査結果を参考とし d を 0.5mm とした。また、本研究では洪水時の流況を再現し対象砂礫州における底面せん断力を求めるため、田中ら⁹⁾と同様に対象砂礫州を含む河道区間に平面二次元計算法を適用し、式(4)に示す摩擦速度の算出に用いた。

(2) 対象砂礫州および観測項目概要

(a) 対象砂礫州の特徴

細粒成分の堆積・再移動に注目した指標の有効性を確認するため、まず、2011年度までに洪水前後の植生繁茂状況や細粒成分の堆積状況が詳細に把握されている、荒川の中流域に位置する2砂礫州(AR, KU)と、越辺川中流域に位置する2砂礫州(O1, O2)を対象とした。

さらに、荒川中流域に位置する本田地先(HO)では、2010年に砂礫州上の一部において、幅が約20m、流下方向長さが約500m、深さが約0.7mの切下げを実施している(図-2(c))。切下げが砂礫州上の土砂堆積に及ぼす影響を把握するため、2012年6月に生じた洪水後に現地観測を実施し、対象砂礫州として解析を行った。

以上を踏まえ、本研究では図-2(a), (b)に示す計5砂礫州を対象にSLIの解析を実施した。解析対象ケース一覧および各砂礫州の特性を表-1に示す。

(b) 植生繁茂状況および細粒土砂の堆積状況

各対象砂礫州において、洪水前後に砂礫州上の植生分布調査を実施し繁茂状況を把握するとともに、分布調査時には代表的な草本・木本の群落単位で平均的な植生高さ、茎直径、密度を把握した。また、細粒成分の堆積状況を把握するため、数値解析の計算グリッドに合わせ、流下方向に約30-50m、横断方向に約10-30m間隔で調査ポイントを設定し、荒川のAR地点では28箇所、KU地点では33箇所、HO地点では26箇所、越辺川のO1地点では22箇所、O2地点では18箇所において細粒土砂の堆積の有無を把握した。細粒土砂の堆積を調査する際は、各ポイントにおいて50cm四方の方形枠を用いて河床の画像を撮影し、その場でふるい分け試験を実施した。本研究では、方形枠の面積のうち50%に細粒成分が堆積しているかどうかで洪水後の堆積の有無を判断した。砂礫河原への植生の入植には、表層の礫間に十分な細粒土が堆積することが重要であると報告されている¹³⁾。現地観測より50%程度堆積した場合に、礫間に細粒土砂が満遍なく存在していたことから、植生の入植を容易にするという観点より堆積有りとして定義した。

(c) 各河川の対象洪水

図-3に今回対象とした洪水ハイドロを示す。表-1に示すように、荒川の砂礫州を対象にした解析では2007年9月洪水、2012年6月洪水(図-3(a))を対象としている。これら2つの洪水では、土砂の堆積に影響する、洪水規模やピークに達してから平水位に戻るまでの時間が大きく異なる。越辺川の砂礫州に対しても同様に2011年8月、9月(図-3(b))に生じた、規模や減水期の特性が大きく異なる洪水を選択し、解析を行っている。

3. 結果および考察

(1) 洪水流解析の検証

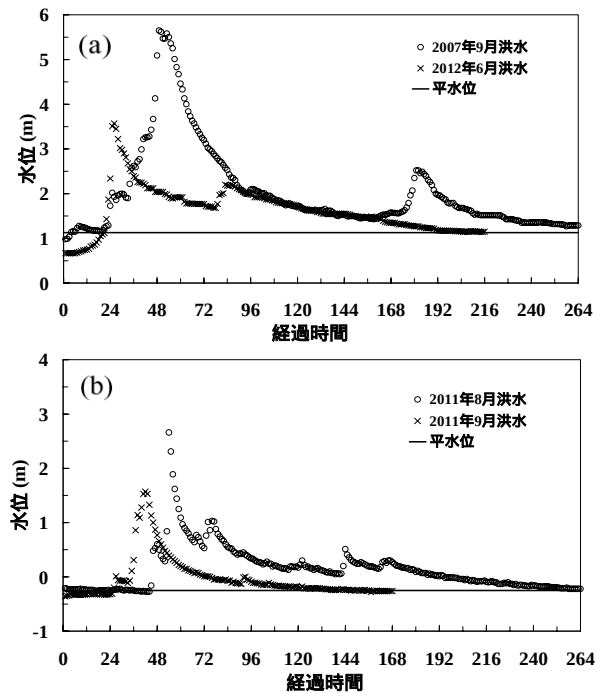


図-3 対象洪水の洪水波形 (a) 荒川・熊谷水位観測所、(b) 越辺川・今宿水位観測所

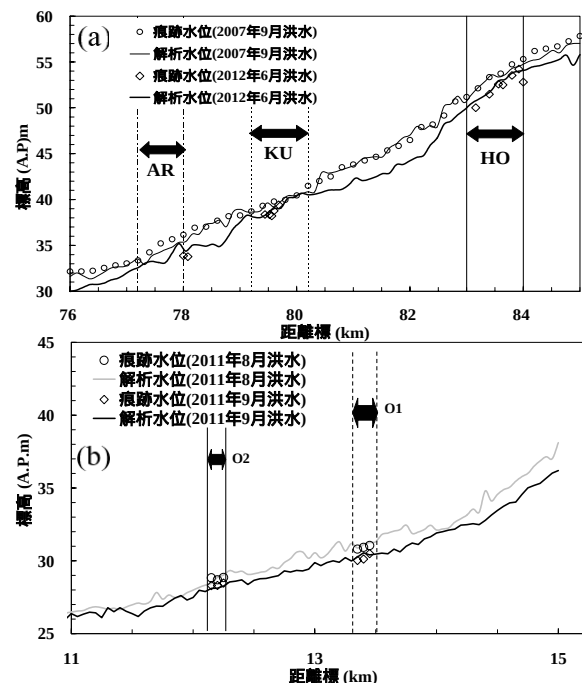


図-4 対象洪水時の各河川での解析ピーク水位と痕跡水位の比較 (a) 荒川、(b) 越辺川

図-4に各解析対象洪水時のピーク水位の縦断分布を示す。図中の実線は解析水位を、プロットは各砂礫州の痕跡水位を示している。痕跡水位は洪水後の観測時において、高水敷あるいは砂礫州上の樹木への流下物の付着から判断した。図より両河川において各対象洪水時のピーク水位の解析値は対象砂礫州の痕跡水位を概ね満足しており、本解析モデルの有効性を確認した。よって、本研究ではこれらの解析結果をもとに、SLIの算出に必要な水深・底面せん断力等を算出した。

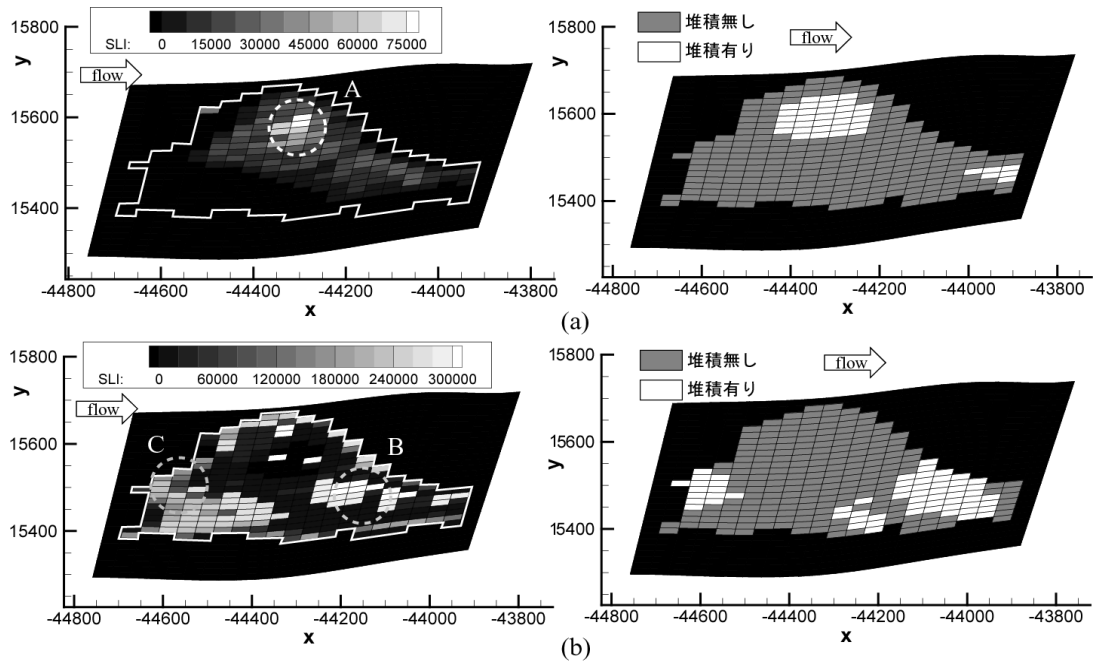


図-5 KU の細粒成分の堆積の有無と SLI の解析値との比較 (a) 2007, (b) 2012 (左: 解析, 右: 実績)
(解析結果の白線は砂礫州の外縁を表している)

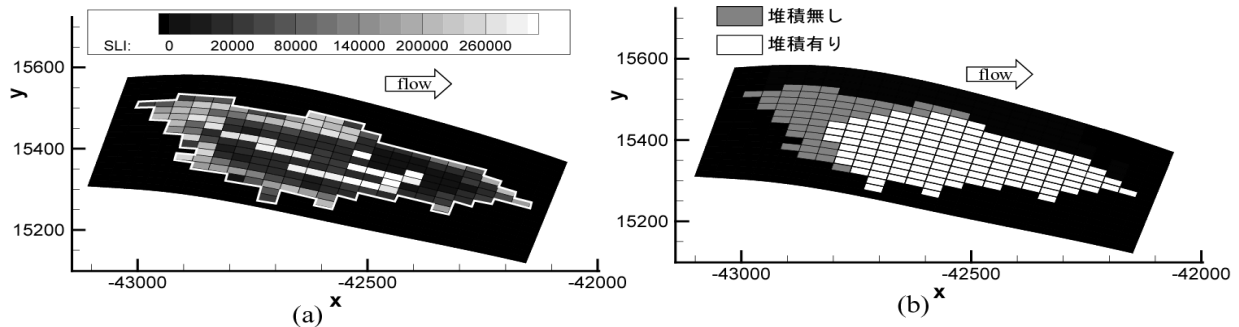


図-6 2012 年 6 月洪水時の AR における細粒成分の堆積の有無と SLI の解析値との比較 (a) 解析値, (b) 堆積実績
(解析結果の白線は砂礫州の外縁を表している)

(2) 各砂礫州における細粒成分の堆積実績をもとにした土砂堆積指標 SLI の妥当性の確認

図-5 に、荒川の熊谷大橋上流の砂礫州(KU)における SLI のコンター図と実際の細粒土砂の堆積状況を比較した結果を示す。2007 年 9 月洪水時(図-5(a)), 2012 年 6 月洪水時(図-5(b))の結果より、図中の A, B, C のように SLI の値が大きな箇所ほど、実際に細粒土砂の堆積が発生する傾向であることが確認できる。また、KU の解析で対象とした 2 洪水は洪水波形(図-3(b))が示すように、ピーク水位(規模)や減水期の特徴(平水位に達するまでに要する時間)が大きく異なる。このように特性が大きく異なる洪水に対しても、本研究で提案した土砂堆積指標 SLI は、砂礫州上の堆積の有無や箇所を概ね評価できることが確認された。しかしながら、荒川大橋上流の砂礫州(AR)では、 SLI が実際の堆積の有無を評価できない場合も見られた。図-6 は AR での解析結果と実際の堆積状況を示している。解析結果では上流側の SLI の値が大きく、下流側が小さい傾向であるものの、実際には上流側は堆積せず下流側に堆積する状況であった。この原因として、砂礫州の平水位からの比高差が挙げられる。AR のように比高

差が小さい場合(表-1)、洪水時における基準グリッドと砂礫州グリッドの水深の差が小さくなり、 SLI の値が小さく見積もられやすくなるため、実際の堆積状況とは異なる傾向を示すと考えられる。また、AR のように流下方向への距離が長い砂礫州では、砂礫州下流側での堆積状況を表現できない場合も確認された。基準グリッドでの浮遊砂・掃流砂の卓越状態が、砂礫州の下流側のグリッドでのそれと、必ずしも関係していないことが原因であると考えられる。

比高差が SLI の傾向に及ぼす影響を確認するため、越辺川の 2 つの砂礫州(比高差の大きな O1, 比高差の小さな O2 (比高差の値は表-1 参照))での SLI の解析結果と実際の堆積状況を比較した(図-7)。比高差の大きな O1(図-7(a))では、左岸側(図中 D)で SLI が大きな値となる傾向がある点、実際に堆積が見られなかった部分では SLI の値が負になる(TAT より TDT が大きく土砂の再移動が顕著に生じたと考えられる)点など、実際の堆積状況をよく評価できていると考えられる。一方で、比高差の小さな O2(図-7(b))では、 SLI の解析値は、砂礫州の前面で土砂堆積が生じていないという実際の堆積状況を表現できな

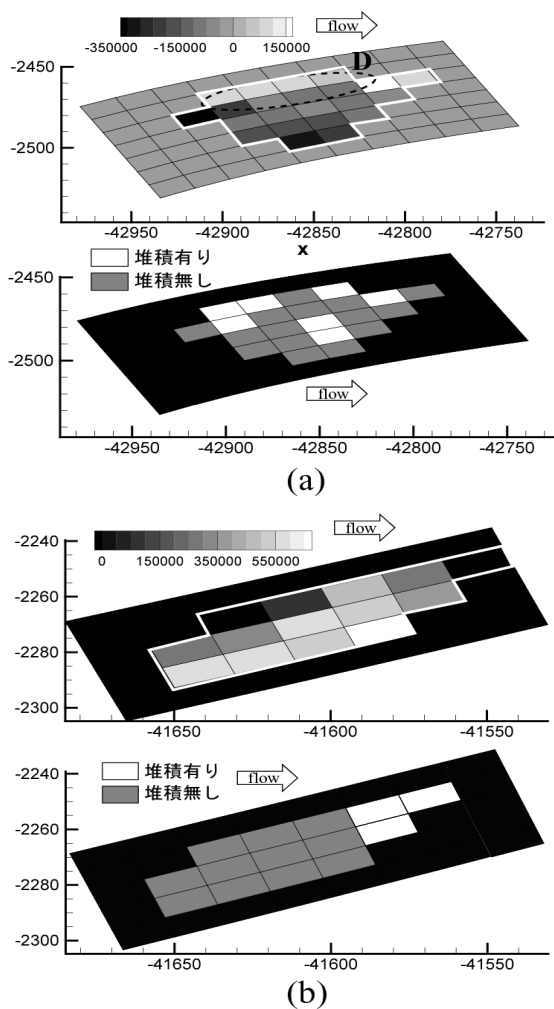


図-7 2011年8月洪水時の細粒成分の堆積の有無とSLIの解析値との比較 (a)O1, (b)O2 (上:解析, 下:実績) (解析結果の白線は砂礫州の外縁を表している)

いことがわかる。以上より、比高差や砂礫州の流下方向スケールなどの条件によって、実際の堆積状況を正確に表現できない場合もあるものの、規模や減水特性の大きく異なる洪水に対しても、細粒土砂の堆積・再移動を考慮した土砂堆積指標 SLI を用いることで、砂礫州の堆積の有無や箇所を概ね評価可能であることがわかった。

(3) 本田地先の砂礫州の切下げが細粒成分の堆積状況に与える影響

図-8は、2012年洪水を対象にした、荒川の本田地先の砂礫州(HO)の切下げ前後での SLI の解析結果と実際の堆積状況を比較したものである。切下げ前後の SLI の分布を比較すると、切下げ前では砂礫州上流部で SLI の値が高くなっている傾向にあるが(図-8(b)のE付近)、切下げ後では切下げ箇所の後方部分にあたる、砂礫州中流部にまで SLI の高い領域が広がっている(図-8(c)のF付近)ことがわかる。この箇所付近では、実際に細粒成分の堆積が顕著であったこと、草本植生(主にヨシやツルヨシなどの多年生草本)が密に繁茂していることが2012年6月洪水

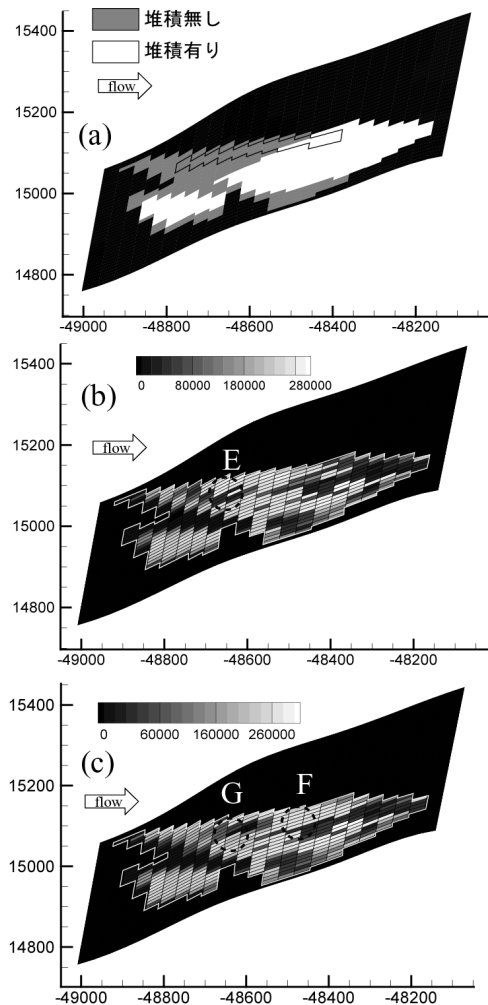


図-8 本田地先砂礫州(HO)の切下げがSLIに及ぼす影響

(a)実際の堆積状況(黒線は切下げ部を表す) (b)切下げを考慮しないSLIコンター, (c)切下げを考慮したSLIコンター (解析結果の白線は砂礫州の外縁を表している)

後の現地観測により確認されている。一方、切下げ流路の上流部分(図-8(c)のG付近)では、切下げ前に比べ SLI が小さい領域が増加していることが分かる。この付近では、実際に堆積土砂が無く、裸地が維持されている状態であった。すなわち、切下げによる SLI の変化が実際の土砂堆積状況、植生繁茂状況を表現できることを示している。以上のことから、本田地先の砂礫州で実施された切下げは、洪水時における右岸側の流れの集中を軽減させることが主目的ではあるものの、切り下げ前後の SLI の解析結果より、今回対象としたような小規模洪水が生じた場合、植生の再繁茂を抑制する効果は小さく、場所によっては土砂堆積により再繁茂を促進させてしまう可能性があることがわかった。上記の結果より、切下げ後の土砂堆積・植生繁茂の状況を SLI によって評価できる可能性があることがわかった。

(4) SLIの閾値の定量化に向けて

図-9は土砂堆積が生じる SLI の閾値を調べるため、対象砂礫州の各グリッドで得られた SLI と堆積の有無を比

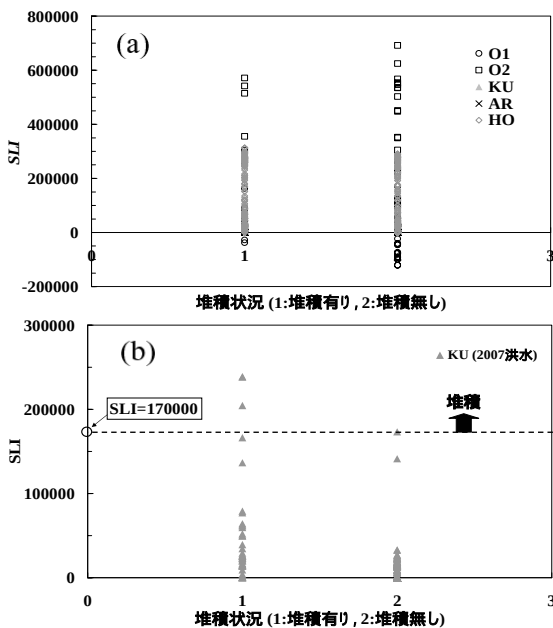


図-9 対象砂礫州各グリッドの SLI と堆積の有無との関係

(a) 全グリッドでの検討, (b) 2007 年洪水時の KU を対象

較した結果を示している。図-9(a)は対象砂礫州で得られた値を全て示している。この図より、堆積と非堆積を明確に区分する閾値が見られないことがわかる。細粒成分の堆積は、主に、砂礫州の上流での細粒成分の輸送形態と砂礫州上での輸送形態との関係、二次流による横断方向への輸送、植物による捕捉、が支配的であると考えられる。本研究では、のメカニズムのみを簡易に考慮したため、明確な閾値が確認できなかったものと考えられる。そこで、他の砂礫州に比べ、上記の影響が卓越していると考えられる熊谷大橋(KU)の砂礫州で閾値を確認したところ $SLI > 170000$ の領域では堆積のみが生じていることがわかった(図-9(b))。この砂礫州では2007年の大きな洪水により、洪水ピーク時には砂礫州上の植生は比高の高い一部を除きほぼ流失した状態であることが確認されている。すなわち、切下げを実施した直後と同じような状態であると想定され、このような場所に対しては、の要因による土砂の堆積の有無をより正確に判断することが可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、従来の植生破壊・流失評価指標に加え細粒成分の堆積に関する指標を導入し、その有効性について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 土砂堆積指標 SLI は、低水路との比高差が大きく、上下流の比高差が小さい砂礫州に対しては、細粒分の堆積範囲を示せる可能性を示した。
- 2) 流下方向スケールの大きな砂礫州の下流側、植生群落が過剰に存在する砂礫州に対しては、堆積の有無を評価できない傾向が見られた。

3) 本田地先での検討より、砂礫州の切下げによる SLI の変化と実際の状況が対応している部分もみられたことから、切り下げ後の土砂堆積・植生繁茂の状況を SLI によって評価できる可能性がある。

しかし、堆積状況と SLI の適合度は良くない箇所もあり、 SLI の定義式を、より物理的意味の明確な指標へと改善する余地があると考えられる。

謝辞：本研究は河川環境管理財団河川整備基金の助成(代表: 田中規夫)を受けて実施した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 重枝末玲, 秋山壽一郎: 数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討, 土木学会論文集, No.740/-64, pp.19-30, 2003.
- 2) 財団法人 河川環境管理財団: 河川整備基金自主研究事業 流水木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究, 2008.
- 3) Maekawa, M. and Nakagoshi, N.: Riparian landscape changes over a period of 46 years, on the Azusa River in Central Japan, Landscape and Urban Planning, 37, pp.37-43, 1997.
- 4) 眞田淳二, 浦上将人, 前野詩朗, 渡辺敏: 2006 年 7 月出水を経験した旭川下流部礫河原再生箇所でのモニタリング結果と考察, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.129-134, 2007.
- 5) 岩見収二, 清水義彦: 低水路管理における中州掘削の有効性とその留意点について, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.279-284, 2009.
- 6) Oswalt, S.N. and King, S.L.: Channelization and floodplain forests: Impacts of accelerated sedimentation and valley plug formation on floodplain forests of the Middle Fork Forked Deer River, Tennessee, USA, Forest Ecology and Management, 215, pp.69-83, 2005.
- 7) 李参照, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏, 山本晃一, 望月達也: 礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.433-438, 1998.
- 8) 砂田憲吾, 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.
- 9) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案, 土木学会論文集, 第 66 巻, pp.359-370, 2010.
- 10) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 土砂堆積指標を考慮した砂礫州の樹林化評価に関する研究, 河川技術論文集, 第 18 巻, pp.65-70, 2012.
- 11) 椿東一郎: 水理学, 基礎土木工学全書 7, 森北出版, 1974.
- 12) Rubey, W. W.: Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles, American Journal of Science, 5th series, Vol. 25, No. 148, 1933.
- 13) 渡辺敏, 藤田光一, 塚原隆夫: 安定した砂礫州における草本植生発達の有無を分ける要因, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.439-444, 1998.

(2013.4.4 受付)