土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1045-I_1050, 2018.

乾湿風化を考慮した岩盤侵食モデルの構築

サムナー 圭希[1]・井上 卓也[2]・人見 美哉[3]・清水 康行[4]

[1]正会員　株式会社水工リサーチ（〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目2-7）
E-mail:t-sumner@suiko-r.co.jp
[2]正会員　博（工）　寒地土木研究所　寒地河川チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）
E-mail:inoue-t@ceri.go.jp
[3]非会員　株式会社ドーコン　地質部（〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1）
E-mail:yh1195@docon.jp
[4]フェロー　博（工）　北海道大学工学研究院教授（〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail: yasu@eng.hokudai.ac.jp

近年，北海道の多くの河川で岩盤の露出と侵食が河川構造物の安定性の低下を引き起こしている．岩盤侵食の主な原因は流砂の衝突によるものであると報告されているが，岩盤は乾湿や凍結融解の繰り返しによっても侵食される．岩盤の侵食地形は砂礫被覆割合と岩盤強度の関係から，渓谷型，単一澪筋型，複数筋型に分類できる．岩盤床が露出している豊平川花魁淵において針貫入試験を行い，岩盤強度を計測したところ，水際部の岩盤強度が一番低いことから乾湿サイクルによる風化を確認した．本研究では，乾湿風化を考慮した侵食モデルを構築し数値計算を行った．結果，風化による侵食が卓越すると岩盤河床は平滑化され，逆に流砂の衝突による侵食が卓越すると澪筋の下刻が進行した．

Key Words : *bedrock, erosional morphology, numerical simulation, wet-dry weathering*

１．はじめに

近年，北海道の複数の河川では砂礫の流出に伴い岩盤床が露出し，流砂の衝突等による岩盤侵食によってさらに河床低下が進行している．平成28年8月の北海道豪雨では台風10号の接近による大雨で，十勝川水系や石狩川水系で堤防の決壊や河川の氾濫，橋梁の流失など甚大な被害に見舞われた．例えば，ペケレベツ川上流では大規模な出水により砂礫層が流失したため，岩盤床が露出し岩盤侵食が進行した（**図-1**）．今後，河川管理をする上で岩盤侵食の現象を把握することは重要であると考える．

岩盤床の露出は，主に流砂量の減少や掃流力の増加，砂州の形成と移動などにより発生すると報告[1),2),3),4)]されている．一度露出した岩盤床は，岩盤床の粗度が低く滑らかな場合，砂礫床に復元することが困難[5)]である．Chatanantavet and Parker[3)]は，この流砂量があるにも関わらず岩盤床が砂礫によって被覆されない現象をrunaway alluviationと呼んでいる．

流砂量の増加は，岩盤床に衝突する粒子の個数を増やすことになり，侵食速度を増加するtools effectと，流砂の増加により，岩盤床を保護する砂礫面積の割合も増加し，結果として侵食速度が減少するcover effectという，相反する二つの効果を持つことが明らかとなっている[1)]．このことは，砂礫の有無や挙動が岩盤侵食に大きく影響することを意味している．

また，岩盤は乾湿や凍結融解の繰り返しによって風化し，岩盤表面の劣化が起こる[6),7),8),9)]．亀裂や間隙の増加は岩盤強度を低下させるため，風化によって岩盤は侵食されやすくなる．そのため，岩盤侵食メカニズムを解明する場合，風化による岩盤の侵食速度も考慮する必要がある．Inoue et al.[10)]や日下部ら[9)]によると，岩盤強度の変化率は乾湿繰返しまたは凍結融解サイクル数に対し指数的に減少し，岩盤強度の減少率は初期吸水率と初期引張強度の比に依存すると述べている．しかし，風化に伴う

図-1　岩盤侵食が進行したペケレベツ川上流

侵食地形については知見がほとんどない．そこで，本研究では，風化が侵食地形に及ぼす影響を把握することを目的に，現地調査と乾湿風化を考慮した岩盤侵食モデルの構築を行った．

２．岩盤床を有する河川の現地調査

岩盤侵食地形を観察すると，北海道の河川だけでも様々な河道地形が形成されていることがわかる．岩盤の侵食地形は，砂礫の被覆面積及び給砂量，岩盤の強度により異なると推測できる．現地調査[11]で確認した岩盤侵食地形の分類し，岩盤強度と砂礫被覆面積の割合の関係を整理した．

北海道の岩盤侵食地形は主に，①平坦な河床に複数の浅い筋を有する複数筋型，②澪筋部に沿って侵食が進行する単一澪筋型，③河道全体が鉛直方向に穿入する渓谷型の3つに分類できる（**図-2**）．岩盤侵食地形のタイプを赤の点線で大まかに区分した．

複数筋がみられる網走川や居辺川の調査区間の砂礫の被覆面積の割合は12.5%～29.9%（**表-1**）と低く，砂礫はほとんど堆積していない．また，筋の深さは数cmから数十cmと浅いのが特徴である．擬似岩盤床を用いた水路実験[12]においても，給砂量が平衡流砂量よりも少ない場合に複数の縦筋状の侵食が確認されている．縦筋は，水深の2倍程度の間隔で並列して形成されると報告[13),14]されており，これは平坦床において乱流起因で発生する第二種二次流によって，流れの方向に砂礫が集中するためと推測される．

流砂量が増加し局所的に流砂が集中すると，澪筋部に沿って岩盤が侵食を始め，澪筋状の侵食地形を形成する．この単一澪筋型は美瑛川や石狩川上流にみられ，澪筋の深さは数m程度である．井上ら[15]は石狩川上流部にて現地実験を行い，流砂の集中によって形成された局所的な澪筋地形を確認し，また及川ら[16]は，平面二次元数値解析によってその岩盤床上の澪筋侵食を再現している．

渓谷型の然別川では砂礫被覆面積の割合が98%（**図-3**）であり，被覆の影響により鉛直方向の侵食が抑制され，相対的に側方侵食が強くなった結果，側壁が切り立ったと推測される．なお然別川の谷の深さは10m以上あり，鉛直方向の侵食も起きていると推測される．この鉛直方向の侵食がいつ起きるのかはまだ分かっておらず，被覆率が低い時代があった可能性や，堆積している砂礫層が薄く洪水中は層ごと動いている可能性などを想定し，調査を続けている最中である．いずれにせよ，渓谷型の場合，岩盤床強度は非常に低く，砂礫の衝突に対し脆弱である．このことから，侵食の作用が強いことが渓谷地形の一因であることは容易に推測される．

侵食地形と引張強度の関係（**表-1**）を整理すると，岩盤が非常に軟らかいと渓谷型に，やや軟らかいと単一澪筋型に，やや硬いと複数筋型になる傾向にあった．しかし，釧路川は岩盤引張強度が0.05MPaと比較的低いにも関わらず，渓谷化していない．然別川と比べると，釧路川は披覆率が小さいことから，澪筋型と渓谷型の区分は，岩盤の強度だけでなく，土砂供給にも依ると考えられる．また，釧路川の調査対象区間では澪筋は深く侵食しているが，それ以外の部分は，岩盤床が露出しており平滑な地形である．流砂の衝突によって岩盤床が平滑に侵食す

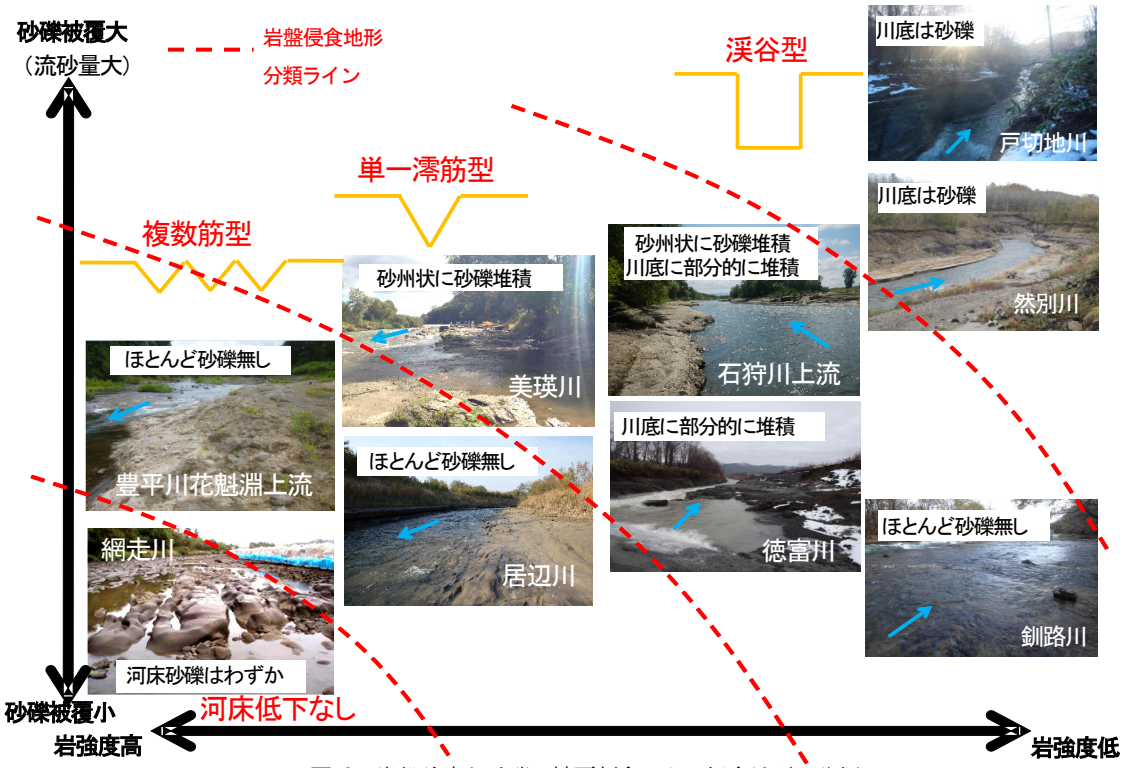

図-2　岩盤強度と砂礫の被覆割合による侵食地形の分類

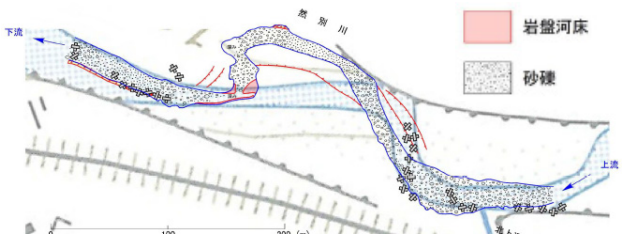

図-3　然別川のスケッチ図

る事例はなく，乾湿風化又は凍結融解等の風化によって岩盤強度が低下し，最終的に岩盤が土砂化した結果，平滑化した可能性も考えられる．

北海道札幌市を流れる豊平川花魁淵上流を対象に，河岸寄りの乾燥部，湿潤状態である水際，ある程度水深がある水中部の河床状況が異なる3箇所の岩盤引張強度の計測を行った．計測は軟岩ペネトロ計（丸東製作所・SH-70）を使用し，各箇所5回計測した平均値を**表-2**に示した．花魁淵上流の岩盤は，西野層基底部の硬質の八垂別集塊岩（**図-4**）であり，その河床は砂礫の堆積が少なく，平滑な河床と複数の澪筋が混在しているため，複数筋型に分類できる（**図-2**）．調査結果（**表-2**）をみると，水中が非常に硬く，水際の岩盤強度はかなり低下していることから，花魁淵上流の平滑な岩盤床の形成には，乾湿風化が影響している可能性が高い．

以上の調査により，岩盤侵食地形の形成要因を論じるためには，岩盤の侵食作用（主に強度と流砂量に依存）だけ考慮した既存モデルでは不十分であり，乾湿の繰り返しによる風化作用も考慮した新たなモデルの構築が必要であると考えた．

３．風化モデルの構築と考察

本研究は，乾湿風化による岩盤強度の低下と，それに伴う流砂の衝突による侵食速度への影響を数値計算により確認するため，岩盤床の乾湿風化モデルの構築を行なった．また，岩盤は水分を吸収して岩盤強度が低下し，最後には土砂化（スレーキング）することから，乾湿風化のみによる侵食も考慮した．

(1)　数値解析法

本研究の数値計算モデルは，非定常の平面2次元流況計算を採用しており，流れの基礎式および砂礫床の河床変動手法については，iRICソフトウェアのソルバーNays2DHのHP(http://i-ric.org/ja/software/18/)に記載されているため，ここでは省略する．また，砂礫層の変動については，流砂の連続式に被覆率を含ませた数値計算法[17]を用いており，これも省略する．

流砂の衝突による侵食速度は，既往研究[3]によると以下の式で表わされる．

表-1　調査対象区間の圧裂引張強度と砂礫の被覆面積割合

調査対象河川	侵食地形タイプ	圧裂引張強度(MPa)※	被覆面積割合(%)
網走川	複数筋	1.03±0.24	12.5
居辺川	複数筋	0.16±0.04	29.9
釧路川	単一澪筋	0.05±0.02	16.8
然別川	渓谷	0.02±0.01	97.9

※圧裂引張強度は3回計測した平均値

図-4　花魁淵上流の八垂別集塊岩と軟岩ペネトロ計

表-2　花魁淵の換算引張強度

調査箇所	河床状況	換算引張強度(MPa)
花魁淵上流	乾燥	0.52±0.12
	水際	0.33±0.05
	水中	0.68±0.20

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -E = -\beta\sqrt{{q_{b,x}}^2 + {q_{b,y}}^2}\left(1 - P_c\right) \tag{1}$$

ここで，t は時間，x は縦断方向の座標軸，y は横断方向の座標軸，$q_{b,x}$，$q_{b,y}$ はそれぞれ x，y 方向の単位幅流砂量，η_b は岩盤床の標高，E は侵食速度，β は岩盤床の摩耗係数，P_c は砂礫が岩床を被覆している面積割合である．また，Inoue et al.の研究[10]によると，岩盤床の摩耗係数 β は以下の式で表わされる．

$$\beta = \beta_c \sigma_T^{-2}\left(d/k_s\right)^{0.5} \tag{2}$$

ここで，β_c は摩耗定数，σ_T は引張強度，d は粒径，k_s は岩盤床の等価粗度高さである．

Inoue et al.[10]は，乾湿の繰り返しによって岩盤強度が指数的に低下することを実験的に確認し，以下の式を提案している．

$$\frac{\sigma_{TN}}{\sigma_{T0}} = \exp(-\alpha_{dw} N) \tag{3}$$

$$\alpha_{dw} = C_{dw}\frac{W_{a0}}{\sigma_{T0}} \tag{4}$$

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（密度試験JGS2132），N は乾湿サイクル数，C_{dw} は定数である．乾湿サイクル数 N によって低下した引張強度 σ_{TN} は，(2)式の σ_T に代入される．乾湿サイクルは一定時間乾燥と湿潤を繰り返したものを1サイクルと設定する．

また本研究では，風化による岩盤の土砂化を新たにモデルに組み込む（**図-6**）．岩盤の土砂化は，岩盤の吸水膨張によって岩盤強度が低下し，その強度が限界を超えることにより岩自身の結合力が消失し発生する[18]と言われている．そこで，土砂化させる岩盤強度の閾値 σ_{TC} を設定する．岩盤強度 σ_{TN} が初期岩盤強度 σ_{T0} と同じかそれよりも低く土砂化の閾値 σ_{TC} より大きい場合，岩盤高に変化はない．岩盤強度 σ_{TN} が低下し，土砂化の閾値 σ_{TC} に達した場合，岩盤河床は土砂化により一定量河床低下する．この風化による岩盤侵食深さを $\Delta\eta_{bw}$ とする．$\Delta\eta_{bw}$ 河床低下した岩盤床の引張強度は，またフレッシュな状態に戻るため風化前の引張強度 σ_{T0} を再設定する．

(2) 計算条件

計算河道は，長方形矩形断面形状とし，計算水路長は1km，水路幅は40m，縦断方向の河床勾配は0.01である．助走区間は川幅の5倍である200mを水路上下流に設けた．横断形状は，風化の影響が表現できるよう横勾配の緩いV字型とし，水路中央と両水路際の河床高差は0.05mに設定した．格子サイズは2m×10mである．また，河床が乾燥と湿潤を繰り返す条件にするため，流量は0.2m³/sと40m³/sを1時間おきに変化させるよう山型のハイドロを96時間与えた（**図-5**）．40m³/sの流量は水路が満杯になる流量であり，0.5m³/sは両水路際の河床が露出する流量としている．今回の数値実験では，乾燥と湿潤を30分間繰り返すと乾湿サイクル数が1とカウントすることとした．初期河床は，砂礫の被覆がなく完全に露出した岩盤床とした．給砂量は流量40m³/sの単位幅平衡流砂量の10%である2.0×10⁻⁴m²/sを上流端から水路幅一様に与え，粒径は50mmとした．なお，流砂量が少ない場合においても侵食式(1)，(2)が適用可能[19]であることから，本研究でもこの侵食式を用いることとした．マニングの粗度係数0.03から岩盤床の等価粗度高さを算出し0.1386mとした．Inoue et al.の実験[10]によると，(4)式の C_{dw} の値は0.21，β_c は0.00014である．風化しやすさを検証するために釧路川の泥岩をモデルとし，現地調査のデータ[11]を基に岩盤の吸水率 W_{a0} は0.5，初期岩盤強度 σ_{T0} は0.1MPaに設定した．釧路川と同程度の強度を持つ岩盤の風化実験では，おおよそ0.02MPa～0.18MPaで，岩盤が割れしまう[10]．そこで，風化による岩盤の土砂化閾値を σ_{TC} 0.08MPaとした．また，既往研究[7),10),20)]によると風化の深さはおよそ数mmから数m程度と報告されている．本研究では，風化による侵食深さ $\Delta\eta_{bw}$ を松倉の論文[7]から0.05mとした．土砂化の閾値及び風化による侵食深さの値について

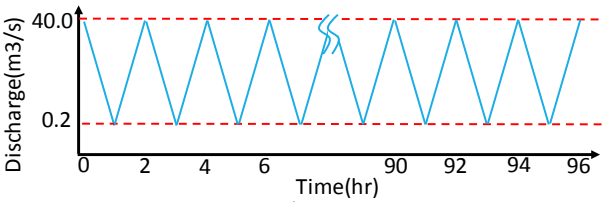

図-5 流量ハイドロ

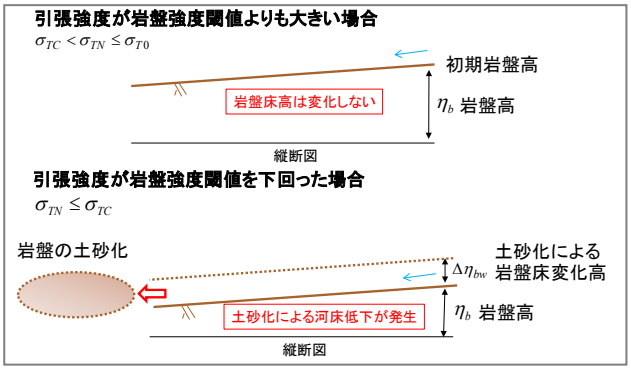

図-6 風化による岩盤の土砂化

表-3 計算条件

計算ケース	流砂の衝突による侵食	乾湿風化による侵食
case1-1	—	○
case1-2	○	○
case1-3	○	—

は十分に研究されておらず，有用なデータがないため今後検討が必要である．

計算ケースは，乾湿風化（土砂化）による岩盤侵食のみ考慮したcase1-1，乾湿風化と流砂の衝突による侵食を考慮したcase1-2，流砂の衝突による侵食のみを考慮したcase1-3の3ケース（**表-3**）とし，計算を行った．

(3) 数値実験の結果と考察

図-7に3ケースの96時間計算後の縦断距離500m区間の河床横断図を示す．青い線は初期岩盤河床高を表わしている．乾湿風化のみの侵食を考慮したcase1-1の計算結果によると，岩盤床は平滑な地形を形成した．**図-8(a)**の河床変化高コンター図からも両水路際が河床低下しており，**図-9(a)**の岩盤強度コンター図では上下流端の助走区間を除き，両水路際の岩盤強度が低下している．これは，両水路際の乾湿サイクルの繰り返しにより水路際から風化による侵食（土砂化）が起ったためである．土砂の供給が皆無である河床では，このような平滑な岩盤床が形成される可能性が高いと考えられる．

乾湿風化と流砂の衝突による侵食を考慮したcase1-2の計算結果（**図-7(b)**）によると，水路中央は澪筋状を形成し，両水路際は平滑に侵食しており，**図-8(b)**からみても河床は全体的に低下しているのを確認した．流砂は，河床が低い水路中央に集中したため澪筋が固定され下刻が進行する．同時に，風化による土砂化によって低下した両水路際の河床に流砂が衝突したことにより侵食はさ

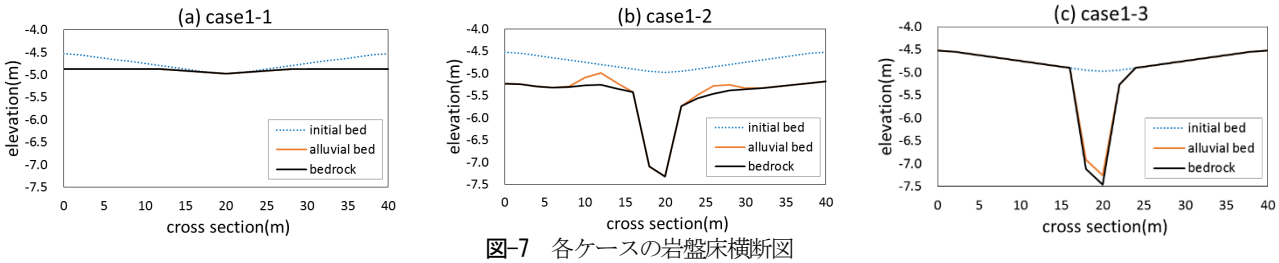

図-7　各ケースの岩盤床横断図

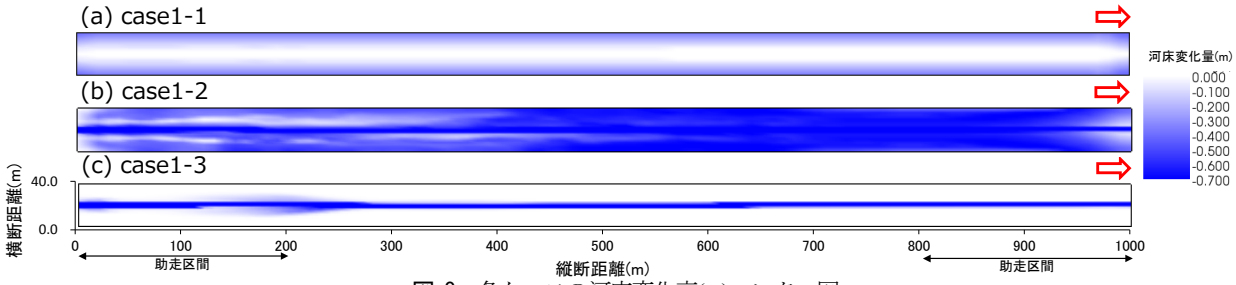

図-8　各ケースの河床変化高(m)コンター図

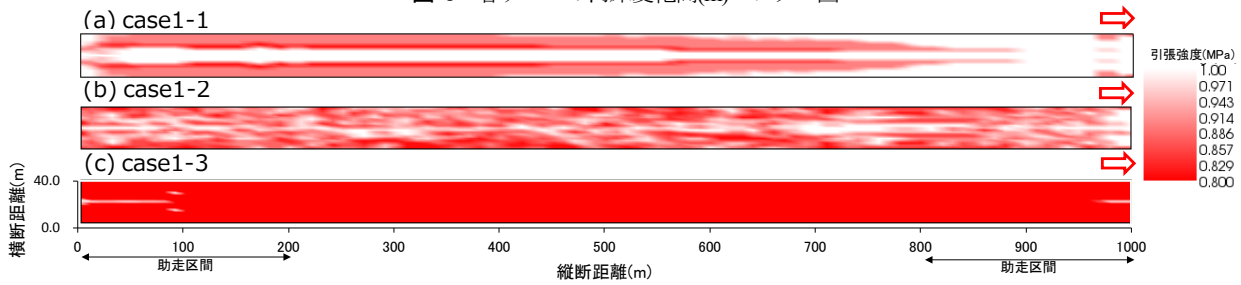

図-9　各ケースの岩盤強度(MPa)コンター図

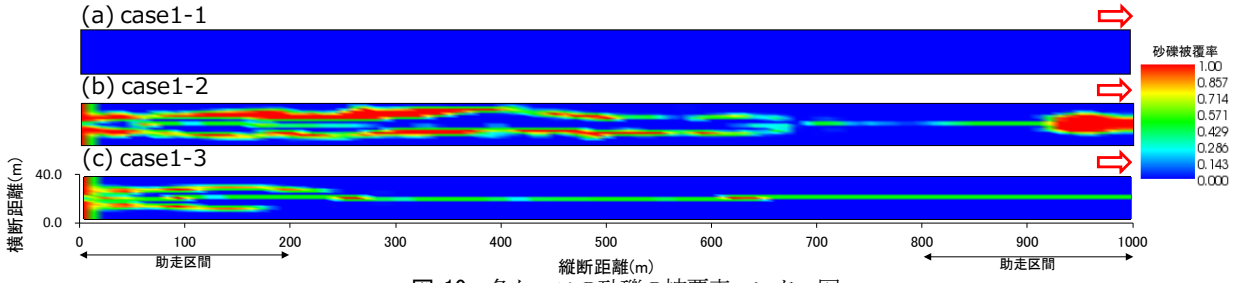

図-10　各ケースの砂礫の被覆率コンター図

らに進行したため，case1-1よりも侵食量が多いことが**図-10(b)**の砂礫の堆積から推測できる．釧路川の岩盤床は，単一澪筋型に位置するが，その周りの河床が平滑であるため，このcase1-2の計算結果と類似している．

流砂の衝突のみによる侵食を考慮したcase1-3の計算結果（**図-7(c)**）によると，水路中央の河床低下が顕著である．**図-8(c)**からも水路中央以外の侵食は確認されなかった．乾湿サイクルによって岩盤強度は低下するものの（**図-9(c)**），風化による土砂化が考慮されていないため侵食されず，流砂が水路中央に集中（**図-10(c)**）し下刻が進むと両水路際に水が着かなくなり深いV字型の渓谷のような地形が形成された．3ケースの数値実験の結果から，風化速度が限りなく小さい場合，側壁の風化が進みづらく鉛直方向の侵食が卓越するため，急傾斜の切り立った地形を形成し，一方で，風化速度が大きい場合，鉛直方向の河床低下が進行するよりも側壁に対する侵食が卓越し緩傾斜で平滑な地形を形成する傾向にあると推測できる．

今回の調査や数値実験によって，流砂が多く軟らかい岩盤河床では，流砂の衝突による侵食が卓越し渓谷地形が形成され，流砂が少なく硬い岩盤河川では，風化による侵食が卓越し，平滑な地形が形成されることが確認された．

4．まとめ

本研究で得られた知見を以下に列記する．

1) 被覆面積割合と岩盤強度の関係から，北海道の岩盤侵食地形を3つに分類した．①平坦な河床に複数の浅い筋を有する複数筋型，②澪筋部に沿って侵食が進行する単一澪筋型，③河道全体が鉛直方向に穿入する渓谷型である．また，豊平川花魁淵の岩盤床において，乾湿サイクルによる岩盤強度の低下が確認された．
2) 乾湿サイクルによる岩盤強度の低下と風化による

土砂化を考慮した数値モデルを構築し，数値計算を行った．乾湿風化が卓越すると岩盤床は平滑な地形を形成し，一方で流砂の衝突による侵食が卓越すると，下刻が進行し渓谷地形を形成した．

謝辞：北海道河川財団，北海道開発局旭川開発建設部には貴重な現地調査のデータを提供して頂きました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, Water Resour. Res., 40, W06301, 2004.
2) Chatanantavet, P., and Parker, G.: Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, J. Geophys. Res., 114, F04018, 2009.
3) Chatanantavet, P. and Parker, G.: Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, Water Resour. Res., 44, W12446, 2008.
4) 矢野雅昭，渡邊康玄，井上卓也，山口里実，渡邊和好，平井康幸：岩河床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響，土木学会論文集B1，71(4)，1003-1008，2015.
5) 久加朋子，竹林洋史，藤田正治：固定床と移動床が混在する場における動的平衡河床の不可逆性，土木学会論文集B1，70(2)，727-734，2015.
6) 磯安奈，森井俊広：乾湿繰り返し作用を受ける泥岩の強度特性，新潟大学農学部研究報告，第56巻2号，119-127，2004.
7) 松倉公憲：地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題，地学雑誌，126(3)，271-296，2017.
8) 堤大三，藤田正治，泉山寛明：気象上昇による土砂生産に対する凍結融解の影響変化予測，水工学論文集，第53巻，649-654，2009.
9) 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，平成24年研究発表会公演予稿集，第32号，2012.
10) Inoue, T., Yamaguchi, S., and Nelson, J. M.: The effect of wet-dry weathering on the rate of bedrock river channel erosion by saltation gravel, Geomorphology, 285, 152-1161, 2017.
11) 北海道開発局，国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：岩盤河床における河床低下危険度評価の手引き（案），2016.
12) サムナー圭希，井上卓也，清水康行：岩盤床上の砂州形成に伴う侵食地形，水工学論文集，第60巻，2016.
13) 木村一郎，Wim S. J. Uijittewaal：粗面滑面平行開水路における横断方向運動量輸送に関する数値解析，土木学会論文集B1，69(4)，847-852，2013.
14) 井上卓也，矢部浩規：岩盤上に形成される複数筋の形成過程，水工学論文集，第61巻，2017.
15) 井上卓也，渡邊康玄，斎藤大作，根本深，松本勝治，江崎國夫，濱木道大：軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発，河川技術論文集，15，2009.
16) 及川森，岩崎理樹，山口里実，清水康行，木村一郎：流砂の摩耗作用による岩盤侵食に関する実験的検討と数値シミュレーション，土木学会論文集B1，67(4)，751-756，2011.
17) Inoue, T., Izumi, N., Shimizu, Y. and Parker, G. : Interaction among alluvial cover, bed roughness and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, J. Geophys. Res., 2014.
18) 土質工学会（編）：日本の特殊土，土質基礎工学ライブラリー10，土質工学会，東京．314-342，1974.
19) 井上卓也，清水康行，Gary Parker，山口里実，伊藤丹：給砂量と岩床侵食地形の関係，土木学会論文集B1（水工学），70(4)，I_1039-I_1044，2014.
20) Small, E. E., Blom, T., Hancock, G. S., Hynek, B. M., Wobus, C. W.: Variability of rock erodibility in bedrock-floored stream channels based on abrasion mill experiments, J. Geophys. Res. Earth Surf. 120, 1455-1469, 2015.

（2017. 9. 29受付）

MODELING OF BEDROCK EROSION CONSIDERING WET-DRY WEATHERING

Tamaki SUMNER, Takuya INOUE, Yoshiya HITOMI and Yasuyuki SHIMIZU

Bedrock exposure and erosion have caused the deterioration of the river structure's stability in many rivers. Previous studies reported that the collision of bedload is one of major factor controlling bedrock erosion. Furthermore, bedrock erosion has been concerned with wet-dry weathering and freeze-thaw. The bedrock erosional morphology can be classified into valley type, single water route type and multiple longitudinal groove type from the relationship between alluvial cover rate and bedrock strength. We conducted the needle penetration tests at the upstream of Oiranbuchi in Toyohira River where bedrock widely exposed. It is confirmed that the influence of weathering by wet-dry cycles due to tendency of low bedrock strength at the water's edge. In this study, we constructed the bedrock erosion model considering of wet-dry weathering and carried out the numerical simulations to evaluate the erosion morphology by weathering. The results suggest that bedrock is smoothed when erosion by weathering is dominant and bedrock incision progresses when abrasion by bedload is dominant.