

第65回(2021年度) 北海道開発技術研究発表会論文

水理諸量に着目した河岸侵食リスクの 評価について

—対策必要箇所抽出の指標化に向けて—

北海道開発局建設部 河川計画課 ○ 萬谷 太雅
北海道開発局建設部 河川計画課 今村 仁紀
北海道開発局建設部 河川計画課 佐々木 博文

近年、大規模な洪水を経験していない河川では、砂州の発達や樹林化とともに、滞筋が固定化し、河床低下が進行しており、洪水等が生じた際に河岸侵食が発生し、堤防侵食へと進行する事が懸念される。そこで河岸侵食対策が必要となる箇所を簡便的に把握するために、近年の被災実績を有する河川を対象に、水理諸量に着目して洪水による外力を指標化し、河岸侵食リスクとして評価する手法について検討した。

キーワード：防災, 自然災害, 維持管理

1. 序論

砂州の発達、出水時の流れの偏り等により河岸侵食を誘発する^{1),2),3)}。近年では、千曲川中流部において、HWL以下の洪水であっても、砂州地形と関連するように堤防侵食、鉄道橋の被災等が発生している⁴⁾。北海道内の河川においても、砂州波高の増大に伴い、樹林化が進行した砂州の対岸で、河岸侵食による被災が発生している^{5),6)} (例えば、図-1)。これらは、計画規模相当以下

の洪水であっても、洪水流が安全に流下できないリスクの高い状況であることを示唆している。これまで治水安全度として、流下能力の向上といった量的整備を重視してきたが、砂州の発達、樹林化による滞筋固定等が進行している道内河川では、河岸侵食の可能性が考えられる箇所への対応といった質的整備が必要となっている。

各河川においては、量的整備は着実に進展しているが、質的整備については事前の評価手法がないため、事後対応となっているのが現状である。今後の気候変動に伴う外力増加、砂州の発達や樹林化の進行等を考慮すると、対策必要箇所の抽出と、計画的な対策の実施が不可欠と考えられ、河岸侵食リスクに関する評価手法の構築が必要である。

リスク評価については、全川的なスクリーニングを実施した上で、対策必要箇所においては河床変動解析による詳細検討が有効と考えられる。スクリーニングにおいては、砂州の発達形状といった「地形指標」、トリガー

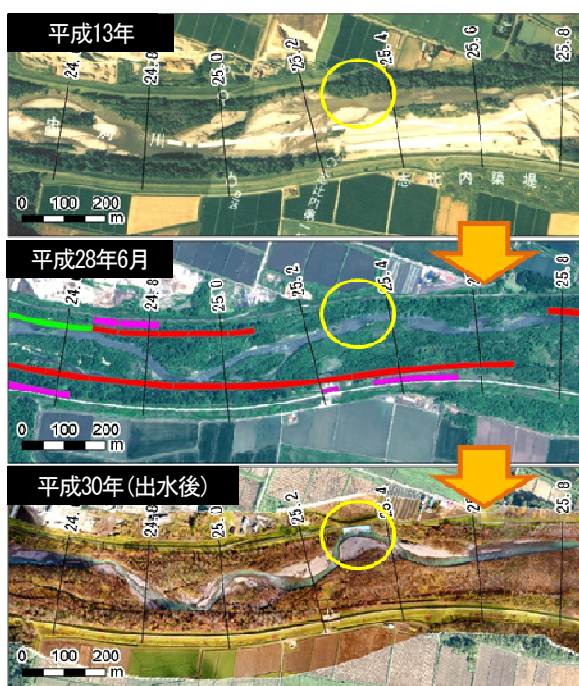


図-1 忠別川の河道変化

$$\text{比高水深比 (低水路満杯相当)} \\ = \text{砂州波高 (Zb)} / \text{満杯水深 (D)}$$

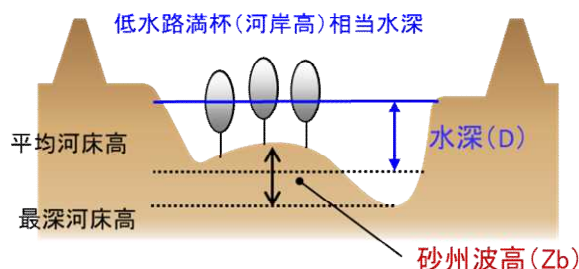


図-2 地形の指標化

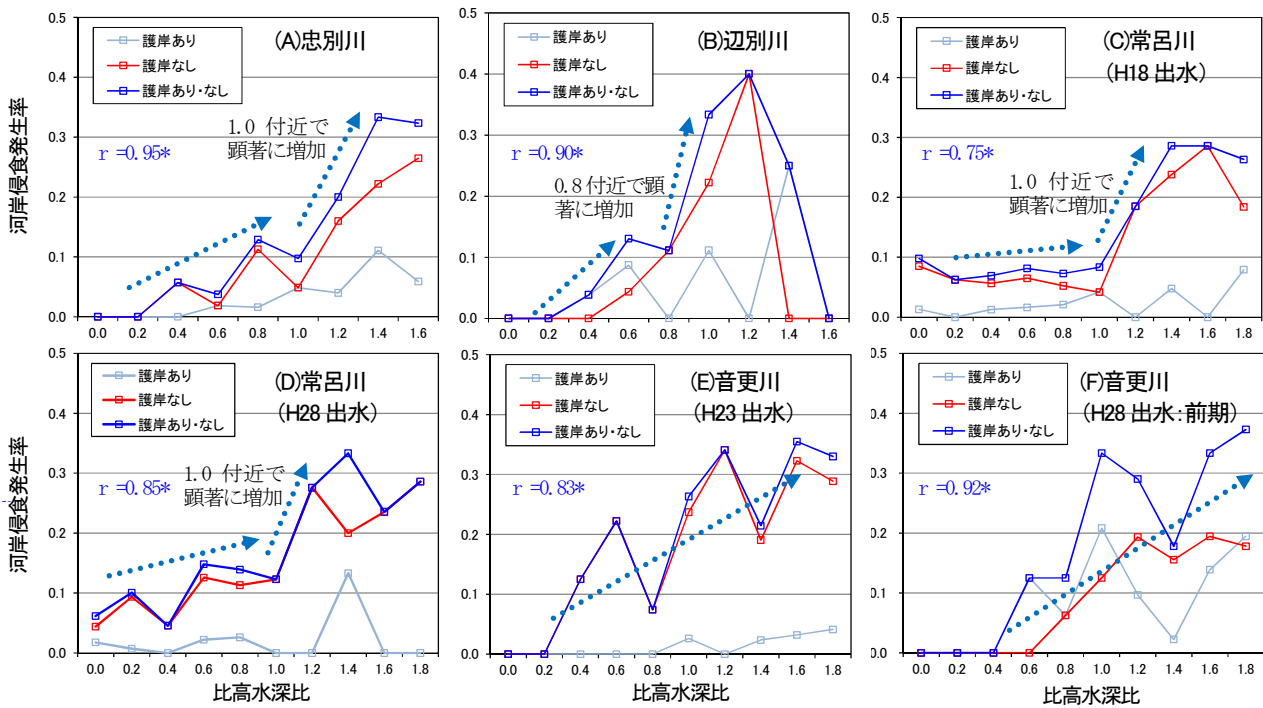


図-3 地形指標と侵食発生率の関係⁷⁾

・比高水深比のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

となる洪水外力の作用「外力指標」の観点から、評価指標の構築が必要である。過年度の検討⁷⁾では、地形指標として、出水前の砂州波高と低水路満杯相当水深の関係(比高水深比)に着目し、比高水深比の増加に伴い河岸侵食発生率及び河岸侵食幅が増加する傾向を確認した(図-2, 3, 4)。また、交互砂州領域では比高水深比が1.0以上になると河岸侵食発生率が急増する傾向等も確認しており、地形指標の有効性を確認している。

今年度は、出水前の河道形状より得られる外力指標に着目し、河岸侵食リスクとの関係性より指標としての有効性について検討した。

2. 対象河川の特徴・対象洪水

対象河川は、近年に河岸侵食を有する河川を対象に、表-1に示す石狩川水系忠別川、同水系辺別川、常呂川水系常呂川、十勝川水系音更川とした。

各河川の砂州領域は、忠別川が交互砂州～複列砂州、辺別川が主に交互砂州、常呂川が砂州非発生～交互砂州、音更川が主に複列砂州である(表-1)。

近年に河岸侵食が生じた洪水は、表-1、図-5のように、4河川9洪水であり、常呂川、音更川で継続時間が長い状況であった。音更川では平成28年に2度(前期:8月18日～24日、後期:8月31日)の出水が発生しているが、前期出水後に砂州形状が大きく変化した後に、後期出水が発生したこと、前期出水で多くの箇所で侵食が発生したことを踏まえ、出水前の初期河道が及ぼす影響として前期出水を検討対象とした。また、忠別川では平成28年及び

平成30年に河岸侵食を伴う出水が生じており、常呂川では平成28年8月及び同年10月に出水が生じているが、どちらの出水によって河岸侵食が発生したか判断出来なかったため、本検討では両河川とも2つの出水により河岸侵食が発生したものとして評価することとした。

3. 検討方法

(1) 河岸侵食の把握方法

河岸侵食実績は、出水前後の空中写真及び横断測量から河岸の後退距離を計測し、何れか大きな方を該当測線の侵食幅とした。なお、横断測量では出水前の河岸からの後退距離を200mピッチ測線毎で計測し、空中写真では20mピッチ測線毎に計測した。これらを基に、全測線数に占める侵食発生測線数を侵食発生率としてまとめた(左右岸別カウント)。

(2) 着目した水理諸量

洪水の影響としては、河岸近傍の継続時間や累積的な影響が想定されるため(図-6)、摩擦速度 u_* 、無次元掃流力 τ_* の観点から、 u_* を時間積分した積算 u_*t 、 τ_* を時間積分した積算 τ_*t 、継続時間 u_* 、継続時間 τ_*t に着目した。これらについては、出水前河道の準二次元不等流計算で算定した河道HQ式を用いて、洪水ハイドロ時間における水深や水面形を算定しながら評価した。

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_e} \quad \tau_* = \frac{u_*^2}{s \cdot g \cdot d}$$

(右式)
 $d \geq 0.303 \text{ cm} : n_* = 0.9d$
 $0.118 \leq d < 0.303 \text{ cm} : = 134.6d^{1/3}$
 $0.0565 \leq d < 0.118 \text{ cm} : = 55.0d$
 $0.0065 \leq d < 0.0565 \text{ cm} : = 8.41d^{1/3}$
 $d < 0.0065 \text{ cm} : = 226d$

u_* : 摩擦速度
 τ_* : 無次元掃流力
 g : 重力加速度
 h : 水深
 I_e : エネルギー勾配
 s : 砂の水中比重
 d : 代表粒径

表-1 対象河川

河川	砂州領域*	延長	勾配	対象洪水
忠別川	【交互～複列】 ・非発生 1% ・単列 65% ・複列 34%	約 30km	1/200 ～ 1/80	H28+H30
辺別川	【主に交互】 ・非発生 15% ・単列 85% ・複列 0%	約 9km	1/160 ～ 1/150	H28
常呂川	【非発生～交互】 ・非発生 53% ・単列 45% ・複列 2%	約 87km	1/2000 ～ 1/160	H18 H28
音更川	【主に複列】 ・非発生 0% ・単列 31% ・複列 69%	約 30km	1/200 ～ 1/130	H23 H28 前期

※出水前河道の中規模河床形態の領域区分⁶⁾による(該当断面の割合)。水深は河岸満杯相当である。常呂川は平成18年出水前、音更川は平成23年出水前河道である。

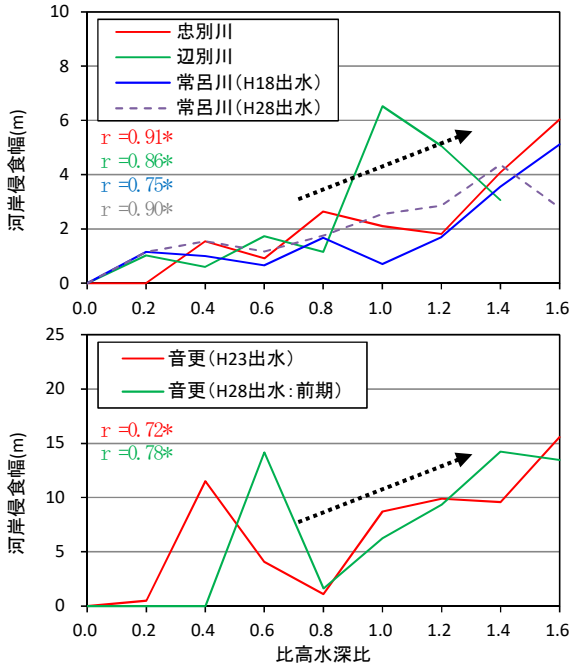


図-4 地形指標と河岸侵食幅の関係⁷⁾

比高水深比のレンジ毎の平均値を示す。比高水深比のレンジ0.2は、 $0.2 \leq \text{比高水深比} < 0.4$ を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、*は統計的に有意な相関を示す($p < 0.05$)。

水理諸量算定にあたっては、河岸近傍(河岸から川幅の10%範囲)の平均河床高を評価高とした水深、上下流断面の水面勾配の平均値をエネルギー勾配として算出した。積算値、継続時間の算定にあたっては、ハイドロ時刻毎に、侵食への影響が大きいと考えられる限界値(u_{lc} :河床材料に応じた岩垣式の値、 τ_{*c} :0.05)以上を対象とした。

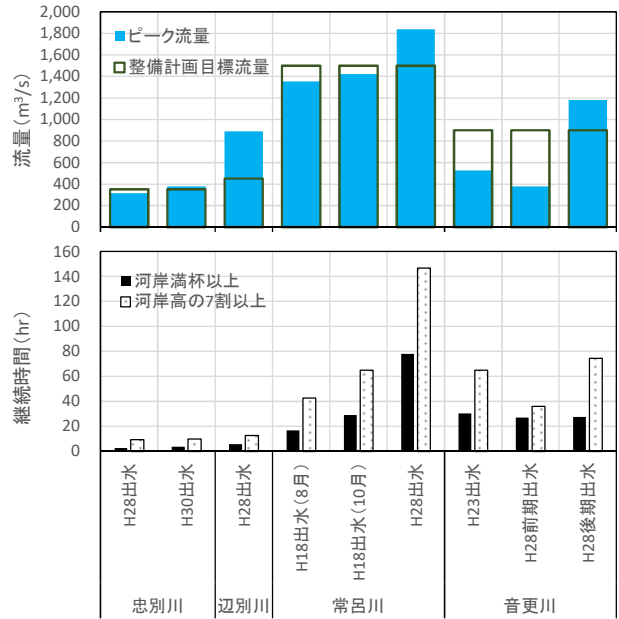


図-5 各洪水のピーク流量(上)、継続時間(下)

観測所は、忠別川は曉橋、辺別川は18号、音更川は音更、常呂川は上川沿である。継続時間は出水前河道の河道HQ式による全断面の平均値である。

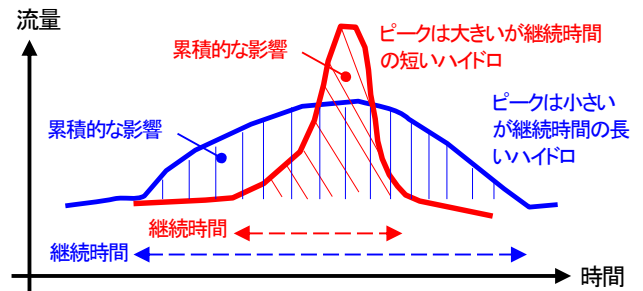


図-6 ハイドロの継続時間、累積的な積算値のイメージ

4. 検討結果及び考察

着目した4つの水理諸量と河岸侵食の発生率、侵食幅との関係をまとめたのが図-7、図-8である。

発生率については、図-7のように、積算 u_{lc} 、積算 τ_{*c} において全体に右肩上がりの傾向となっており、継続時間については積算値より右肩上がりの傾向は弱くなっている。侵食幅については、図-8のように、積算 u_{lc} 、積算 τ_{*c} では若干右肩上がりの傾向は見られるが、発生率ほど明瞭な傾向となっていない。

これらの相関関係についてまとめたのが表-2である。表より、外力指標については、積算 u_{lc} が発生率との正の相関関係を有している河川が多い状況にある。侵食幅との関係については、発生率に比べ、正の相関関係を有する河川が減少している。このように、外力指標について

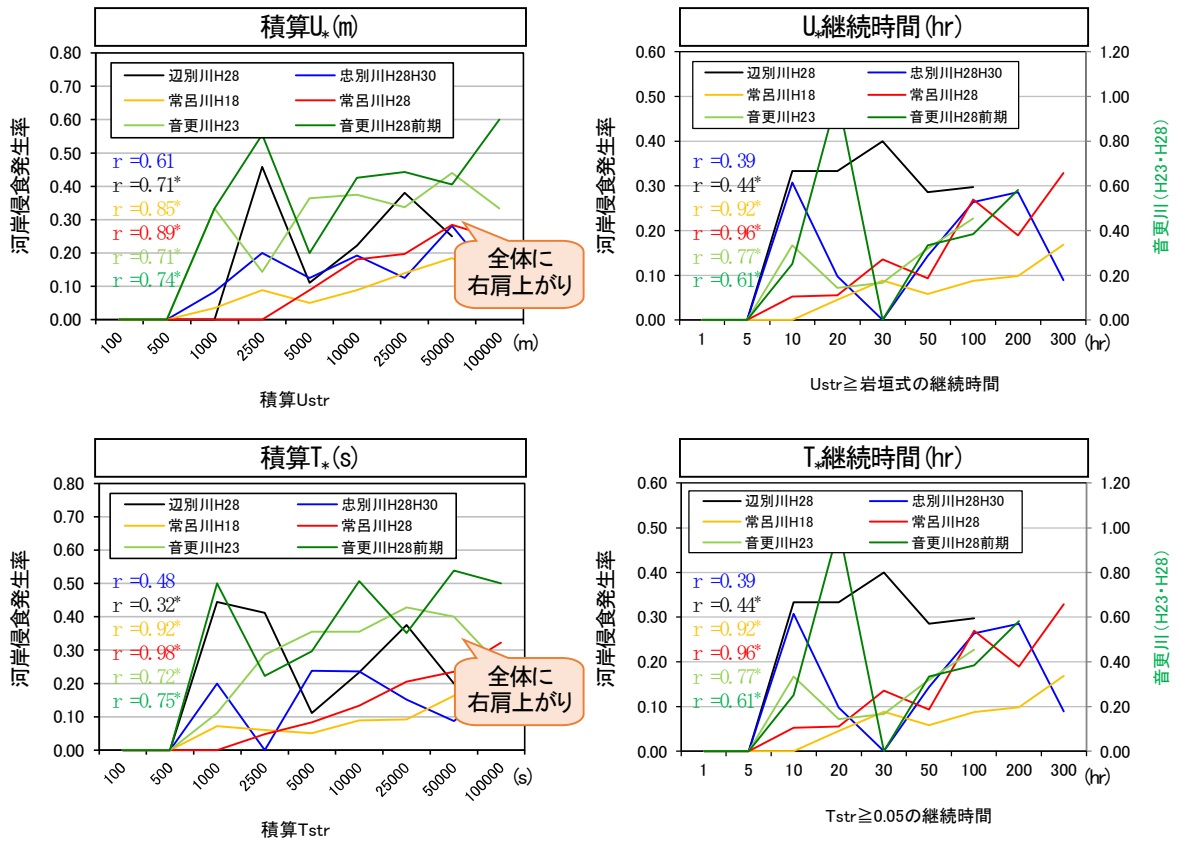


図-7 外力指標と河岸侵食発生率の関係

各水理諸量のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

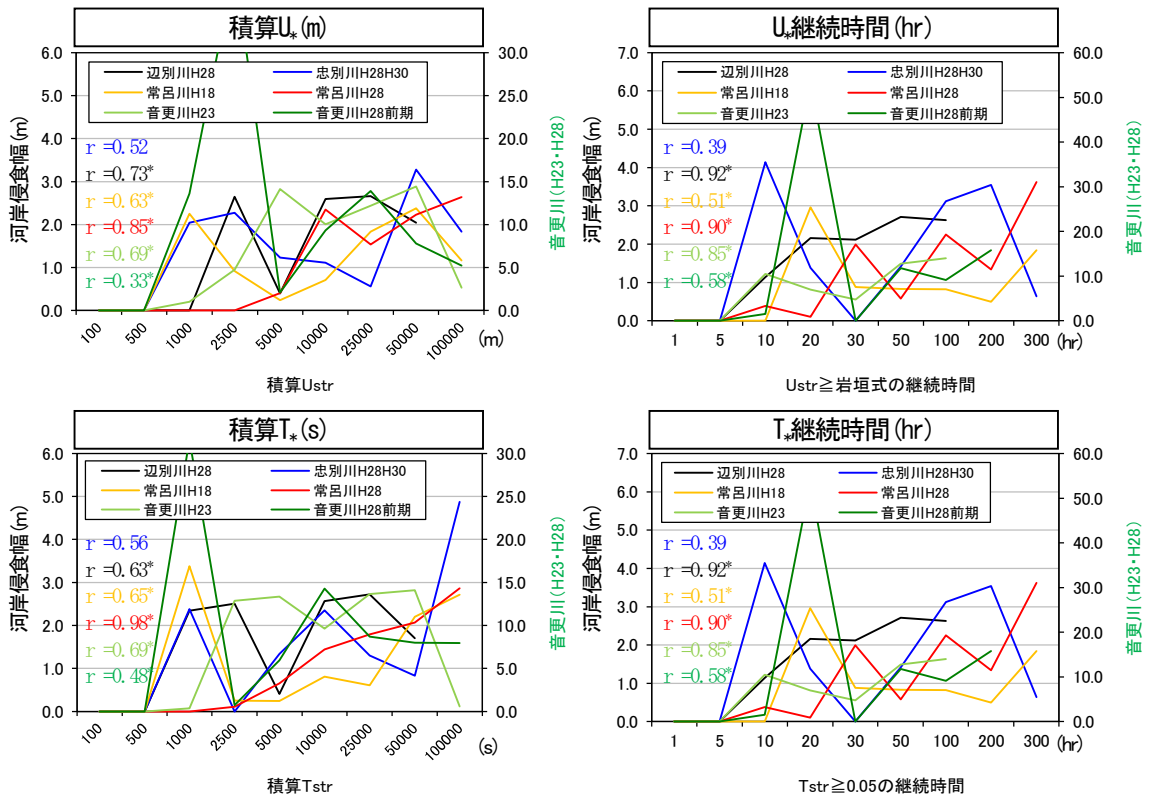


図-8 外力指標と河岸侵食幅の関係

各水理諸量のレンジ毎の平均値を示す。相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

表-2 各水理諸量の相関係数比較

河川・出水	外力指標							
	積算 U_*		積算 τ_*		U_* 継続時間 ($U_* \geq U_{*c}$)		τ_* 継続時間 ($\tau_* \geq \tau_{*c}$)	
	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅	侵食発生率	侵食幅
忠別川H28・H30出水	0.61	0.52	0.48	0.56	0.39	0.39	0.39	0.39
辺別川H28出水	0.71 *	0.73 *	0.32	0.63	0.44	0.92 *	0.44	0.92 *
常呂川H18出水	0.85 *	0.63	0.92 *	0.65	0.92 *	0.51	0.92 *	0.51
常呂川H28出水	0.89 *	0.85 *	0.98 *	0.98 *	0.96 *	0.90 *	0.96 *	0.90 *
音更川H23出水	0.71 *	0.69 *	0.72 *	0.69 *	0.77 *	0.85 *	0.77 *	0.85 *
音更川H28前期出水	0.74 *	0.33	0.75 *	0.48	0.61	0.58	0.61	0.58

※相関係数(r)はスピアマンの順位相関係数で、*は統計的に有意な相関を示す(p<0.05)。

※外力指標については、出水前河道においてほとんど水理諸量が発生していない箇所でも侵食が発生等、洪水中に上流断面の影響で巻き込まれた等の影響も想定される箇所もあった。これらは、今回の簡便的な方法では対象とできない領域と考え、洪水中の河岸近傍水深1.0m未満、水理諸量の棄却値以下を除外して検討した。棄却値は各水理諸量の外れ値となっている付近の値とし(積算 U_* が1000m、積算 τ_* が1000、継続時間は10hr)、それ以下を除外した。

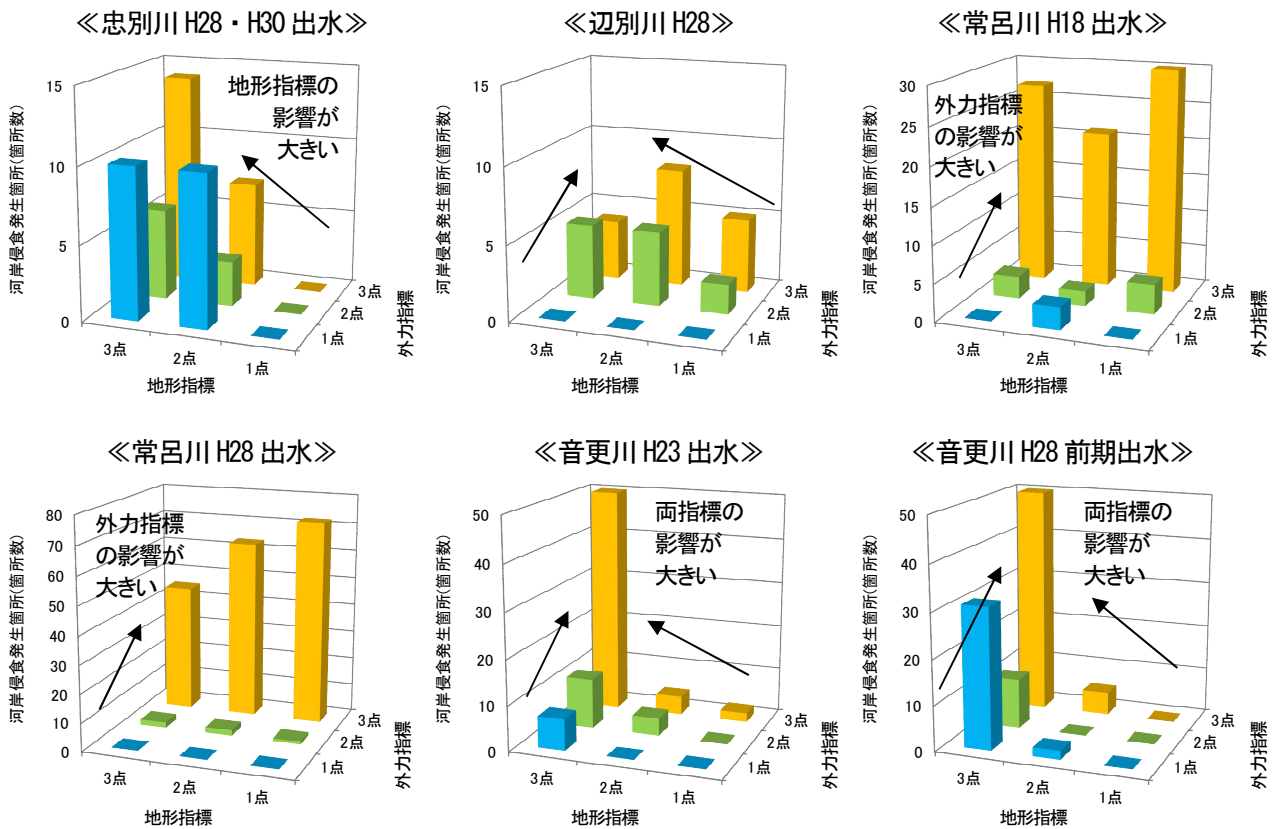


図-9 地形指標・外力指標のランクと河岸侵食発生箇所数の関係

※地形指標の危険度 (1点: 比高水深比 ≤ 0.5 , 2点: $0.5 < \text{比高水深比} < 1.0$, 3点: $1.0 \leq \text{比高水深比}$), 外力指標の危険度 (1点: 積算 $U_* \leq 1000$, 2点: $1000 < \text{積算}U_* < 10000$, 3点: $10000 \leq \text{積算}U_*$) と仮にランク区分を与えた。

※データは表-2と同様に、水深1.0m未満かつ積算 U_* の棄却値以下を除外した。

は、積算 u_s が最も感受性が良いと考えられる。

なお、積算 u_s について、侵食幅の相関関係が発生率ほど高くない原因としては、水理諸量の把握は出水前地形の河道HQ式によるものであり、洪水時の砂州の変化を考慮できないこと等も影響していると思われる。

5. 今後の展開に向けて

(1) 地形指標と外力指標の影響度

本検討では、河岸侵食リスクのスクリーニングにあたり、既往検討である砂州の発達を表現する地形指標に加え、トリガーとなる外力指標に着目し、侵食実績との関係性より、積算 u_s の適合性が高く、指標として適していると考えた。しかしながら、実河川への適用にあたっては、各指標の重みづけの必要性等もあり、困惑する原因ともなる。

ここでは、仮に河岸侵食リスクについて、地形指標の危険度（1点：比高水深比 ≤ 0.5 ，2点： $0.5 < \text{比高水深比} < 1.0$ ，3点： $1.0 \leq \text{比高水深比}$ ），外力指標の危険度（1点：積算 $u_s \leq 1000$ ，2点： $1000 < \text{積算}u_s < 10000$ ，3点： $10000 \leq \text{積算}u_s$ ）として、ランク区分を与えて、実績の侵食発生箇所数との関係をまとめた（図-9）。

図-9からは、地形指標の影響の大きな忠別川、外力指標の影響の大きな常呂川、両指標の影響の大きな音更川というような特徴があらわれている。このように、両指標とも同数のランク区分を与えることにより、地形の影響の大きな河川やイベント、外力の影響の大きな河川やイベントに対しても対応できると考えられる。なお、辺別川については、平成22年出水、平成23年出水による被災も発生し、その直後に河道が整備され、出水前の河道データ（横断測量平成23年、砂州高の平成25年LPデータ）は砂州が未発達で地形指標が小さな状態であったと考えられる。

今後は、各指標の重みづけの考え方等についても検討する必要がある。

(2) 実河川への評価方法の実装に向けて

河岸侵食リスクについては、侵食発生時に、堤防侵食まで到達する危険性を見逃さないことが重要と考えられる。このため、地形指標、外力指標に加え、低水護岸の有無や安定性といった河岸防護機能の指標、堤防法尻まで侵食が到達する容易さ（高水敷幅）等の指標もあわせて検討していく必要がある。

加えて、侵食破堤後の背後地の浸水リスク等を考慮することで、対策必要箇所の優先度を定めることが可能となることが期待されるため、今後はリスク評価手法についても検討が必要である。

5. おわりに

本研究は、各開発建設部の河床低下対策について取りまとめ、研究を行い、より効率的、効果的な河道管理を実施するために、「北海道河道技術研究会」を立ち上げ議論した結果をとりまとめたものである。

研究会の成果としては、これまで、「河道の変化要因に着目したこれからの河道管理の実践読本（案）」⁹等、指針として取りまとめた。

引き続き、河岸侵食リスクの検討を進めて、河岸侵食対策が必要となる箇所の抽出や発生要因とあわせて、対策工のアイディアについて議論し、指針を充実化していく予定である。

謝辞：本研究は北海道開発局が主催する河道技術研究会の成果の一部です。研究会でご意見を頂いた寒地土木研究所、各開発建設部の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊康玄，島絵里子，山口里美：浸食性河岸を有する水路を用いた中規模河床波の形成実験，土木学会論文集 B1，Vol.71，No.4，pp. L1009-1014，2015.
- 2) 井上卓也，矢部浩規：河床地形の二極化が河岸侵食に及ぼす影響，寒地土木研究所月報，No.802，pp.2-8，2020.
- 3) 川村里美，久加朋子，岡部和憲：大規模な側岸侵食と低水護岸背後洗掘の発生プロセス，音更川における被災の要因分析と急流河川における今後の対策に向けて，第64回北海道開発技術研究発表会，2021.
- 4) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020.
- 5) 小田島大祐，桑村貴志，永多朋紀：音更川における出水時の堤防一部流出の原因分析について，第55回北海道開発技術研究発表会，2012.
- 6) 天野直哉，米元光明，石井克英：辺別川における平成23年9月出水での被災について，第55回北海道開発技術研究発表会，2012.
- 7) 傳甫潤也，井上卓也，橋本慎一，千葉学，戸村翔，川上北斗，佐々木博文：河道の二極化の形状指標と河岸侵食リスクの関係，土木学会論文集B1(水工学) Vol.77，No.2，L373-L378，2021.
- 8) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984.
- 9) 北海道開発局・寒地土木研究所：河道の変化要因に着目したこれからの河道管理の実践読本（案），2014.