

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820233

研究課題名(和文) 岩盤河川の風化侵食と地形変化の相互作用

研究課題名(英文) Interaction between weathering-erosion and riverbed deformation in a bedrock channel

研究代表者

井上 卓也 (Inoue, Takuya)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所・研究員

研究者番号：20647094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：一般的に岩盤は乾湿風化を受けると、ヒビの多い構造になり、その強度と侵食耐性が低下する。また、岩盤の砂礫による被覆率は、給砂量と飽和流砂量の比でモデル化されているが、岩床粗度が被覆率に与える影響については未解明な部分が多い。本研究では、乾湿風化による強度低下率と侵食速度増加率について室内実験により明らかとし、これを定式化した。また、水路実験により被覆率、給砂量、岩床粗度の関係を分析した。最後に、上記検討を考慮した物理ベースの解析モデルを開発し、給砂量と粗度が岩床上の砂礫被覆割合に与える影響について感度分析を行った。

研究成果の概要(英文)：The typical wet-dry cycling of exposed bedrock in river beds gives rise to cracks and voids that are likely to alter the erosion rate of the material when subjected to impacts of moving sediment. The areal fraction of bedrock covered by alluvium is typically modeled as a function of relative sediment flux (sediment supply rate over bedload transport capacity), yet little is known about how the bedrock roughness affects the cover fraction. In this study, we conducted laboratory experiments to develop an understanding of how weathering of bedrock affects the rock tensile strength and the bedrock erosion rate. Next, we performed flume experiments under varied sediment supply rates and bedrock surface topographies. We then developed a physically based model for predicting the cover fraction in consideration of the relative roughness (bedrock roughness over grain size), and tested the sensitivity of the model to changes in bedrock relative roughness and relative sediment flux.

研究分野：工学

キーワード：岩床侵食 乾湿風化 水路実験 粗度 砂礫被覆

1. 研究開始当初の背景

一般に岩盤侵食の時間スケールは非常に遅いため、岩盤河川において河床低下は殆ど生じないと考えられてきた。しかし、岩盤河川の急激な河床低下により、橋脚や護岸の安定性が低下し、被災する事例が近年増加している。このような岩盤河川は、北海道をはじめ日本各地に数多く存在し、乾湿により風化しやすいこと、固結度が低いため流水・流砂により侵食されやすいことなど共通の特徴を持つ。

風化とは、乾湿の繰返しなどにより、ヒビや間隙の多い構造に変質し、最終的に土砂化する現象である。一方、侵食とは、岩盤が流水のせん断力によって剥離したり、流砂の衝突によって摩擦する現象である。これまで、風化現象と侵食現象はそれぞれ個別に研究されており、風化度合と侵食速度の関係に着目した研究は殆ど行われていない。

また、風化と侵食によって形成された様々な岩盤河床がフィールド調査を基に報告(例えば、Wohl and Ikeda¹⁾)されているが、風化-侵食を考慮した物理的な解析手法が確立されていないため、形成条件については未解明の部分が多い。

2. 研究の目的

本研究では、様々な岩床侵食地形の形成条件の分析を目的に、(1)風化-侵食プロセスの定式化、(2)岩床粗度と砂礫被覆率の関係の分析を行った。

3. 研究の方法

(1)に対する研究方法

乾湿風化が岩床強度と侵食速度に与える影響を調査するために実験 A を行った。まず、北海道内の 9 河川 10 カ所から風化していない岩床を採取し、風化処理を行う前のフレッシュな岩床と、人工的な風化処理を行った後の岩床に対して、それぞれ侵食速度試験、引張強度試験、吸水率の試験を行った。

人工的な風化処理は、日本道路公団が定める乾湿繰返し試験に則り行った。乾湿繰返しサイクル数は、事前に各岩床ディスクが崩壊(細粒化)する回数を調べ、その半分の回数とした。ただし、20 回以上乾湿を繰り返しても崩壊しなかった岩床ディスクのサイクル数は、実験時間短縮のため一律 10 回とした。

侵食速度試験は、円筒水槽(図-1)を用いて行われた。外径 220mm の円筒水槽に、岩床から切り出した直径 200mm、厚さ 50mm のディスクを装置底に固定し、粒径 6mm の砂礫 150g と水を投入後、プロペラを一定速度で回転(回転数:1,000rpm)させた(回転流によって砂礫が移動し岩床を削る)。円筒水槽による実験前後の質量変化を電子天秤で計測し、これを実験時間で除した値を質量侵食速度 E_g とした。

岩床の引張強度の計測は、JGS2551 規格に、乾燥密度、飽和密度および吸水率の計測は

JGS2132 規格に則りそれぞれ行われた。

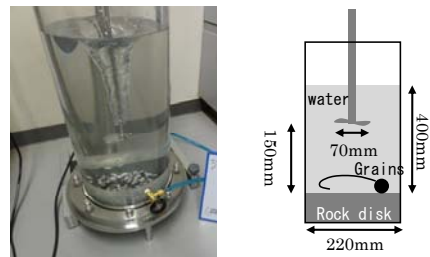


図-1 実験 A で用いられた円筒水槽

(2)に対する研究方法

砂礫により被覆されている岩床は侵食されない。このため、岩床侵食地形を解析するためには、砂礫被覆箇所の予測が重要となる。そこで、砂礫被覆と岩床粗度、給砂量の関係を実験的・理論的に分析した。

図-2は実験Bに用いられた水路床(疑似岩床)の写真である。Run1, Run2, Run3では非侵食性モルタルに粒径の異なる礫が埋め込まれている。埋め込まれた礫の粒径は、Run1で30mm, Run2で50mm, Run3で5mmである。Run4とRun5ではモルタル床にネットが設置されている。Run4のネットは厚さ4mm, Run5のネットは厚さ2mmである。ネットのメッシュサイズはRun4とRun5の両方とも同じ30mm×30mmである。なお水路は直線であり、長さ22m, 幅0.5m, 勾配0.01である。

流量が $0.03\text{m}^3/\text{s}$ 一定の状態、異なる給砂量を定常的に与え、平衡状態に達した際の砂礫による被覆面積率を計測した。給砂量はゼロから砂礫によって完全に被覆されるまで4~5段階とした。給砂時間は被覆率が概ね平衡状態に至った2~4時間程度とし、被覆率は水路上方から撮影した写真画像を白黒2階調化し、そのピクセル数の比により算出した。

実験中および実験後の水理学的な粗度を算出するために、水位を1時間おきに水路センター1点1m間隔で計測した。また、実験後の地形的な粗度を計測するために、通水前と同じ位置の河床高をレーザー砂面計で計測した。

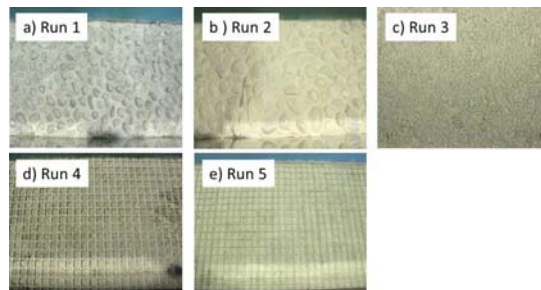


図-2 実験Bの水路床の写真

4. 研究成果

(1)に対する研究成果

①実験 A の結果

図-3 はフレッシュな初期岩床の引張強度 σ_{T0} と乾湿風化後の引張強度 σ_{TN} の関係である。図中の N は乾湿繰返しのサイクル回数である。

これによると、乾湿繰返しによって引張強度は低下するが、サイクル回数に対する強度低下割合は、岩床毎に大きく異なった。図-4は初期岩床の質量侵食速度 E_{g0} と乾湿風化後の質量侵食速度 E_{gN} の関係である。これによると、乾湿処理によって強度がほとんど低下しなかった空知川 (So) を除き、乾湿風化によって侵食速度が増加することが確認された。

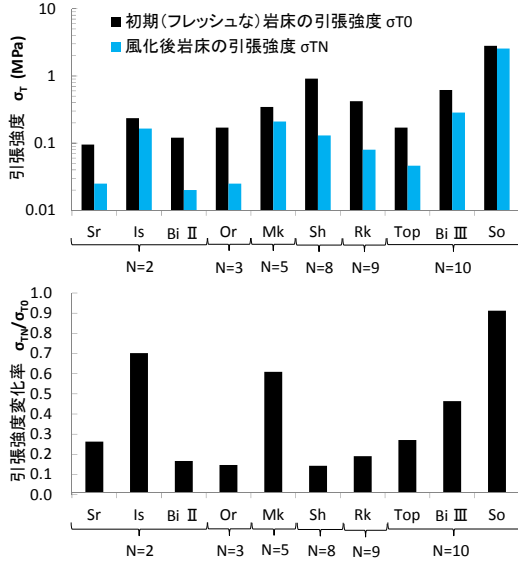


図-3 風化処理前後の引張強度とその比

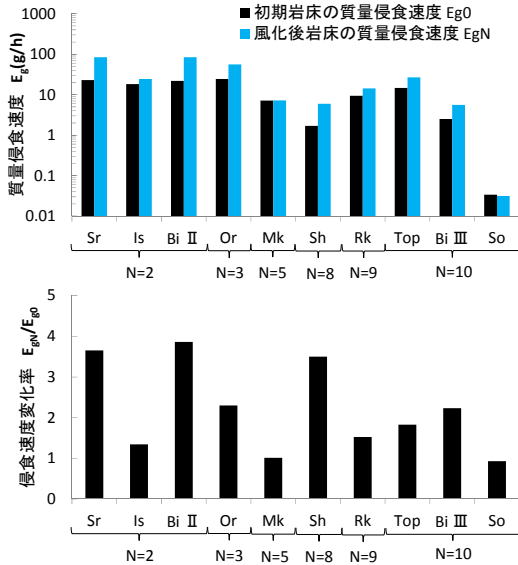


図-4 風化処理前後の質量侵食速度とその比

② 乾湿風化による引張強度の変化

日下部ら²⁾によると、岩盤の圧縮強度の変化率は凍結融解サイクル数に対し指数的に減少する。さらに、日下部らは実験結果の次元解析から、指数関数の定数項が初期圧縮強度の-1乗に依存し、初期吸水率の1乗に依存することを発見した。

乾湿繰返しによる引張強度の低下も、凍結融解による圧縮強度の低下と類似した傾向を示すと仮定すると、以下の式で表される。

$$\left(\frac{\sigma_{TN}}{\sigma_{T0}}\right)^{1/N} = \exp\left(-C_{dw} \frac{W_{a0}}{\sigma_{T0}}\right) \quad (1)$$

ここで、 σ_{TN} は風化後の引張強度、 σ_{T0} は風化前の引張強度、 W_{a0} は初期吸水率、 N は乾湿サイクル数、 C_{dw} は定数である。

図-5は、(1)式に則って実験結果をプロットしたものである。黒線は、実験結果の指数近似である。これによって、実験で用いた岩盤が乾湿繰返しによって、指数関数に則って強度低下していること、 C_{dw} の値が0.21であることが確認された。

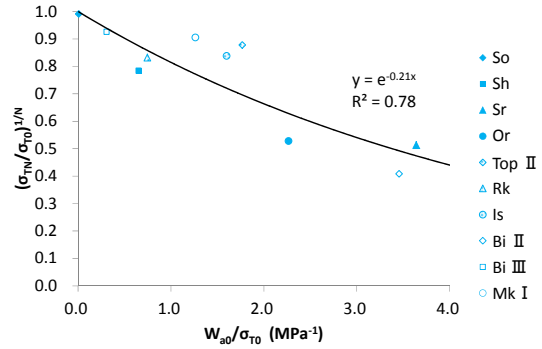


図-5 (1)式に則ってプロットした実験結果

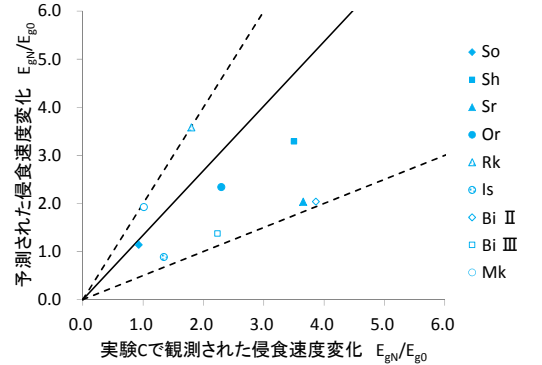


図-6 予測結果と実験結果Aの比較

③ 乾湿風化を考慮した岩床侵食式の検証

本研究で示した(1)式と既往研究³⁾⁴⁾⁵⁾で提案された流砂による岩盤侵食式(2)および摩擦係数の評価式(3)を組み合わせることで、乾湿風化による岩床侵食速度の変化が評価可能となる。

$$E = \beta q_b (1 - P_c) \quad (2)$$

$$\beta = C_a \sigma_T^{\gamma_1} (d/k_{sb})^{\gamma_2} \quad (3)$$

ここで、 E は岩床の侵食速度、 q_b は流砂量、 P_c は砂礫による岩床の被覆面積割合(被覆率)、 β は摩擦係数、 σ_T は引張強度、 γ_1 は-1.5~-2、 d は粒径、 k_{sb} は岩床の等価粗度高、 γ_2 は0.5、 C_a は定数0.00009~0.00014である。

図-6は、実験から得られた乾湿風化による侵食速度比と上述の(1)(2)(3)式から予測した侵食速度比の関係である。ここで、黒実線は実験結果と予測結果が完全に一致するライン、黒点線は2倍および0.5倍の誤差範囲を示している。これによると、実験結果と本研

究で提案した乾湿風化を考慮した侵食速度式の予測結果は概ね一致している。

(2)に対する研究成果

①実験 B の結果

図-7は岩床粗度（砂礫が堆積していない状態の水理学的な粗度高さ）が最も大きいRun1シリーズの、図-8は岩床粗度が最も小さいRun3シリーズの実験後の水路床写真である。これによると、岩床粗度の違いによって、給砂量に対する被覆率が全く異なることが分かる。特に給砂量が等しいRun1-4とRun3-1を比較すると、粗度が大きいRun1-4の岩床が砂礫で覆われたのに対し、粗度が小さいRun3-1では砂礫が殆ど堆積していない。

図-9は実験終了後の写真から判読した平衡被覆率 P_c と単位幅給砂量 q_{bs} の関係である。ここで、被覆率は、砂礫被覆面積を水路全体面積で除した値であり、完全な砂礫床で1、完全な露岩床で0である。これによると、相対粗度（岩床粗度を砂礫粒径で除したもの k_{sb}/d ）が大きいRun1, Run2, Run4シリーズの被覆率は、給砂量の増加に伴い増加した。しかし、相対粗度が小さいRun3とRun5の被覆率は、給砂量が小さいとき殆ど増加せず、ある給砂量を超えると急激に1（完全な砂礫床）に移した。

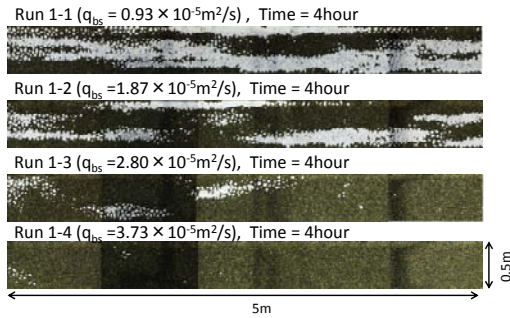


図-7 Run 1 シリーズの通水後の水路床写真 (白:岩床, 黒:砂礫)

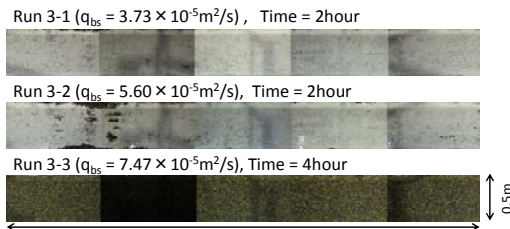


図-8 Run 3 シリーズの通水後の水路床写真 (白:岩床, 黒:砂礫)

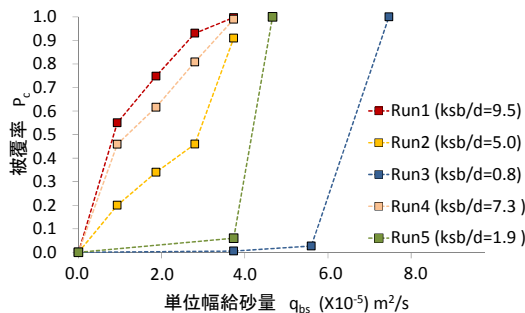


図-9 給砂量, 相対粗度と被覆率の関係

②粗度と被覆率の理論的分析

ここでは、実験Bで見られた被覆率、岩床粗度、給砂量の関係を予測できる理論的なモデルを開発する。

Parkerら⁶⁾は、被覆率を砂礫層厚の関数で表している。

$$P_c = \begin{cases} \frac{\eta_a}{L} & \text{for } 0 \leq \frac{\eta_a}{L} < 1 \\ 1 & \text{for } \frac{\eta_a}{L} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 η_a は平均的な砂礫層の厚さ、 L は岩床が侵食されなくなる砂礫層厚（岩床凹凸高さの標準偏差の2倍程度）である。

砂礫層厚 η_a が0の場合、河床は完全な岩床となり、水理学的な粗度高さは、岩床凹凸に依存する k_{sb} となる。砂礫層厚 η_a が L の場合、河床は完全な砂礫床となり、水理学的な粗度高さは、堆積した粒径に依存する $k_{sa} (=2.5d)$ となる。ここで、砂礫床と岩床が混合した河床の水理学的粗度高さ k_s は上記2点間を線形的に変化すると仮定する。

$$k_s = \begin{cases} \left(1 - \frac{\eta_a}{L}\right)k_{sb} + \left(\frac{\eta_a}{L}\right)k_{sa} & \text{for } 0 \leq \frac{\eta_a}{L} < 1 \\ k_{sa} & \text{for } \frac{\eta_a}{L} \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

一般的に水理的粗度高さが変化すると、無次元掃流力 τ_* と無次元限界掃流力 τ_{*c} も変化する。本研究では、 τ_* をManning-Stricklerの関係式を変形させた(6)式から求め、無次元限界掃流力 τ_{*c} は井上ら⁷⁾が岩床河川を対象に提案した(7)式より算出する。

$$\tau_* = \left(\frac{k_s^{1/6} Q}{7.66 B \sqrt{g S_b}} \right)^{3/5} \frac{S_b}{R_b d} \quad (6)$$

$$\tau_{*c} = 0.03 \left(\frac{k_{sb}}{d} \right)^{0.6} \quad (7)$$

ここで、 Q は流量、 B は水路幅、 g は重力加速度、 S_b は河床勾配、 R_b は砂礫の水中比重(1.65)である。

岩床上の飽和流砂量（岩床上を流れうる流砂の最大量）も粗度によって変化すると考えられる。井上ら⁷⁾によると、岩床の飽和流砂量は既存の掃流砂量式に岩床の無次元限界掃流力を代入することで概ね推定できる。

$$q_{bc} = A_b (\tau_* - \tau_{*c}) \sqrt{R_b g d^3} \quad (8)$$

ここで、 A_b は流砂量式の係数であり、これまでに様々な値が提案されている。本研究では、実験水路が砂礫床だった場合の流砂量を最も精度良く表せたWong and Parker⁸⁾の3.97を用いる。

最後に流砂量の保存を考える。本研究ではLuu et al.⁹⁾が提案した掃流層を考慮した連続式を用いる。

$$\frac{\partial V_b}{\partial t} + (1-\lambda) \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

ここで、 V_b は掃流砂層内における砂礫の単位面積当たりの体積、 λ は堆積した砂礫の空隙率(0.35)である。

通常の砂礫床では、河床から常に砂礫が補給されるため、その場を通過する流砂量 q_b とその場が流しうる流砂量 q_{bc} は等しい。しかし、岩床河川では、岩床から砂礫が発生しないため、流砂量 q_b は飽和流砂量 q_{bc} を下回る場合がある。そこで、本研究は、通過する掃流砂の体積 V_b と飽和状態の体積 V_{bc} を用いて、通過する流砂量を補正する。

$$q_b = \begin{cases} \left(\frac{V_b}{V_{bc}}\right) q_{bc} & \text{for } 0 \leq \frac{V_b}{V_{bc}} < 1 \\ q_{bc} & \text{for } \frac{V_b}{V_{bc}} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

(4)~(10)式を用いて、砂礫層厚 η_a が平衡に至る岩床粗度、流砂量、被覆率を解析する(解析方法については、主な発表論文①に詳述しているため、ここでは省略する)。

図-10は、今回の実験条件における解析結果と実験結果の比較である。これによると、今回提案したモデル(すなわち、(4)~(10)の組合せ)によって、実験結果を概ね再現できることが確認された。

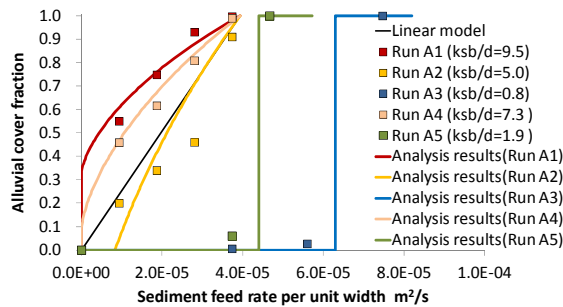


図-10 解析結果(実線)と実験結果(■)の比較

③粗い岩床と滑らかな岩床

ここで、岩床粗度が砂礫床粗度より小さい場合($k_{sb}/d < 2.5$)をClast-Smooth, その逆($k_{sb}/d > 2.5$)をClast-Roughと定義し、その特徴を考察する。

Clast-Roughの場合、完全な岩床における飽和流砂量は小さいため砂礫は堆積しやすい。しかし、部分的な被覆が生じると砂礫床部と岩床部を含む水路表面の凹凸は小さくなり、水路全体の水理学的な粗度も低下する。粗度の低下に伴い、飽和流砂量は増加し、砂礫は堆積しにくくなる。つまり、粗い岩床では、砂礫堆積を減速させる方向に粗度が変化するため、被覆率が緩やかに増加する(図-10のRun1, Run2, Run4)。

一方、Clast-Smoothの場合、完全な岩床における飽和流砂量が大きいいため砂礫は堆積しにくい。しかし、飽和流砂量を超え砂礫が

わずかに堆積すると、水路表面の凹凸は大きくなり、粗度は上昇する。粗度が上昇すると、その場の飽和流砂量は減少するため、ますます砂礫は堆積しやすくなる。滑らかな岩床では、砂礫堆積を加速させる方向に粗度が変化するため、被覆率が急激に増加する(図-10のRun3, Run5)。

さらにClast-Smoothの場合、露岩床から砂礫床へシフトする流砂量と、砂礫床から露岩床へシフトする流砂量が異なり、そこにヒステリシスが存在する。砂礫床から露岩床へ遷移する場合、一部露岩すると、加速度的に露岩箇所が増加する(図-11の緑線)。また、露岩河床を砂礫床へ回復するためには、露岩時より遙かに多い土砂供給が必要となる(図-11の青点線)。これは、滑らかな岩床河川が露岩した場合、砂礫床への復元が非常に難しいことを意味している。

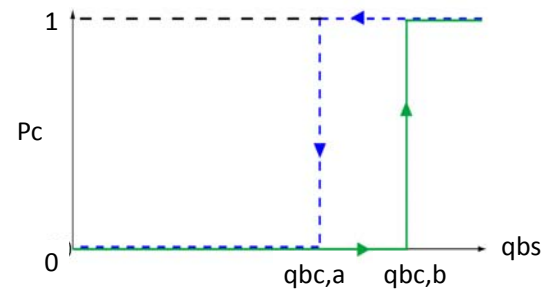


図-11 滑らかな岩床で生じる被覆率のヒステリシス (Pc: 被覆率, qbc,a: 砂礫床の飽和流砂量, qbc,b: 露岩床の飽和流砂量, qbs: 上流からの供給流砂量)

(4)まとめ

- ① 乾湿の繰り返しによる岩床の強度低下は、初期岩床の引張強度と吸水率に依存し、水を含みやすく軟らかい岩の方が強度低下しやすい。
- ② 乾湿風化によって、岩床の侵食速度は大きく変化し、風化しやすい岩床の場合、数回の乾湿繰り返しによって侵食速度が初期(フレッシュな)状態の3~4倍に増加した。
- ③ 乾湿風化を考慮した流砂による岩床侵食式を提案し、提案した侵食式によって風化による侵食速度変化率を概ね再現できることを確認した。
- ④ 給砂量が等しい場合、岩床の砂礫による被覆面積割合(被覆率)は、岩床粗度が大きいほど大きくなる。
- ⑤ 粗い岩床(Clast-Rough)では、給砂量の増加に伴い、被覆率は徐々に増加する。
- ⑥ 滑らかな岩床(Clast-Smooth)では、給砂量に対する被覆率の変化が粗い岩床に比べ急激である。また、砂礫床から露岩床へのシフトと、露岩床から砂礫床へのシフトにヒステリシスが存在する。

<引用文献>

- 1) Wohl, E.E., H. Ikeda : Patterns of Bedrock Channel Erosion on the Boso Peninsula, Japan, *The Journal of Geology* Vol. 106, No. 3, 1998.
- 2) 日下部祐基, 伊東佳彦, 佐藤博知: 岩石の凍結融解による強度劣化の推定方法と現地観測による検証, *日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会*, 32, 2012.
- 3) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 4) Chatanantavet, P., and G. Parker : Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 5) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳: 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, *河川技術論文集*, 第17巻, 2011.
- 6) Parker, G., Fernández, R., Viparelli, E., Stark, C. P., Zhang, L., Fu, X., Inoue, T., Izumi, N., and Shimizu, Y. : Interaction between waves of alluviation and incision in mixed bedrock-alluvial rivers, *Advances in River Sediment Research*, ISRS, 2013.
- 7) 井上卓也, 伊藤丹: 軟岩河床における粗度, 無次元限界掃流力と飽和流砂量の関係, 第68回土木学会年次講演会報告集, 2013.
- 8) Wong, M., Parker, G. : Re-analysis and correction of bedload relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *J. Hydraul. Eng.* 132, 2006.
- 9) Luu, L. X., Egashira, S., and Takebayashi, H. : Investigation of Tan Chau reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.48, 1057-1062, 2004.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Takuya Inoue, Norihiro Izumi, Yasuyuki Shimizu, Gary Parker : Interaction among alluvial cover, bed roughness and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, *Journal of Geophysical Research -Earth Surface-*, 査読有, Volume 119, Issue 10, 2014, 2123–2146.
DOI: 10.1002/2014JF003133
- ② 井上卓也, 松元一馬, 清水康行, 泉典洋, Gary Parker, 伊藤丹: 岩床粗度と砂礫被覆に関する実験的研究, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, 査読有, Vol.70, No. 2, 2014, I_727-I_734.
DOI: 10.2208/jscejam.70.I_727
- ③ 井上卓也, 山口里実, 船木淳悟: 乾湿風化を伴う流砂による岩床侵食, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 査読有, Vol.71, No.4, I_853-I_858, 2015.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020435624>

〔学会発表〕(計1件)

- ① Takuya Inoue, Norihiro Izumi, Yasuyuki Shimizu, Gary Parker : Interaction between Bedrock Roughness and Alluvial Cover: Field Experiments and Modelling, *AGU Fall meeting (招待発表)*, 2014年12月15日～2014年12月19日, アメリカ・サンフランシスコ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 卓也 (INOUE, Takuya)

寒地土木研究所・研究員

研究者番号: 20647094