

石狩川中流部で発生した大規模河岸浸食の要因について

BANK EROSION IN MIDDLE PART OF THE ISHIKARI RIVER

鈴木 優一¹・渡邊 康玄²・山越 明博³

Yuuichi SUZUKI, Yasuharu WATANABE and Akihero YAMAKOSHI

¹正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²正会員 工博 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

³国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

The middle reaches (KP77 - KP87) of the Ishikari River have been repeated meandering and cut-off. Although this part was improved, alternate bars present there and the low water channel is meandered. In this river section, which is just below the Sunagawa New Channel, sandbar(island) began to develop immediately after the 1969 completion of the channel work. This island grew and the riverbank suffered serious erosion. Bank protection work was executed as a countermeasure.

The sandbars are developed by several factors, and it caused the unusual situation of erosion on both the inner and outer banks. While it is true that outer bank erosion can generally be explained in relation to excess velocity, this is not so for inner bank erosion.

This paper used existing research on the relationship between erosion process and excess velocity in order to explain the erosion following the development of the sandbars. We also examined the section prone to erosion caused by changing of sandbar formation. We propose how to maintain the low-water channel in rivers where alternate bars develop at the middle reaches.

Keywords: *excess velocity, bank erosion, sandbar, the Ishikari river*

1. はじめに

石狩川の奈井江町から砂川市にかけての中流部 (KP77 ~87) は, 原始河川での姿は激しく蛇行や短絡を繰り返してきた区間である。低水路では単列砂州が発達し流れの蛇行が著しく, 河岸が築堤に接近している箇所もある。また, 石狩川最後の捷水路工事となり 1969 年に完成した砂川新水路の直下では, 新水路完成直後から中州の発生が見られ, 時間の経過と共に中州が発達し, 河岸が大規模に浸食され緊急的に護岸工事が実施されている。大規模河岸浸食の原因となった中州は, 捷水路工事や低水路の線形などの要因が重なり合って発生したものであるが, 河岸浸食は外岸側のみならず中州の発生とともに内岸側も同時に浸食される状況を呈している。一般的に河岸浸食は偏倚流速と関係付けられているが, この内岸側浸食の

現象は偏倚流速から説明できないものである。本論文は捷水路工事が終了した 1969 年以降における上記区間について, 既往の縦横断面図や垂直写真等の資料から河岸浸食経過を明らかにすると共に, 砂州や中州の発達に伴う河岸浸食について偏倚流速との関係を説明する。さらに, 砂州の移動や停止状態における浸食危険箇所を検討することにより, 交互砂州の発生するような中流域における低水路満杯流量程度での低水路河道維持について提言を行ったものである。

2. 河道変遷と河岸浸食経過

検討区間の現況図を図-1に示す。この区間では砂川新水路の完成や築堤の概成により河道が固定されており, 低水路内には単列交互砂州が形成され流れがそれによっ



図－１ １９９９年河道平面図

て蛇行している。

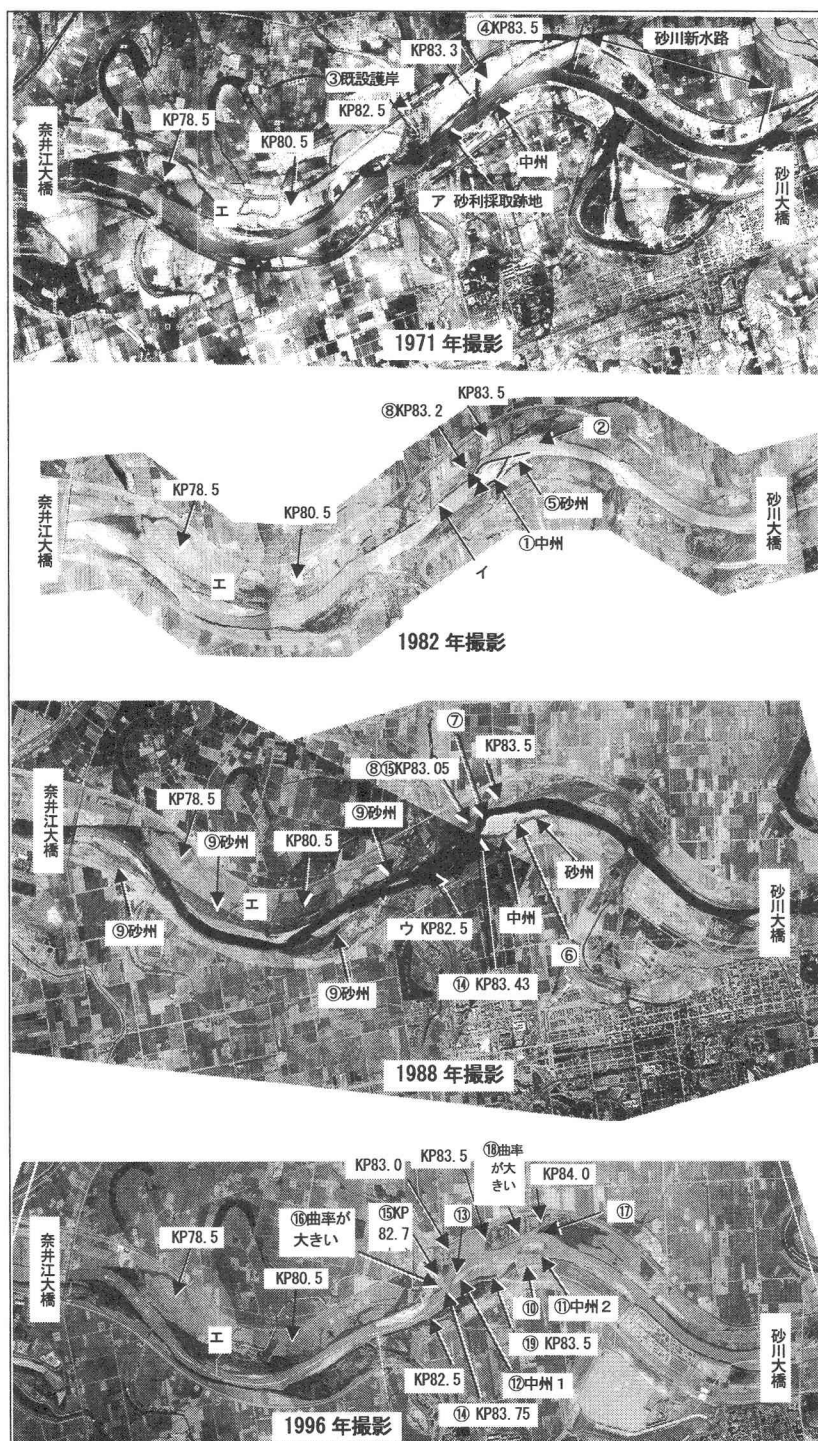
図－２は、１９７１年、１９８２年、１９８８年、１９９６年に撮影された垂直写真を並べたものである。この一連の写真から時間の経過と共に砂州や中州の発達していく様子が詳しく見てとれる。

特に、１９８２年以降の垂直写真には砂川新水路下流の KP83.5 付近(図－２中の丸数字①と対応、以下同じ)に大規模な中州が発達し低水路右岸の河岸が著しく浸食されていく様子が伺える。中州の影響により河岸浸食(築堤側へ最大約 180m)した右岸 KP82.7～84.3 (図－１参照)までの区間は、１９９９年から ２０００ 年にかけて延長約 1,400m の大規模な護岸工事が実施されているため、この箇所における河岸浸食の過程について詳しく見ることにする。

この中州は、後述する低水路幅や河床縦断勾配の変化が原因となり形成されたと判断される。

１９８２年の垂直写真からは、中州が大規模に発達し、この影響で石狩川の流れが左右に分かれ(②)、左右の河岸が大きく浸食されている様子が確認できる。また、右岸河岸には、１９７１年の時点で既に KP82.5～83.3 まで護岸が敷設(③)されていたが、河岸浸食は KP83.5 付近(④)から始まったため、護岸裏側が浸食され既設護岸は流出したものと推定される。さらに、左岸側河岸凸部には、砂州が形成(⑤)されていることも確認できる。

１９８８年垂直写真には、中州と左岸側河岸に形成された砂州が繋がり、左岸側の流路はほとんど陸化(⑥)していることが見てとれる。また、中州右岸側は、河岸が浸食されるに伴い右岸方向に成長し、１９７１年当時には低水路河岸線であ



図－２ 河道の経年変化

った地点に中州右岸側の先端が到達(⑦)している。この結果、流れは右岸沿いのみの流れとなり、河岸浸食は拡大し、1982年と比較し浸食位置が下流に延びている(⑧)。

また、区間の中央付近から下流側では、4つの砂州(⑨)が発達しているのが分かる。

1996年の垂直写真では、左岸側の低水路河岸が一部河川工事により成形(⑩)され、自然な河道の姿は確認できないが、KP83.5付近に形成された砂州の上流側に新たに砂州が発達し、中州の様な状況(⑪)となっているのが分かる。ここで、中州を区別するために、下流側を中州1(⑫)、上流側を中州2(⑬)とする。中州1は1971年から確認されている中州である。

中州1は、さらに発達し中州自体の右岸側の部分が1971年当時の高水敷部分に入るほど成長(⑭)しているほか、中州下流端が1988年よりさらに下流側に延びている(⑮)。中州1に対して発生した右岸河岸浸食は、さらに拡大しており下流側にも伸びてきている(⑯)。河岸線の浸食形状は1988年と同じ形状で、下流部の曲率が大きく浸食されやすい状況(⑰)である。

中州2については、大きく発達しているのが分かり、この影響による右岸側の河岸浸食も、大規模な浸食(⑱)に発展している。河岸線の浸食形状は下流側の浸食形状と同じく下流部分の曲率が大きい(⑲)ため、河岸浸食が下流へと進む状況である。

この河岸線の浸食形状が流れを急激に左岸側へと向け、対岸の左岸側や中州1の上流側を浸食(⑳)しているのが確認できる。

3. 偏倚流速と河岸浸食

(1) 偏倚流速

河道のわん曲により外岸側の流れは、一般に断面平均流速より大きくなる。この程度を表すものとして、断面平均流速からの偏倚量である偏倚流速がある。

一般に河岸浸食は、偏倚流速 $\tilde{u}_e$ と関係付けられているため、大規模な中州の発生で顕著な河岸浸食のあったKP82.7～84.3の区間を含むKP77～86までについて、偏倚流速と河岸浸食の関係調べることとした。

偏倚流速 $\tilde{u}_e$ ¹⁾は、線形偏倚流方程式を無次元表示し「 $s = -\infty$ において $u_e = 0$ 」の条件のもとに解いた(1)式を用い、(2)式から算出できる。

$$u_e = -\chi C_{*(s)} + \int_{-\infty}^s C_f \{ (A+2)\chi^2 + F^2 \chi^3 \} C_{*(s')} \exp[-2\chi C_f(s-s')] ds' \quad (1)$$

ここで、 χ ：蛇行の程度を示すパラメータ

$C_{*(s)}$ ：河道の曲率 C_f ：摩擦係数

A ：河床横断形状に関するパラメータ（洗掘係数）

F ：フルード数 s ：縦断方向河道距離

$$\tilde{u}_e = u_e \times \tilde{U}_0 \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{U}_0$ ：谷軸方向想定河川の平均流速であり、 $\sim$ は次元を持つ値であることを表している。

偏倚流速 $\tilde{u}_e$ を1969年以降で平面図が作成されている1970年、1978年、1988年の3ヶ年について、各年平面図の低水路河道に低水路満杯時の流心線を設定し、低水路幅(250m)の間隔で算出した。なお、対象流量は、検討区間最下流部に位置する奈井江大橋観測所の1969年から2000年までの大出水年(1975年、1981年等)を除いた年最大流量の平均値2,500m³/sを用いた。

(2) 偏倚流速と河岸浸食量の関係

算出した3ヶ年分の偏倚流速と測量年の異なる横断面図の重ね合わせから求めた河岸浸食量の関係を以下の図-3～5に示す。ここで偏倚流速は、河道が下流に向かって時計回りに曲がる場合(左岸側が浸食される)を正の値としており、河岸浸食量は、右岸と左岸方向に浸食された量を示している。

これらの図から、偏倚流速は1988年のKP78.5と79.0で一部他の年度と異なるほかは、ほぼ全体的に同一の値を示している。河岸浸食は、砂州や中州等の影響を受け各年で異なる位置に発生している。これらの現象を各年で詳しく見ると以下の様になる。

a) 1970年の偏倚流速と河岸浸食

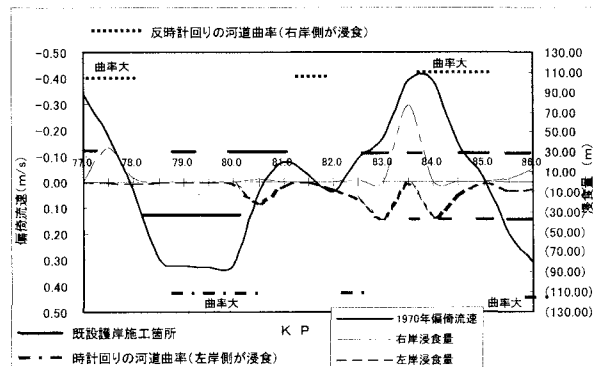


図-3 1970年偏倚流速と河岸浸食量の関係

1970年について、偏倚流速は、河道の線形である曲率に大きく支配された形状を示している。この区間の河道線形は図-1に示すとおり、KP78.5～80.5、82.0～82.5、86.0～87.0付近の3箇所では時計回りに曲がり(左岸が浸食される)、KP77.0～78.0、81.5、83.5～85.0付近で反時計回りに曲がっている(右岸が浸食される)。偏倚流速はこれらの箇所では河道曲率とある位相を持って左岸または右岸方向の浸食を示す分布形状となっている。

偏倚流速は、曲率が大きくなっているKP77.0(右岸)、78.5～80.0(左岸)、83.5～84.0(右岸)、86.0(左岸)付近の4箇所では大きな値となっている。この曲率は対

岸の砂州による河道の蛇行 (KP77.0~78.0, 78.5~80.5, 図-1 参照) と新水路工事に伴う河道線形の付替 (KP83.5~85.0, 86.0~87.0, 図-1 参照) によるものである。

一方, 河岸浸食量は, 1970 年と 1978 年の横断面の重ね合わせから左右岸別に求めたものである。KP77.5 (右岸), 80.5 (左岸), 83.5 (右岸) では偏倚流速の傾向と河岸浸食の発生位置が合致しており, 浸食量も大きな値となっている。特に, KP83.5 では特に大きな浸食が起きているが, これは, 護岸工事に伴う河岸掘削によるもので, 以後, 河岸浸食は発生していない。

KP83.0 (左岸), 84.0 (左岸), 86.0 (右岸) 付近では, 偏倚流速の発生とは反対の河岸に浸食が発生している。これについて詳しく調べることにする。KP83 付近の河道はほぼ直線であり, 河岸は 1970 年の平面図から判断すると砂利採取場の跡地になっている。1971 年の垂直写真からはその名残と思われる砂州の不規則な形状 (図-2 中のア, 以下同じ) が確認されるとともに, 1982 年の垂直写真からは河床部分の砂州がほぼ流出 (イ) していることが確認される。以上から, この地点での浸食は河岸ではなく河床部に残った砂州の流出と判断された。KP84.0 と KP86.0 付近の河岸浸食は, 横断面図や垂直写真から判断すると護岸工事に伴う河岸掘削によるものであった。

b) 1978 年の偏倚流速と河岸浸食

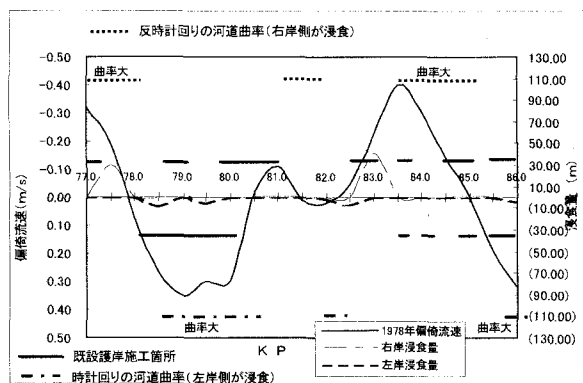


図-4 1978 年偏倚流速と河岸浸食量の関係

1978 年の偏倚流速と河岸浸食量の関係は以下のとおりである。

偏倚流速の分布については, 1970 年と河道線形が変わらないためほぼ同じ分布形状である。

河岸浸食量は 1978 年と 1990 年の横断面図から求めたものである。偏倚流速の傾向と合致した浸食が KP77.5 (右岸), KP78.5 (左岸), 79.5 (左岸), 83.0 (右岸) 付近で見られる。これらの浸食について見てみると, KP77.5 は偏倚流速が示すとおり河道の蛇行によるものである。KP78.5, 79.5 の浸食は, 戦後最大の洪水となった 1981 年洪水直後の横断測量から判断すると, この大洪水による浸食であると考えられる。KP83.0 の浸食は, 図-2 に示す 1982 年垂直写真で確認される中州 (①) によって, 既設護岸の上流裏側から護岸を破壊しつつ下流に下がってき

たものと推定される。

KP82.5 (左岸) では, 偏倚流速と合致しない浸食 (ウ) が発生している。これは, 横断面図や垂直写真から判断すると KP83.0 右岸側の浸食により流れが急激に左岸へ向くことによって生じたものである。この左岸の浸食は, 中州の影響で生じたものであるため, 偏倚流速には現れなかったものと判断される。

c) 1988 年の偏倚流速と河岸浸食

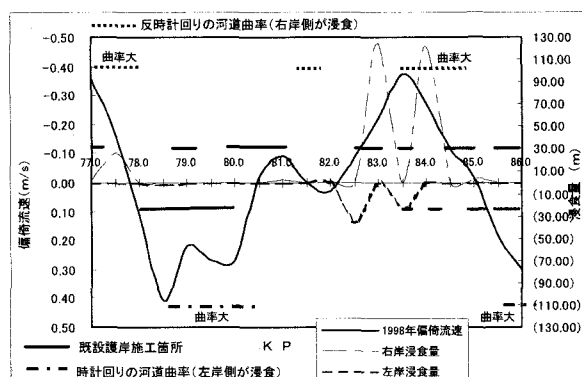


図-5 1988 年偏倚流速と河岸浸食量の関係

1988 年の偏倚流速と河岸浸食量の関係を見ると以下のようになっている。

偏倚流速の全体的な分布は 1970 年, 1978 年とほぼ同じ形状であるが, 左岸 KP78.5, 79.0 で他の年とは明らかに異なった値を示しており, KP78.5 では特に大きな値, KP79.0 では小さな値を示している。これは, 右岸側の KP78.5~80.5 に存在する砂州 (エ) の影響によるものである。この区間では, 1970 年当時の平面図から判断すると, 大きな砂州は砂利採取によって発達が人工的に抑制させられていた。しかし, 1968 年に制定された砂利採取法の関係でそれ以降に砂利採取が行われなくなり, 砂州が徐々に発達してきている。1970 年, 1978 年では砂州の規模が小さく曲率も小さかったが, 1988 年時点では砂州が発達して河道が左岸に寄り曲率も大きくなっている (図-2 参照)。この砂州との位置関係により KP78.5 では曲率の大きくなった影響を受けて偏倚流速が大きな値となり, KP79.0 では上流河道との繋がりで直線の部分が増え結果として他の年より偏倚流速が小さくなったものである。

河岸浸食量は 1990 年と 1997 年の横断面図から求めているが, 特徴的傾向としては, 偏倚流速の値に合致した形で右岸 KP83.0, 84.0 で大きな浸食が発生している。また, 偏倚流速とは合致しないものの左岸 KP82.5 と 83.5 においても比較的大きな浸食が発生している。これは, 1978 年でも見られた中州の発達の影響によるものである。図-2 の 1988 年や 1996 年垂直写真からは, 中州が下流側や上流側へと発達している様子が伺える。それに伴い, 右岸河岸では 1990 年から 1997 年までに 100m 以上河岸浸食 (⑩) され, 1978 年と同様にこの右岸浸食で流れが左岸向きとなり, 左岸の浸食 (⑨) に発展している。測点毎に見ると, 右

岸 KP83.0 の河岸浸食が下流の左岸 KP82.5 の浸食を発生させ、右岸 KP84.0 の河岸浸食では、流れが中州 1 の上流部分の一部を浸食した後に、左岸 KP83.5 での河岸浸食を発生させているのが図-2 の 1996 年垂直写真から伺える。

4. 中州の発生過程

中州の影響による河岸浸食は、偏倚流速では現れなかったが、この河岸浸食発生の原因となった中州について、その発生過程を詳しく見ることにする。

この中州は 1971 年の垂直写真に小規模ながら確認できるため、この当時の河床形状を調べたものが、図-6、7 である。

図-6 の新水路完成直後である 1970 年の縦断面図では、中州の発生した KP83.5 付近には既に砂州の形成が認められる河床の凹凸が見られる。さらに、この箇所は、検討区間を含む KP67.0~90.0 までの平均河床縦断面図である図-7 に示されるように、河床縦断面勾配の変化点となっていた。また、捷水路工事では、新水路の低水路幅が 120m とされていたが、図-8 の 1970 年河道平面図から判断すると新水路直下の KP84.3 付近から下流の川幅は旧川との合流点であったということもあり約 180m となっていた。すなわち、この箇所では低水路幅が急に広がるとともに、河床勾配が緩やかとなる河道となっていた。これによりこの箇所において、中州の形成が助長させられたものと推定される。これが原因となり、前述した一連の中州の発達、右岸浸食とそれに伴う左岸浸食が起きている。

5. 砂州の移動と浸食危険箇所

本検討区間の中央付近から下流側では図-9 に示すとおり 4 つの砂州（最下流の砂州を No.1 とし、最上流の砂州を No.4 とする）が存在している。前述したとおり 1968 年以降徐々に発達し、最下流部の No.1 砂州では対岸の河岸が浸食されている様子が確認出来る。このことから、砂州の移動と浸食危険箇所の関係について検討を行う。4 つの砂州について、平面図が作成された 1988 年と 1999 年について蛇行角と半蛇行長を調べたものが表-1 であり、これを基に木下²⁾ の砂州の移動停止限界を参考として判断すると、下流側 2 つの砂州（No.1、No.2）は停止領域、上流側 2 つの砂州（No.3、No.4）では移動領域であると判断される。

砂州の存在が明瞭に撮影されている 1988 年と 1996 年の垂直写真からこれら 4 つの砂州の動きを調べると、下流側 No.1、No.2 の砂州では形状の変化や移動している様子はほとんどなく、植生が河岸から進出して 1996 年の時点では砂州全体が植生で覆われているのが見てとれる。しかし、上流側 No.3、No.4 の砂州では、徐々に発達していく様子が分かるが、植生の進出や移動する状況はほとんど見られない。

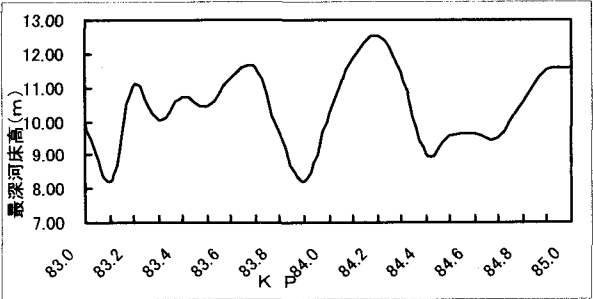


図-6 1970 年河床縦断面図

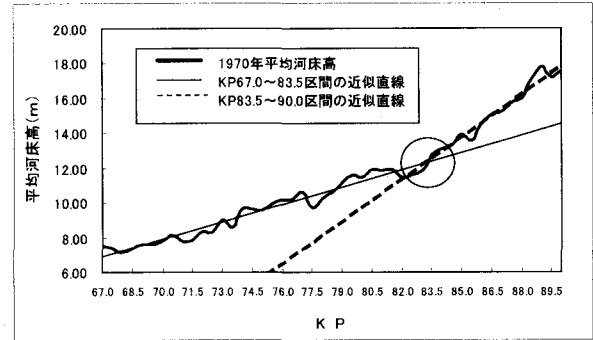


図-7 平均河床縦断面図

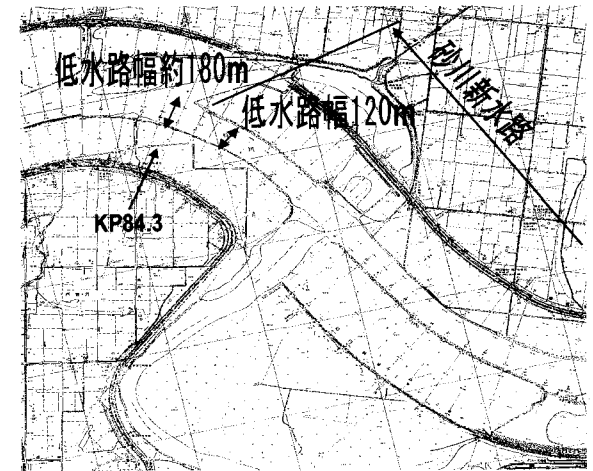


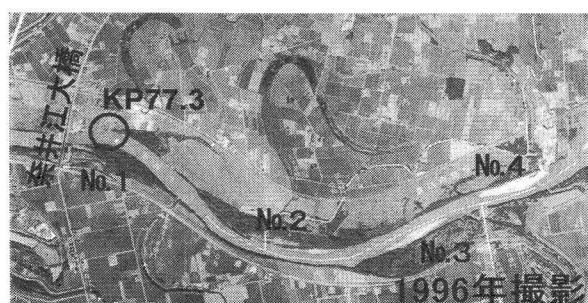
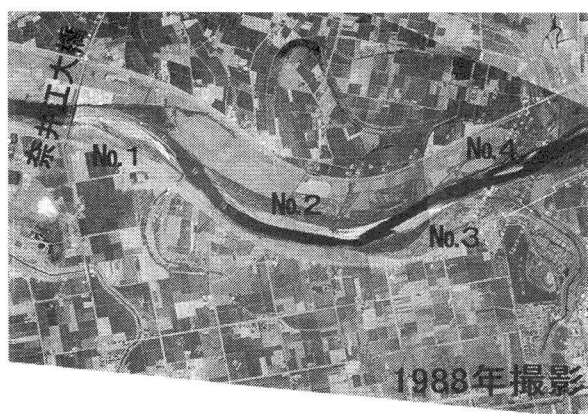
図-8 1970 年河道平面図

表-1 蛇行角度と半蛇行長

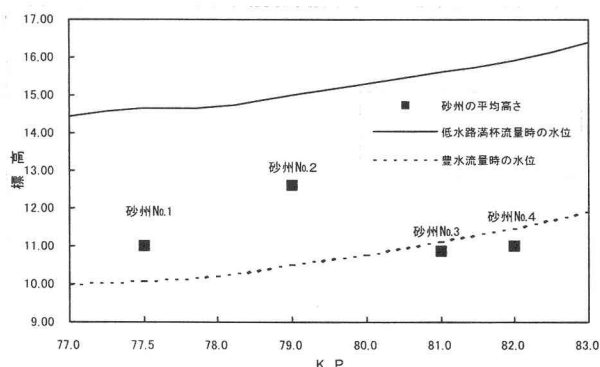
砂 州	蛇 行 角 度 (度)		半 蛇 行 長 (m)		蛇 行 長 / 川 幅 (250m)	
	1988年	1999年	1988年	1999年	1988年	1999年
L No.1	53.5	53.5	1105	1105	4	4
R No.2	40	41	1280	1280	5	5
L No.3	14	14	875	1005	4	4
R No.4	10	26	1000	775	4	3

垂直写真の撮影された 1988 年と 1996 年に最も近い年に行われた横断測量の成果から、砂州の平均的な高さと同河川水位を比べたものが図-10、11 である。検討区間下流端には奈井江大橋水位観測所 (KP76.8) があるため、この観測所での豊水流量 400m³/s (豊水位 9.89m) と低水路満杯流量相当とした 2,500 m³/s での河川水位を不等流計算から求め図-10、11 に示した。

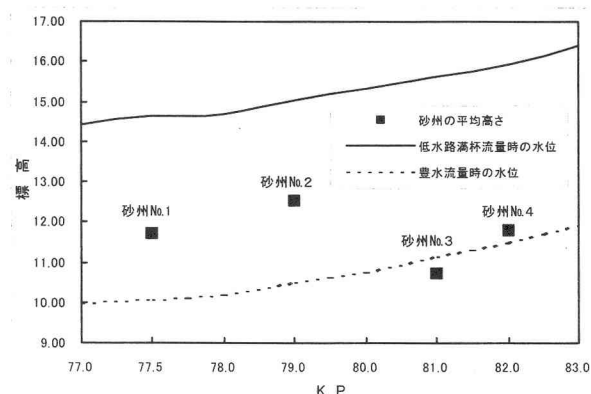
この図から、砂州の平均的な高さを 1990 年と 1999 年で



図－9 砂州の変遷図



図－10 1990年平均的な砂州の高さと河川水位



図－11 1999年平均的な砂州の高さと河川水位

比較すると、No.1, No.4 は若干高くなっているものの、4つの砂州は大きく変化していない。下流側No.1, No.2 の砂州は強固に発達し、豊水位を大きく超える様な出水でなければ砂州が冠水しない。また、砂州表面が植生で覆われてい

る。しかし、上流側No.3, No.4 の砂州では豊水位程度で冠水するため、年間の1/4 (95 日以上) 程度は冠水していることになる。冠水頻度が高く、図－9 で表れているように、移動はしないものの出水により形状が変化しているものと判断される。

上流側と下流側での砂州発達の程度の違いが、対岸への影響にも反映している。すなわち、No.1, No.2 の砂州では流れを対岸に蛇行させており、特に、No.1 砂州では、対岸側となる KP77.3 右岸側で 13 年間に約 50m 河岸浸食されているのが平面図や垂直写真から確認出来る。No.2 の砂州は、左岸側の低水路河岸が築堤に接近しているため護岸が施工されており左岸河岸の浸食は発生していない。一方、No.3, No.4 の砂州では水位が高いと冠水するため流れを極端に蛇行させることはなく、対岸への影響も少なく横断図等の資料からも河岸浸食の発生は確認されていない。

この様に、砂州発達の程度と河岸浸食の発生とは、強い関係にあると言える。

6. まとめ

偏倚流速と河岸浸食の関係を経年的に調べた結果、偏倚流速を用いることにより低水路河岸の浸食範囲はある程度推定できるが、中州が存在すると偏倚流速からの推定は難しく、その浸食の規模や箇所は想定し得ないものとなる。また、移動を停止している砂州は対岸へ及ぼす影響が大きく、河岸線の浸食形状によっては、流れの急激な偏向を生じる危険性を持つことが中州の例と同様に危惧される。これらの例から、厚く堆積した大規模な砂州や中州の存在は、大規模洪水を除く低水路満杯流量程度での河道維持にとってきわめて危険な状況をもたらすことが分かる。特に、積雪寒冷地においては、融雪時に低水路満杯流量程度の出水が比較的長期に亘って継続するため、注意が必要である。

河川管理を行う上で、河岸浸食の把握は定期的な横断測量等の実施が有効であることは言うまでもないが、大河川では横断測量の縦断間隔も広い図上に現れないことも生じる。このため、浸食箇所を把握するうえでは横断測量間隔を河道の形状によっては低水路幅程度とするのが望ましく、また、垂直写真の撮影を大規模洪水発生時等のみならず定期的に続け、経年的な河道形状の把握を行うことが河川管理やその後の対応で有効である。

参考文献

- 1) 財団法人 北海道河川防災研究センター：河道設計論 (案), pp. 196-198, 平成元年 3 月
- 2) 木下良作, : 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集第 345 号, II-1. pp. 1-19, 1984

(2002. 4. 15 受付)