境界層水理学が生態系保全に果たす役割

ROLE OF BOUNDARY LAYER HYDRAULICS ON THE PRESERVATION OF INSTREAM ECOLOGY

田中規夫¹•内田龍彦²•山上路生³ Norio TANAKA, Tatsuhiko UCHIDA, Michio SANJOU

 「正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)
 ²正会員 博(工) 広島大学大学院准教授 工学研究院(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)
 ³正会員 博(工) 京都大学大学院准教授 工学研究科(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1-256)

This study summarizes the importance to clarify the turbulent and sediment transport characteristics inside the roughness layer and the boundary layer for improving the river environment, especially for invertebrate and periphyton communities. By reviewing the meaning of the friction velocity, many unknowns are found especially on the flow around large roughness elements on the bed. In that case, down-scaling analysis is recommended for elucidating the actual shear structure inside the roughness layer under the condition that the whole flow structure including the resistance characteristics is analyzed as a whole by using the actual water surface variation. Velocity measurement method should be more high precision and double-averaging method is found a useful tool for further analysis.

Key Words : flood disturbance, turbulence structure, roughness layer, friction velocity, shear stress

1. はじめに

出水などの「撹乱」影響の解明に向けて,境界層水理 学や土砂水理学の必要性が高まっていることを受け, 2014年土木学会基礎水理シンポジウムでは「移動床水理 学が生態系保全に果たす役割」という討論が行なわれた. 本総説はその成果を発展させ,河川環境工学の更なる学 術的発展と将来的な実務応用に資することを目的とし, 取りまとめる.特に,河床という時空間的に変動する要 素に関連して,境界層水理学の活用という視点で論じる.

本総説では「撹乱」を、流量変動や土砂移動によって、 対象とする生物に直接的(流体力や土砂の衝突力等)・間接 的(生息基盤の流出等)に作用する営力という意味で使 用する.はじめに、河川空間における撹乱の位置づけをま とめ、河床構造、土砂移動性と生物群集の関係を整理する. 次に、河床近傍、特に粗粒化している河床の粗度層内の乱 流構造解明の必要性を論じ、土砂移動の指標としての粗度 層内せん断力の重要性を浮き彫りにする.そして、粗度層 の流れを解析する際の摩擦速度の取り扱いの持つ意味、粗 面境界層の乱流構造と輸送現象について実務や実験水理学 の立場から見た課題から、将来考慮すべき点を整理する.

2. 生息場としての境界層・粗度層

(1) 河川空間の生態系基盤としての特殊性: 撹乱

生息場に関しては、撹乱と物質移動に伴う生息場環境

の変化¹⁾,生息場の構造の機能やその形成・維持機構:生息場学²⁾,生息場所の多様性研究が土木工学と生態工学の 重要な接点となること³⁾,などの重要な点が指摘されている.藤田ら⁴は,国内のダム下流の物理環境と生態系との 関係に関して,流況や土砂量が底生動物および付着藻類 に与える影響について,地形・底質変化に対する水生生物の応答性の知見が限られている事を指摘している.

河川空間は、空間スケールに応じて異なったシステム からなる階層性が存在⁵⁰し、撹乱も規模に応じて多様であ る.すなわち、数年~数十年規模以上の出水は、河床の 骨格を形成する河床材料を移動させる場合があり、水生 昆虫にとっては破局的流出⁶⁰を引き起こす.一方、小規模 出水であっても、砂等の小型材料は移動する場合もあり、 水生昆虫は影響を受ける⁷.水生昆虫の体サイズや生活史

(非洪水期に産卵・成長し洪水期前に羽化するものが多い)の時間スケール・時期を考えれば、夏季の大規模出 水だけでなく、非洪水期に生じる出水も考慮する必要が ある.実際に洪水期の出水よりも非洪水期の出水のほう が底生動物に大きな影響を与えるという報告®もある.

河床もしくは還元土砂に含まれる小型河床材料の割合 やその移動性も重要である.すなわち,水生昆虫の流失 量は小型河床材料の移動の有無で大きく変化する。こと, 土砂還元でダム下流河川の河床材料が小型化した場合に, 安定した河床に住むトビケラなどが減り,カゲロウなど の移動性の高い水生昆虫が秋季から翌春季にかけて増加 したこと⁷⁹等から,粗粒化した河床の中(粗度層)での小 型河床材料の移動特性を把握することが重要といえる.

多くの場合,土砂移動の指標として摩擦速度が用いられるが,非平衡性としての取り扱いの問題がある.また,河床の仮想原点より下も砂が流れるため,粗度層内部の乱流構造や流速分布を解明する必要がある.さらに,粗度層内の平均的なせん断力ではなく河床礫の流下方向キャニオンの局所的に高いせん断力と遮蔽域のように局所的に低いせん断力の両方を考慮することが必要である. 付着藻が繁茂すると流下方向キャニオンの運動量交換が減り、流れ場の3次元性が減少する⁹との指摘もある.

(2) 河床構造, 土砂移動性と生物群集

河床構造を変化させるような大規模出水は、瀬淵のよ うな大規模構造, クラスター構造のような局所的構造, 浮石・はまり石のような小規模構造を作り出す. これら の構造は、平水時の多様な生息場特性を定めるだけでは なく、撹乱後の生物の回復過程における初期生息場を作 り出す.これに対して、ダム直下流の河川では、上流か らの砂礫の供給は支川が合流するまでは側岸等に限られ る. そのため, ある規模以上の支川が合流する前までは, ダム下流河川の巨礫背後の遮蔽域などに捕捉されていた 砂成分などは小規模の出水においても少しずつ河床から 抜けていき, 大型河床材料で構成された粗粒化 (アーマ 一化)した河床が形成される4.ダム下流では、大規模出 水だけでなく、短期的・小規模出水に加え、発電やかん がい補給等の流況調整による短期的・小規模流量変動も 撹乱として作用する. ただし、これらの撹乱作用は、大 規模出水で形成された河川形態、骨格礫背後や礫間(特 に流下方向)などの乱流特性に応じて生じる.小規模撹 乱では骨格となる河床材料は動かない場合が多いため、 骨格材料で形成された河川低水路を出水規模に応じた砂 や小礫が移動し、その河川の非洪水期の撹乱を規定する. すなわち、4節で述べるような平板上の大規模粗度群で模 擬されるような物体周辺の乱流構造の解明が重要となる.

水生昆虫の生息場は、特に昼間は捕食や流失を避ける ため礫底部や礫間になる.河床の礫間は遮蔽域ではある が、出水時の水位上昇に伴い虫体への作用営力(抗力や 揚力、摩擦力)は増加する.これら営力により基盤部の 小型材料の移動が生じ、水生昆虫は避難するか、流失さ れる.粗粒化した河床では大礫間の流速は底面に向かっ て指数関数的に減少する¹⁰ため、流体力による撹乱が減 少するのみではなく、河床材料の移動性も減少する.加 えて上流からの土砂供給も少ないため、河床そのものが 避難場のような役割を果たすことが想定される.

二瀬ダム下流において土砂還元後には,移動性が高い 水生昆虫が経年的に増加し,付着藻の夏季バイオマスが 減少した⁷.これは,土砂を含む洪水撹乱作用と河床構造

(特に粗度層の充填具合)の変化に大きく影響を受けて いると考えられる.この現象を理解するためには、粗度 層下層部(特に礫間)の土砂移動現象,水生昆虫の撹乱 に対する抵抗性,の解明が必要である.

水生昆虫のドリフトには能動的・受動的の2種類がある.能動的な場合は新たな生息場の探索と分散であり, 受動的な場合は捕食や死亡と同様に個体群現存量の損失 につながる.受動的ドリフト(以後、単にドリフト)に ついては,夜間と昼間等の時間帯,捕食者に加え,発電 放流に伴う流量変動などが影響を与える.Holomuzki & Biggs¹⁰は,水路実験により河床が不安定な条件でドリフ ト量が増加することを報告しており,河床材料移動性を 含めた現地実験のより,小型河床材料移動性がドリフト現 象には重要であるとされる.土砂移動等の流水の作用営 力とドリフトとの関係を明らかにすることで,土砂還元 によって生じた生態系の変化についての理解が深まる.

(3) 課題と今後の方向性

実河川では、礫の平面配置やかみ合わせ等の様々な平 面・立体構造が底面流れ特性に影響する.水生昆虫動態 および流れ場の観点から河床構造についても類型化を行 い、境界層水理学を軸として生物・生態学および河川地 形学の双方の要素を連携させることが期待される.

ダム下流の土砂還元は,経験的な実施が現状である⁴⁾ が,適切な河川空間形態,アーマー化率,土砂の移動性 を目標として定義し,そのためのフラッシュ放流(流量お よび時間等)や土砂還元条件(量や材料サイズ等)を明確に 出来れば合理的な実施が可能となる.このためには,粗 度空間において実際に起きている現象を理解する指標が 必要である.第3節では礫床河川の底面せん断応力と粗 面抵抗則,第4節では粗面境界層の乱流輸送現象という 視点でこの分野の方向性と課題について取りまとめる.

3. 礫床河川の底面せん断応力と粗面抵抗則

(1) 摩擦速度の評価方法と物理的意味

粗面において摩擦速度 U*, 底面せん断応力を計測する 方法には以下の5つの方法が考えられる¹²⁻¹⁵⁾.

a) 水面形を用いる方法

$$U_* = \sqrt{gRS} \tag{1}$$

等流状態を仮定すれば、重力項との釣り合いから勾配S と水深h/径深Rを用いて摩擦速度U*が算出できる.一次 元漸変流の場合は勾配にエネルギー勾配を用いる.より 一般的には水面形を再現するように運動方程式を解く¹⁶⁾ ことで底面せん断応力は逆算できる.水面勾配は精度良 く計算できるため、本手法で算出されるせん断応力は広 い範囲の平均的なせん断応力を見積もるのに適している. b) 対数分布則を用いる方法

時間平均の流速鉛直分布 u が計測されれば、その勾配 (式(2)の微分)から対数分布則(κ:一定)を仮定して計測点 の底面せん断応力を算出できる.

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + A \tag{2}$$

この手法では流速分布は平衡状態のものが仮定されている.また,計測点の高さ,即ち対数則の原点位置(z=0の位置)が必要となる.

c) 乱れエネルギーを用いる方法

$$U_* = \sqrt{C_1 k_b} = \sqrt{C_2 w_b^{2}}$$
(3)

乱れエネルギーの壁法則より,底面近傍では摩擦速度は 乱れエネルギーの1/2乗に比例する.この方法はzの定義 が難しい現地観測において有効である.現地観測におい ては,zを三方向の乱れ強度を求めることは難しいために, 鉛直方向の乱れ強度が用いられる場合もある.乱れを計 測する底面近傍の計測点より下層では平衡状態を仮定し ている.

d) レイノルズ応力を用いる方法

河床極近傍のレイノルズ応力を底面せん断応力とする 方法も乱れエネルギーを用いる方法と同様に下層で平衡 状態を仮定している.

e) 直接計測法

粗面に作用する力については分力計を用いて直接計測 することができる^{例えば 17)}.しかし、実験室においても計 測できる条件は限られ、現地河川には適用できない.

以上のように、直接計測以外の底面せん断応力の算定 法はあるスケールにおいて流れの平衡状態の仮定をする 必要があり、目的とするスケールに応じて適切な手法を 選ぶ必要がある.ある断面のせん断応力が河床材料に作 用する流体力や粗度層の流速を表すためには、その断面 より下層では流れが平衡状態である必要がある.

(2) 流れの解析における粗面の評価方法

流れの解析において,底面せん断応力は底面の境界条件として必要である.

f) 平面二次元解析

$$\tau_b / \rho = C^2 U \sqrt{U^2}, C = \sqrt{g} \left(n / h^{1/6} \right)$$
 (4)

平面二次元解析では一般にはマニングの粗度係数n,水深 h,水深平均流速Uを用いて底面せん断応力が評価される. この方法では,鉛直方向の流速分布については水深全体 に亘って対数分布則などの平衡状態が仮定される.

g) 準三次元·三次元解析

準三次元解析や三次元解析では流れの計算点の最下層 の流速(底面流速)を用い,式(2)から底面せん断応力が与え られる.三次元乱流解析では,底面近傍の乱れエネルギ ーk_bも考慮して,式(5)が用いられる場合もある¹⁸.

$$\frac{u_b}{U_*^2} \sqrt{k_b c_{\mu}^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \ln(E_r z_b \frac{\sqrt{k_b c_{\mu}^{1/2}}}{k_s U_*})$$
(5)

以上のように、流れの解析においても、前節(1)に示した 計測の場合と同様に底面せん断応力の評価には流れの平 衡状態が仮定されており、平面二次元解析が a)、準三次 元・三次元解析法が b),c)もしくは d)におおよそ対応する スケールとなっている.しかし、人工的な粗度の場合と 異なり、広い粒度分布から構成される礫床河川の底面粗 度は均質ではなく、場所ごとに異なる.また、礫層間の 非平衡流れを無視することが出来ず、礫床粗面を不透過 の一様粗度の河床面として取り扱う方法には限界がある.

礫床河川における巨礫群などの河床相度の不均質性や 粗度層の非平衡流れを取り扱う代表的な解析法にはレイ ノルズ平均と空間平均を施す二重平均法が有効である 19)20). 中川ら 19)は粗度径に対する相対水深が小さい流れ場 において、流れと乱れの詳細な計測を行い、底面近傍で は流れの空間的不均質性により流速と乱れの鉛直構造が 変化することを示した. この研究からも示唆されるよう に、二重平均法による解析を行う場合20,21),基礎方程式 の平均化に伴う種々の未知係数の評価法や従来の抵抗則 との関連を明確にすることが課題となる. なお、計測5) に対応する方法としては、粗面形状をすべて厳密に与え、 高度な乱流解析法(DNS, LES, DES など)を用いて解析す る方法がある22). このような方法は、計算負荷のために 粗度要素近傍の範囲の検討に限られるが、粗面河床近傍 の乱流構造だけでなく、ムラサキイガイ群回りの流れ、 乱流構造、洗掘力を検討するための数値実験として有効 なツールになりつつある 22).

(3) 粗度のスケール分離と非平衡粗面抵抗則の考え方

図-1のように不均質かつ様々な粗度要素によって構成 される礫床河川の河床抵抗評価のためには粗度のスケー ル分離が必要となる.内田・福岡²³,24)は河川流解析に適 用できる平面二次元解析の枠組みの中で大きな粗度を形 状として小さな粗度を抵抗則で与える流れの解析法を提 案した.大きな粗度が流れに与える影響を考慮するため, 粗度背面の剥離が考慮できる非静水圧準三次元解析法の GBVC 法が用いられている.大きな粗度の存在によって 小さな粗度で構成される河床近傍の流れも乱されるため に,前節のような流れの平衡状態を仮定することは適切 でない.非平衡粗面抵抗則²³,24)では底面近傍を粗度層, 渦層に分離し,その運動方程式(6),(7)と連続式が解かれる.

$$\rho \frac{Du_{vi}}{Dt} = -\frac{\partial(p_b + \rho g z_b)}{\partial x_i} + \frac{\tau_{bi}}{\delta z_b} - \frac{\tau_{ti}}{\delta z_b}$$
(6)

$$\rho \frac{Du_{ii}}{Dt} = -\frac{\partial(p_b + \rho g z_b)}{\partial x_i} + \frac{\tau_{ii}}{\delta z_b} - \frac{D_i}{\delta z_b}$$
(7)

図-2 はこの解析法を水没する巨石周りの流れの解析結果である.詳細については文献²⁴⁾を参照されたい.

底面近傍で流れが平衡であれば底面(z=h/20), 渦層(z= h/40), 粗度層(z=-k/2)で同一の流れのパターンとなるが, 平衡状態巨石全面の馬蹄形渦, 背後の剥離渦によって流 れは複雑に変化している. このような流れでは底面近傍 のせん断応力を用いて粗度層の流れや粗度層の河床材料 に作用する流体力を評価できないことを示している.

非平衡粗面抵抗則を礫間の生態系を検討に応用するた めには、目的とする流れに応じた粗度スケール分離法を 検討していく必要がある.また、ここで示した方法は河 川スケールの解析をするために時空間的に平均化された 流れ構造であるため、礫床間の微細な乱流構造を知るた めには計算結果を用いたダウンスケール解析が必要とな る.しかし、例えば、計測された水面形を再現するよう にこの解析法を行えば、全体的な底面せん断応力の精度 を確保した中で、流速鉛直分布を考慮し、河床礫間の複 雑流れと礫に作用する流体力の分布が運動方程式に基づ いて力学的に計算できる.最新の計測技術と組み合わせ、 礫床河川の境界層水理学の理解を深めることは、流れや 土砂の水理だけでなく、河川生態分野などの学際領域と 併せて発展することが期待される.

4. 粗面境界層の乱流輸送現象

(1) 河川における粗面境界層と物質輸送の役割

実河川の底層は砂面や礫床,植生といった様々な粗度 要素から構成されるため、フラットな固定床流れとは異 なる複雑な流速分布や乱流構造を有する.

図-3 は河川にみられる典型的な物質輸送現象のスケッ チである. 礫や植生などのマクロな粗度は,局所的な減 速域や剥離域を引き起こし,大きな流速勾配が生じる. 微視的には個々の粗度要素の表層にも境界層が生まれる が,水深スケールでみると図のようにキャノピー層(粗 度領域)の上部に平均流分布の変曲点が現れ,せん断層 あるいは混合層が生成される.このせん断不安定性から 横断軸をもつ大規模な組織渦構造が誘起される.この大 規模組織渦は礫や植生の間隙とその上層(バルク層)と の物質や運動量交換を担う(例えば,文献25),26).

さらにこの渦構造にともない底層から水面層に向けて バースティングが発生する.バースティングは,突発的 な下降流である sweep と上昇流である ejection に分類され る.これらが交互に発生すると考えられており,水面か ら供給される溶存酸素の水深方向輸送に寄与するものと 思われる.水面領域で適度な流体塊の更新(水面更新と よばれる),すなわち酸素飽和流体塊と酸欠流体塊の交換 がなければ,大気から水中への酸素供給は促進されない ³⁷.バースティングはこの水面更新にとって重要な役割を もつと期待されるが,多くの詳細が未解明のままである.



の GBVC4-DWL²⁴)による解析結果. 流線はそれぞれの流れ 場において図の左端から等間隔に発生させている.

これまでの既往研究成果より、粗面と平坦滑面ではバ ースティングの発生特性や組織渦のスケールに違いがあ ることがわかっており²⁸,粗度境界層と乱流輸送の関係 については今後さらなる研究発展が求められる.以下で は植生粗面における乱流構造と輸送メカニズムについて、 水理計測にもとづく知見を解説する.

(2) 水没植生による境界層形成

平均流分布や乱流構造を明らかにするためには、室内 水路における高精度な水理計測が必要である.ここでは 既往の実験結果²⁸にもとづいて、植生粗度によって形成 される境界層の特性を考察する.同実験では、高さ 5cm ×幅0.8cmにカットした 1mm厚のアクリル板を 40cm幅 水路の路床に一定間隔でグリッド上に設置し、配置間隔 によって植生密度λを変化させた.主流速および鉛直流 速成分をレーザー流速計(LDA)および画像流速計測シス テム(PIV)によって計測した.計測環境の詳細については 原論文²⁸を参考にされたい.

図-4にはLDAによって計測された主流速分布< ω >の鉛 直分布を λ =0.38, 0.77 および 1.56 の 3 通りの植生密度に ついて示した. なお<>は同一高さに分布する流速値の水 平面の平均操作を意味する.結果は植生先端 ($z = h_{\nu}$) に おける流速 $u_{h\nu} = <u$ (h_{ν} >で無次元化した.これより植生密 度が大きいほど植生内部 ($z/h_{\nu} < 1$)で植生の存在が流れ場 に及ぼす影響が大きくなり、シェルター効果によって植 生背後領域では主流速が極めて小さくなる. 植生高さ付 近で変曲点が生じ、せん断不安定となる. また植生内部



図-3 河川流における境界層形成と物質輸送のイメージ



図-4 水没植生流れにおける主流速の水深方向分布

で2次ピークをもち、流速分布は負の勾配をもつことが わかる.この逆勾配流速分布は野外の植生気流でも報告 されているが不明な点が多い.植生による2次流の影響 と推測され、今後詳細に検討する必要がある.

(3) 植生境界層と乱流輸送メカニズム

植生流れの乱流構造に関する先駆的な研究として, Raupach et al.²⁹があげられる.彼らは粗度風洞場を時系列 計測し,植生先端付近の変曲点不安定性にともなうスキ ューネス分布特性や乱れエネルギーの収支特性などを明 らかにして,大気キャノピー流れの乱流構造の基礎デー タを得た.水工学分野における植生乱流も鋭意研究され ており,2000年前後より MIT の Nepf グループが精力的 に成果をあげている.特に植生高さに対する相対水深と 乱れ生成の関係特性が明らかにされた³⁰.最近では植生 藻波と乱流の相互作用についての理解も進んでいる(例 えば Patil & Singh³¹).

乱流による物質輸送特性を知るためには、実験水路の 底面付近に極細ノズルを設置して、注入染料の挙動を画 像記録する実験が有効である³⁰. このシステムは2台の 高速カメラを用いて流速と染料濃度分布を同時計測でき る.図-5は瞬間ベクトルと瞬間濃度コンターの時間変化 を例示したものである.(a)は sweep および(b)は ejection を対象としたものである.(a)の sweep に注目すると x/L,=5 で外層からキャノピーへ下降する高速流体がみられる. これが 0.4s 後には流下輸送される. sweep の流下ととも



図-5 瞬間流速と染料濃度分布の時系列

に $xL_v=6-7$ 間のキャノピー領域においては $z/h_v=1$ の先端 付近で濃度分布が時間的に減少する.次に、ejection の(b) 図ではt=0sにおいて $z/h_v=1.5$ 付近に局所的に高濃度分 布がみられる. sweep と同じく ejection も流下方向に輸送 される.特に 0.4 秒後には高濃度分布が上方に巻き上げら れて $z/h_v=2.0$ 付近に観察される. このように組織乱流イ ベントにともない植生内外の物質交換が促進される.

(4) 粗面乱流研究の今後の課題

このように実験室スケールでは植生粗度流れの乱流構 造や輸送機構が定量的に解明されつつある. 次の研究ス テージとしては、バースティングによる水面更新がキー ポイントとなる. 粗度に起因する大規模な乱れが水面領 域に大きな界面流速発散を引き起こし、それに伴い溶存 酸素ガスが大気から水中へ効率的に供給される. すなわ ち底層粗度に起因する乱流が貧酸素域(特に光合成によ る酸素供給がない夜間の中小河川)への再曝気に重要な 役割をはたすものと期待される.また粗度スケールが大 きいほど流れの3次元性が顕著となり,2次流による輸送 機構も明らかにする必要がある.3次元流れの詳細を解明 するためには流速計測法のさらなる高精度化とともに, 二重平均法20,21)のようなデータ解析の高度化も求められ る. さらに室内実験で得られた知見を実河川場へ適用す る際のスケールギャップについても、将来的な研究発展 にとって解決すべき課題の一つといえる.

5. 結論

生態水理学と基礎水理学双方の発展において重要な事 項は広範囲であるが,境界層水理学との関連で本総説を 取りまとめた.重要事項は以下の通りである. 1) 底生動物の環境改善には粗度空間における乱流現象 の解明とそれを適切に表現する指標が必要である.

2) 流れの鉛直構造と非平衡粗面抵抗則を考慮して実測水 面形を再現する解析を行うことにより,全体的な底面せ ん断応力の精度を確保した中で,河床礫間の複雑流れと 礫に作用する流体力の分布が計算できる.

3) 三次元流れの詳細を解明するためには流速計測法のさらなる高精度化と、二重平均法のようなデータ解析の高度化も求められる.

参考文献

- 中村太士:応用生態工学が担ってきた研究領域と未知の領域,一現状認識と新たな視点の発掘を目指して一.応用生態工学10(1):47-58,2007.
- 竹門康弘: 生息場の科学としての応用生態工学.応用生態 工学 10(1): 41-46, 2007.
- 谷田一三:河川における土木工学と生態学の共通性と異質 性 ~生息場所再考~. 応用生態工学10(1): 35-40, 2007.
- 4) 藤田光一ら:ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方-下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて
 -.国土技術政策総合研究所資料 No.521/土木研究所資料 No.4140, 274p., 2009.
- Frissell, C.A. et al.: A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. Environmental Management 10 (2): 199-214, 1986.
- 6) Gibbins, C. et al.: Invertebrate drift and benthic exhaustion during disturbance: Response of mayflies (Ephemeroptera) to increasing shear stress and river-bed instability. River Research and Applications 26: 499-511, 2010.
- 7) 田中規夫ら:土砂還元実施後の二瀬ダム下流における水生 昆虫群集の経年的な動態変化と低水路空間における河床 材料の移動性について、河川技術論文集 19:483-488,2013.
- Brewin P.A. et al.: The seasonal dynamics and persistence of stream macroinvertebrates in Nepal: do monsoon floods represent disturbance. Freshwater Biology 44: 581–594, 2000.
- 9) 長谷見優,田中規夫:付着藻類の繁茂が粗粒化河床の粗度 層内外の運動量交換と底面せん断力に与える影響,土木学 会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I 1189-I 1194, 2017.
- Habib, S. et al.: Turbulence characteristics in open channel gravel bed with small water depth relative to roughness elements height, J. of Jap. Soc. of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 72, No. 4, I_511-I_516, 2016.
- Holomuzki, J.R. & Biggs, B.J.: Taxon-specific responses to high-flow disturbance in streams: implications for population persistence. J. of the North American Benthological Society 19(4): 670-679, 2000.
- Nezu, I. & Nakagawa, H. : Turbulence in open channel flow, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993.
- 国永晃宏ら:河川湾曲部における3次元乱流構造の現地計 測と底面せん断応力の評価方法,水工学論文集,第38巻, pp.727-732,1994.
- 14) Rowinski, P., et al. : Shear velocity estimation in hydraulic research, Acta Geophysica Polonica 53(4), 567-583, 2005.

- Bagherimiyab, F. & Lemmin, U. : Shear velocity estimates in rough-bed open channel flow, Earth Surf. Process. Landforms 38, 1714-1724, 2013.
- 福岡捷二:実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前 線と今後の調査研究の方向性,河川技術論文集 20, 253-258, 2014.
- 17) 内田龍彦ら:段落ち部下流の礫河床に作用する流体力とその変動に関する基礎的研究,第4回流体力の評価とその応用に関する講演集,土木学会水工学委員会基礎水理部会, 51-56,2007.
- Launder, B.E. & Spalding, D.B. : The numerical computation of turbulent flow, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3, 269-289, 1973.
- 19) 中川博次ら: 粗度近傍の組織的流速変動場が相対水深の小 さな流れの乱流構造に及ぼす影響,第33回水理講演会論 文集: 487-492, 1989.
- Nikora, V. et al.: Spatially averaged open-channel flow over rough bed, J. of Hydraulic Engineering, 127(2), 123-133, 2001.
- Nikora, V. et al.: Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: applications, J. Hydraul. Eng. 133(8), pp. 884-895, 2007.
- Rodi, W. et al.: Large-Eddy Simulation in Hydraulics, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013.
- 23) 内田龍彦,福岡捷二:非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面 流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用,土木学会論 文集 B1 (水工学) 71(2), pp.43-62, 2015.
- 24) Uchida, T. et al.: Non-hydrostatic quasi-3D model coupled with dynamic rough wall law for simulating flow over rough bed with submerged boulders, J. Hydraul. Eng. 142(11), 04016054, 14p.
- 25) Sukhodolov, N. & Sukhodolova, N.A.: Case study, Effect of submerged aquatic plants on turbulence structure in a lowland river, J. of Hydraulic Engineering, 136: 434–446, 2010.
- 26) Okamoto, T. et al.: Vertical mass and momentum transport in open-channel flows with submerged vegetations, Journal of Hydro-environment Research, 6(4): 287-297, 2012.
- Komori, S. et al.: The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow, J. Fluid Mech., 203: 103–123, 1989.
- Nezu, I. & Sanjou, M.: Turbulence structure and coherent motion in vegetated open-channel flows, J. of Hydro-Environment Research, 2: 62-90, 2008.
- Raupach, M.R. et al.: A Wind-Tunnel Study of Turbulent Flow close to Regularly Arrayed Rough Surface, Boundary Layer Meteorology, 18: 373-393, 1979.
- Nepf, H. M. & Vivoni, E. R.: Flow structure in depth-limited, vegetated Flow, J. of Geophysical Res., 105:28547-28557, 2000.
- Patil, S. and Singh, V. P.: Characteristics of monami wave in submerged vegetated flow: J. of Hydrologic Engineering, 15(3): 171-181, 2010.
- 32) 山上路生ら:レーザー蛍光誘起法を用いた植生開水路流れ における乱流拡散特性に関する研究,水工学論文集 52:745-750,2013.

(2017.4.3 受付)