石狩川上流部の河床における粘板岩の摩耗現象

A STUDY OF SLURRY-EROSION BEHAVIOR
OF CLAY-SLATE ON RIVERBED SURFACE IN THE UPPER ISHIKARI RIVER

北海道大学　工学部環境社会工学科国土政策学コース　○学生員　及川　森　（Shin Oikawa）
北海道大学　大学院工学研究科　教授　正　員　清水　康行（Yasuyuki Shimizu）
北海道大学　大学院工学研究科　准教授　正　員　木村　一郎（Kimura Ichirou）
北海道大学　大学院工学研究科　助教　正　員　山口　里実（Satomi Kawamura）

1.　まえがき

1.1　研究の背景

河川の形態はその河床材料の性質に依存する．既往の文献[1)]によれば，礫床河川の河床は広い粒度分布の河床材料で構成されており，流水の作用を受けると，流れの掃流力に見合った河床材料が表層を占めるとされる．したがって，ダム建設や上流部での過剰な土砂採集などの原因で上流からの河床材料の供給が遮断され，更に洪水や捷水路化などにより掃流力が卓越すれば，河床高さのバランスを保っていた河床材料はただちに流下されることになる．現在このような作用により，石狩川本川の旭川市街地付近では河床低下が進行し，河床を覆っていた砂礫が一掃されることで低固結の基盤岩（粘板岩などの泥質軟岩）が露出する区間が増加している．

さらに近年，既に砂礫が残っていない河床の異常低下が旭川開発建設部[2)]により報告されている．この河床を構成する基盤岩は，旭川市街地付近の石狩川に架かる橋梁や，河岸浸食を守る護岸などの構造物を設置している土台に他ならない．この土台の急激な深掘れによりそれらの構造物の根入れが不足し不安定化したり，下部が抉られて護岸が欠落したりしている個所が見受けられる．

基盤岩が露出した時点で河床低下が抑制せず，むしろ洗掘が顕著になるのは，流水の影響ではなく共に流される砂礫の影響が原因であると考えられる．なぜなら粘板岩をはじめとする泥質岩は，泥の地層が圧密され，地下深部で更なる高温高圧の下におかれ緻密になった剥離性を有する岩であり，流水に抵抗する程度の固結力を持つが一般の岩ほど高くなく，洪水やダムの放水などにより大水が発生した際に流砂の影響を受けやすいからである．

1.2　研究の目的

いま全国的に河川の河床形態の変化による洗掘現象が問題となっており，石狩川上流域も例外ではない．このような市街地付近での河川形態の不安定化は，これまでの治水事業によって守られた住民の安全な暮らしを脅かすものである．したがって河床に露出した岩が摩耗されてゆくメカニズムを早急に解明する必要がある．その将来予測に基づいて効果的な対策がなされることが本研究の最終目標であると言える．本実験に先立って，旭川開発建設部により現地実験が行われており，岩盤河床の洗掘速度は単位幅流砂量に流速を乗じたものと相関があることが分かっている．

今後の研究では，洗掘速度が影響を受けやすいとされる粒径，河床岩質の違い，河床付近での底面剪断力との関係を調べていくことになるが，現地スケールでは河床岩質や流速など自由に変えられる条件が限られると予想される．室内実験ではそのような条件を変えることに優れており，現地実験に取って代わることが可能になれば，大幅にコストや労力の削減になるだけではなく，大規模な現地水路の設置により環境を破壊する懸念も避けられる．本文は現地実験の代替・補助として位置づけられる簡単な室内実験の手法を提案するものである．現地データがあるものは常に比較するようにし，現地実験では難しい条件下での検証を室内実験で補えるよう心掛ける．

2.　実験内容

最初に写真-1のような水槽を用いて，河床材料を敷いた水槽に砂礫を投入し流速分布を与え，どれだけ河床が洗掘されたかを測定する室内実験を行う．これは現地実験の再現であり，今後の研究の足がかりとするものである．

水路は平坦床であり，循環型回転式水槽で，天盤を回転させ水に動力を伝える．素材は天盤，側面はともにアクリル製であり，底面は石膏を敷いた．規格は水深約3cm弱，幅10cm，外側面直径100cm，天盤回転数は連続的可変式で0～160回転/分である．

測定方法は，流下方向に対して垂直にとった断面を測線とし，流砂を取り除いたのち，ポイントゲージで河床を測定した．また，どの断面でも物理諸量は一定と仮定し，洗掘深さは２測線で計ったものを平均すれば良いと判断した．そして，ポイントゲージの目盛は0.1㎜単位まで読み，断面方向は0.5cm間隔に測定した．

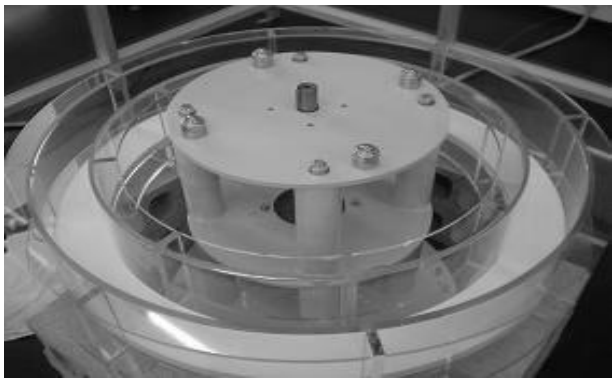


写真-1　天盤を外した回転水槽

3.　物理諸量の決定

この実験において重要な３つの物理条件を以下に示す.

3.1　河床材料

(1)　現地調査

2009年6月11日，旭川開発建設部協力の下で石狩川の現地調査を行い,河床付近で露出している岩の物理的性質を確認した.現地では泥を起源とする泥岩やシルト岩や粘板岩などの泥質岩が広く露出していた.粘板岩は前述の通り剥離性を有する岩である.この剥離性が局所的な深掘れを促進するようだが,ここではそれを無視して議論を進める.

(2)　粘板岩の物理的性質

さて,これら岩には一度乾いて再び吸水すると固結力が低下し,岩を構成する粒子がばらばらになる性質が現地にて確認した.持ち帰った試料に繰り返し水をかける実験を行い，その繰り返しによる細粒化が確認された．写真-2

現地の川岸に露出した乾燥した岩をそのまま実験水槽の河床に敷くことを考えると,この吸水による風化が原因で,砂礫による摩耗現象だけに着眼することが難しくなる.一方，水中に存在するものを湿潤状態で採集するのは，今回の実験の意図に反して非効率である．また，この水槽には一度投入した砂礫が循環するという特徴があり,何度も給砂する必要がないという大きな利点がある．がしかし，現地の岩は様々な粒径の粒子で構成されており,摩耗されて一度河床を離れたそれらの粒子も一緒に循環することで，予期せぬ摩耗を引き起こしてしまう懸念がある.

したがって流砂量や粒径といったパラメタを一定に保てないので,現地の岩を水路に敷いて用いることは現段階では不可能と判断し,実験中にいたずらに流砂を増やさない石膏を用いた人工の粘板岩を作成した.

(3)　人工粘板岩の作成

石膏は,粉を水で溶けば次第に粘性が増し約30分で硬化し，粘性が増す前に水路に流し込んでおけば，手を加えること無く重力の作用で水平床が出来上がる．さらに，硬化は水和反応によるもので細粒化することが無く,水流に浸食されない程度の強度をもつ.また，実験による摩耗で発生する石膏の微粉末は，浮遊して水を白濁させるが，直接的に摩耗に関与することは無いと考えられる.加えて，石膏(硫酸カルシウム)は化学的に中性でアクリルと相性がよく，水路からきれいに外すことができる.

これらのメリットによって,より多くのケースを必要とするこの室内実験を,より簡単かつ厳密に進めることが可能になったのでここに記した.

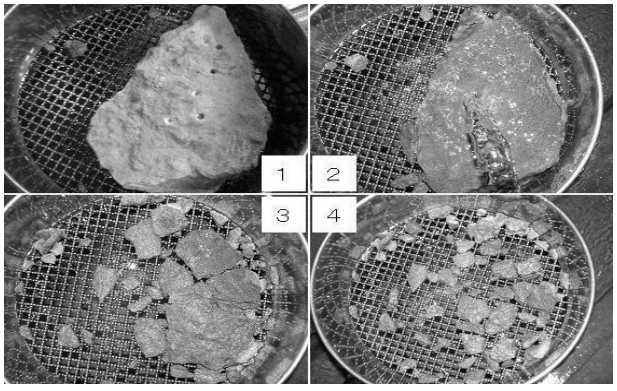


写真-2　粘板岩の吸水による細粒化

(4)　人工粘板岩の摩耗強度試験

人工粘板岩の耐摩耗強度を現地のものと同程度にするために，以下のような実験を行った．（写真-3）

水石膏比を変えた人工粘板岩の平面に電動ドライバに5kgの重りを載荷して，その面に対して30秒間垂直に押し付け，図-1のようにそれぞれの摩耗速度を比較した．ただし,石膏粉の攪拌具合によっても強度が変わることが認められたので,この図は実験者本人が攪拌方法を徹底した上で自ら作成する必要がある．一方，現地の粘板岩に対しても同様の実験を行った結果，摩耗速度は0.250(㎜/s)であったので,図-1の線形近似式を満足する最適化された水石膏比は0.780と分かった．また，これは石膏が規定の強度を保つ範囲内(0.72～0.78)であった.

3.2　使用する砂礫

(1)　粒径のふるい分け

粒径は5,10(㎜)の川砂利をそれぞれ4.00m/m，5.60m/mと9.5m/m，11.20m/mのふるいを組み合わせて抽出した．極力，三軸の粒径がそろった球形に近いものを採用した.

(2)　密度の測定

密度は無作為に50粒ほど選んだ砂礫全体の体積とその質量を測定することを12回行った.それぞれ比を計算してその平均値を求めた結果，用いる砂礫の密度は2.408（g/cm^3）であることが分かった.

(3)　流砂量の測定法

流砂量q_bは単位奥行単位時間あたりにある断面を通過する土砂体積であるので，投入した砂礫の個数の内，x%を無作為に選んでマーキングし，それが幅Bの水路の断面をある時間tで通過する個数N_xをカウントし求める．この時q_bは(1)式で与えられる.

$$q_b = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D^3}{6}\right) \cdot \left(\frac{100}{x}\right) \cdot N_x}{B \cdot t} \qquad (1)$$

写真-3　ドライバ押付けによる耐摩耗強度試験

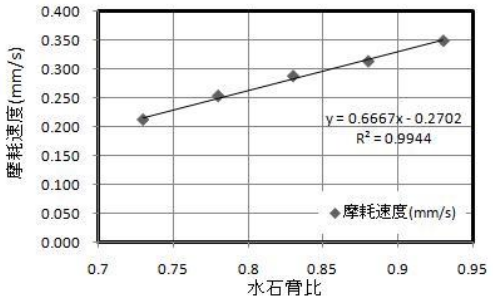


図-1　摩耗速度の水石膏比との関係

3.3　流速分布測定

(1)　概要

平均流速や底面剪断力を算出するための流速分布を測定する．市販のスポンジを用いて比重が約1(g/cm³)の中立粒子を作成して水路に流し，シャッタースピードと撮影間隔を固定した上で高速連続撮影する．これを写真-4のように画像解析して軌跡を追うことで，粒子の通過高さ毎の流速を調べた．このとき，カメラの集光角度により屈折が生じることが懸念されるが，遠方から撮ること，また撮影間隔を短くすることで無視できるものとした．

流砂を投入しないものをcase0とし，さらに天盤回転数を変えることで３ケースに分けてそれぞれ測定した結果を図-2に示した．このとき河床洗掘量を測定したが，測定の誤差を考慮すればいずれも0であり，30分や1時間程度の実験では水流による摩耗は無視できると判断した．

(2)　結果と考察

case0-1では天盤回転速度が遅く二次流の影響はさほど感じられなかった．したがって直線分布のクウェット流に近い形状を呈している．一方，case0-2と0-3では天盤回転速度が速く，遠心力に引っ張られるように天盤付近の速い流れが外側面から下方向へずれ始める．このように，水路では反時計周りに流下する方向へ右ねじを回す方向に二次流が卓越しており，水路断面全体の流速が攪拌され底面付近でも速い流速を保っていることが中立粒子の挙動を追うことで確認できた．したがって，天盤回転数を十分に大きくすれば，case0は一様流として近似できる．

また，これらの近似直線をデータの範囲で積分して平均値を求め，図-3に水路の回転速度との関連特性を示した．

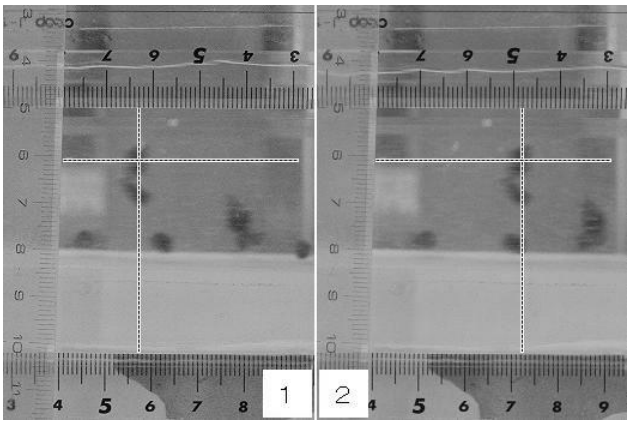


写真-4　撮影間隔1/40sの連続撮影

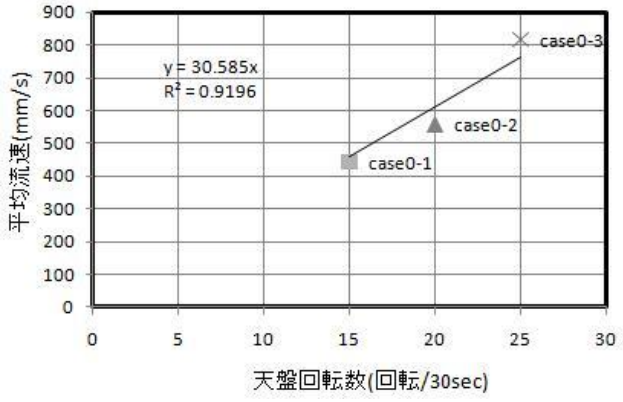


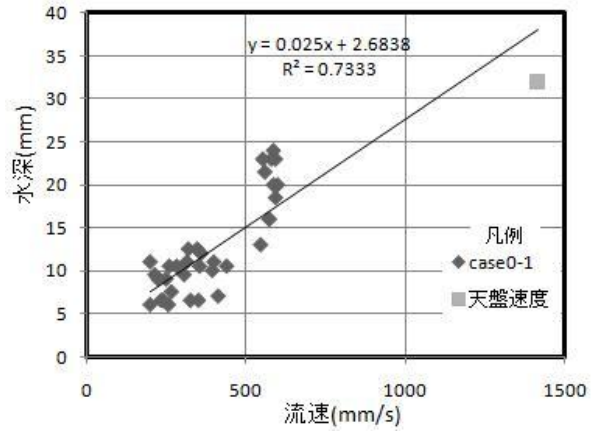
図-3　平均流速の天盤回転数との関係

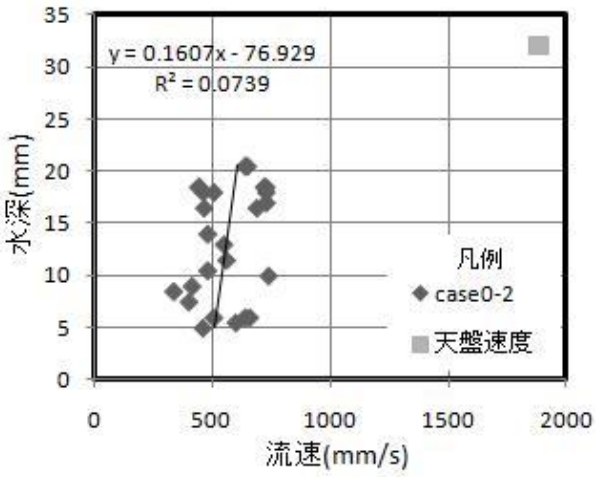
なお，各ケースで分布がばらつくのは，中立粒子が水路を周回する際の曲率半径が40～50(cm)と差があるからである．したがって，ある水深を与えたとき流速が遅いものは内側，速いものは外側を周回したとみなすため，近似直線が縦方向に出るよう一度軸を反転させる工夫を施した．

4.　回転水槽による摩耗実験

次にcase0に対して，流砂を投入するものをcase1，2，3として前述の物理条件によってケース分けし，摩耗実験を行った．この条件と結果をcase0と合わせて次頁表-1に示す．また流速分布は次頁図-4のようになった．

実験中は流砂が石膏河床底面上全域を小跳躍，転動，滑動する様子が確認されたが，二次流の影響で中心方向にやや集積する挙動も見られた．





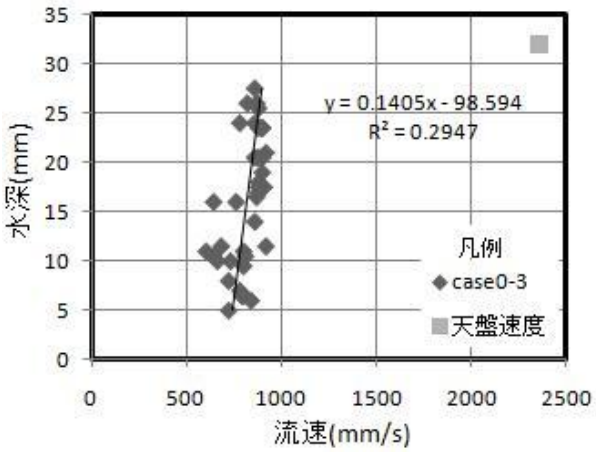


図-2　流砂無しの場合の流速分布図

表-1　実験条件と結果一覧

	Case0-1	Case0-2	Case0-3	Case1	Case2	Case3
粒径(mm)				10	5	10
粒子個数	0	0	0	330	2541	910
マーキング粒子個数				33	231	330
流砂量(m^2/h)	0	0	0	0.40	0.14	0.81
天盤回転数(回転/30s)	15	20	25	25.1	20	29.5
平均流速(mm/s)	442	558	817	757	655	903
稼働時間(h)				0.5	0.5	0.5
平均水深(mm)	32	32	32	33	33.5	33.5
摩耗深(cm)	0	0	0	0.0728	0.0175	0.0628
平均摩耗速度(mm/h)	0	0	0	1.4556	0.35	1.2556

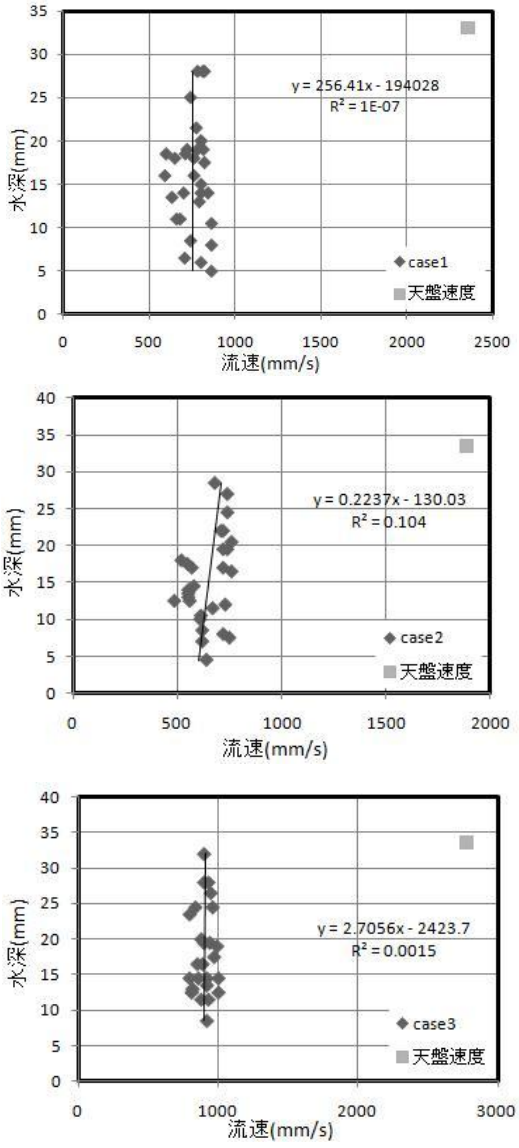


図-4　流砂が存在する場合の流速分布図

case1では粒径10mmの砂礫を投入した影響で，同じ天盤回転数のcase0-3よりも平均流速が小さい．一方case2では粒径5mmの砂礫を投入しているが，同じ天盤回転数のcase0-2よりも平均流速が大きい．二次流の影響が卓越するのにも関わらずこのような矛盾が生じるのは，粒径の大きさで説明できる．case1ではcase2よりも水路の規模に対して粒径のスケールが大きいので，粒子が集積したとき空間充填率が小さい分，抵抗が大きくなり，二次流を抑制する働きがある．一方case2では密集した砂礫が水深を浅くする効果によって流速が速くなったと説明できる．また流砂投入により流速はほぼ完全に一様化しているといえる．

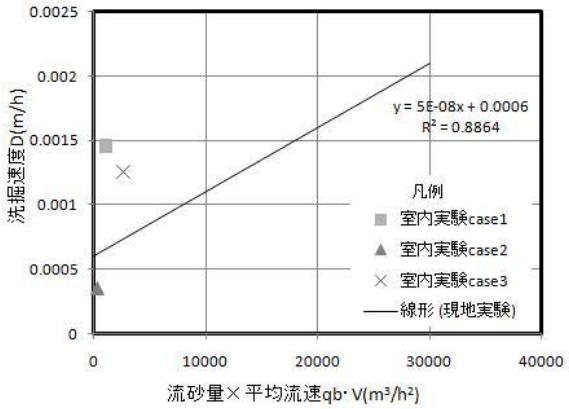


図-5　旭川開発建設部の現地実験との比較

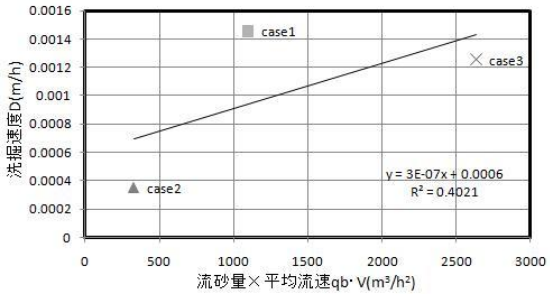


図-6　室内実験のみ

5.　比較と考察

この結果を旭川開発建設部による現地実験のデータの近似直線と比較したものを図-5にプロットした．

4. で述べた通り，case1及び3では水路断面に対して粒径の比率がcase2に比べ大きいので，流速が抑えられたように感じられた．したがって図-5及び6の凡例■と凡例×は，本来二次流によって流速と流砂量が卓越するので，より右側にプロットされ，良好な結果が得られるはずである．

6.　おわりに

今回の研究では現地実験の代替になるような室内実験を目指した。結果的に現地実験のオーダーに近い値が出たが，粒径10mmでいずれも洗掘速度が大きくなる事と，$q_b \cdot V$オーダーが現地実験に比べ極めて狭い範囲でしか実験を行えていないことが依然として懸念される状況である．

したがって今後の研究では，二次流の影響を極力取り除くことと，現地実験との無次元量を合わせることを念頭に置く．その上で流砂量や流速が大きくなるような条件で現地との比較を行いながら，粒径や河床岩質の違い，及び河床付近での底面剪断力との関係を調べていきたい．

参　考　文　献

1）米沢拓繁，福岡捷二，鈴木重隆：水衝部の河床表層材料と河床洗掘の関係の調査研究，河川技術論文集，第 13 巻，2007 年 6 月
2）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 巻，2009 年 6 月
3）都城秋穂，久城育夫：岩石学Ⅱ　岩石の性質と分類
4）関根正人：移動床流れの水理学