

## 積雪寒冷地域における土丹河床の侵食過程と河川構造物等の影響に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：伊藤丹、井上卓也、阿部孝章、安田裕一

### 【要旨】

本研究は、積雪寒冷地における土丹(軟岩)の風化・侵食メカニズムの解明、軟岩河床上の河川構造物の影響把握を最終目標としている。本報告では、侵食速度と岩の物性値の関係を把握するために、昨年度実施した実験を分析し、軟岩侵食速度の定式化を行った。また、侵食速度と軟岩の物性値の関係を簡易的に調査する手法について検討をおこなった。検討の結果、軟岩侵食速度は、岩の強度と有効間隙率に依存することが判明した。岩盤の有効間隙率は、乾湿や凍結融解による風化作用によって低下することが予想される。このことから、岩盤の侵食速度や侵食地形は、岩盤の風化作用に大きく依存することが示唆された。

キーワード：土丹河床、侵食、岩質、粗度

### 1.はじめに

石狩川上流など北海道内の複数河川において、土丹河床上(軟岩河床)の砂礫が流出し、急激に河床低下・河岸侵食が進行している。これにより、橋脚などの構造物への影響や治水安全度の低下が懸念されている。

軟岩河床は融雪期に凍結融解による風化の影響を受け、融雪出水時に流水や砂礫の侵食に晒されると考えられる。また、軟岩河床の粗度は、砂礫河床の粗度よりも小さく砂礫を捕捉しにくい。このことから、予防保全型を念頭においた軟岩河床の河床低下対策が求められている。

予防保全型の河床低下対策を検討する上では、将来的な軟岩河床の侵食量を予測し、河床低下対策の効果を把握できるモデルの構築が不可欠である。

しかし、軟岩河床の侵食プロセスは、砂礫河床の河床低下(河床変動)プロセスと大きく異なる。砂礫河床の河床変動は、流入する流砂と流出する流砂のバランスにより算定されるが、軟岩河床の侵食は、流水や流砂による摩耗により生じる。このため、これまで砂礫河床において築きあげられた流砂量式や河床変動モデルでは、軟岩河床の侵食を予測することは困難である。

軟岩河床の侵食は、岩床上の流砂運動と岩の物性の2つに支配される。流砂運動と侵食速度の関係は、Sklar and Dietrich<sup>1)2)</sup>、Chatanantavet and Parker<sup>3)</sup>、Johnson and Whipple<sup>4)</sup>、井上ら<sup>5)6)</sup>、及川ら<sup>7)8)</sup>、小松ら<sup>9)</sup>、大澤ら<sup>10)</sup>により研究されている。この結果、侵食速度は、岩床

を摩耗させる流砂の衝突頻度に強く依存することが明らかにされている。

一方、岩の物性値と侵食速度の関係については、Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>、及川ら<sup>8)</sup>によって実験が行われている。この結果、侵食速度は強度(引張強度または一軸圧縮強度)に依存することが指摘されている。しかし、強度以外の岩の物性値と侵食速度の関係は明らかにされていない。

そこで、昨年度研究では、流砂による岩床の侵食速度と岩の物性値の関係を明らかにすることを目的に、7河川の岩床を対象とした侵食速度実験および物性値試験を行った。本年度研究では、この実験データを分析し、軟岩侵食速度の定式化を行った。また、侵食速度と軟岩の強度の関係を簡易的に調査する手法について検討をおこなった。

さらに、軟岩河床は砂礫床に比べ粗度や限界掃流力が小さいため、砂礫が捕捉されにくい。軟岩床の砂礫床への復元を検討するためには、軟岩床の粗度、限界掃流力、砂礫床の復元に必要な流砂量(飽和流砂量)の関係を把握することが重要となる。そこで、本研究では、上述の関係について、水理実験を用いて検討をおこなった。

## 2. 既往研究について

### 2.1 Sklar and Dietrich の研究

Sklar and Dietrich<sup>2)</sup>は、工業機械(鋼材)の侵食予測に用いられる Bitter<sup>11)12)</sup>のモデルを岩床侵食に適用し、流砂の衝突頻度をサルテーション運動と関連付けることで、以下のモデルを導いている。

$$E = \frac{\rho_s Y w_{si}^2}{k_v \sigma_T^2 L_s} q_s F_e \quad (1)$$

ここで、 $E$  は岩床の侵食速度(m/s)、 $\rho_s$  は砂礫の密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $Y$  は基盤岩のヤング率(Mpa)、 $k_v$  は無次元の侵食係数(約  $10^6$ )、 $\sigma_T$  は岩の引張強度(Mpa)、 $w_{si}$  は鉛直方向の粒子衝突速度(m/s)、 $L_s$  は跳躍距離(m)、 $q_s$  は上流からの単位幅給砂量( $\text{m}^2/\text{s}$ )である。 $F_e$  は露出した岩床の面積割合を表している(河床が完全に露岩している場合  $F_e$  は 1. 河床が完全に砂礫で覆われる場合  $F_e$  はゼロ)。

さらに、Sklar and Dietrich はサルテーション運動の実験データを基に、鉛直方向の粒子衝突速度と跳躍距離に関する以下の実験式を導いている。

$$\frac{w_{si}^2}{L_s} = 0.08 R_b g \left( \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right)^{-0.5} \quad (2)$$

ここで、 $R_b$  は砂礫の水中比重、 $g$  は重力加速度、 $\tau_*$  は無次元せん断力、 $\tau_{*c}$  は無次元限界せん断力である。最終的に、Sklar and Dietrich の提案した岩床の侵食速度は次のように表される。

$$E = C_s q_s \left( \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right)^{-0.5} F_e \quad (3)$$

$$C_s = \frac{0.08 \rho_s R_b g Y}{k_v \sigma_T^2} \quad (4)$$

Sklar and Dietrich のモデルにおいて、岩床侵食に対する流砂運動の影響は、給砂量、露岩率、無次元せん断力で表され、岩の侵食耐性は引張強度とヤング率で表される。

Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>は円筒水槽を用いた岩床侵食実験結果<sup>1)</sup>を用いて、モデルの検証を行なっている。その結果、岩床侵食速度が引張強度、給砂量、砂礫粒径、露岩率に依存することを明らかにしている。

### 2.2 Chatanantavet and Parker の研究

Chatanantavet and Parker<sup>3)</sup>は、Parker<sup>13)</sup>が行った基盤岩の碎屑物の流下分級現象に関する研究を基に、岩床侵食モデルを提案している。

$$E = C_c q_s F_e \quad (5)$$

ここで、 $C_c$  は岩床により異なる侵食耐性を表すモデル係数( $\text{m}^{-1}$ )である。Chatanantavet and Parker によると、 $C_c$  と  $C_s$  は同程度の値となり  $10^{-6} \text{m}^{-1}$ (硬岩)~ $10^{-4} \text{m}^{-1}$ (軟岩)である。このことから、Chatanantavet and Parker<sup>3)</sup>のモデルと Sklar and Dietrich<sup>2)</sup>のモデルは、 $\tau_*/\tau_{*c} - 1$ に対する依存性を除き概ね同じモデルと考えられる。

### 2.3 Johnson and Whipple の研究

Johnson and Whipple<sup>4)</sup>は、Sklar and Dietrich<sup>2)</sup>および Chatanantavet and Parker<sup>3)</sup>の提案したモデルを検証するために、侵食しやすいモルタル床を用いた実験を行なっている。この結果、侵食速度は、給砂量、露岩率に比例し、 $\tau_*/\tau_{*c} - 1$ に依存しないことを示している。

### 2.4 井上らの研究

井上ら<sup>5)6)</sup>は、岩床河川を掘削して作成した現地水路を用いた実験により、給砂量と砂礫粒径が大きくなると、侵食速度も大きくなることを明らかにしている。井上ら<sup>6)</sup>は鋼材の粒子衝突による摩耗現象を扱った Finnie<sup>14)</sup>のモデルを基に、粒径別の岩床侵食モデルを提案している。

$$E_* = C_i F_V^2 q_{s*} \frac{(\tau_*^{0.5} - \tau_{*c}^{0.5})^2}{(\tau_* - \tau_{*c})} \quad (6)$$

$$F_V = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30.1 \alpha_* d}{k_s} \quad (7)$$

ここで、 $E_*(=E/\sqrt{R_b g d})$ は無次元化した侵食速度、 $q_{s*}(=q_s/\sqrt{R_b g d^3})$ は無次元化した給砂量、 $F_V$ は対数流速分布、 $\kappa$ はカルマン係数(0.4)、 $d$ は砂礫粒子の粒径(m)、 $k_s$ には岩床の等価粗度高(m)である。 $C_i$ は岩床により異なる侵食耐性を表す無次元のモデル係数あり、岩の塑性開始変形応力(Mpa)に反比例するコンセプトになっている。

井上らは、粒径毎に異なる粒子速度を、粒径の  $\alpha_*$  倍の高さにおける対数流速を用いて表すことで、侵食速度の粒径依存性を考慮している。また、無次元せん断力が十分に大きいとき、 $(\tau_*^{0.5} - \tau_{*c}^{0.5})^2 / (\tau_* - \tau_{*c})$ の項はほぼ1になる。したがって、Johnson and Whipple や Chatanantavet and Parker と同様に、侵食速度は河床せん断力にほとんど依存しない。なお、井上らのモデルは、露岩部のみを対象としているため露岩率を表す項は含まれていない。

### 2.5 小松ら・大澤らの研究

小松ら<sup>9)</sup>、大澤ら<sup>10)</sup>は、石橋<sup>15)</sup>によるダム排砂設備の砂礫による摩耗・損傷に関する研究を岩床侵食に適用し、以下の侵食速度式を提案している。

$$E = C_w \frac{3Wv_{si}^2}{\pi d^3 g L_s} q_s \quad (8)$$

ここで、 $C_w$ は岩質によって定まる損傷係数(m<sup>2</sup>/kgf)、 $W$ は砂礫一個あたりの荷重(kgf)、 $v_{si}$ は砂礫の衝突速度(m/s)である。

彼らのモデルは、Sklar and Dietrich のモデルと同様に、侵食量が給砂量と粒子衝突速度の2乗に比例し、跳躍距離に反比例する。なお、彼らの研究も露岩部のみを対象としているため、露岩率を表す項は含まれていない。

小松ら<sup>9)</sup>は、モルタル床を用いた水路実験を行い、跳躍距離は土屋<sup>16)</sup>の提案した理論式と概ね一致すること、摩耗と衝突では損傷係数が異なることを明らかにしている。大澤ら<sup>10)</sup>は、給砂量と給砂する砂礫粒径が大きくなると侵食速度も大きくなることを明らかにしている。

### 2.6 及川らの研究

及川ら<sup>78)</sup>は、侵食速度が給砂量と流速の積と比例関係にあると仮定し、以下の実験式を提案している。

$$E = C_o q_s V + C_o' \quad (9)$$

ここで、 $C_o$ は岩の侵食耐性を表すモデル係数(s/m<sup>2</sup>)、 $C_o'$ は実験式の切片(m/s)、 $V$ は流速である。なお、及川らの研究も露岩部のみを対象としているため、露岩率を表す項は含まれていない。

及川ら<sup>78)</sup>は石膏を敷き均した回転水槽を用いた実験により、侵食速度が給砂量と流速の積と比例関係にあることを明らかにしている。また、給砂する砂礫粒径の大きさにより侵食量が異なること<sup>7)</sup>、石膏の一軸圧縮強度が強くなると侵食量が低下すること<sup>8)</sup>を示している。

### 2.7 既往研究のまとめ

既往研究より得られた知見を(表-1)に整理する。これによると、岩床侵食速度は、主に上流からの給砂量、露岩率、砂礫粒径、岩の強度に依存する。また、河床せん断力に対する依存性は無い(もしくは小さい)と考えられる。ただし、実河川においては、給砂量や露岩率が河床せん断力によって変化するため、河床せん断力は間接的に岩床侵食に影響を与えられられる。

一方、Sklar and Dietrich<sup>2)</sup>のモデルに含まれるヤング率や、その他の岩の物性値(密度、有効間隙率など)が

侵食速度に与える影響は検証されていない。

表-1 岩床侵食の依存性

侵食要因		岩床侵食速度の依存性
流砂運動の影響	給砂量	有り <sup>1)2)3)4)5)6)7)8)9)11)</sup>
	露岩率(被覆率)	有り <sup>1)2)3)4)</sup>
	砂礫粒径	有り <sup>1)6)8)11)</sup>
	河床せん断力	無し(小さい) <sup>3)4)6)</sup>
岩の物性の影響	引張強度(一軸圧縮強度)	有り <sup>1)8)</sup>
	ヤング率	検証されていない <sup>2)</sup>
	その他の物性値	検証されていない

※添字は、参考論文を示している。

表-2 岩の物性値の試験方法

試験名	試験方法	備考
岩石の一軸圧縮試験	JGS2521-2009	一軸圧縮強度 変形係数(≒ヤング係数)
圧裂による岩石の引張り強さ試験	JGS2551-2009	圧裂引張強度
岩石の密度試験	JGS2132-2009	乾燥密度 有効間隙率
岩石のスレーキング試験	JGS2124-2009	劣化しやすさ

## 3. 岩の物性値と侵食速度に関する実験

### 3.1. 実験概要

本研究では、Chatanantavet and Parker<sup>3)</sup>の研究を基に岩床の侵食速度は以下の式で表されると仮定する。

$$E = C_o q_s F_e \quad (10)$$

ここで、 $C_o$ は岩の侵食耐性を表す係数(m<sup>-1</sup>)、 $q_s$ は上流からの単位幅給砂量(m<sup>2</sup>/s)、 $F_e$ は露岩率である。本実験では、粒径 $d$ 、給砂量 $q_s$ 、露岩率 $F_e$ が一定の条件の基、様々な岩床の侵食速度を計測し、岩の侵食耐性 $C_o$ と岩の物性値(ヤング率、密度など)の関係について検討を行う。

岩床の侵食速度は、Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>と同様の方法を用いて計測する。Sklar and Dietrichの実験方法は、外径22cmの円筒形水槽に、岩床から切り出した直径20cm、厚さ5cmの岩盤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:1000rpm)させ、その後岩盤ディスクの侵食量を計測する。プロペラの位置は岩盤ディスク

の150mm上方であり(プロペラは岩盤ディスクや砂礫に直接当たらない)、

水面は岩盤ディスクの400mm上方である(プロペラにより回転流が生じ、回転流によって砂礫が移動し、岩盤ディスクを侵食させる)。

岩盤ディスクは、真駒内川、夕張川、石狩川、歴舟川、野田追川、久著呂川、網走川の7河川より切り出す。この内、真駒内川と久著呂川の岩床は凝灰岩であり、その他の河川の岩床は堆積岩である。実験における平均侵食速度は以下の方法で算出する。実験前後の質量を電子天秤で計測し、それを実験時間で除し単位時間あたりの侵食質量とする。単位時間あたりの侵食質量を飽和密度で除し単位時間あたりの侵食体積に変換する。単位時間あたりの侵食体積を岩盤ディスクの面積(半径×半径×円周率)で除し平均侵食速度とする。なお、今回の実験では、粒径・投入砂礫量およびプロペラの回転速度を一定としているため、粒径 $d$ 、給砂量 $q_s$ 、露岩率 $F_e$ も一定である。したがって、実験結果における平均侵食速度 $E'$ は、(10)式の侵食耐性 $C_b$ に比例すると考えられる。

岩の物性値は別途室内試験により調査する。調査方法はJGS(地盤工学会基準)に則る(表-2)。一軸圧縮試験は、円柱状に整形した岩石供試体を長軸方向に圧縮し、軸方向応力一軸ひずみ曲線を求める試験である。得られた曲線より、軸方向応力の最大値を一軸圧縮強度、一軸圧縮強度の50%時の応力一ひずみ曲線の割線勾配を変形係数とする。圧裂による引張り強さ試験は、円柱状供試体を長軸と直交する方向に載荷し破壊時の荷重から間接的に引張り強度を求める試験である。密度試験は、かさ密度(任意の含水状態における供試体の質量を、固相・液相・気相部分すべてを含んだ体積で除した値)を求める試験である。乾燥密度、飽和密度は、それぞれ乾燥状態(間隙中の水分が排出された状態)、飽和状態(外部と繋がった間隙を全て水で満たした状態)のかさ密度である。有効間隙率は、飽和状態と乾燥状態の質量差(間隙中の水の質量)から有効間隙の体積を求め供試体体積との比を百分率で表したものである。スレーキング試験は、乾燥させた供試体を水浸させ24時間経過後の形状変化を観察しスレーキング区分(細粒化など形状変化の程度を表す数字)により劣化のしやすさを判定する試験である。

### 3.2. 実験結果

図-2は真駒内川で採取した岩盤ディスクの実験前後の侵食深(レーザースキャナにより計測)である。岩盤ディスクはリング状に侵食した(他河川のサンプルも同じくリング状に侵食)。これは、円筒水槽内に強い2次流が発生し、砂礫の一部が中心部(図-2の白実線の円)に堆積し、流砂の衝突による侵食を妨げたためと考えられる。また、白点線の外側は、2次流の影響で砂礫がほとんど通過せず侵食も少なかった。なお、この現象は全てのサンプルに共通して現れた。

Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>および及川ら<sup>8)</sup>により、依存性が指摘されている(圧裂)引張強度、一軸圧縮強度と平均侵食速度の関係を図-3、図-4にそれぞれ示す。これらによると、平均侵食速度は圧裂引張強度および一軸圧縮強度の概ね2乗に依存する。このことは、Sklar and Dietrich<sup>2)</sup>のモデルと一致する。なお、一軸圧縮強度と圧裂引張強度は概ね比例することが知られており、本実験では、一軸圧縮強度は圧裂引張強度の10倍程度である。

侵食速度と変形係数(岩を弾性体と仮定した場合ヤング係数に相当)の関係を図-5に示す。これによると、侵食速度とヤング率は概ね2乗の関係にあり、侵食速度がヤング率に比例するSklar and Dietrich<sup>2)</sup>のモデルと異なる。Sklar and Dietrichのモデルが、岩と力学的性質の異なる鋼材の侵食式をベースとしているためと推測される。

本実験において、岩の一軸圧縮強度とヤング率は強い正の相関を持つ(図-8)。このことから、岩の場合、侵食速度に対する一軸圧縮強度の依存性を考慮すれば、変形係数(ヤング率)の依存性を考慮する必要は少ない。

侵食速度と乾燥密度および有効間隙率の関係を図-6、図-7に示す。これによると、侵食速度は乾燥密度に対し負の相関を持ち、有効間隙率に対し正の相関を持つ。なお、有効間隙率と乾燥密度は強い負の相関(図-9)を持つため、岩床侵食に対する有効間隙率の依存性を考慮すれば、乾燥密度の依存性を考慮する必要は少ない。一方、一軸圧縮強度と有効間隙率の関係(図-10)を見ると、バラツキが大きく、比較的独立したパラメータである。

以上のことから、岩床の侵食他性を表すためには、一軸圧縮強度(もしくは圧裂引張強度)と有効間隙率(もしくは乾燥密度)を考慮する必要がある。

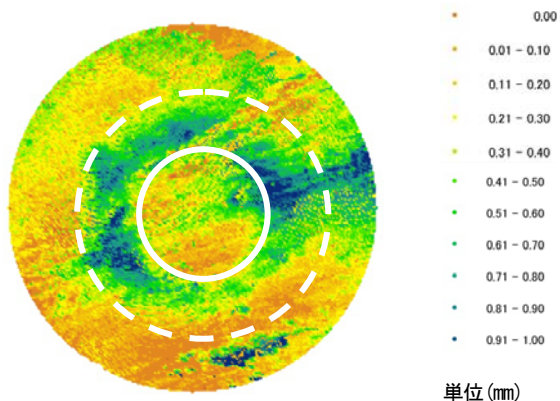


図-2 岩盤ディスクの侵食深(真駒内川)

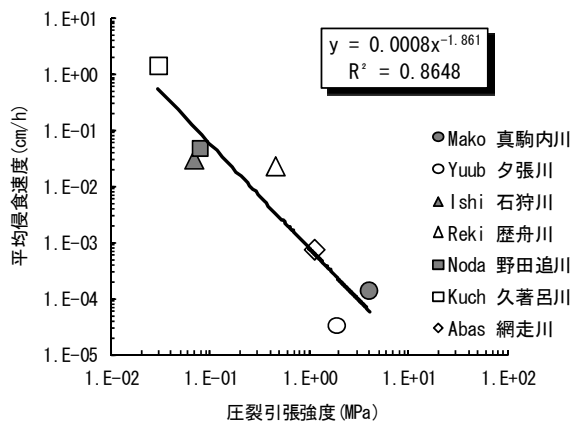


図-3 侵食速度と圧裂引張強度の関係

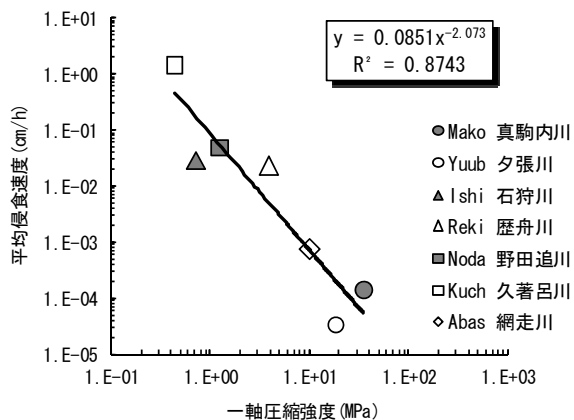


図-4 侵食速度と一軸圧縮強度の関係

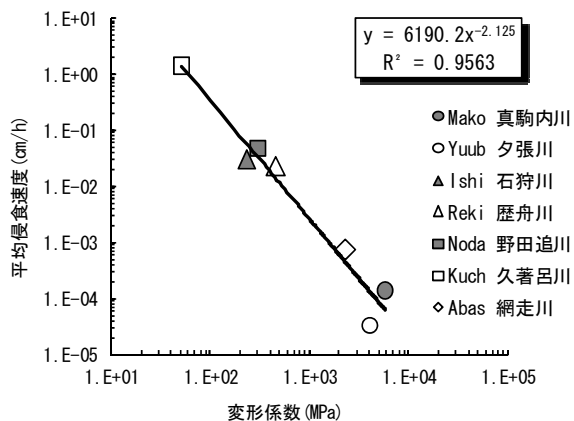


図-5 侵食速度と変形係数(ヤング率)の関係

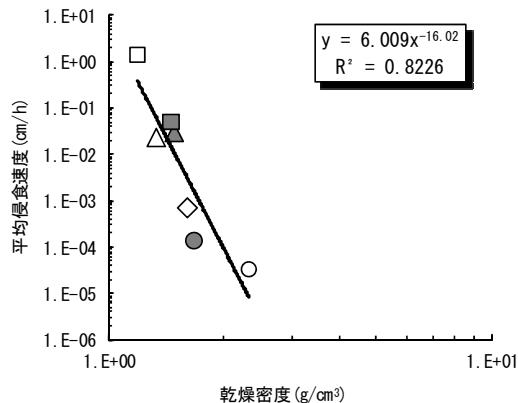


図-6 侵食速度と乾燥密度の関係

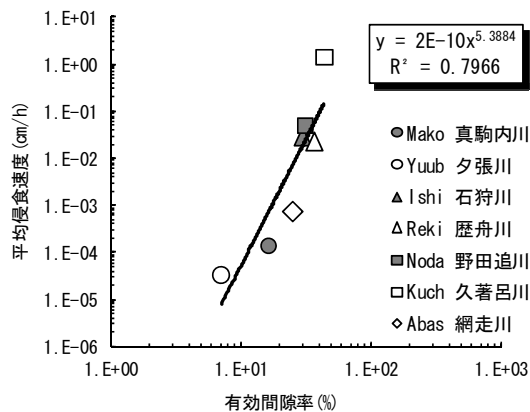


図-7 侵食速度と有効間隙率の関係

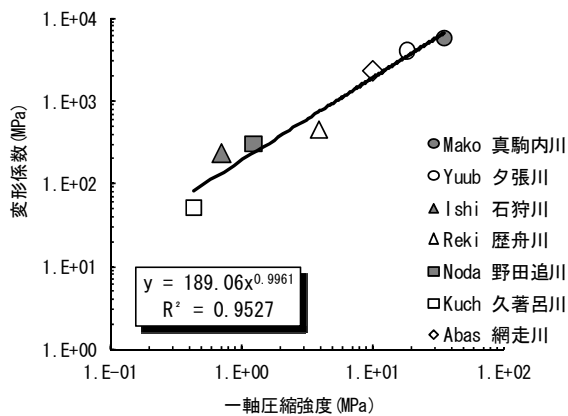


図-8 変形係数(ヤング率)と一軸圧縮強度の関係

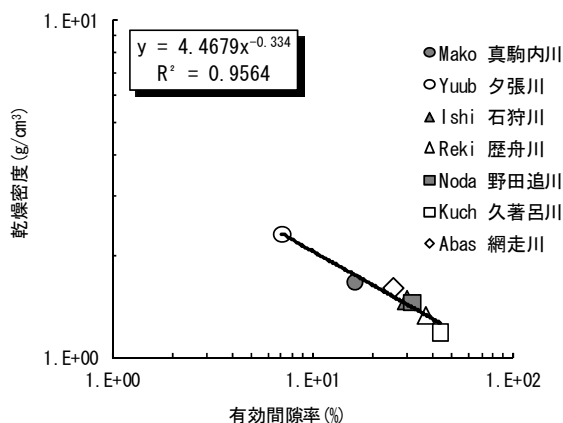


図-9 乾燥密度と有効間隙率の関係

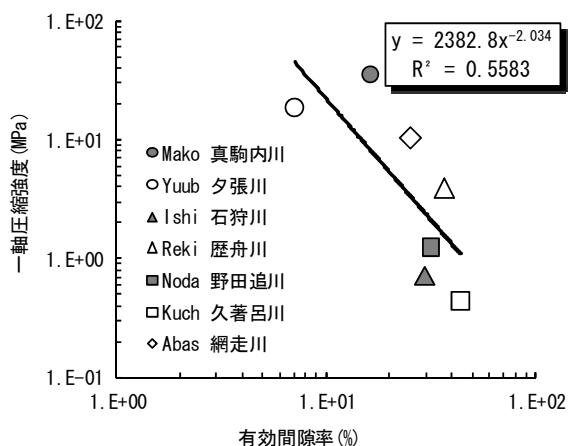


図-10 一軸圧縮強度と有効間隙率の関係

表-3 スレーキング試験による岩の劣化しやすさ

	岩種	劣化しやすさ
真駒内川	凝灰岩	
夕張川	礫岩	
石狩川	砂岩	○
歴舟川	シルト岩	
野田追川	砂岩	○
久著呂川	凝灰岩	○
網走川	砂岩	

※スレーキング試験(乾燥後・24 時間水浸)で細片化、泥状化したサンプル(スレーキング区分で3, 4)を劣化しやすいと判断した。

### 3.3. 岩の劣化と侵食速度

表-3 にスレーキング試験による岩の劣化しやすさを示す。これによると、図-7 において有効間隙率が大きかった石狩川、野田追川、久著呂川のサンプルは、乾湿繰返しにより劣化しやすい。また、地質学分野における既往研究<sup>17)18)19)</sup>によると、乾湿繰返しや凍結融解によって有効間隙率が増加することが指摘されている。このことから、有効間隙率は、岩の侵食耐性に対する乾湿繰返しや凍結融解の影響を表す指標と考えられる。

そこで、一軸圧縮強度  $\sigma_c$ 、有効間隙率  $n_e$  と実験結果における侵食速度  $E'$  の関係を重回帰計算により分析した。この結果、以下の関係が得られた。

$$E' \propto C_b \propto \sigma_c^{-2} n_e \quad (11)$$

これによると、岩床の侵食速度は、一軸圧縮強度の-2乗に依存し、有効間隙率に比例する。乾湿繰返しや凍結融解により、岩床の間隙率が増加し、それに伴い岩床の侵食耐性が低下すると仮定した場合、乾湿繰返しや凍結融解は水際や河岸で発生することから、乾湿繰返しや凍結融解は岩床河川の川幅変化や河岸侵食に大きな影響を与えている可能性がある(図-11、12)。

### 3.4. 岩種と侵食速度

本研究でサンプリングした7河川のうち、真駒内川と久著呂川の岩床は凝灰岩であり、その他の河川の岩床は堆積岩である。実験結果(図-3～図7)をみると、岩種(岩を構成する材料)の違いは侵食速度に大きな影響を与えていない。



図-11 凍結融解による表層が劣化した岩と河岸の侵食状況(久著呂川)



図-12 乾湿繰返しにより表層が劣化した岩と河床の侵食状況(石狩川)

### 3.5 実験結果の侵食式への反映

図-13で示した平均侵食速度と一軸圧縮強度および有効間隙率の関係式は、ある流砂量、ある被覆率のときの相対的な関係であり、流砂量や被覆率が異なった場合は適用できない。

そこで、本研究の実験結果と既往実験結果<sup>9)</sup>を用いて、岩盤強度、流砂量、被覆率を考慮した軟岩侵食式を提案する。既往実験に用いるのは、2008年に石狩川上流(河口から160.2km左岸付近)の低水路内の露岩箇所を掘削して行われた現地実験である(図-14)。

図-15は石狩川上流で行われた既往実験の結果である。これによると、軟岩の侵食速度は給砂量(流砂量)に比例している。既往実験は軟岩上にほとんど砂礫が堆積しない条件で行われている。また、実験結果を整理する段階で、堆積した部分を除いて侵食速度を算出している。このため、式(1)の露岩率  $F_e$  は 1 と考えられる。したがって、図-5の比例定数 ( $7.52 \times 10^{-4}$ ) は式(1)の  $C_b$  と考えられる。

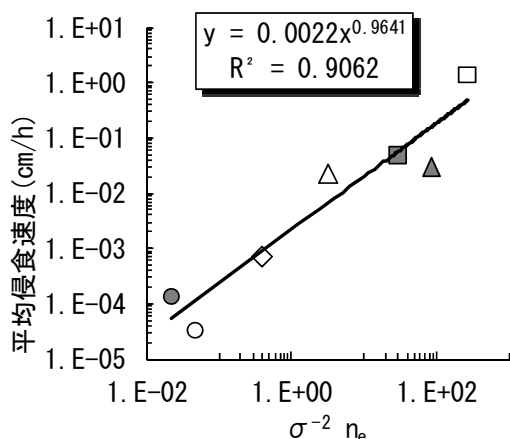


図-13 一軸圧縮強度および有効間隙率と侵食速度の関係



図-14 石狩川上流の現地実験水路(実験終了後の水路床)<sup>5)</sup>

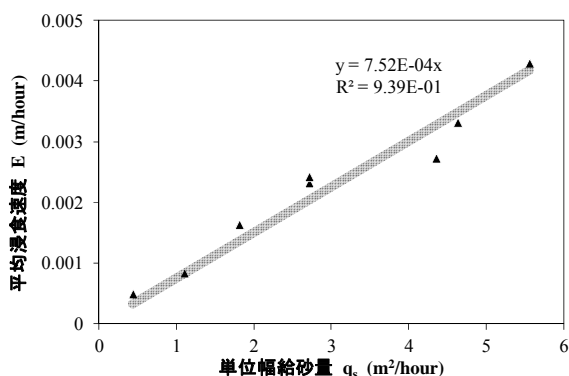


図-15 侵食速度と給砂量の関係(既往研究結果<sup>5)</sup>を基に作成)

本研究の実験において、 $C_b$  は一軸圧縮強度の -2 乗と有効間隙率の1乗に比例することが確認された。そこで、式(1)に示した侵食速度を以下の式に変換する。

$$E = C_b q_b F_e = C_c \sigma^{-2} n_e q_b F_e \quad (12)$$

ここで、 $C_c$  は係数( $m^{-1} Mpa^{-2}$ )である。既往実験結果の比例定数  $C_b$  ( $=7.52 \times 10^{-4} m^{-1}$ ) と石狩川上流の軟岩強度  $\sigma$  ( $=0.72 Mpa$ )、有効間隙率 ( $=44.23\%$ ) を用いて  $C_c$  を逆算すると、 $C_c$  の値は  $8.8 \times 10^{-6} m^{-1} Mpa^{-2}$  程度である。ただし、 $C_c$  の値は石狩川上流の1サンプルから求めた値であるため、今後サンプル数を増やして信頼性を向上させていく必要がある。

#### 4. 簡易的な軟岩侵食速度の推定方法

軟岩は乾湿の繰り返しにより風化しやすいため、岩盤ディスクを採取・輸送し、侵食速度試験や一軸圧縮強度試験を行うことは手間とコストのかかる作業である。そこで、軟岩の侵食速度を現地で簡易的に把握する方法について検討する。

軟岩の強度や硬度を現地で調査する機器として、土壌硬度計(藤原製作所・山中式)、軟岩ペネトロ計(丸東製作所・SH-70)、シュミットロックハンマー(プロセク・KS型)の3つがあげられる。以下に3つの機器の概要を記載する。土壌硬度計とは、できるだけ平滑な岩盤面に対し、突き当てツバが当たるまで垂直に圧入し、そのまま硬度計を抜き取り、針が示している目盛り(土壌硬度)を読み取る機器である。軟岩ペネトロ計は、できるだけ平滑な岩盤面に、試験装置に固定した針を偏心しないように一定の早さで貫入させ、貫入量が10mmに達したときの貫入力(貫入勾配が小の場合)、あるいは貫入力が100kNに達したときの貫入量(貫入勾配が大の場合)を読み取り、両者の比から針貫入勾配(kN/mm)を求める機器である。シュミットロックハンマーは、本体を岩盤測定面にプランジャーが垂直になるように静かに力を入れながら押しつけ、ハンマーの自動打撃により反発度を計測する機器である。

表-3に岩盤ディスクを採取する際に、現地河川で計測した各機器の計測値を示す。なお、表-3に示している値は、岩盤ディスクを採取した位置付近の5か所の平均値である。

##### 4.1 各機器の計測値と侵食速度の関係

表-3に岩盤ディスクを採取はじめに、各機器の値と軟岩侵食速度の関係(図-16、17、18)を整理する。これによると、軟岩侵食速度と相関が良かった機器は、

土壌硬度計と軟岩ペネトロ計である。ただし、土壌硬度計の計測値は33mmから39mmと幅が狭く、近似式の指数が大きい。つまり、わずかな計測誤差によって侵食速度の推定値が大きく変わる可能性がある。したがって、本研究では現地における簡易的な軟岩の侵食速度計測方法として、軟岩ペネトロ計を推奨する。

表 - 3 各機器の現地における計測値

調査箇所	土壌硬度測定	針貫入試験	シュミットロックハンマー反発度測定
	貫入量 (mm)	針貫入勾配 (N/mm)	反発度
真駒内川	39	100	45
夕張川	39	47	27
石狩川	36	5	10
歴舟川	34	9	29
野田追川	34	4	17
久著呂川	33	3	13
網走川	37	17	30

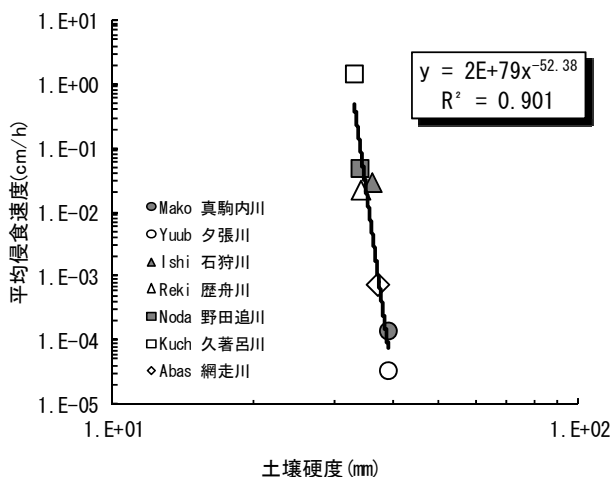


図-16 侵食速度と土壌硬度の関係

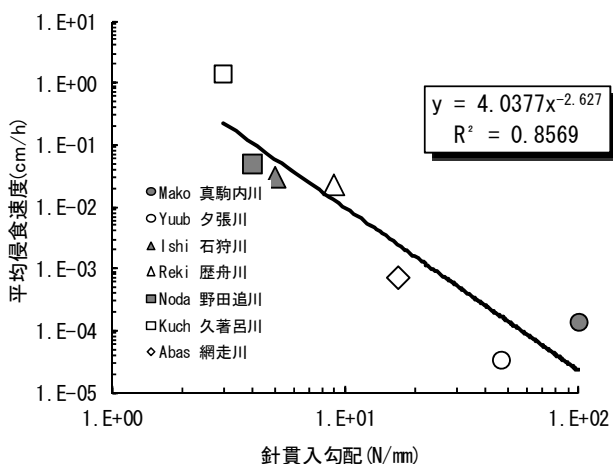


図-17 侵食速度と針貫入勾配の関係

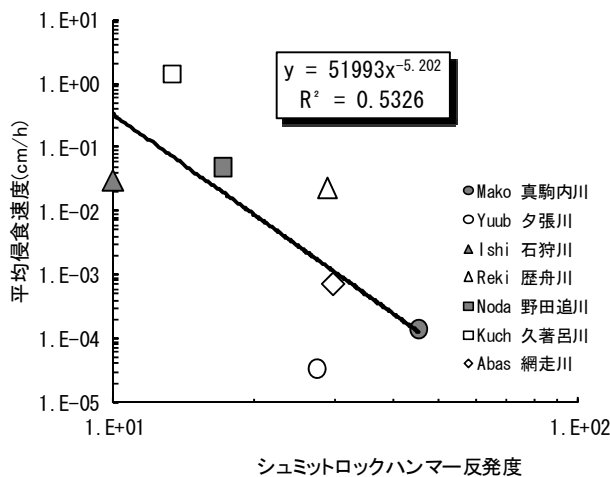


図-18 侵食速度とシュミットハンマー反発度の関係

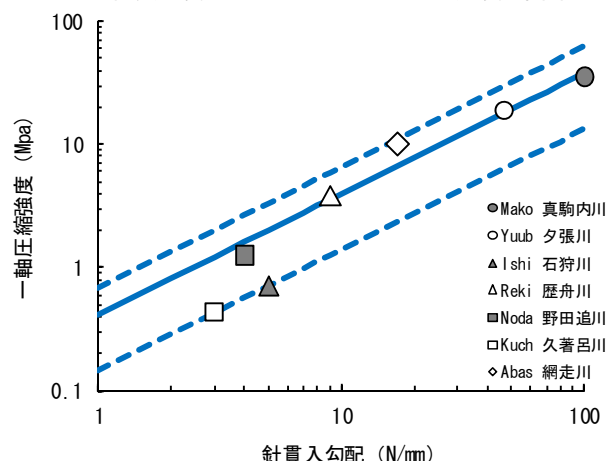


図-19 一軸圧縮強度と針貫入勾配の関係

(図中の青実線は式(13)、青点線は式(13)の±65%ライン)

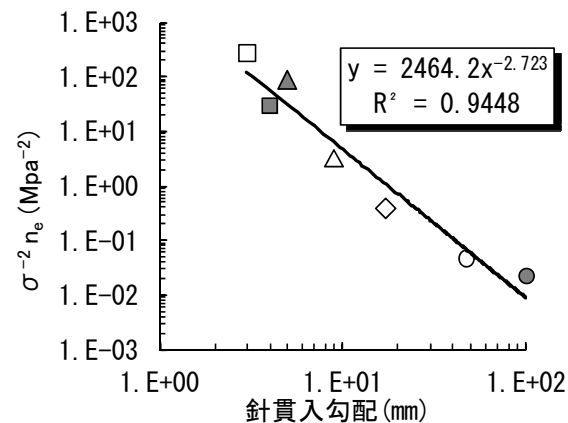


図-20  $\sigma^{-2} n_e$ と針貫入勾配の関係

#### 4.2 軟岩ペネトロ計の計測値と一軸圧縮強度および有効間隙率の関係

実河川の侵食速度を簡易的に把握するためには、針貫入勾配から一軸圧縮強度と有効間隙率を推定し、式(12)の軟岩侵食速度式に代入する必要がある。



軟岩ペネトロ計には、針貫入勾配  $x$  から一軸圧縮強度  $\sigma$  を推定するための以下の経験式が用意されている。

$$\log(\sigma) = 0.978 \log(x) + 2.621 \quad (13)$$

図-19に室内試験で計測した一軸圧縮強度、針貫入勾配、上述の経験式(図中の青実線)、経験式の $\pm 65\%$ のライン(図中の青点線)を示す。これによると、針貫入勾配と一軸圧縮強度の相関性は高く、式(13)で一軸圧縮強度を概ね推定可能である。

次に、針貫入勾配と $\sigma^2 n_e$ の関係を図-20に示す。これによると、以下の式から $\sigma^2 n_e$ を簡易的に推測可能である。

$$\sigma^2 n_e = 2500 x^{2.7} \quad (14)$$

## 5. 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

実験は寒地土木研究所の高速循環実験水路を用いて行われた。水路幅 1m、水路長 25m(計測区間は、上流端から 8m 地点～18m 地点の 10m 区間)、水路勾配 0.003 である。水路床には、軟岩河床を模した非侵食性のモルタル床を用いた。水路は同じ寸法で 2 回作成し、1 回目と 2 回目でモルタル表面の仕上げ方を変化させた。1 回目(以下、水路 1 と呼ぶ)は金ゴテを用いて滑らかに仕上げ、2 回目(以下、水路 2 と呼ぶ)は木ゴテで仕上げた後、プラスチック製のホウキを用いて横断方向に筋をつけた。

### 5.1 水路の粗度の計測

水路 1 と水路 2 において、水深 0.10m、0.15m、0.20m のときの平均水面勾配  $I_w$ 、断面平均流速  $V$  を計測した。実験結果を基に、マンシングの粗度係数  $n_m$  をマンシングの平均流速公式( $n_m = R^{2/3} I_w^{1/2} / V$ )を用いて算出し、等価粗度  $k_s$  をマンシング・ストリクラーの式( $n_m = k_s^{1/6} / (8.1\sqrt{g})^3$ )を用いて逆算した。なお、 $R$  は径深、 $g$  は重力加速度である。この結果、水路 1 のマンシングの粗度係数は  $0.0099 \pm 0.0003 \text{ m}^{-1/3}$ 、等価粗度は  $0.00025 \pm 0.00004 \text{ m}$  であり、水路 2 のマンシングの粗度係数は、 $0.0149 \pm 0.0004 \text{ m}^{-1/3}$ 、等価粗度は  $0.0029 \pm 0.0004 \text{ m}$  であった。

### 5.2 無次元限界掃流力の計測

井上ら<sup>6)</sup>は、水路床の等価粗度  $k_s$  が一定のもと粒径  $d$  を変化させ、軟岩床上の無次元限界掃流力と相対粗

度( $d/k_s$ )の関係を調査し、軟岩床上の無次元限界掃流力算定式を導いている。しかし、等価粗度  $k_s$  が変化した場合については確認していない。本研究では、粒径  $d$  を一定(5mm; ろ過砂利)のもと等価粗度  $k_s$  を変化させ(水路 1 と水路 2 の 2 パターン)、無次元限界掃流力と相対粗度( $d/k_s$ )の関係を調査した。

実験方法は以下のとおりである。①30 個の砂礫粒子を遮蔽の影響が無いように 3 個ずつ投下して移動有無を観測する、②全粒子が移動するまで流量を少しずつ増加させる、③流量ごとの水深と水面勾配を計測し無次元掃流力( $\tau_* = RI_w / sd$ 、 $s$  は砂礫の水中比重)を算出する、④流下した粒子数による無次元掃流力の重み付き平均値を無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  とする。なお、上述の作業を水路ごとに 2 回(計 4 回)実施した。実験は水路の上端から 14m 地点で行い、砂礫粒子が 1m 以上流下した場合を「移動」と判断した。

実験より算定した無次元限界掃流力と相当粗度の関係を図-21 に示す。図-21 には、井上ら(2011)<sup>6)</sup>の実験結果と、軟岩床上の無次元限界掃流力算定式も併せてプロットした。算定式を以下のとおりである。

$$\tau_{*c} = \alpha_1 \sqrt{\left[ \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30.1 \alpha_* d}{k_s} \right]^2} \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \frac{2A_3}{0.4A_2} \frac{(\mu_f - \tan \theta) \cos \theta}{\{\mu_f + (1/0.85)\} 0.85}$$

ここで、 $\kappa$  はカルマン定数(0.4)、 $\alpha_*$  は砂礫粒子の着目高さ (0.65)、 $A_2$  は  $\pi/4$ 、 $A_3$  は  $\pi/6$ 、 $\mu_f$  は静止摩擦係数(岩盤の一般的な値 0.65-0.85、本研究では 0.85 を採用)、 $\tan \theta$  は河床勾配である。井上ら<sup>6)</sup>の実験は河床勾配 0.03、本研究の実験は河床勾配 0.003 のため、図-21 中に 2 本の算定式をプロットした。この結果、(15)式によって、本実験水路の無次元限界掃流力も概ね評価できることが確認された。

### 5.3 砂礫床の復元に必要な流砂量の計測

水路 2 において、給砂量を変化させ、上流端付近が砂礫によって完全に被覆される流砂量(飽和流砂量)を計測した。実験条件と実験結果を表-4 に示す。×は被覆が殆ど無く流砂が通過した結果、▲は部分的に砂礫によって被覆された結果、●は上流端付近において全面的に砂礫によって被覆された結果をそれぞれ表している。なお、本研究では通水時間が 1 時間と短かった

ため水路全体が完全に被覆されるには至らなかった。砂礫の被覆は上流から下流へ徐々に進行することから、上流端付近(8m 地点の横断)が完全に被覆された場合を全面被覆、それ以外を部分被覆と定義した。図-22に、無次元掃流力、給砂量、砂礫による被覆の関係を示す。図-22には Meyer / Peter-Muller 式 ( $q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3}$ )による理論流砂量も併せて

示している。 $\tau_{*c} = 0.047$  は砂礫床上の一般的な値を利用した場合、 $\tau_{*c} = 0.022$  は(1式から算出した値を利用した場合)である。この結果、飽和流砂量は、Meyer / Peter-Muller 式に含まれる無次元限界掃流力に、(15)式から算出した値を利用することで、概ね再現可能であることが確認された。

表-4 飽和流砂量に関する実験条件と実験結果

ケース名	通水時間(h)	水深(m)	無次元掃流力	給砂量 (m <sup>2</sup> /s)	実験結果
Q1-1	1	0.10	0.037	1.08 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q1-2	1	0.10	0.037	2.17 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q1-3	1	0.10	0.037	4.33 × 10 <sup>-5</sup>	● 全面被覆
Q2-1	1	0.15	0.055	3.79 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q2-2	1	0.15	0.055	6.50 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q2-3	1	0.15	0.055	8.67 × 10 <sup>-5</sup>	● 全面被覆
Q3-1	1	0.20	0.073	4.33 × 10 <sup>-5</sup>	× 被覆なし
Q3-2	1	0.20	0.073	6.50 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q3-3	1	0.20	0.073	9.75 × 10 <sup>-5</sup>	▲ 部分被覆
Q3-4	1	0.20	0.073	1.30 × 10 <sup>-4</sup>	● 全面被覆

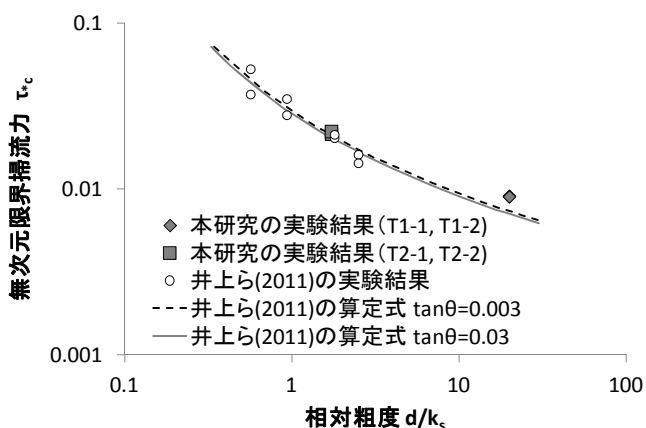


図-21 無次元限界掃流力と相対粗度の関係

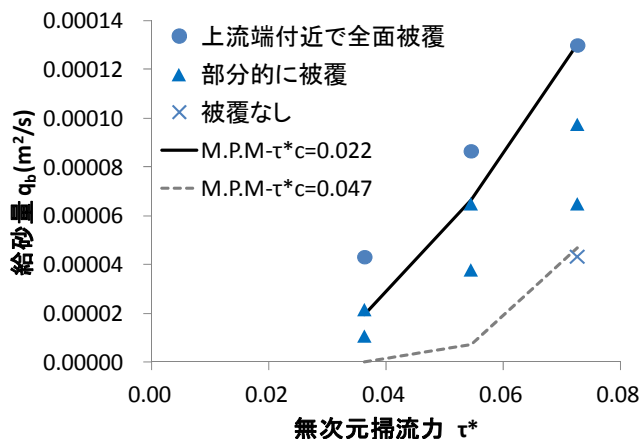


図-22 無次元掃流力、給砂量、砂礫被覆の関係

## 7 まとめ

本研究で得られた主な知見と今後の課題について以下に列記する。

- 岩床侵食に関する既往研究を整理した結果、流砂による岩の侵食は、給砂量、露岩率、砂礫粒径、強度に依存し、河床せん断力にはほとんど依存しないことが分かった。
- 岩の物性が侵食速度に与える影響を把握するために、給砂量、露岩率、砂礫粒径が一定の条件下において、7種類の岩の侵食実験を行った。
- 岩の物性値と侵食速度の関係について、実験を基に分析した結果、強度だけでは無く、有効間隙率

も侵食速度に影響を与えることが明らかになった。

- 地質学分野の既往研究において、乾湿繰返しや凍結融解によって有効間隙率が増加することが指摘されていることから、有効間隙率は岩の侵食耐性に対する乾湿繰返しや凍結融解の影響を表す指標になり得る。
- 実験結果によると、岩種(岩を構成する材料)の違いは侵食速度に大きな影響を与えていない。
- 既往の実験結果<sup>5)</sup>と本研究の実験結果を分析した結果、軟岩の侵食速度は「 $E = C_c \sigma^2 n_e q_b F_e$ 」(ここで、 $E$ は侵食速度、 $C_c$ は比例定数、 $\sigma$ は一軸圧縮強度、 $n_e$ は有効間隙率、 $q_b$ は流砂量、 $F_e$ は露岩率)で表され、比例定数 $C_c$ は $8.8 \times 10^{-6} \text{ (m}^{-1} \text{ Mpa}^{-2})$ 程度であ

ることを確認した。

- g) 軟岩の侵食速度を現地で簡易的に計測する手法を把握するために、土壌硬度計、軟岩ペネトロ計、シュミットロックハンマーの3つの機器の計測値と実験結果の侵食速度の関係を整理した。この結果、軟岩ペネトロ計の針貫入勾配と実験結果の侵食速度は高い相関性があることを確認した。
- h) 軟岩の侵食速度「 $E = C_c \sigma^2 n_e q_b F_e$ 」を利用するために、軟岩ペネトロ計の針貫入勾配と $\sigma^2 n_e$ の関係を整理した。
- i) 軟岩床の砂礫床への復元を検討するためには、軟岩床の粗度、限界掃流力、砂礫床の復元に必要な流砂量(飽和流砂量)の関係を把握することが重要となる。そこで、本研究では、上述の関係について、水理実験を用いて検討をおこなった。この結果、既往の無次元限界掃流力推定式によって、実験水路の無次元限界掃流力も概ね評価できることが確認された。
- j) また、飽和流砂量は、Meyer / Peter-Muller式に含まれる無次元限界掃流力に、既往の無次元限界掃流力推定式から算出した値を利用することで、概ね再現可能であることが確認された。

## 参考文献

- 1) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, *Geology*, 29, 1087- 1090, 2001.
- 2) 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.
- 3) Chatanantavet, P., and G. Parker : Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 4) Johnson, J. P. L., and K. X. Whipple : Evaluating the controls of shear stress, sediment supply, alluvial cover, and channel morphology on experimental bedrock incision rate, *J. Geophys. Res.*, 115, F02018, 2010.
- 5) 井上卓也, 渡邊康玄, 齋藤大作, 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*, 第 15 卷, pp.321-326, 2009.
- 6) 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 卷, pp.77-82, 2011.
- 7) 及川森, 岩崎理樹, 山口市実, 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, *水工学論文集*, 第 55 卷, pp.751-756, 2011.
- 8) 及川森, 岩崎理樹, 山口市実, 清水康行, 井上卓也 : 河床における岩盤上の流砂の集中度合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(水工学) Vol.68, No.4, I\_949-I\_954*, 2012.
- 9) 小松祐輔, 渡邊康玄, 泉典洋, 竹林洋史 : モルタルで擬似した軟岩の流砂の衝突による洗掘, *河川技術論文集*, 第 17 卷, pp.167-172, 2011.
- 10) 大澤亮介, 渡邊康玄, 鰐目淑範 : 混合砂礫の衝突による軟岩の洗掘機構, *土木学会北海道支部論文報告集*, 第 68 号, B-48, 2012.
- 11) Bitter, J. G. A. : A study of erosion phenomena, part I, *Wear*, 6, 5 - 21, 1963.
- 12) Bitter, J. G. A. : A study of erosion phenomena, part II, *Wear*, 6, 169 - 190, 1963.
- 13) Parker, G. : Selective sorting and abrasion of river gravel. 1: Theory, *J. Hydraul. Eng.*, 117(2), 131-149, 1991.
- 14) Finnie, I. : Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3, pp. 87-103, 1960.
- 15) 石橋毅 : ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, *土木学会論文報告集*, 第 334 号, 1983.
- 16) 土屋義人, 青山俊樹 : 水流による砂れき saltation の機構(2), *京都大学防災研究所年報*, 第 13 号 B, pp.199- 216, 1970.
- 17) Wohl, E.E., H. Ikeda : Patterns of Bedrock Channel Erosion on the Boso Peninsula, Japan, *The Journal of Geology* Vol. 106, No. 3 (May 1998), pp. 331-346, 1998.
- 18) 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法に関する検討, *寒地土木研究所月報* 第 681 号, 2010.
- 19) 日下部祐基, 伊東佳彦, 阿南修司 : 岩石の乾湿繰返しによる強度低下の定量化に関する検討, *寒地土木研究所月報* 第 688 号, 2010.

## STUDY CONCERNING PROCESS OF THE EROSION OF BEDROCK AND THE EFFECT OF RIVER STRUCTURERS

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : River Engineering Research Team

**Author** : ITO Akashi

INOUE Takuya

ABE Takaaki

YASUDA Yuichi

**Abstract** : Many bedrock channels are composed partly of alluvium and partly of bare rock, and abrasion from the influence of bed load is known to be a ubiquitous and principal mechanism of fluvial bedrock incision. The results of recent investigations have suggested that the bedrock incision rate depends on rock strength, sediment supply, grain size and the areal fraction of bedrock exposure. In this study, the authors performed laboratory experiments to evaluate the influence of rock properties on the bedrock incision rate. The results showed that rock strength and the effective porosity of bedrock have a significant effect on this rate. As the effective porosity of weathered bedrock is greater than that of fresh bedrock, these results suggest that wetting/drying cycles and freeze/thaw cycles can affect the incision rate and the resulting bedrock channel morphology.

**Keywords**: bedrock, abrasion, rock property, roughness