

# 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

INDEX FOR EXPRESSING VEGETATION BREAKAGE AND WASHOUT BY FLOOD  
DISTURBANCE AND HIGHLY CORRELATED WITH BIODIVERSITY ON GRAVEL-BED BARS

田中規夫<sup>1</sup>・八木澤順治<sup>2</sup>・菊次祐<sup>3</sup>・佐藤貴紀<sup>4</sup>・福岡捷二<sup>5</sup>

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Yu KIKUJI, Takanori SATO and Shouji FUKUOKA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 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)

<sup>3</sup>非会員 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)

<sup>4</sup>非会員 埼玉大学 工学部 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

<sup>5</sup>フェロー会員 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 elucidating the relationship between flood disturbance and biodiversity of vegetation in gravel bed bars, Breakage or Overturning Index (BOI) and Wash-Out Index (WOI) were derived considering the difference of vegetation breaking phenomena due to floods, i.e. trunk breakage or overturning, and wash-out of trees or grass, respectively. Coupling the two indices, the method for classifying the river habitat into five, not tree breaking and not washout (Region A), tree breaking and not washout (Region B), not tree breaking and washout (annual grass) (Region C), tree breaking and washout (annual grass) (Region D), and washout of all vegetation (Region E), is proposed. The condition at which WOI is larger than 0.5, and WOI is less than one, is correlated with the Shannon-Wiener index at three gravel-bed bars in the Arakawa River, Japan. Especially, when BOI is larger than one, the biodiversity is increased. For Region A and E, the trend is assumed to be affected by the duration after flood. The proposed index for Region D has possibilities to express middle class disturbance that is closely related to the biodiversity at the habitat.

**Key Words :** middle class flood disturbance, biodiversity, Breakage or Overturning Index (BOI), Wash Out Index (WOI)

## 1. はじめに

近年、洪水攪乱頻度の減少や強度の低下などにより、河道内に樹木が繁茂する問題（河道内樹林化問題）が生じており、流下能力のみならず、生物の多様度にも影響を与えている。生物多様性は攪乱の強度、頻度、攪乱からの経過時間によって大きく変化し、中規模の攪乱において生物多様性が最大になることが知られている（中規模攪乱仮説）<sup>1)</sup>。そのため、適度な洪水攪乱を誘発し河川環境を保全するという観点から、樹林化防止対策として高水敷の切り下げが行なわれるなど、攪乱の重要性が認識されている。しかしながら、「河川洪水としての中規模攪乱」は、既存の生物多様性の指標<sup>2)</sup>では十分に表現されていない。また、中規模攪乱仮説が、河川において適用が可能なのか、またどのように適用するのがよいかについての知見はほとんどない。

洪水攪乱と植物動態の関係を表現するためには河道内に繁茂した植物の破壊の規模を評価する必要がある。し

かし、従来の河道内に繁茂した植生の洪水による破壊に関する評価手法では、流失による裸地化のみを評価している場合が多い<sup>3, 4)</sup>。実際には、洪水によって破断・倒伏された樹木(特にハリエンジュやヤナギ類)は、破壊されながらも再生長することで、破壊前に比べて繁茂域や繁茂密度を拡大させる場合もある<sup>5, 6)</sup>。そのため、様々な破壊形態を考慮した上で、それらが生物多様性とどのような関係にあるかを把握することが重要である。上記のような関係を把握し、河川空間における生物の多様度を高める洪水攪乱の規模・頻度、洪水攪乱からの経過時間を明らかにすることが重要である。そうした知見は、河川改修における治水と環境の調和という観点から、流下能力を確保しつつ生物多様度を向上させる河道断面形状の設計手法の確立に有用であると考えられる。

そこで、本研究では樹木の破壊、樹木・草本の流失という異なる破壊形態が生じる確率の期待値を表す洪水攪乱指標を導出した上で、生物多様度と相関性の高い洪水攪乱形態についての知見を得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洪水攪乱指標 BOI・WOI の定義

本研究では洪水時の流況を再現するため、田中ら<sup>7)</sup>と同様に一般座標系を用いた平面流計算法を用いた。数値計算では荒川の対象砂礫州に繁茂する植生に作用する抗力モーメントおよび植生繁茂地点における底面せん断力を求めた。それらを用いて樹木の破壊指標 BOI と草本・木の流失指標 WOI をそれぞれ以下の式より算定した。

$$BOI = \frac{d_{BH-max}}{d_{BH}} \quad (1)$$

$$WOI = \frac{\tau_{*90}}{\tau_{*c90}} \quad (2)$$

ここに、 $d_{BH}$  はある樹木の胸高直径(cm)、 $d_{BH-max}$  は破断・倒伏限界式<sup>8)</sup>あるいは転倒限界式<sup>9)</sup>より算定された、ある抗力モーメントで破壊可能な胸高直径  $d_{BH-max}$  である。また、 $\tau_{*90}$ 、 $\tau_{*c90}$  はそれぞれ植物繁茂地点における河床材料の90%粒径の無次元掃流力、無次元限界掃流力である。 $\tau_{*90}$ 、 $\tau_{*c90}$ <sup>10)</sup>はそれぞれ、以下の式より算出した。

$$\tau_{*90} = \frac{H_{max} I_e}{S d_{90}} \quad (3)$$

$$\frac{\tau_{*c90}}{\tau_{*c50}} = \left[ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{90}/d_{50})} \right]^2 \quad (4)$$

ここに、 $H_{max}$ 、 $I_e$ 、 $S$  はそれぞれ、樹木が繁茂していた地点の最大水深(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)、 $\tau_{*c50}$  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。

算出された BOI、WOI の値をもとに、樹木と草本に関する破壊形態を図-1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-1における木本類の破断・倒伏を判断する BOI の値  $\alpha$ 、樹木あるいは多年生草本の流失を判断する WOI の値  $\beta$ 、一年生草本の流失を判断する WOI の値  $\gamma$ 、については流れの数値計算より得られる BOI、WOI の計算値と洪水時における破壊や流失の実績をもとに決定する。

### (2) 研究対象砂礫州および観測項目概要

荒川・烏川における複数砂礫州(図-2(a)、(b))において、洪水前後に砂礫州上の草本・木本分布調査を実施し、破壊・流失状況を把握した。さらに、分布調査時には木本については各個体の樹高、胸高直径を把握し、草本については、群落単位で平均的な草丈、茎直径、密度を把握した。また、荒川の熊谷大橋上流左岸(KL)、熊谷大橋下流右岸(KR)、荒川大橋上流右岸(AR)の砂礫州において、

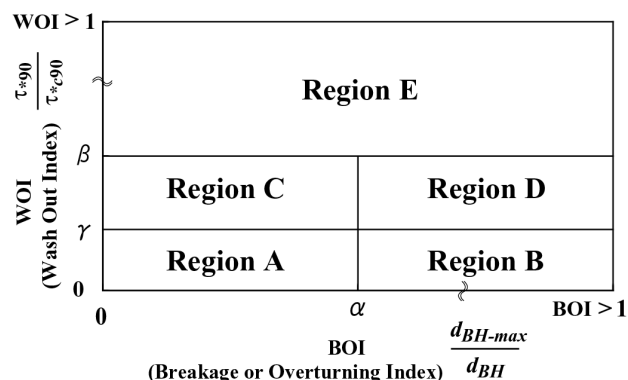


図-1 本研究で提案する植物破壊形態分類図

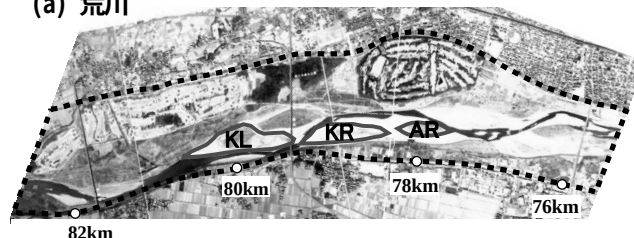
$d_{BH}$ 、 $d_{BH-max}$  はそれぞれ、ある時点における樹木の胸高直径(cm)、任意の洪水によって破壊可能な最大の胸高直径(cm)、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  はそれぞれ、樹木の破断・倒伏限界となる BOI の値、樹木および多年生草本の流失限界となる WOI の値、一年生草本の流失限界となる WOI の値を意味する(それぞれの値は後に詳述する)。Region A～E の定義は表-1を参照

表-1 植物破壊形態分類図の各領域の定義

BOI は破断・倒伏、転倒判定指標( $=d_{BH-max}/d_{BH}$ )、WOI は流失評価指標( $=\tau_{*90}/\tau_{*c90}$ )を示す

| Region | BOI           | WOI                    | 定義                                                                  |
|--------|---------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| A      | $< \alpha$    | $< \gamma$             | 樹木、一年生・多年生草本ともに破壊が生じない領域                                            |
| B      | $\geq \alpha$ | $< \gamma$             | 樹木 : 破断・倒伏は生じるが、流失は生じない領域<br>一年生草本 : 流失が生じない領域<br>多年生草本 : 流失が生じない領域 |
| C      | $< \alpha$    | $\geq \gamma, < \beta$ | 樹木 : 破断・倒伏、流失も生じない領域<br>一年生草本 : 流失が生じる領域<br>多年生草本 : 流失が生じない領域       |
| D      | $\geq \alpha$ | $\geq \gamma, < \beta$ | 樹木 : 破断・倒伏は生じるが、流失は生じない領域<br>一年生草本 : 流失が生じる領域<br>多年生草本 : 流失が生じない領域  |
| E      | —             | $\geq \beta$           | 樹木、一年生・多年生草本ともに流失が生じる領域                                             |

(a) 荒川



(b) 烏川



図-2 対象河川の航空写真と対象砂礫州

(a) 荒川、(b) 烏川

環境情報図(2006 年時に取得された植生群落分布の資料)の情報確認を行った。また、荒川のKL 地点では30箇所、

KR 地点では 18 箇所、AR 地点では 20 箇所、烏川の K1 地点では 6 箇所、K2 地点では 10 箇所、K3 地点では 8 箇所において河床材料調査を実施し、 $d_{50}$ 、 $d_{90}$  を把握した。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。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。なお、烏川の観測結果は、一年生草本の流失限界となる  $\gamma$  の把握に活用した。

### (3) 洪水攪乱指標 $I_i$ の評価方法

研究背景でも述べたように、河川空間における生物の多様度と洪水攪乱との関係を把握するためには、洪水攪乱規模、洪水攪乱頻度、洪水からの経過時間を考慮した洪水攪乱指標が必要であると考えられる。しかしながら、本研究では、ある時期の植生分布(河川環境基図(2006 年に取得))のみを参考に検討を行なったため、洪水からの経過時間を考慮することは難しい。従って、洪水攪乱指標  $I_i$  は以下の式に示すような洪水攪乱規模・頻度の影響を考慮した期待値として定義した。

$$I_i = \int_{1/40}^{1/2} \frac{A_i(P)}{A} dP \quad (5)$$

ここに、 $A_i$ ：対象砂礫州において図-1 で定義される領域  $i$  に分類される総面積、 $A$ ：各砂礫州の全面積、 $T$ ：確率洪水年（本研究では  $T=2, 3, 5, 10, 20, 25, 40$  とした）、 $P=1/T$  である。本研究で定義した洪水攪乱指標  $I_i$  の算出には、まず、ある砂礫州において、洪水規模に応じてどのような植生の破壊パターンが卓越するかを把握する。さらに、それを確率洪水年ごとに把握し期待値にすることで洪水規模・頻度を考慮した形で、どのような植生破壊パターンが卓越する砂礫州かを判断することが可能となる。

### (4) 砂礫州の生物多様度の評価方法

藪化・樹林化した砂礫州もあることから植物の個体数の把握は困難と判断し、本研究では、水辺の国勢調査の活用を考慮した。すなわち、従来一般的に用いられる生物種数を考慮した多様度(例えば、Simpson 指数<sup>11)</sup>や Shannon-Wiener の多様度指数<sup>12)</sup>など)ではなく、各植生群落の面積的多様度を用いた。なお、面積的多様度が高い場合には生物の多様度も高くなること<sup>13)</sup>が報告されているため、以後、本研究では植生の面積的多様度を生物多様度と定義する。具体的には、河川水辺の国勢調査をもとに作成された河川環境基図を用いて、砂礫州上の植生群落ごとに面積を算出し、面積的多様度を表す指標  $BI$  (Biodiversity Index)を以下の式(Shannon-Wiener の多様度指数と同様の式形)で定義した。

$$BI = - \sum_{i=1}^S \frac{A_i}{A} \log \frac{A_i}{A} \quad (6)$$

ここに、 $A$ ：砂礫州の全面積、 $A_i$ ：砂礫州上の各植生群

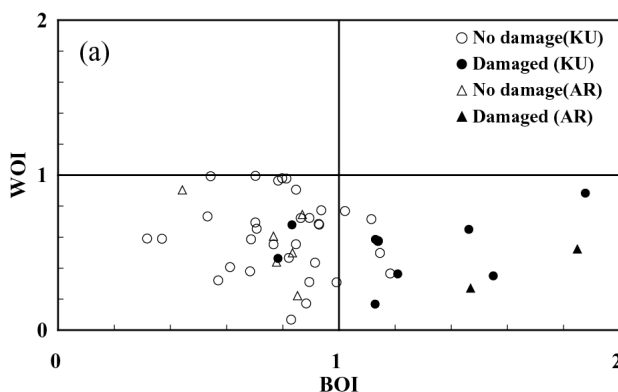


図-3 樹木の破断・倒伏限界 BOI の値  $\alpha$  の把握

(凡例の Not damaged は 2007 年洪水時に破断・倒伏破壊が生じなかった樹木、Damaged は破壊が生じた樹木を示す)

落(i)の面積、 $S$ ：砂礫州上の植生群落総数である。

以上より、本研究では、式(5)で定義した 5 分類の洪水攪乱指標  $I_i$  と式(6)で定義した生物多様度  $BI$  の相関関係を KL, KR, AR の砂礫州において把握した。

## 3. 試験結果および考察

### (1) 洪水流解析の検証

本研究で用いた平面 2 次元流れの数値解析モデルは、田中ら<sup>8)</sup>が本研究対象の 2007 年洪水で検証済みである。本研究ではその解析結果をもとに、BOI(樹木に作用する抗力モーメント)や WOI(植物周辺のせん断力)を算出した。

### (2) 荒川・多摩川・烏川における植生破壊実績をもとにした BOI, WOI の限界値の妥当性

AR, KL を対象とした数値解析結果より得られた抗力モーメントをもとに BOI を算出し、破断・倒伏・転倒実績と比較した結果を図-3 に示す。対象洪水時に実際に破断・倒伏・転倒された樹木の大部分は BOI が 1 を超えた領域に集中しており、残存したほとんどの樹木は BOI が 1 を下回る領域に分類されている。しかしながら、KL では BOI が 1 を下回る領域にプロットされながらも実際には倒伏していた樹木もあった。対象洪水後の現地観測より、KL や AR で残存していた樹木には流下物の捕捉が少なかったが、BOI が 1 を下回る領域にプロットされながらも実際には倒伏していた樹木は、流下物を大量に捕捉して倒伏していた。樹木が捕捉した流下物が付加抵抗となったため、洪水中に実際に樹木に作用した抗力モーメントを過小評価したことが、BOI が 1 を下回る領域にプロットされた原因であると考えられる。上記のように、洪水時の付加抗力によって多少ばらつきは生じるものの、本研究では BOI=1 を破断・倒伏の限界値  $\alpha$  として用いた。

WOI については、荒川・烏川ののべ 5 地点の砂礫州のデータを用いて検証を行なった。図-4(a)に、荒川における流失評価指標 WOI の検討結果を示す。図-4(a)に示す

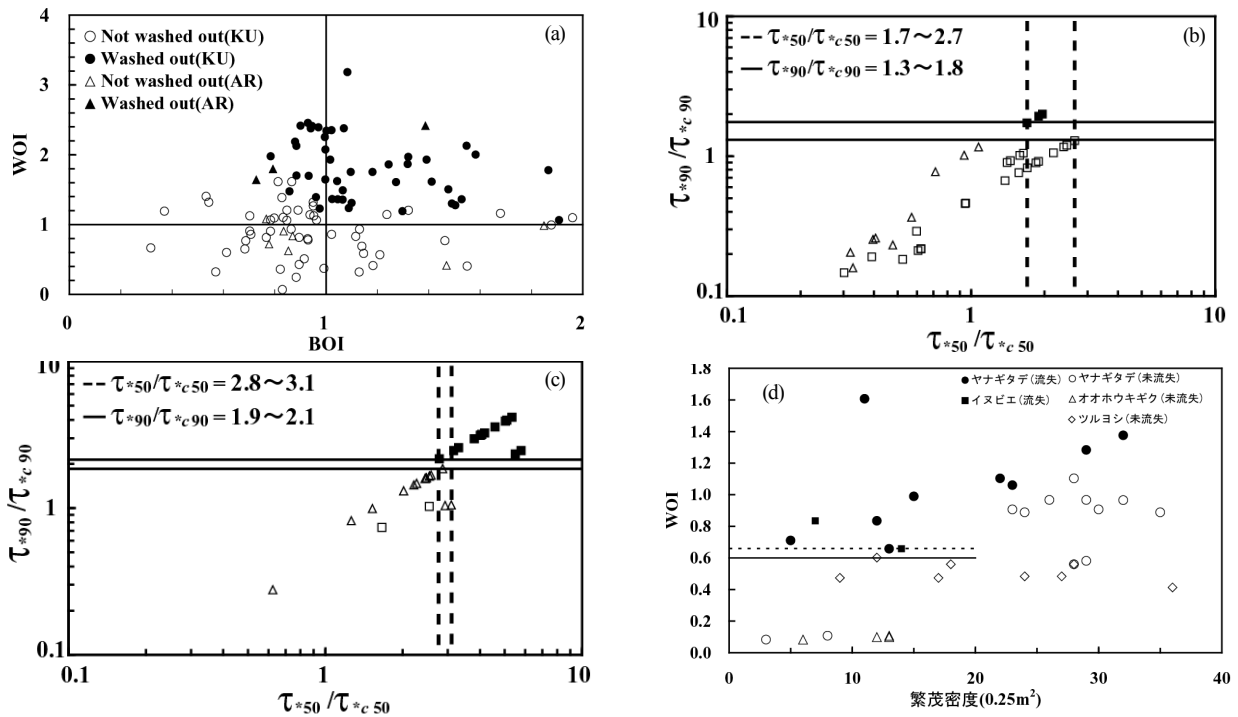


図-4 樹木・草本類の流失限界 WOI の値  $\beta$ ,  $\gamma$  の検証

(a) 荒川における樹木の流失実績と解析値の比較, 荒川における多年生草本シナダレスズメガヤ(b)とツルヨシ(群落)(c)の流失実績と解析値の比較, (d) 烏川における一年生草本の流失実績と解析値の比較 (実線は繁茂密度が 20 shoots/m<sup>2</sup> における未流失の一年生草本の最大値, 点線は流失した一年生草本の最小値)

荒川の検討結果においては, 流失した樹木は全て WOI が 1 を超えた領域で流失している一方で, 流失しなかった樹木は WOI が 1 を上回る領域にも存在する. すなわち, 流失限界となる WOI の値  $\beta$  は 1-1.6 と幅を有する.

図-4(b),(c)はそれぞれ, 荒川の砂礫州に繁茂していた多年生草本, シナダレスズメガヤ, ツルヨシの流失限界となる WOI を示している(横軸は 50%粒径の  $\tau_*$  と  $\tau_{*c}$  の比). シナダレスズメガヤ(WOI=1.3 - 1.8)やツルヨシ(WOI=1.9 - 2.1)も樹木と同様に WOI(縦軸の値)に幅を持ち, さらに, その限界値は樹木と同様かそれ以上であった. この原因として, 樹木は多年生草本に比べ洪水時に作用する抗力モーメントがはるかに大きく, 流失を助長するためと考えられる. また, 植物周辺の洗掘の進行状況や, 植物の根圏の深さ等の不確定要素も関係する. WOI 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, 本検討では樹木あるいは多年生草本の流失を判断する WOI の値  $\beta$  を下限値の 1 と設定した.

また, 一年生草本の流失を評価する WOI( $\gamma$ )は, 烏川においては, 実際の一年生草本の流失実績から, 荒川においては河床材料の移動限界の観点から検討した.

烏川において, 一年生草本の流失限界となる 90%粒径の移動限界(WOI( $\gamma$ ))を調べた(図-4(d)). 繁茂密度が大きくなると植物周辺の実際のせん断力減少を水深平均の方程式の解析では正確には評価できず, せん断力がやや過大になるため, 流失限界となる WOI の値が上昇する<sup>14)</sup>. そこで本研究では, 20(shoots/0.25m<sup>2</sup>)以下の小さい密度の

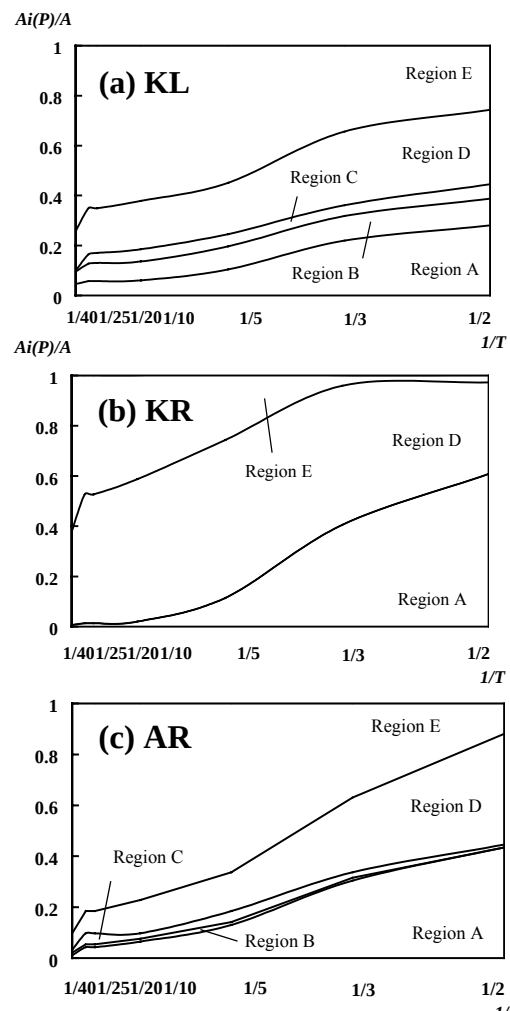


図-5 荒川 3 砂礫州における異なる確率洪水年ごとの Region A,B,C,D,E が占める面積割合の変化 (a) KL, (b) KR, (c) AR

範囲で流失限界を判断した。その結果、WOI が 0.6 程度が流失限界値となった。さらに、複数の一年生草本について 50% 粒径の移動限界(WOI<sub>50</sub>)と流失状況を比較したところ、概ね WOI<sub>50</sub>=1 付近に対応していた。根圏の深い樹木や多年生草本の流失は、90% 粒径の移動と関係が深い。一方、一年生草本はそれらと比較して根圏がはるかに浅いため、50% 粒径の移動でも判断可能と考えられる。

一方、荒川の 3 砂礫州において、WOI<sub>50</sub> と WOI の関係を調べたところ、平均して WOI が 0.5 の時に WOI<sub>50</sub> が 1 となる関係が見られた。以上より、烏川・荒川では  $\gamma$  は 0.5-0.6 と幅を持つ。今回の検討では下限値かつ荒川の値である 0.5 とした。

### (3) 各砂礫州(KL, KR, AR)における洪水攪乱指標 $I_i$

各砂礫州における洪水攪乱指標(Region A から E の期待値)を図-5 に示す。どの砂礫州においても Region B(WOI が 0.5 を超えずに樹木が折れる(または転倒する))の値は小さく、現象として生じづらいことがわかる。一方で、樹木が折れるような流れが生じている時は、WOI が 0.5 を超える場合が多いと考えられることから、Region D や Region E が占める割合が多い傾向にある。また、3 砂礫州の中で最も平水位からの比高差が大きい KR では、Region A の領域が KL, AR に比べて大きい。これは、比高の大きい地点では樹林化が進行しやすいことを示しており、現地の状況とも一致する。また、KL や AR は Region A, Region E の領域がともに大きく、一部では樹木が侵入・定着しやすい状況であるものの、砂礫州の大部分において樹林化が進行しづらい特性も有している。実際の AR や KL の状況として、砂礫州のごく一部(主に比高差が高い砂礫州の頂部)で樹木の繁茂が進行していること、それ以外の周辺部では砂礫の更新が起これ、礫床や一年生草本などの小型草本が繁茂している場所が維持されていることなどから、洪水攪乱の領域分類図は実際の状況を概ね表現できていると考えられる。

このように、同分類図は、ある砂礫州が、5 種類のうちどのようなタイプの攪乱を受けやすいかを洪水攪乱の規模、頻度を考慮して把握することができる。

### (4) 各砂礫州における洪水攪乱指標 $I_i$ と生物多様度 $BI$ の関係

図-5 において、解析対象とした洪水確率年の範囲である  $T=1/2$  から  $1/40$  までの範囲について、各 Region の面積比を積分する(式(5)) ことにより、洪水攪乱指標  $I_i$  を算出した。この洪水攪乱指標  $I_i$  と砂礫州の生物多様度を表す指標  $BI$ (式(6)より算出)の関係を図-6 に示す。図-6(a) の Region A および図-6(d) の Region D においては、洪水攪乱指標  $I_a$  および  $I_d$  の増加に対して、生物多様度指数  $BI$  も増加する傾向であった。また、Region B や C (図-6(b), (c)) においては洪水攪乱指数  $I_b$  および  $I_c$  が大きく

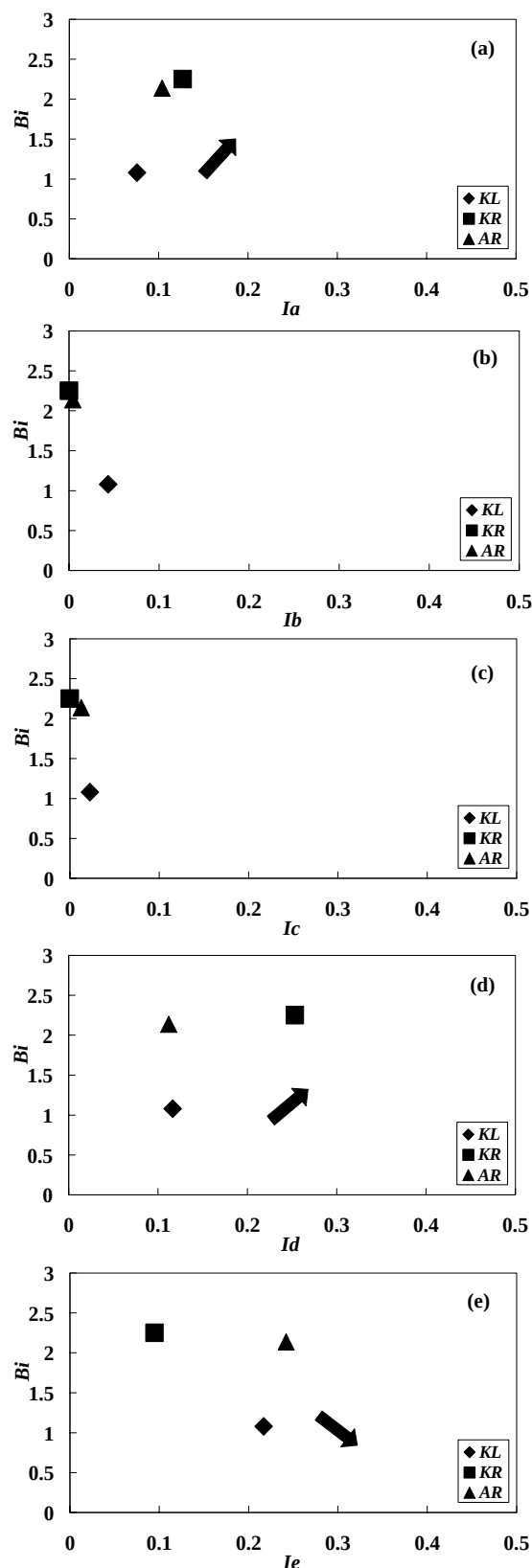


図-6 荒川3砂礫州における各領域の洪水攪乱指標  $I_i$  と生物多様度  $BI$  の関係 (a) Region A, (b) Region B, (c) Region C, (d) Region D, (e) Region E

なると生物多様度指数  $BI$  は減少するという傾向が見られた。また、砂礫州上の植物が流失する Region E(最も攪乱を受ける領域)では、 $I_e$ が増加すると  $BI$ が減少するという Region A や D とは逆の傾向が見られた(図-6(e))。

KR と AR では  $I_b$  や  $I_c$  の値が 0 に近い。これは、Region B、Region C に該当する状況が砂礫州上で生じづらいためである。 $I_b$  や  $I_c$  の増加に対する  $BI$  の減少傾向も KL のみで出ているものである。そこで、以下は広い領域をもつ Region A、D、E について考察する。はじめに、 $I_d$  と  $BI$  に正の相関が見られた理由は以下のように考える。Region D では一年生草本は流失、樹木は破断・倒伏が生じるが、多年生草本は残存する領域であり、そのような攪乱が生じやすい砂礫州では様々な種の植生が繁茂できる可能性が高くなると考えられる。また、 $I_d$  に関しては、最も攪乱を受けづらい領域である Region A が多いため、遷移の過程で優先種が場を占有することで多様度は低下する(負の相関が見られる)と予想された。しかし、予想に反して  $BI$  との間に正の相関が見られた。今回検討を実施した荒川の 3 砂礫州の Region A に該当する箇所(主に砂礫州の頂部)で樹木が侵入し始めたのは、1999 年(1/40 確率洪水)あるいは 2001 年(1/25 確率洪水)以降であることを当該地点における航空写真から確認している。また、本研究で  $BI$  の算出に用いた植物の分布状況を示す資料は 2006 年時点に取得されたものである。このように樹木が侵入してから、わずか 5.6 年では遷移が途中段階にあったため、Region A に該当する箇所であっても、植生の多様度が維持された状態であったと考えられる。今回は、砂礫州の植生分布を決めるような大洪水からの経過年数が植生の多様度に与える影響は考慮していない。そのため、 $I_d$  に関しては予想と異なる結果が得られたものと考えられる。また、 $I_c$  と  $BI$  との間に見られた負の相関は Region A と同様に、大洪水からの経過年数が影響したと考えられる。

今回の荒川における検討では、 $I_d$  の値が大きい(確率洪水年が 1/2 から 1/40 の洪水において、Region D に該当する領域が多い砂礫州ほど、生物多様度  $BI$  が大きくなる傾向が見られた。本研究より、生物多様度を向上させるには Region D を増やすことが有効である可能性がある。

今後、栄養塩状態、土砂の粒径の異なる砂礫州を対象に加え、洪水攪乱以外の与える影響も含めて、今回得られた知見を一般化していく必要がある。そうすることで、河道設計に活用可能な手法を構築できる可能性がある。

#### 4. 結論

本研究では、樹木の破壊、樹木・草本の流失という異なる攪乱形態がどのような確率で生じるかという期待値を表す洪水攪乱指標  $I_i$  を荒川の 3 つの砂礫州で算出し、生物多様度  $BI$  との相関を把握した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①本研究で提案した洪水攪乱指標  $I_i$  を用いることによって、実際の砂礫州における植物の繁茂分布の特徴を概ね表現可能である。
- ②得られた各領域の  $I_i$  と実際の植物分布から得られる  $BI$

との関係を把握したところ、荒川の 3 砂礫州では、 $I_d$  が大きい砂礫州(Region D が占める面積が大きい砂礫州)は  $BI$  も大きくなることがわかった。

**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高崎河川国道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) Connell, J. H. : Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs New Series, Vol.199 No. 4335, pp.1302-1310, 1978.
- 2) 森本淳子：生態系レベルの生物多様性—評価手法の確立における課題：ランドスケープ研究, 67 (2), pp.183-189, 2003.
- 3) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No.747/II-65, pp.41-60, 2003.
- 4) Egger, E., Benjankar, R., Davis, L. and Jorde, K. : Simulated effects of dam operation and water diversion on riparian vegetation of the lower bois river IDAHO, USA, 32<sup>nd</sup> IAHR congress(CD-ROM), 2007.
- 5) 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, 2000.
- 6) 田中規夫, 八木澤順治, 佐々木寧, 福岡捷二：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.649-654, 2008.
- 7) 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.
- 8) 田中規夫, 八木澤順治, 青木信哉, 福岡捷二：河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化, 河川技術論文集, pp.177-182, 第 13 巻, 2007.
- 9) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.147-171, 1994.
- 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) Simpson, E.H.: Measurement of diversity, Nature, Vol.163, p.688, 1949.
- 12) Ito, Y.: Recommendations for the use of species diversity indices with reference to a recently published article as an example, Ecological Research, Vol.22, pp.703-705, 2007.
- 13) 鬼倉徳雄, 中島淳：重要文化的景観地, 通潤用水の魚類および水生昆虫相, 九大農芸誌, 第 65 巻, 第 2 号, pp.39-46, 2010.
- 14) 原達章, 田中規夫, 群落内流速と底面せん断力変化を考慮した株状草本の流失限界評価に関する研究, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S\_1417-S\_1422, 2011.

(2011.5.19 受付)