短報 SHORT COMMUNICATION**平地河川の底生動物に対する河床攪乱の評価：Pfankuch 法の適用性の検討**

上田 航*・福崎 健太・三宅 洋

愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番

Wataru UEDA*, Kenta FUKUSAKI, Yo MIYAKE: Assessing bed disturbance for invertebrates in lowland streams using the Pfankuch index. *Ecol. Civil Eng.* 23(2), 341-347, 2021*Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan*

Abstract: The Pfankuch stability index (PI) is known as a simple and suitable measure to assess streambed disturbance for benthic organisms. Although this method has been widely applied to unimpacted mountain streams, the applicability for human-altered lowland streams has not been clarified yet. In this study, we conducted surveys on stream invertebrates and bed-stability using the PI in ten streams flowing the Dogo Plain in Ehime Prefecture, southwestern Japan. We aimed to evaluate the applicability of the PI to lowland streams and to develop a better index (modified PI) that is specialized to assess streambed disturbance in lowland streams by considering the effect of water quality degradation. As a result, the PI varied markedly among the sites. The modified PI also showed high variation but the rank of the score did not change for each site when compared with the original PI. Our analyses demonstrated that the invertebrate abundance decreased with increasing PI. A negative relationship with abundance was also found for the modified PI but there was little improvement in the relationship compared with the original PI. Overall, this study suggests that the Pfankuch method can be applied to assess the streambed disturbance for benthic macroinvertebrates in human-altered lowland streams. Our attempt to modify the applicability of score was not successful, implying that further trials are recommended to increase the applicability of the PI to lowland streams. We suggest that developing methodology for measuring flood disturbance, as in this study, is key to boosting disturbance studies in streams and managing stream ecosystems from the viewpoint of disturbance ecology.

Key words: bed stability, flood disturbance, human impact, substrate, water quality

はじめに

流量変動は河川における最も普遍的な現象の一つである (Poff et al. 1997). 出水による物理的攪乱は、直接的な河川生物の除去に加え、生息場所環境の改変を介して間接的な影響も及ぼすことから、河川生態系特性の支配的な決定要因と考えられている (Resh et al. 1988; 三宅 2013). 近年では、人為的な気候変動の進行により、異

常多雨の発生に伴う大規模出水の高頻度化が観測されており (Herring et al. 2017), 出水攪乱が河川生態系に及ぼす影響に関する知見の蓄積が求められている. このため、汎用性や精度が高く、実施の容易な出水攪乱の評価手法の開発が必要になっている (Schwendel et al. 2010).

これまでに最も適用例の多い攪乱評価手法の一つに Pfankuch index (PI) を使用した河道安定性の定性的評価法 (Pfankuch 1975, 以降 Pfankuch 法とする) がある. Pfankuch 法は基本的に一度の現地訪問による観察にもとづく定性的評価 (スコアの付与) のみで河道の不安定

2020年6月26日受付, 2020年8月19日受理

*e-mail: ueda.wataru.15@cee.ehime-u.ac.jp

性を数値化することが可能であり、実施が非常に容易である（三宅 2019）。河岸上部、河岸下部および底質の3要素を評価する手法であるものの、底質要素（Bottom component）のみが用いられることが多い。これにより得られる底質スコアは、河床に生息する生物に対する攪乱強度を評価する手法として国内外の河川で有用性が示されている（Schwendel et al. 2011；三宅 2019）。ただし、Pfankuch 法は自然度の高い山地河川への適用を想定しており、これまでに人為的な改変が進んだ河川や平野部を流れる河川への適用を試みた例は見られない。

平野部を流れる河川（以降、平地河川とする）は多くの人々にとって身近な河川であり、親水空間などとしての生態系サービスの提供が期待されている（Sarvilinna et al. 2017）。このため、平地河川における生物相や生息環境の現状把握とその保全が喫緊の課題となっている（Trabucchi et al. 2012）。他方、平地河川では流域の都市化や農地拡大による人為的な環境改変と生態系の劣化が進行している（Walsh et al. 2001）。とりわけ河道改変や流域の土地利用にともなう流量変動の激化は河床攪乱の強度を増加させるため、平地河川生態系の主要な劣化要因であると考えられている（Franssen et al. 2006）。このため平地河川においても攪乱生態学的研究を推進させる必要があるものの、これまでに平野部を流れる人為改変の進行した河川において河床攪乱を評価した研究は見られず、底生動物に対する攪乱影響についても実証的な知見は限られている。ここで、もし前述の Pfankuch 法のように実施が容易な攪乱評価手法の適用性が確認されれば、平地河川における攪乱研究を促進しうるものと考えられる。

本研究は、愛媛県道後平野を流れる複数河川にて Pfankuch 法を用いた河床攪乱の評価を実施し、河床攪乱が平地河川の底生動物群集に及ぼす影響を解明することを目的とした。これにより Pfankuch 法の平地河川への適用性を評価するとともに、平地河川での利用可能性の向上に資する情報を得ることを目的とした。

方 法

調査地

本研究は愛媛県道後平野を流れる平地河川にて現地調査を行った（Fig. 1）。道後平野の中央部には一級河川である重信川が西流し、多くの中小河川を集めて瀬戸内海に注いでいる。周辺山地の表層地質は主に堆積岩であるが、北東部には領家帯の花崗閃緑岩が見られる（金澤・

三宅 2006）。重信川の北側には松山市の都市域が位置し、周辺には主に水田により構成される農地が広がっている。平野部の年降水量は約 1300 mm と少ないが、梅雨前線や台風に伴う豪雨が7-10月に発生する（渡辺ほか 2019）。

道後平野に位置する 10 河川の河川規模が類似した区間に調査地を設定した（流路長：10-18 m，流路幅：2.4-4.8 m，満水時川幅：4.7-11.6 m，集水域面積：2.1-5.4 km²，Fig. 1）。この際、極端な物理的環境を有する三面護岸を避け、各河川で典型的な物理化学的環境を有する区間を選出した（福崎ほか 2019）。全ての調査地は瀬淵が連続する区間の瀬または平瀬に設定された（平均水深：4.3-22.9 cm）。

調査河川のうち、川附川（KW）、堀越川（HR）および悪社川（AK）は、重信川流域を北方より流下する二次支流である。郷谷川（GT）は道後平野北部を、宮前川（MY）は中央部を、長尾谷川（NG）および国近川（KN）は南部を流れる小規模な二級河川である。大川（OK）は北部を流れる二級河川で、中流部で吉藤川（YS）が、河口部で久万川（KM）が合流している。平野北東部の山地より流下する郷谷川、吉藤川、大川および宮前川では河床材料に花崗閃緑岩由来の真砂が見られ、中でも郷谷川は河床表層がほぼ真砂で覆われる砂河川である。各調査地で調査時に採取した河川水の全無機態窒素濃度は 0.99-4.34 (mg l⁻¹)，リン酸態リン濃度は 0.03-0.57 (mg l⁻¹) であり、いずれも都市域を流れる低勾配河川である久万川で最大値を示した。また、全ての調査地において大型水生植物の繁茂は見られなかった。

2018 年 9 月 30 日に、台風 24 号の接近にともなう豪雨により大規模な出水が発生した。道後平野に位置する松山気象観測所および南吉田気象観測所ではそれぞれ 122 mm および 114 mm の連続雨量を記録した。本研究ではこの出水から 26 日後の 10 月 25 日に現地調査を実施した。

底生動物

各調査区間において等間隔に 5 本のトランセクト（横断側線）を設けた。最上流と最下流を除いた 3 横断側線上の流心部で D フレームネット（開口部 25×25 cm，ネット長 40 cm，目相 0.5 mm，離合社）を用いて底生動物サンプルを採取した。河床の 25 cm×25 cm の範囲を足で約 10 秒間攪乱し、河床砂礫および流下した物質を下流に構えた D フレームネットにより採取した（計 30 サンプル）。従事者によるバイアスを避けるため、採取は常に筆頭著者（上田）が担当した。採取したサンプル

Fig. 1. Location of study sites.
調査地図.

は分析を行うまで70%エタノールで保存した。実験室にて、各サンプルに含まれる底生動物を実体顕微鏡下で可能な限り下位の分類階級まで同定し、計数した。

Pfankuch 法による河床安定性の評価

Pfankuch index (PI) を使用した定性的評価法により各調査地の河床不安定性（河床攪乱の程度）を測定した。PI は河岸上部、河岸下部および河床の各要素について不安定性を目視によりスコア化する方法であり、値が大きいほど不安定と評価される（Pfankuch 1975）。本研究では、河川生態学において導入例が多い底質要素のみを用いた手法を採用した（Death & Winterbourn 1994, Table 1）。評価項目は、1) 礫の角張り具合（rock angularity）、2) 礫の明度（brightness）、3) 礫のはまり具合（consolidation or particle packing）、4) 安定な河床材料の割合（percentage stable materials）、5) 洗堀・堆積の割合（scouring and/or deposition）、6) 水生植生（付着藻類・コケ類）の繁茂状況（aquatic vegetation）の6つである。

各項目について、excellent, good, fair, poor の4段階で評価し、重要度に応じて異なるスコアが与えられる。底質要素のPIが取りうる値は15-60である（Table 1 参照）。

2018年10月25日の現地調査時における目視観察と、各調査地の河床状態を撮影した水中写真から得られた情報を統合してPIによる評価を行った。観測者によるバイアスを避けるため、全ての評価は実施経験のある1名（三宅）と事前にトレーニングを積んだ1名（上田）の2名により行った。

ただし、PIは自然度の高い山地河川のみを想定して作られた指標であることを考慮し、本研究では人為影響の強い平地河川における適用を見越したPI（以降、修正PIとする）も試行的に算出した。平地河川においては水質悪化による付着藻類の繁茂が典型的に見られる。このため、河床不安定性が過大評価されるバイアスが生じ、適用性が低下する可能性が考えられる（Table 1）。

Table 1. Evaluation criteria for the Pfankuch index (bottom component).
Pfankuch 法 (底質要素) の評価基準.

Component	Rating							
	Excellent	Score	Good	Score	Fair	Score	Poor	Score
1) Rock angularity	Sharp edges and corners, plane surfaces roughened.	1	Rounded corners and edges. Smooth and flat.	2	Corners and edges well rounded in two dimensions.	3	Well rounded in all dimensions.	4
2) Brightness	Surfaces dull, darkened or stained. Bright surfaces <5%.	1	Mostly dull, but may have up to 35% bright surfaces.	2	Mixture, 50-50% dull and bright +/− 15% (i.e. 35-65%).	3	Predominantly bright, 65%, exposed or scoured surfaces.	4
3) Consolidation or particle packing	Assorted sizes tightly packed and/or overlapping.	2	Moderately packed with some overlapping.	4	Mostly a loose assortment with no apparent overlap.	6	No packing evident. Loose assortment, easily moved.	8
4) % stable materials	No change in sizes evident. Stable materials 80-100%.	4	Distribution shift slight. Stable materials 50-80%.	8	Moderate change in sizes. Stable materials 20-50%.	12	Marked distribution change. Stable materials 0-20%.	16
5) Scouring and deposition	<5% of the bottom affected by scouring and deposition.	6	5-30% affected. Scour at constrictions and where grades steepen. Some deposition in pools.	12	30-50% affected. Deposits and scour at obstructions, constrictions, and bends. Some pool filling of pools.	18	>50% of bed in a state of flux or change nearly year-long.	24
6) Clinging aquatic vegetation (moss and algae)	Abundant, growth largely moss, dark green, perennial. In swift water too.	1	Common. Algal forms in low velocity and pool areas. Moss here too and swifter waters.	2	Present but spotty, mostly in backwater areas. Seasonal blooms make rocks slick.	3	Perennial types scarce or absent. Yellow-green, short term bloom may be present.	4

そこで水質による影響が考えられる 2) 礫の明度および 6) 水生植生 (付着藻類・コケ類) の繁茂状況の 2 項目を除外したスコアを修正 PI (Modified PI) として算出した (値域: 13-52)。

データ処理・統計解析

底生動物の群集構造を表すために、各調査地について生息密度 ($N m^{-2}$) および分類群数を算出した。この際、各調査地で得られた 3 サンプルをプールした。

底生動物群集と河床不安定性との関係性を明らかにするために、応答変数を底生動物の生息密度および分類群数、説明変数を PI または修正 PI として一般化線形モデル (Generalized linear model: GLM) による解析を行った。応答変数の誤差構造は、生息密度は負の 2 項分布に、分類群数はポアソン分布に従うものとした。これらの解析には解析ソフトウェア R 3.5.1 を用いた (R Development Core Team 2018)。

結果および考察

本調査により、合計して 54 分類群、12,449 個体の底生動物が採取された。最も優占的に見られた分類群はエ

リュスリカ亜科 (Orthoclaudiinae, 相対個体数 29.7%) で、以下、ミミズ綱 (Oligochaeta, 19.3%), ユスリカ亜科 (Chironominae, 18.6%), サホコカゲロウ (*Baetis sahoensis*, 15.6%), ウデマガリコカゲロウ (*Tenuibaetis flexifemora*, 4.1%), フタモンコカゲロウ (*Baetis taiwanensis*, 2.6%) の順であった。相対密度が 2% 以上を占めるこれら 6 分類群で総個体数の約 89.9% を占めていた。

Pfankuch 法にもとづき算出した河床の不安定性の合計スコア (PI) には調査地点間で著しいばらつきが見られた (Table 2)。PI は久万川 (KM) で最小値 (15 点) を、郷谷川 (GT) で最大値 (60 点) を示した。久万川は平地を流れる低勾配河川であり、郷谷川は不安定な真砂で河床が構成される砂河川であることから、本研究における PI の変異は流域の地形および地質を主に反映しているものと考えられた。上記の値は底質要素の PI がとりうるそれぞれ最小値および最大値であり、過去の自然河川における事例と比較しても (例えば Schwendel et al. 2011), 底質要素にもとづく Pfankuch 法が平地河川における河床攪乱の評価手法として適用可能であること示唆している。

Table 2. Results of the evaluation of substrate stability (score) using the Pfankuch index (bottom component) and the modified Pfankuch index in each study site. See Fig. 1 for site abbreviations.

各調査地における Pfankuch index (底質要素) および修正 Pfankuch index を用いた河床不安定性の評価スコア。調査地の略号については図 1 参照。

Component	GT	YS	KM	OK	MY	KW	HR	AK	KN	NG
1) Rock angularity	4	2	1	3	3	2	3	3	2	3
2) Brightness	4	2	1	3	3	2	2	3	2	1
3) Consolidation or particle packing	8	6	2	6	6	4	2	4	4	4
4) % stable materials	16	12	4	16	12	4	8	8	8	8
5) Scouring and deposition	24	12	6	24	18	6	6	12	6	6
6) Clinging aquatic vegetation (moss and algae)	4	2	1	4	3	3	3	2	2	2
Total score	60	36	15	56	45	21	24	32	24	24
Modified score	52	32	13	49	39	16	19	27	20	21

人為影響を軽減した修正 PI の範囲は、13-52 点であった (Table 2)。修正前の PI でそれぞれ最大、最小値を示していた久万川と郷谷川は、修正 PI でも最小値および最大値を示した。各地点におけるスコアに順位変動はみられなかったものの、スコアの減少幅には各地点でばらつきがみられた (2-8 点, Table 2)。

一般化線形モデル (GLM) による解析の結果、底生動物群集と河床不安定性との間に関係があることが示された。PI と底生動物の生息密度との間には有意な負の関係が見られ、PI の値が大きくなるほど生息密度が低下していた (Fig. 2)。調査日以前の 1 月以内に大規模な出水が発生していたことを考慮すると、河床が不安定な調査地で底生動物に対する攪乱影響が大きかったことを反映した結果と解釈できる (Death & Winterbourn 1995)。このため、PI は河床攪乱の評価手法として平地河川に適用可能であるものと考えられた。一方、分類群数と PI との間には有意な関係が見られなかった。PI 値が特に大きかった郷谷川 (GT) および大川 (OK) では、確認された底生動物はそれぞれ 8 分類群および 12 分類群と少なかった。しかし、PI 値が中程度または小さな調査地では分類群数のばらつきが大きかった。分類群数はある場所における各分類群の存否を反映する指標である。底生動物の高い移動性を考慮すると、攪乱によるある分類群の完全な除去 (すなわち、分類群数の減少) は生息密度の低下と比較して起こりづらい (Miyake et al. 2005; 角田ほか 2019)。このため、分類群数は生息密度と比較して攪乱勾配への反応が小さかったものと考えられる。

修正 PI についても底生動物の生息密度との間に有意

な負の関係がみられ、決定係数に注目すると修正前の PI ($R^2=0.506$) よりも関係が強いことが示された ($R^2=0.513$, Fig. 2)。この傾向は分類群数についても同様であった (修正前 PI : $R^2=0.255$, 修正 PI : $R^2=0.273$)。ただし、PI の導入による関係性の向上は両底生動物変数ともにわずかであった (R^2 値について、生息密度 : 0.007, 分類群数 : 0.018, Fig. 2)。この原因としては、本研究では調査地点間で河床の不安定性が著しく異なり、スコアの修正を行う前から評価値 (修正前の PI) に顕著に違いが見られたことが考えられる。また、本研究の調査地はいずれも水質の汚濁が進行しており、付着藻類の繁茂を想定した修正の効果が大きくなかった可能性もある。

本研究により、これまでのような自然度の高い山地河川ばかりではなく、人為的な改変の進んだ平地河川においても、Pfankuch 法が底生動物に対する攪乱強度の評価手法として適用可能であることが示唆された。ただし、水質悪化の影響を考慮したスコア修正による適用性の改善効果は大きくなかった。これには本研究で対象としている河川の特徴が影響している可能性もあり、今後は修正方法の改善も含めたさらなる試行が求められるだろう。近年、河川において攪乱影響を把握する重要性は高まっており、より簡便で汎用性の高い攪乱評価手法の開発が求められている (三宅 2019)。本研究のような手法開発の取り組みは、このような需要に応えることによって、攪乱生態学的研究の発展や出水攪乱の影響を考慮した河川管理手法の改善に貢献するものと考えられる。

Fig. 2. Relationships of invertebrate abundance and taxon richness with scores of the Pfanckuch index (bottom component) (PI) and modified PI. The values in graphs are coefficients of determination (R^2) and P values. Regression lines were shown when significant ($P < 0.05$).

底生動物の生息密度および分類群数と Pfanckuch 法（底質要素）および修正 Pfanckuch 法によるスコアとの関係。図中の数値は決定係数 (R^2) および P 値。有意な場合のみ回帰直線を示す ($P < 0.05$)。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、野外調査を手伝って下さった保全生態学研究室の Satrio Budi Prakoso 氏、目崎文崇氏、角田康祐氏、大畑沙紀氏、荻家由里子氏および牧野洸和氏に心よりお礼を申し上げます。本研究は JSPS 科研費 18K11727 の助成を受けて行われた。

摘 要

河床に生息する生物に対する攪乱強度を評価するための簡易かつ適用性の高い手法として Pfanckuch 法がある。

しかし、この手法は自然度の高い山地河川への適用を想定しており、人為的改変の進行した河川や平地河川への適用可能性は明らかになっていない。本研究は、愛媛県道後平野を流れる複数河川にて Pfanckuch 法を用いた河床攪乱の評価を実施し、河床攪乱が平地河川の底生動物群集に及ぼす影響を解明することを目的とした。これにより Pfanckuch 法の平地河川への適用性を評価するとともに、平地河川での利用可能性の向上に資する情報を得ることを目的とした。

2018 年 9 月に愛媛県道後平野を流れる 10 河川にて調査地を実施した。底生動物の採集を行うとともに、Pfanckuch 法（底質要素）による河床安定性の評価を行

った。これにより得られた Pfankuch index (PI) に加え、平地河川において典型的に見られる水質悪化の影響を考慮した修正 PI を算出した。底生動物の生息密度および分類群数を応答変数、PI および修正 PI を説明変数とした一般化線形モデルによる解析を行った。

PI および修正 PI には調査地間で著しいばらつきが見られた。解析の結果、底生動物の生息密度は PI の値が大きくなるほど低下することが明らかになった。修正後の PI に関しても底生動物の生息密度との間に負の関係がみられたが、関係性の向上の程度は小さかった。

本研究により、Pfankuch 法は人為的な改変の進行した平地河川においても底生動物に対する攪乱強度の評価手法として適用可能であることが示唆された。しかし、スコア修正による適用性の改善効果は大きくなかったため、今後は修正方法の改善も含めたさらなる試行が求められる。

引用文献

- Death R. G. & Winterbourn M. J. (1994) Environmental stability and community persistence: A multivariate perspective. *Journal of the North American Benthological Society* **13**: 125-139.
- Death R. G. & Winterbourn M. J. (1995) Diversity patterns in stream benthic invertebrate communities: The influence of habitat stability. *Ecology* **76**: 1446-1460.
- Franssen N., Gido K., Guy C., Tripe J., Shrank S., Strakosh T. & Paukert C. (2006) Effects of floods on fish assemblages in an intermittent prairie stream. *Freshwater Biology* **51**: 2072-2086.
- 福岡健太・目崎文崇・三宅洋 (2019) 平地河川における出水攪乱に対する底生動物群集の反応。環境システム研究論文集 **47**: 143-149.
- Herring S. C., N. Christidis, A. Hoell, J. P. Kossin, C. J. Schreck III & P. A. Stott. Eds. (2017) Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **98**: S1-S157.
- 金澤康史・三宅洋 (2006) コンクリート基質-自然基質間における河川性底生動物の群集構造の比較。応用生態工学会誌 **9**: 141-50
- 三宅洋 (2013) 流量変動・攪乱の重要性。河川生態学。第 1 刷。pp. 169-191, 中村太士編, 講談社, 東京。
- 三宅洋 (2019) 攪乱を表す。河川生態系の調査・分析方法。第 1 刷。pp. 122-141, 井上幹生・中村太士編, 講談社, 東京。
- Miyake Y., Hiura T. & Nakano S. (2005) Effects of frequent streambed disturbance on the diversity of stream invertebrates. *Archiv für Hydrobiologie* **162**: 465-480.
- Pfankuch D. J. (1975) Stream reach inventory and channel stability evaluation. US Department of Agriculture Forest Service Region 1.
- Poff N. L., Allan J. D., Bain M. B., Karr J. R., Prestegard K. L., Richter B. D., Sprks R. E. & Stromberg J. C. (1997) The natural flow regime: Paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* **47**: 769-784.
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<http://R-project.org/>, 2020 年 6 月 20 日確認)。
- Resh V. H., Brown A. V., Covich A. P., Gurtz M. E., Li H. W., Minshall G. W., Reice S. R., Sheldon A. L., Wallace J. B. & Wissmar R. C. (1988) The role of disturbance in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society* **7**: 433-455.
- Sarvilinna A., Lehtoranta V. & Hjerpe T. (2017) Are urban stream restoration plans worth implementing? *Environmental Management* **59**: 10-20.
- Schwendel A. C., Death R. G., Fuller I. C. & Joy M. K. (2011) Linking disturbance and stream invertebrate communities: How best to measure bed stability. *Journal of the North American Benthological Society* **30**: 11-24.
- Schwendel A. C., Fuller I. C. & Death R. G. (2010) Shortterm dynamics of upland headwater streams in the southern North Island of New Zealand. *New Zealand Geographer* **22**: 14-32.
- 角田康祐・三宅洋・渡辺裕也・井上幹生 (2019) 重信川で発生した記録的出水に対する底生無脊椎動物群集および魚類群集の反応。応用生態工学 **22**: 35-49.
- Trabucchi M., Ntshotsho P., O'Farrell P., Comin F. A. (2012) Ecosystem service trends in basin-scale restoration initiatives: a review. *J Environ Manag* **111**: 18-23.
- Walsh C. J., Sharpe A. K., Breen P. F. & Sonneman J. A. (2001) Effects of urbanization on streams of the Melbourne region, Victoria, Australia. I. Benthic macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology* **46**: 535-551.
- 渡辺裕也・吉村研人・赤坂卓美・森照貴・三宅洋 (2019) 全国河川の流量レジーム特性と決定要因。応用生態工学 **21**: 75-92.