

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

METHOD FOR EVALUATING THE FORESTATION ON GRAVEL BARS IN RIVERS
CONSIDERING SEDIMENT DEPOSITION INDEX

八木澤順治¹・田中規夫²・福岡捷二³

Junji YAGISAWA, Norio TANAKA and Shoji FUKUOKA

¹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)

²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)

³フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

For evaluating the possibility of forestation in gravel bed bars, sediment deposition index (*SDI*) was derived considering the characteristic of flood hydrograph. The applicability of this index was validated in the middle stream reach of the Opepe River and the down stream reach of the Tamagawa River. Before and after typhoon No.12 and 15 on 2011, field investigations were conducted on gravel bars in Tamagawa and Opepe River. For above two floods, river flow was analyzed by two-dimensional depth-averaged Reynolds equations, and *SDI* and *WOI* (Washout index proposed by Tanaka et al. (2010)) were calculated. Calculated *SDI* in numerical simulation and situation of sand deposition on observed gravel bars were compared. When the critical value of *SDI* was considered to be 0.7, *SDI* could express well the sand deposition situation on observed gravel bars. By using *SDI-WOI* plot, vegetated situation of grass type vegetation on gravel bars in Tamagawa River was classified well. Grass type vegetation has been found to grow only on where *SDI* is larger than 0.7 and *WOI* is smaller than 1.4. These results indicated *SDI-WOI* plot proposed in this study has some possibility to evaluate the location that grass type vegetation can grow easily.

Key Words : possibility of forestation, flood duration, Wash Out Index (*WOI*), Sediment Deposition Index (*SDI*)

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性の減少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、もしくはその後の植生繁茂を抑制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はあるものの、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⁾。上記のような河道掘削で生じた場合も含めた樹林化の初期段階においては、細粒成分の堆積が栄養塩の供給⁶⁾、植生の定着⁷⁾といった観点から植生繁茂の有無に影響を与え、その後の樹林化進行に寄与していることが報告されている。

一方、洪水外力による河道内植生の破壊・流失限界については、近年数多くの研究が行われており⁸⁾、その中で著者らは砂礫州上の植生の破壊評価指標 *BOI* と流失評価指標 *WOI* による樹林化判定手法を提案している⁹⁾。その手法は樹林化がある程度進行した、主に木本類の繁茂が顕著な砂礫州に対して適用性が高いことが確認されている。しかしながら、草本類を中心に構成される樹林化の初期段階においては、細粒成分の堆積がその後の植生遷移に大きく影響することから、植生破壊および生育基盤の流失(洪水外力)のみを考慮した判定手法では樹林化が生じる可能性を精度良く評価することは難しいと考えられる。したがって、樹林化がある程度進行した場合だけでなく、初期段階も含めて評価を行うためには、細粒成分の堆積を考慮した評価方法が必要である。

そこで、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する。その上で、樹林化が進行する可能性の高い砂礫州を、早期に判定することが可能な手法を開発することを目的とする。

2. 研究方法

(1) 流れの数値計算手法および植生流失指標 WOI , 土砂堆積指標 SDI の定義

本研究では洪水時の流況を再現するため、田中ら⁹⁾と同様に平面二次元計算法を用いた。数値計算では後述する対象砂礫州における底面せん断力を求めた。それを用いて流失指標 WOI を以下の式より算定した。

$$WOI = \frac{\tau_{*90}}{\tau_{*c90}} \quad (1)$$

ここに、 τ_{*90} , τ_{*c90} はそれぞれ河床材料の90%粒径の無次元掃流力、無次元限界掃流力である。 τ_{*90} , τ_{*c90} ¹⁰⁾はそれぞれ、以下の式より算出した。

$$\tau_{*90} = \frac{H_{max} I_e}{Sd_{90}} \quad (2)$$

$$\frac{\tau_{*c90}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{90}/d_{50})} \right]^2 \quad (3)$$

ここに、 H_{max} , I_e , S はそれぞれ、砂礫州の計算グリッドの最大水深(m), エネルギー勾配, 土粒子の水中比重である。また、 d_{50} は50%粒径(m), τ_{*c50} は50%粒径の無次元限界掃流力であり、本研究では0.06とした。

一方、土砂堆積指標 SDI (Sediment Deposition Index) は砂礫州上への細粒成分の堆積が洪水減衰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 : Total Aggradation Time)を、ある粒径が摩擦速度で移動する時間(TDT : Total Degradation Time)で除した値($SDI=TAT/TDT$)と定義した。この定義式より SDI が大きければ堆積傾向が強いことを意味する。本研究では、ある粒径の粒子が堆積するか移動するかを判断するため、粒子の沈降速度 W_f と摩擦速度 u_* の比が以下の式¹¹⁾を満たす時、すなわち掃流卓越領域になる時に堆積が生じると判断した。

$$\frac{u_*}{W_f} < 1.08 \quad (4)$$

式(4)において、 W_f は Rubey 式¹²⁾を、 u_* は上述した数値計算より算出された底面せん断力 τ をもとに、それぞれ以下の式より算出した。

$$W_f = \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \right) \sqrt{sgd} \quad (5)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (6)$$

ここに、 v は水の動粘性係数(m^2/s), d は後述する植生の繁茂の有無を分ける粒径(m), s は砂粒の水中比重, g は重

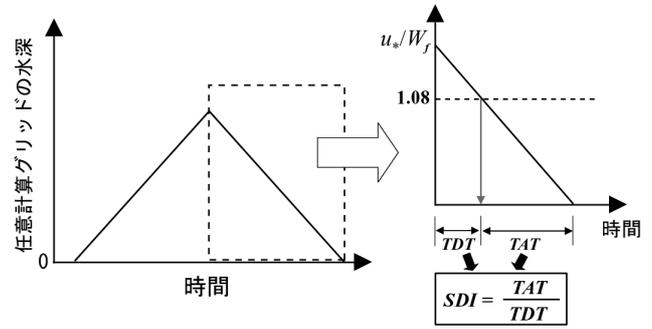


図-1 土砂堆積評価指標 SDI の算出過程の模式図

TDT , TAT はそれぞれ、洪水ピークから平水位に戻る時間内において、ある粒径の河床材料が摩擦速度で移動する時間、堆積する時間を示す

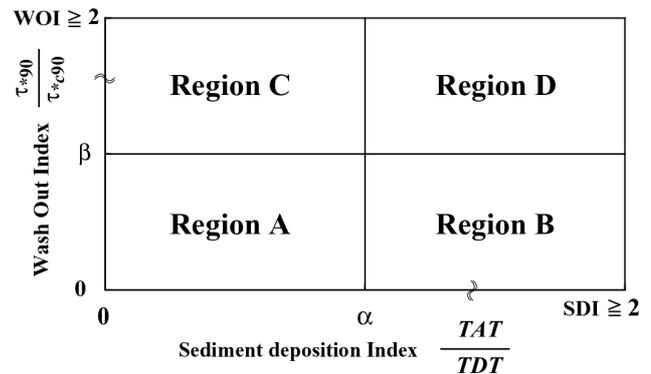


図-2 本研究で提案する植物繁茂状況分類図

α , β はそれぞれ、ある粒径の土砂の堆積の有無を分ける値、樹木および多年生草本の流失限界となる WOI の値(それぞれの値は後に詳述する)。Region A ~ D の定義は表-1 を参照

表-1 植物繁茂状況分類図の各領域の定義

SDI は細粒成分の堆積判定指標(= TAT/TDT)、 WOI は流失評価指標(= τ_{*90}/τ_{*c90})を示す

Region	SDI	WOI	定義
A	$< \alpha$	$< \beta$	洪水による細粒成分の堆積、植物の流失も生じない領域
B	α	$< \beta$	洪水による細粒成分の堆積は生じるが、植物の流失は生じない領域
C	$< \alpha$	β	洪水による植物の流失は生じるが細粒成分の堆積は生じない領域
D	α	β	洪水による細粒成分の堆積、植物の流失も生じる領域

力加速度(m/s^2), ρ は水の密度(kg/m^3)である。図-1 に、ある計算グリッドにおける SDI の算出過程の模式図を示す。上記より算出された WOI , SDI の値をもとに、植生の繁茂状況を図-2 のように分類する。それぞれの領域の定義については表-1 に示す。なお、図-2 において植生の流失を判断する WOI の値 β については、田中ら¹³⁾によって根圏の発達しない一年生草本は0.6程度、根を深く張るあるいは網目状に根圏を発達させる多年生草本については1.3-1.8程度の値を示すなど、ある程度は明らかになっているが、その妥当性について確認することとする。また、

植生繁茂の有無を判断する SDI の値 α は、流れの数値計算より得られる SDI の計算値と現地で確認された細粒成分の堆積および植生繁茂の有無の実績をもとに把握する。

(2) 対象砂礫州および観測項目概要

(a) 対象砂礫州の選定方法

本研究では細粒成分の堆積に注目するため、洪水減衰期の水位ハイドログラフが大きく異なる河川を選定する。そのため、河道縦断勾配・流域面積に大きな違いのある2河川(多摩川と越辺川)を一次選定した。次に、主に一年生、多年生草本で構成される樹林化の初期段階にある砂礫州を二次選定した。選定の結果、多摩川の下流域に位置する砂礫州(T1, T2)と越辺川中流域に位置する砂礫州(O1, O2)の計4砂礫州において現地観測を行った(図-3)。表-2には上述した河床勾配, 流域面積に加え, 1年間あたりの冠水頻度を示した。ここで示した冠水頻度は, 各砂礫州の直上流に位置する水位・流量観測所の10年分の流量データと各砂礫州の横断面図を用いて等流計算を行い, 各砂礫州の最も高い位置まで水位が到達する回数を求め, 年平均値とした。今回対象とした砂礫州では7~8回/年とほぼ同様の冠水頻度であり, 洪水攪乱頻度が植生繁茂状態に与える影響は少ないと判断した。

(b) 対象洪水の特徴

2011年に生じた台風12号と15号による2洪水を対象とした。図-4に対象砂礫州の直上流に位置する観測所の水位データの時間変化を示す。同図には各観測所での平水位も合わせて示している。両河川の流域面積や河床勾配の特徴から, 洪水減衰期の洪水波形に大きな違い(水位がピークに達してから平水位に戻るまでの時間が多摩川は長く, 越辺川は短い)があるかを確認した。まず, 図-4(a)(台風12号)を見ると, 越辺川の方が多摩川に比べ減衰期に平水位を越えている時間が長いものの, ピークに達してからの水位の減少速度は越辺川の方が明らかに大きいことがわかる。一方, 台風15号(図-4(b))については, 両河川でほぼ同様の洪水波形を示しており, 水位のピークから平水位に戻るまでの時間は, 多摩川が130時間であるのに対し越辺川では104時間であった。これらのことから, 多摩川に比べ越辺川の方が細粒成分の堆積が生じやすいと考えられる。本研究では, いずれの洪水においても細粒成分の堆積が確認されたため, 台風12号, 15号による洪水のどちらも対象洪水とした。

(c) 植生繁茂状況および河床材料調査

対象砂礫州において, 洪水前後に砂礫州上の草本分布調査を実施し流失状況を把握するとともに, 分布調査時には草本の群落単位で平均的な草丈, 茎直径, 密度を把握した。WOI算出のため, 砂礫州上の d_{50} , d_{90} を把握する必要があるが, 数値解析の計算グリッドに合わせ, 流下方向に約30m, 横断方向に約10m間隔で調査ポイントを設定し, 多摩川のT1地点では20箇所, T2地点では62箇所,

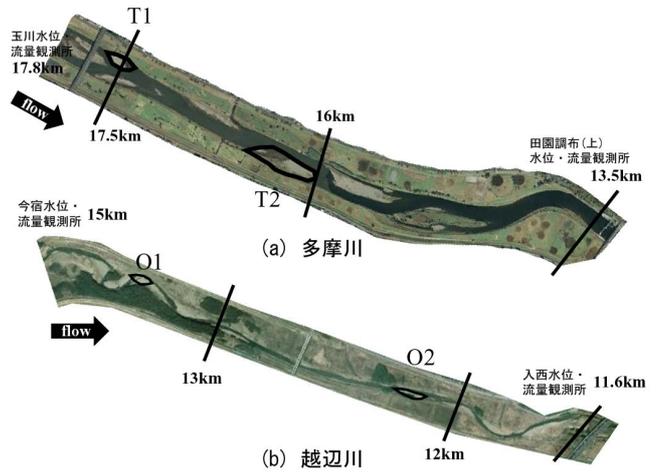


図-3 対象河川の航空写真と対象砂礫州

(a) 多摩川, (b) 越辺川

表-2 対象河川の河床勾配・流域面積と各砂礫州の冠水頻度

河川名	砂礫州名	河床勾配	流域面積 (km ²)	冠水頻度 (回/年)
多摩川	T1	1/837	1,196	8.1
	T2			7.6
越辺川	O1	1/320	93	7
	O2			7.1

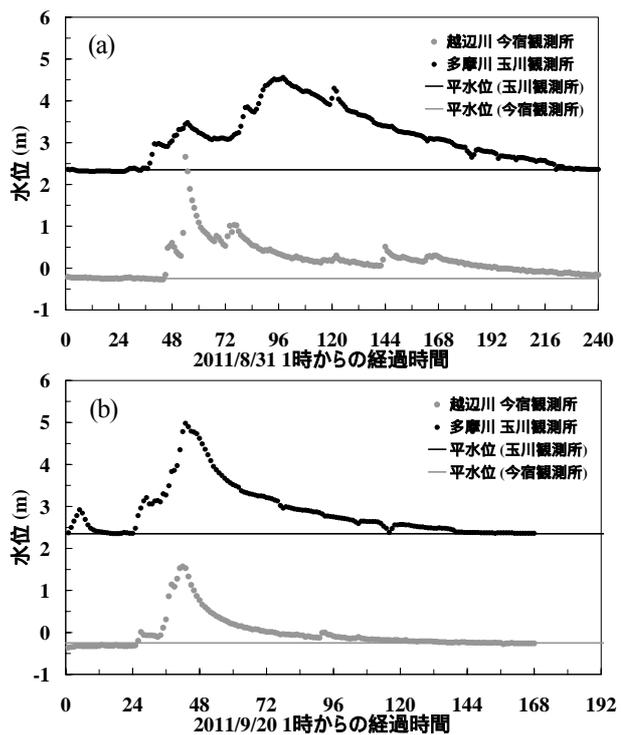


図-4 台風12, 15号時の今宿水位・流量観測所(越辺川), 玉川水位・流量観測所(多摩川)における水位の時間変化 (a) 台風12号, (b) 台風15号

所, 越辺川のO1地点では53箇所, O2地点では33箇所において河床材料調査を実施した。粒度分布を得る際には, 50cm四方の方形枠を用いて河床材料の画像を撮影し, 面積格子法によって粒度分布を把握した。面積格子法が適用できないような細かい河床材料の場合, ふるい分け

試験を実施した．さらに，洪水後に各砂礫州において，細粒成分の堆積範囲の調査を実施した．洪水後の堆積の有無については，各調査ポイントにおいて上記の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判断した．また，式(5)で用いる植生繁茂の有無を分ける粒径(d)は，対象洪水前に各砂礫州において植生繁茂の有無に応じて，それぞれ複数地点の河床材料を採取して把握した．上記のデータを前節の流れの数値計算の計算条件に反映させた．

3. 結果および考察

(1) 植生の有無を分ける細粒成分の粒径 d の把握

図-5 は採取した河床材料の粒径と植生繁茂割合の関係を示している．この図より，越辺川，多摩川の各砂礫州ともに 0.5 mm 以下の粒径が存在する箇所において植生の繁茂割合が高く，それ以上であると繁茂割合が急激に減少していた．渡辺ら¹⁴⁾は千曲川での調査結果から 2 mm 以下の細粒成分が堆積している場所では植生の急速な発達を確認されたことを報告しており，本研究の対象河川でも同様のことが確認できた．このことから式(5)で用いる植生繁茂の有無を分ける粒径(d)は 0.5 mm と設定した．

(2) 洪水流解析の検証

図-6 に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台風 12 号，15 号時の解析水位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，SDI(細粒成分の堆積時間)や WOI(植物周辺のせん断力)を算出した．

(3) 各砂礫州における植生流失実績をもとにした流失評価指標 WOI の妥当性

各砂礫州を対象とした数値解析結果より得られた底面せん断力をもとに WOI を算出し，流失実績と比較した結果を図-7 に示す．対象洪水時に実際に流失された草本の大部分は WOI が 1 を超えた領域に集中しており，残存したほとんどの草本は WOI が 1 を下回る領域に分類されている．しかしながら，T1,T2(図-7(a))では，WOI が 1 を上回る領域にプロットされながらも実際には残存していた草本もあった．O1,O2(図-7(b))でも T1,T2 と同様，WOI > 1 で残存する草本が見られた．このような草本の多くは多年生草本(T1,T2 では多くがツルヨシ，オギ，O1,O2 ではツルヨシ)であり，田中ら¹³⁾の報告でもツルヨシ群落の流失限界となる WOI は 1.3-1.8 程度と高めの値を示すとされていることから，本研究でも同様の限界値となること

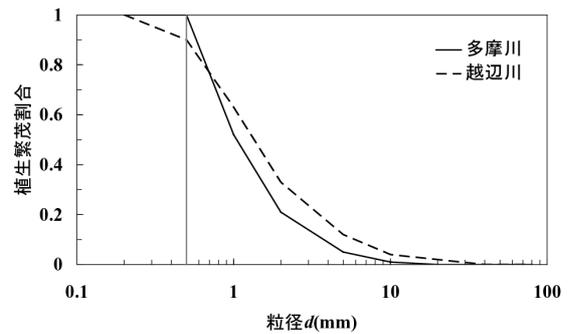


図-5 対象砂礫州での植生繁茂の有無と粒径 d の関係

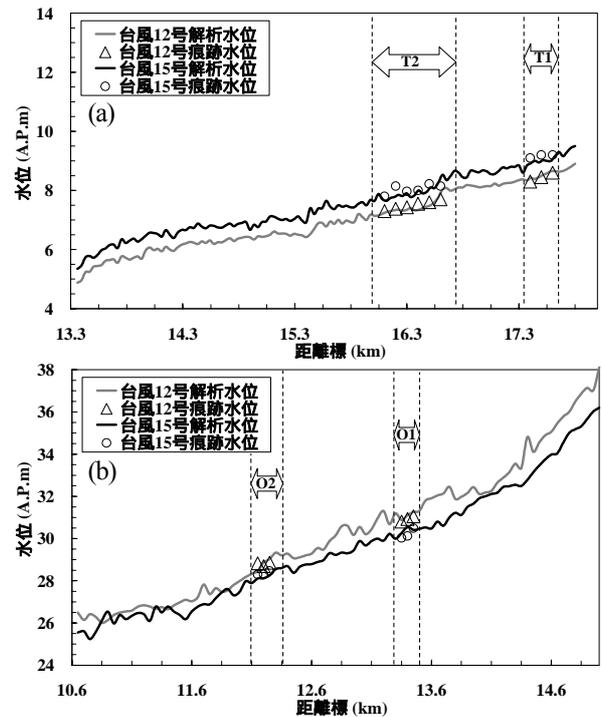


図-6 対象洪水時の各河川での解析水位と痕跡水位の比較

(a) 多摩川, (b) 越辺川

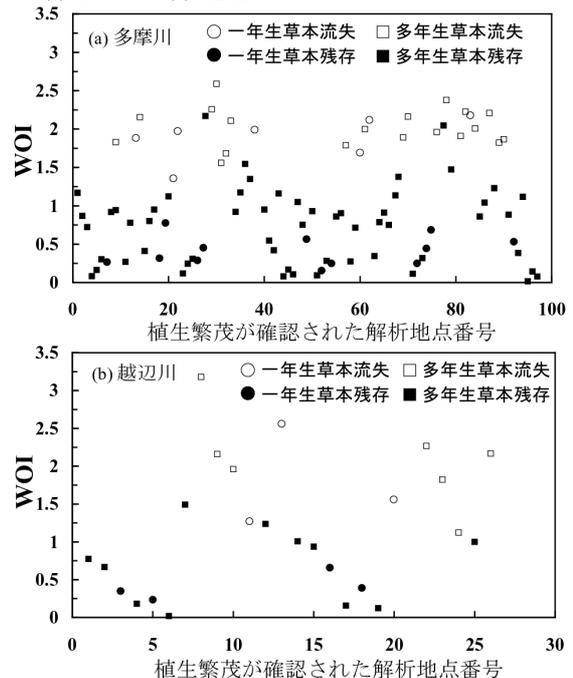


図-7 各砂礫州における草本の流失実績と WOI との比較

(a) 多摩川, (b) 越辺川

が確認できた．一方，一年生草本に関しては流失限界となる WOI は 0.6 程度¹³⁾と報告されているが，本研究では対象とした洪水が比較的大規模であったこともあり，流失した一年生草本は WOI が 1 よりも大きく，限界値を判断することはできなかった．植物の根圏の深さ等の不確定要素もあり，流失限界となる WOI の値をより正確に評価するためには，さらなる検討が必要であるが，本検討では草本の流失を判断する WOI の値 β を 1 と設定した．

(3) 各砂礫州における堆積有無の実績にもとづく土砂堆積指標 SDI の妥当性

図-8 は，対象洪水の数値計算から得られた SDI の解析結果と現地調査から把握した細粒成分の堆積の有無との関係を示したものである．これらの図より，多摩川，越辺川の両河川において SDI の値が大きくなるほど細粒成分の堆積が発生している地点が多く，逆に SDI の値が小さいほど堆積が発生していない地点が多い傾向が確認できる．このことより，本研究で定義した SDI は堆積の有無の評価に適した指標である可能性が高いことがわかる．また，多摩川の結果(図 8-(a))より， SDI の値が 0.7-0.8 程度で堆積の有無が分かれていることが分かる．一方，越辺川については，砂礫州の大きさの関係上，多摩川と比較して数がやや少ないものの SDI の値が概ね 1 程度で堆積の有無が分かれていることが分かる．このように，河川によって堆積が生じる限界となる SDI の値が異なった原因としては，前項で述べた洪水減衰期の水位ハイドロが関係していると考えられる．今回対象とした 2 河川では，河道縦断勾配・流域面積が大きく異なっており，実際に台風 12, 15 号による洪水ハイドロ(図-4)を確認すると，急な河道縦断勾配，小さな流域面積の越辺川の方が多摩川に比べ，減衰期における水位の急激な低下，平水位に戻るまでの時間が短いことが確認されている．このことから，細粒成分の堆積が生じづらい越辺川では，堆積が生じる限界となる SDI が 1 程度であるのに対して，堆積が生じやすい多摩川では 0.7-0.8 という小さな SDI でも堆積している地点が存在していたと考えられる．上述のように堆積が生じる限界となる SDI の値をより正確に評価するためには，河道縦断勾配，流域面積等が違う河川を対象とすることに加え，異なる洪水パターン(本研究では比較的単純な一峰性の洪水を対象とした)を対象としたさらなる検討が必要であるが，本検討では堆積の有無を判断する SDI の値 α を下限値である 0.7 と設定した．

(4) 各砂礫州における WOI と SDI による植生繁茂領域の把握の可能性

図-9 は，多摩川，越辺川の解析における SDI と WOI の関係を示したものであり，図中の判例はそれぞれの解析地点における植生繁茂の有無を示している．この結果から，多摩川(図-9(a))においては SDI の値が 0.7 付近を

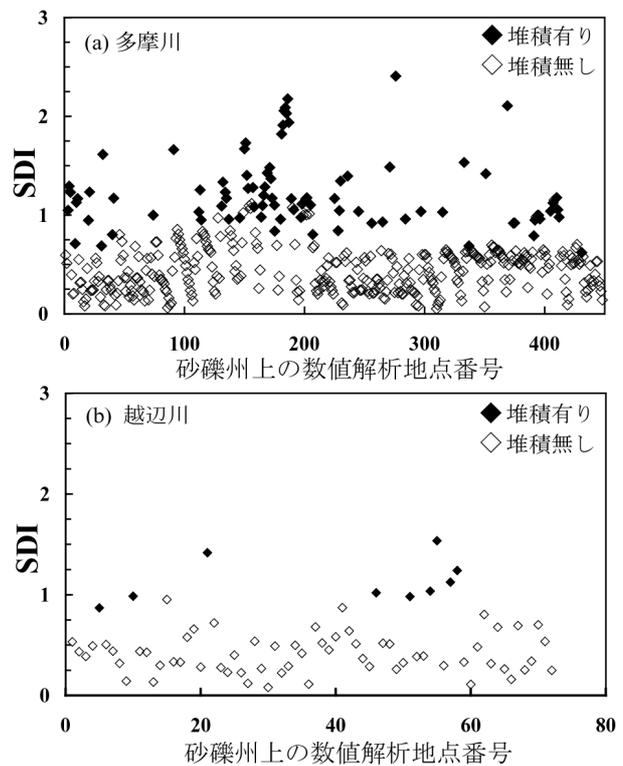


図-8 各砂礫州における細粒成分の堆積の有無と SDI の解析値との比較 (a) 多摩川, (b) 越辺川

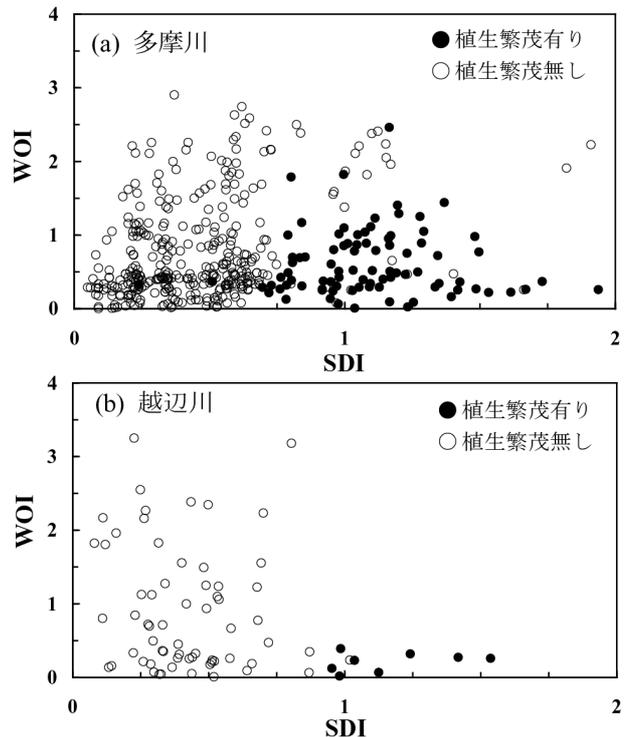


図-9 各砂礫州における SDI , WOI の解析値と植生繁茂の有無との関係 (a) 多摩川, (b) 越辺川

境界として植生繁茂の有無が概ね分かれていることがわかる．さらに， WOI の値が大きく SDI の値が小さい領域 (Region C) では植生が繁茂しておらず 逆に WOI の値が小さく SDI の値が大きい領域 (Region B) では植生繁茂が多く

確認できることが分かる。また、 WOI 、 SDI の値が大きい領域(Region D)では、 WOI が1付近においては植生の繁茂が見られるものの、 WOI が大きくなるにつれて植生の繁茂しづらい状況となっていることがわかる。一方、越辺川の場合(図-9(b))、多摩川と比較して SDI が1以上のデータが少ないものの、 SDI の値が1程度を境に植生繁茂の有無を区分できることがわかる。このことから、細粒成分の堆積の発生しにくい越辺川では、 SDI の値が大きく(細粒成分が堆積している時間が長くなる)ならないと堆積が発生しない状況であることが考えられる。しかし、植生の繁茂に関しては WOI の値が大きく SDI の値が小さい領域(Region C)では植生が繁茂しにくく、 WOI の値が小さく SDI の値が大きい領域(Region B)では、植生が繁茂しやすくなっていることから、概ね多摩川と同じ傾向が確認できた。ただし、Region C($SDI > 1$, $WOI > 1$)では、堆積は生じるものの、植物の流失も生じることから、植物は存在しないことが予想された。しかしながら、多摩川でRegion Cに分類された数地点では繁茂が確認された。この点を改善するためには、多年生草本の流失限界となる WOI を把握する必要がある。また、本研究におけるRegion A($WOI < 1$, $SDI < 1$)は、植生が流失するほどの底面せん断力は作用しないものの、細粒成分も堆積しないことから、植物が繁茂しない領域と定義されている。実際に、今回対象とした2河川においては、多摩川で数地点植生の繁茂が確認されるものの、Region Aでは植生が繁茂していないことが評価できている。著者らが提案した従来の評価方法^{9,13)}では、Region Aは $WOI < 1$ であることから植物が流失しない(残存する)ことを意味するが、本研究で提案した SDI を用いることで細粒成分の堆積とそれによる植物の繁茂の有無をより正確に評価できるという利点があると考えられる。

今回、河道縦断勾配・流域面積が大きく異なる河川として多摩川、越辺川を選定した。しかし、それぞれ SDI が0.7、1.0とそれほど大きく変わらない値で土砂堆積、植生繁茂の有無を区分できたことから、 SDI は様々な河川に適用できる可能性が示唆された。

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。土砂堆積指標 SDI を用いることで、砂礫州上における細粒成分の堆積範囲を示すことができる可能性がある。土砂堆積指標 SDI と流失に関する指標 WOI を組み合わせることで、樹林化初期段階の砂礫州上の植生が繁茂しやすい領域とそうでない領域を分類することができ、植生の繁茂状況を簡易的に判定することができるようになると思われる。

今後、検討対象砂礫州を増やし、今回得られた知見に一般性があるかを確認する必要がある。

謝辞:国土交通省関東地方整備局、荒川上流河川事務所および京浜河川事務所には多数の資料を提供して頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 重枝未玲, 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) Mackawa, 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) 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実験, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 11) 橋本一郎: 水理学 (第7章), 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) 田中規夫, 八木澤順治, 菊次祐, 佐藤貴紀, 福岡捷二: 砂礫州における生物多様度と相関性の高い洪水攪乱指標について, 河川技術論文集, 第17巻, pp.227-232, 2011.
- 14) 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.

(2012.4.5 受付)