

波立ちに基づいた 山地河道の物理構造に関する検討

森本健太¹・川畑遼介¹・白川直樹²

¹ 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail : s1420938@u.tsukuba.ac.jp

² 正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail : naoki-s@kz.tsukuba.ac.jp

山地河道において現地観測を行い、水面の波立ちに基づいて単位形態長さ、早瀬の出現面積、淵の定義に関する検討を行った。単位形態長さ水面幅の比は河川を問わず流量と正の相関を示した。白波の消費エネルギーは河川や流量規模に関わらず面積当たり一定値となった。淵については一般的な定義や先行研究に基づく定義を用いると物理構造をうまく表現できない河川が存在し、一般的な瀬淵構造で山地河川の物理構造を分析するには限界があること、少なくとも淵については水深や流速よりも水面勾配に注目した方がよいことがわかった。

Key Words : physical unit, potential energy, pool, standing wave, mountain stream

1. 背景と目的

瀬淵構造は河川生態系を規定する要因として重要である。しかし同じ淵(瀬)といっても上流, 中流, 下流ではそれぞれに形態は異なるし, 全体として瀬状の区域の内部に淵的な要素を持つ部分が多あることもある¹⁾。山地河道に存在するダム直下の減水区間の様相は的確に表現することが難しく²⁾, 上流域における瀬淵構造の適用性は明確とはいえない。野上ら³⁴⁾は北海道の2つの急流河川を対象に現地観測を行い, 水面勾配とフルード数(F_r)によって定量的なハビタット区分が可能であることを示しているが, そこでは各河川に一つの流量ケースしか観測していない。山地河川は増水時と減水時(人為的減水を含む)の流量比が大きく, 瀬淵構造に流量の影響が及んでいる可能性がある。

そこで本研究では山地河道の早瀬と淵に焦点を絞り, 複数の流量ケースに対して現地観測を行うことにより流量が河道の瀬淵構造に与える影響について検討を行った。

2. 早瀬と淵の捉え方

河川の流水が持つ位置エネルギーは, 河床摩擦, 土砂輸送, 跳水などにより消費されている。急勾配の山地河道では河床摩擦だけでは消費しきれないエネルギーの余剰分を消費するため, 跳水を起こして河床勾配と釣り合いを保っていると仮説を立てた。

模式的に書くと図-1 のようになる。長さ L の河道区間を流れる間に高さ H に相当する位置エネルギーを消費するものとして, 河床摩擦によりエネルギーを失う区間 ($I_1 \sim I_3$) と跳水によりエネルギーを失う区間 ($R_1 \sim R_3$) があると考えた。本論文では前者を仮に「平瀬」, 後者を「早瀬」と名付け, 「平瀬」と「早瀬」の一组を合わせて「単位形態」と呼ぶ。また, 一つの単位形態でエネルギー収支は完結する, すなわち各早瀬の終端におけるエネルギーの差は位置エネルギーの差に等しいと仮定する。

流量が増えると「早瀬」におけるエネルギー消費量も増えることになる。これには「早瀬」の面積が増える場合と面積当たりのエネルギー消費量が増え

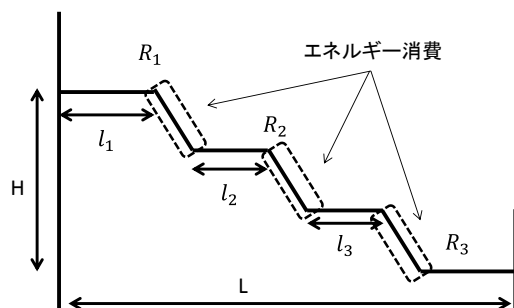


図-1 早瀬に関する作業仮説の概念図

る場合の両方が考えられる。理論的に跳水によるエネルギー消費量は共役水深により定まるが、ここでは「早瀬」面積と消費量の関係を調べる。

淵は魚類の休息や採餌の場として、また避難所や仔稚魚の生育場として重要である⁵⁾。しかし山地河道は平均流速が大きく低流速部は目立たないことも多い。また Aa 型の河道では淵は大きさも形もさまざまに異なるとされており⁶⁾、淵の定義から見直した多面的な考察が必要である。

3. 現地観測

観測河川は茨城県北部を流れる花貫川水系花貫川および久慈川水系里川、皇都川、相川である(表-1)。観測は流量の異なる日を選び、里川で4回、花貫川で5回、皇都川で2回、相川で2回行なった。

観測区間は単位形態を3つ以上含み、大きな落差(滝や堰堤など)を含まない範囲として100～300mの長さに設定した。

河道の物理構造を表す量として、河床及び水面の縦断勾配、水深、視覚的な流れの激しさの3つを計測した。流れの激しさは、水面を流下方向2m、横断方向1mのグリッドに分けた上で、各グリッドを流水表面の波立ちに基づき「白波」「緩流」「その他」に3分類した。波が立ちしづきが上がるグリッドは「白波」、波が立たない部分が半分以上を占めるものは「緩流」、どちらにも当てはまらないものが「その他」である。水深は各グリッドの代表値を計測した。

白波グリッドでは跳水によるエネルギー消費が起きていると考え、白波を含む断面(縦断方向2m)を「早瀬」とみなす。ただし前述のように早瀬の内部に淵的な要素が含まれる場合も多いことから、白波

表-1 観測区間諸元

河川名	里川	花貫川	皇都川	相川
河床勾配	1/18	1/25	1/55	1/65
流域面積(km ²)	12.3	23.4	6.2	2.1
区間長(m)	250	100～300	150	250, 350
観測流量(m ³ /s)	0.04 0.11 0.30 0.60	0.09 0.13 0.40 0.70	0.05 0.08	0.05 0.10
		1.00		

を含まない断面が単独で(2mだけ)出現している場所は「早瀬」の区切りと認めず、前後の早瀬は連続しているものとした。つまり、白波が4m以上途切れる部分を「早瀬」の終わり、すなわち仮の「平瀬」と定義した。

4. 結果と考察

(1) 単位形態の長さ

白波が4m以上現れない部分を境として区切った単位形態の長さは4河川すべてで流量と正の相関を持つことがわかった(図-2)。ここでは既往の研究(野上ら)と比較するために、単位形態の長さをその流量に対する平均水面幅で除している。野上らの結果(0.4m³/sにおいて約10)と比較すると、本研究の値は同じ流量に対して約半分(約5)となっていることがわかる。これは群別川の勾配(1/43)が里川や花貫川の勾配より大きいためではないかと考えられる。

(2) 早瀬面積の決定要因

河床勾配 I の河道を流量 Q が区間長 L だけ流れるとき、下流端からみた上流端の位置エネルギーは

$$P_Q = Q A p g L I \quad (1)$$

となる。ただし、A：断面積、 ρ ：水の密度、g：重力加速度である。このエネルギーが全て白波における跳水により消費されるとすると、白波の単位面積あたりの消費エネルギーは式(1)の P_Q を白波面積 A_s で除して

$$p_Q = P_Q / A_s \quad (2)$$

となる。

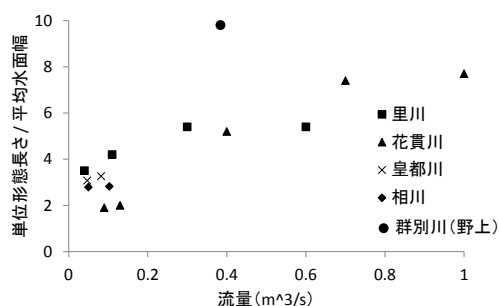


図-2 流量と水面幅当たり単位形態長さの関係

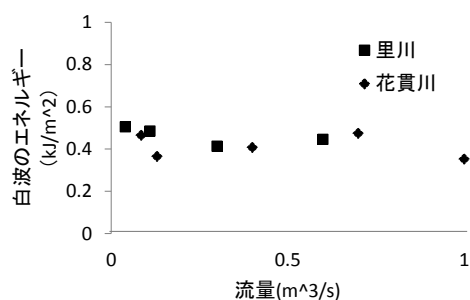


図-4 面積当たりの白波の消費エネルギー

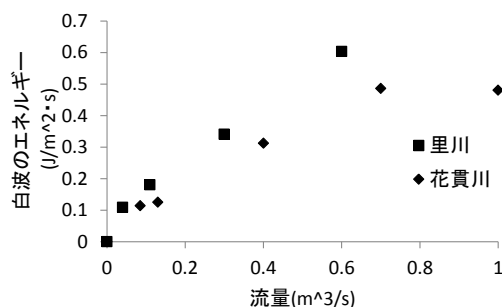


図-3 流量と白波の消費エネルギーの関係

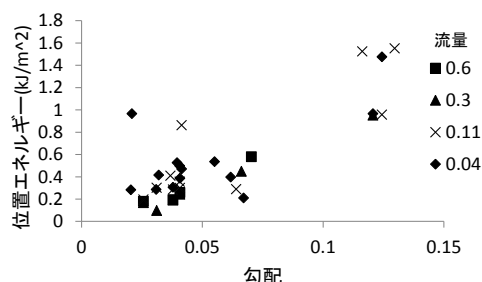


図-5 単位形態ごとに計算した白波のエネルギー

式(2)を用いて里川および花貫川における白波の単位面積あたりの消費エネルギーを計算すると、図-3のように流量と一定の関係がみられる。

式(2)の値に測定区間長をかけ、代表流速で除すると時間の次元が消去される。その結果が図-4である。代表流速は流量および平均水面幅、平均水深より算出した。これより、白波にて消費されるエネルギーは河川の違いや流量の規模に関わらず約 0.44 kJ/m^2 と一定であることがわかった。これは流量が増えると白波面積が一定の法則に従って増えることを意味しており、流量調整による早瀬面積の増減を予測する際に有用な結果と考えられる。

里川においてエネルギー消費量を単位形態ごとに計算した結果を図-5に示す。流量が減少するにつれて、面積あたり消費エネルギーのばらつきが増加することが見て取れる。これは仮説に反して各単位形態でエネルギー収支が完結していないことを示唆している。低流量において白波の面積あたり消費エネルギーが大きな値を示した単位形態は局部的に急勾配であった。急勾配な単位形態では跳水が起きてもエネルギーを消費しきれていないことが予想される。

(3) 淵の定義の見直し

野上らの先行研究では、水面勾配と河床形状（凹状、平坦）による区分を行ったうえで、流速と水深と F_r によって淵、平瀬、早瀬、荒瀬を分けている。群別川と札内川の結果をみると単位形態の中に淵が現れない（平瀬と早瀬だけから成る）ものもあり、淵の定義にはさまざまな可能性の検討が必要である。

典型的な淵とは一般に、水深が深く、水面は波立たず、流速は緩く、底質は砂であるといわれている。しかし、山地河道ではこれらの条件を部分的に満たしながら完全には満たさない不完全な「淵」が多い。

図-6は花貫川、図-7は里川の河道風景である。花貫川には流れが遅く水深の大きい「淵」と流れの速い早瀬が交互に現れているのに対し、里川には流れの速い早瀬は見られるが流れが遅く深い「淵」は見られなかった。代わりに里川でポツポツとみられるのは流速は小さいものの水深が浅い「淵」であり、花貫川では水深が深いものの波立ちのある「淵」であった。



図-6 花貫川の代表的河道景観



図-7 里川の代表的河道景観

図-8 は、花貫川においてさまざまな定義に基づく「淵」がどこにどれくらい存在するかを示したものである。矢印の区間が各定義を満たす「淵」に相当する。波立ちの分布は流量 $0.72\text{m}^3/\text{s}$ の際に観察されたものである。図-9 は同様に里川の結果を示している（流量 $0.62\text{m}^3/\text{s}$ ）。

「一般的な淵」は水深が大きく緩流の場所を示す。花貫川にはある程度の間隔を置いて存在するが、里川にはこの定義を満たす「淵」は全く存在しない。

「水面勾配 a」は野上らの定義した $1/500 \sim 1/1000$ の水面勾配を持つ区間である。この値を満たす場所は両河川ともにほぼ存在しなかった。

「 F_r 、水深」は野上らが示した「 $F_r < 0.2$ および水深 $> 28\text{cm}$ 」にならったものである。本研究で「緩流」と判別されたグリッドにおいて流速を測定したところすべての計測点で $F_r < 0.12$ に収まったため（流速は $0.01 \sim 0.18\text{m/s}$ の範囲であった）、「緩流」かつ「水深 28cm 以上」を満たす場所を「淵」としている。花貫川には周期的にこのような場所が出現し、「一般的な淵」とほぼ一致している。里川ではこの条件を

満たす場所は河岸沿いにいくらか存在するだけであった。「緩流」かつ水深 28cm 未満の場所は多く存在し、水深 28cm 以上の場所は多くが「緩流」以外であった。

「水面勾配 b」は野上らの定義の下限を外し、 $1/500$ より緩い部分を全て含めたものである。花貫川では「一般的な淵」「 F_r 、水深」とほぼ一致し、里川でも「淵」とみられる場所が周期的に存在する。

「緩流域」は波立ちだけに着目した定義である。本研究では「緩流」の存在に相当する。花貫川では他の定義とほぼ重なるのに対し、里川では2箇所以外は河岸近くに存在するだけであった。

以上の結果をまとめると、花貫川では水面勾配、波立ち、水深、 F_r に基づく定義がそれぞれに有効であり、それらの結果は一致する。つまり、典型的な淵に近い形で淵が存在している。これに対して里川では水面勾配（ $1/500$ より緩い）を用いたときのみ「淵」が判別された。里川には何らかの理由で淵が存在しないと推測することも不可能ではないが、そのような河道構造にも対応するには「淵らしきもの」の表現法や再定義を要することがわかった。

6. まとめ

茨城県北部の山地河川で現地観測を行い河道の物理構造を定量的に評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 単位形態の長さは河川によらず流量と正の相関を持ち、流量 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ のとき長さは平均水面幅の2～4倍、流量 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ のとき平均水面幅の約8倍となる。
- (2) 白波の消費するエネルギーは河川および流量に関わらず $0.44\text{kJ}/\text{m}^2$ の値を持つ。
- (3) 山地河道には典型的な淵をもつ河道もあるが、水深が深いのに流れが速かったり、遅いのに浅かったりと従来の定義から外れるものも多い。水面勾配に基づく判別が最も実用性の高い方法となる可能性がある。

参考文献

- 1) 沖野外輝夫：河川の生態学，共立出版，2002.
- 2) 川那部浩哉：生態学の「大きな」話，農山漁村文化協会，2007.
- 3) 野上毅，渡邊康玄，長谷川和義：急流河川における生息場としての河床地形区分，水工学論文集，第 46 巻，pp.1127-1132，2002.
- 4) 野上毅，渡邊康玄，中津川誠：急流河川における河床地形の定量的区分，水工学論文集，第 47 巻，pp.1087-1092，2003.
- 5) 玉井信行，水野信彦，中村俊六編：河川生態環境工学，東京大学出版会，1993.
- 6) 千田稔：自然的河川計画，理工図書，1991.

(2015. 07. 16 受付)

A STUDY ON PHYSICAL STRUCTURE IN MOUNTAIN STREAM BASED ON STANDING WAVES

Kenta MORIMOTO, Ryosuke KAWAHATA and Naoki SHIRAKAWA

We study physical unit length, emergence square measure of riffles and definition about pools based on standing waves by field observation. The ratio of physical unit length to surface width is positive correlation regardless of kinds of river. Energy consumptions of standing waves are constant per unit area regardless of rivers and discharge scales. We found that some of pools aren't interpreted by general definition and definition based on prior study, and having a limit that analyzed physical structure of mountain rivers by general riffle-pool structure, and we should focus on surface slope better than depth of water and velocity about pool at any rate.