

名取川に見られる河床形状特性とその変遷

RIVER BED CHARACTERISTICS AND THEIR CHANGE OF THE NATORI RIVER

谷川 麻子¹・泉 典洋²・田中 仁³

Asako TANIKAWA, Norihiro IZUMI and Hitoshi TANAKA

¹学生員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

²正会員 Ph.D. 東北大学大学院工学研究科

³正会員 工学博士 東北大学大学院工学研究科

In the alluvial reach of the Natori river, two distinctive morphological features can be seen. The reach from the upstream of Taihaku bridge to the confluence with the Hirose river is characterized by unstable, braided configuration while the reach downstream of the confluence is rather stable. This study provides a theoretical explanation for the distinctions between two reaches in a same river by the use of the theories of stable channel cross-section of straight gravel and sand-silt rivers, and the theory of bar formation. The differences of grain size and bed slope are found to cause such a contrast.

Key Words : braided river, stable channel cross-section, single alternate bar, multiple bar

1. はじめに

名取川は、名取川頭首工付近に位置する長町利府断層により、その上流では侵食傾向が卓越し河床に基盤岩の露出した穿入河川の特徴を有し、下流では流送土砂の堆積傾向が卓越した沖積河川の特徴を有している。またその沖積河川領域の中でも、広瀬川合流点付近までは網状流路の形態を呈し、活発な河床変動を繰り返しているのに対して、合流点より下流では単一河道の比較的安定な河道を維持している(図-1~4 参照)。

このような対照的な河床形態の成因を理解することは、合理的な河川改修を行う上で極めて重要である。本研究は名取川を例にとり、沖積河川に見られる特徴的な河床形態の成因を明らかにしようとするものである。網状流路は複列砂州が不安定化したものであり^{1),2)}、砂州の形態を決定するのは河道横断形状の川幅水深比であることが知られている。そこで、直線礫床河川^{3),4),5)}および直線砂床河川の安定横断形状^{6),7)}の理論に基づいて、上流側と下流側の間に生じた川幅水深比の違いについて考察し、河床形態の違いの原因となっている砂州の形態について砂州の形成理論²⁾を用いて考察する。

2. 名取川の河道形態特性

(1) 太白大橋付近の河床変動の様子

図-2 は、過去の地図に見られる太白大橋付近の河床変動の様子である。古い地図では正確な河道位置が不

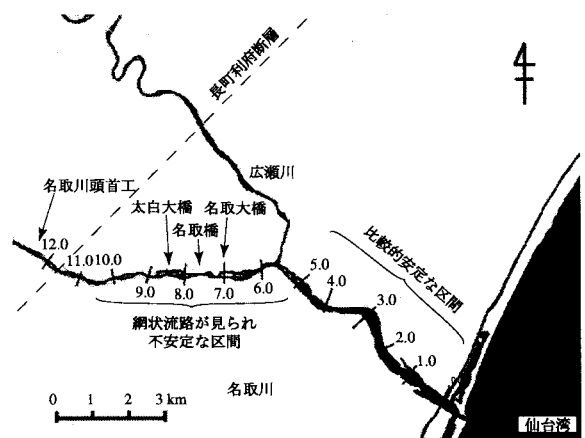


図-1 名取川の概要図。図中の数字は河口からの距離を表す。

明であるが、砂州の位置や流路形状が時代とともに変化していく様子がうかがわれる。

図-3(a)-(f) に1947年から1998年までの太白大橋付近における空中写真を示す。1947年から1961年頃までは中央の砂州が発達していった様子がみられる。1968年頃には河道中央での砂州の発達は止まり、広くて浅い流れになっている。その後は小さな砂州が次第に大きくなると同時に流路と砂州の境が明瞭になってきて、あまり変化が見られなくなる様子がわかる。太白大橋付近は依然として網状流路の形態を有しているものの、近年では河床変動も緩慢となり、比較的安定化してきていることがわかる。

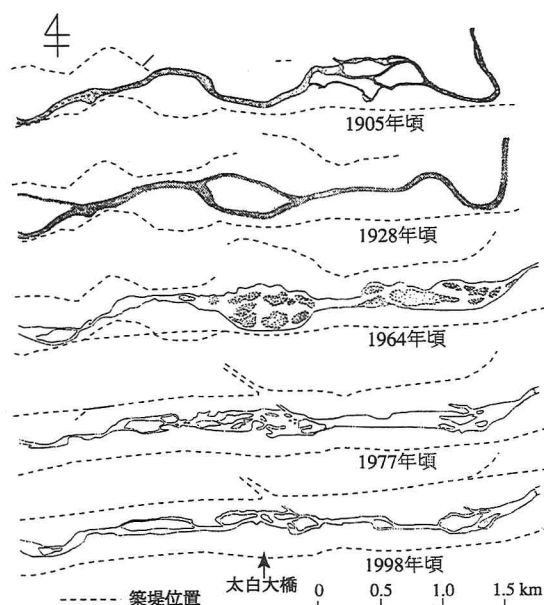


図-2 過去の地図に見る太白大橋付近の河床変動。日本地図センター発行の地形図より作成。

(2) 縦断形状と粒度分布に見られる不連続点

1996年の測量データから抽出した名取川の縦断形状を図-5に示す。この図は横断面図の最深部を河床高としたものである。広瀬川合流点付近を境に勾配が急激に変化しているのがわかる。平均すると、合流点より上流では0.002程度、下流では0.0003程度である。

河口より上流2 km, 4 km, 6 km, 7 km (名取大橋下), 8.5 km (太白大橋下), 10.5 kmの地点で河床材料を採取し粒度分析を行った。その結果得られた各地点における粒径加積曲線を図-6に示す。太白大橋付近の河床が10 mmから100 mmのかなり大きな粒径の礫で構成されているのに対して、合流点から下流では0.1 mmから0.5 mm程度の非常に細かい砂で構成されている。広瀬川合流点付近において、河床材料は礫から砂に急激に変化している様子がはっきりと見て取れる。このような不連続点は世界中の多くの河川で観測されており、同じ宮城県鳴瀬川や江合川にも同様の傾向が見られている。その成因については、土砂の分級作用によるものであることがほぼ明らかになっている^{8),9),10)}。

3. 安定横断河床形状の理論

(1) 理論の概要

まず直線礫床河川および直線砂床河川の安定横断形状の理論から川幅水深比を求め、太白大橋付近と広瀬川合流点より下流における横断面形状の違いについて考察する。

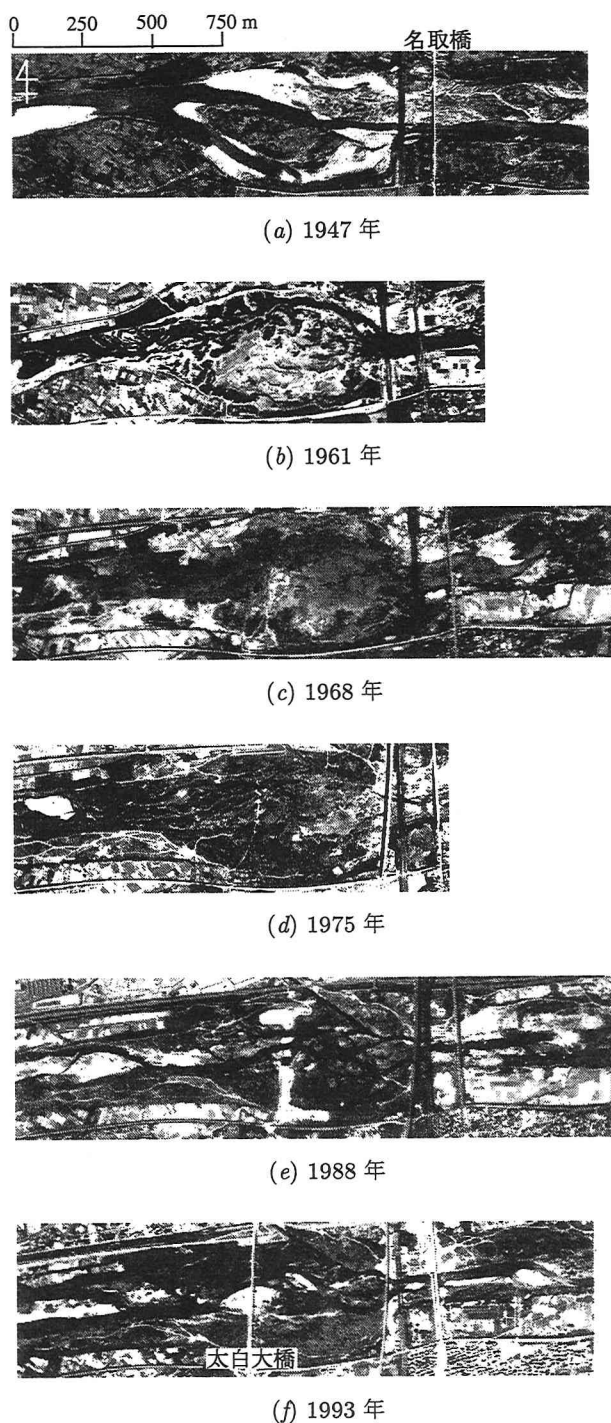


図-3 空中写真に見る太白大橋付近の河床変動。米軍および国土地理院撮影、日本地図センター発行の空中写真より転載。

直線礫床河川の安定横断形状の理論^{3),4),5)}によれば、礫床河川では側岸上の土砂が動くと側岸侵食が発生するので河床上の剪断力は限界剪断力より20%程度しか大きくなれず、水深は河床材料の粒径に比例し、勾配に反比例することがわかっている。つまり、河道の中央水深 D_c は次の式で表される。

$$D_c = 0.03 R_s D_s S^{-1} = 0.0495 D_s S^{-1} \quad (1)$$

ここで D_c は河道中央の水深、 S は河床勾配、 R_s は土

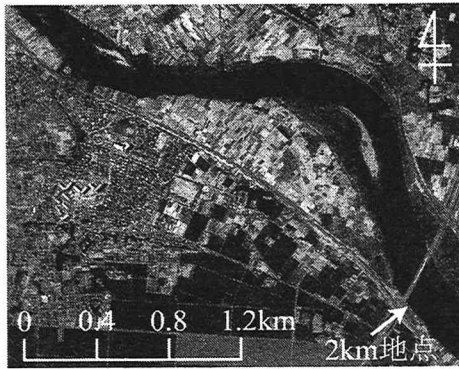


図-4 広瀬川合流点より下流の河道の様子

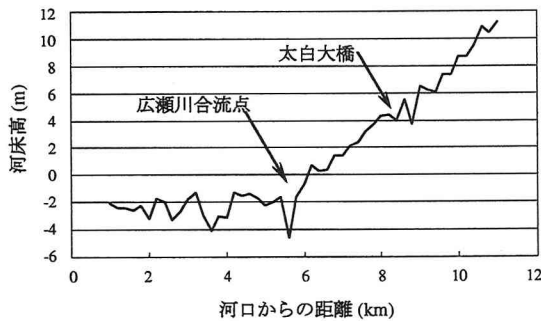


図-5 名取川の縦断形状

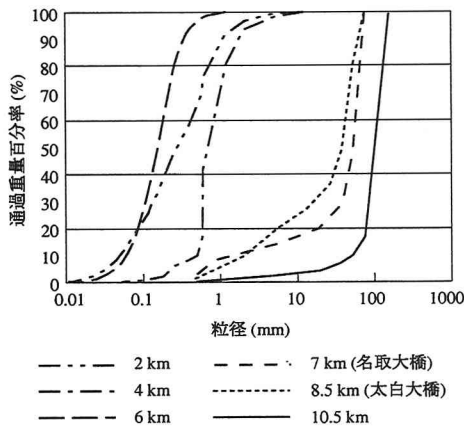


図-6 名取川各地点での粒径加積曲線

砂粒子の水中比重 ($= \rho_s / \rho - 1 = 1.65$), ρ_s および ρ はそれぞれ土砂粒子および水の密度, D_s は粒径である。

また直線砂床河川の安定横断形状の理論^{6),7)}から次のようなことがわかっている。浮遊砂を伴う砂床河川の場合、側岸侵食が起きても浮遊砂の拡散がそれを補うため、河床上の剪断力は限界剪断力を大きく上回ることができる。ただしその場合も水深は河床材料の粒径の関数になり、勾配に反比例する。この理論により、砂床河川における安定水深と河床勾配、河床材料の粒

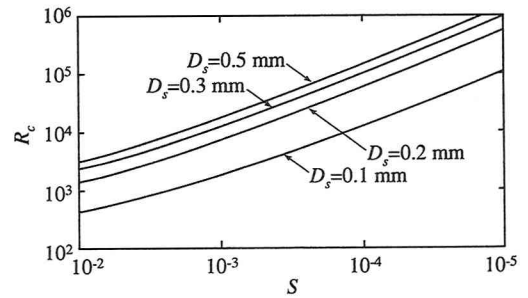


図-7 砂床河川の相対水深 $R_c (= D_c/D_s)$ の関係⁷⁾。

径の関係がわかっており、図-7 のようになる。図中の R_c は粒径に対する相対水深 ($= D_c/D_s$) である。

(2) 理論の適用

河口から 8.5 km と 2 km における水深と川幅を、上記理論を用いて見積もる。8.5 km の地点には直線礫床河川の安定横断河床形状の理論を適用し、2 km の地点には直線砂床河川の安定横断形状の理論を適用する。川幅と水深を求めるには、河床勾配、河床材料の粒径、流量が必要である。そこで、次のような値を用いる。

河床勾配は低水路の平均河床高さをプロットしたときの回帰直線の傾きとする。このとき、8.5 km の太白大橋付近で 0.002、河口から 2 km 地点で 0.0003 となる。

粒径は図-6 に示した粒度分布から求めた 50 % 粒径を用いる。2 km 地点では 0.2 mm、8.5 km 地点では 38 mm である。

河道横断面形状を決定する流量が、どの程度の規模の洪水であるかは難しい問題である。Kellerhals¹¹⁾ および Bray¹²⁾ は河道地形を決定する流量として確率年が 2 年の流量を用いている。彼らが対象としているのは自然河道であり、河川改修によって築堤の進んだ名取川に彼らの考え方が適用できるか不明であるが、概ね適用可能であると考え、名取橋地点および太白大橋地点（河口から 8.5 km）における流量として、当該地点における 2 年確率の洪水流量に相当する 1996 年の最大流量 $496 \text{ m}^3/\text{s}$ を用いる。また過去の流量データから名取川と広瀬川の流量の比を求め、その結果から合流後の流量 $782 \text{ m}^3/\text{s}$ を河口から 2 km 地点での流量とした。

河口から 8.5 km 地点については礫床河川とみなし、前述の勾配 0.002 と粒径 38 mm を用いて式 (1) から水深を求めると、0.94 m という値が導かれる。また河口から 2 km 地点については、前述の勾配 0.0003 と粒径 0.2 mm を用い、図-7 より 3.2 m と導かれる。

これら水深と勾配から、等流状態で成り立つ次式を用いて流速を求めることができる。

$$\rho g D S = \frac{\rho n^2 g U^2}{D^{1/3}} \quad (2)$$

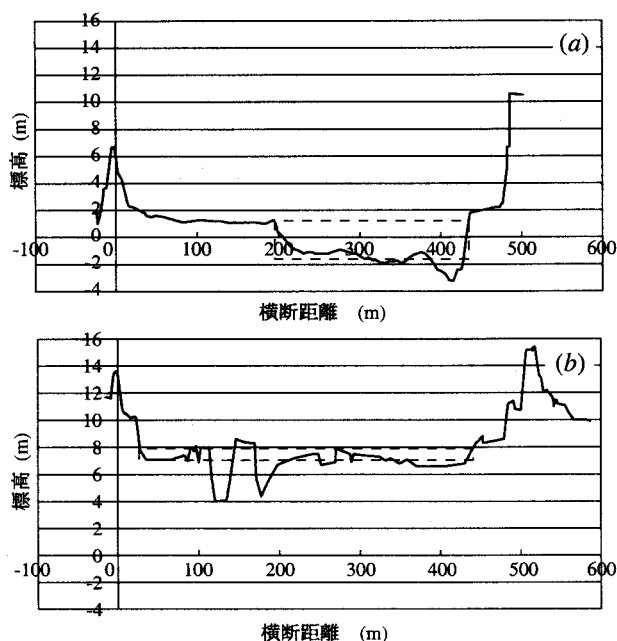


図-8 横断面形状。(a) 河口から 2 km 地点。(b) 河口から 8.5 km 地点。実線は実測された断面形状を、点線は理論との比較に際して仮定された広幅矩形断面形状を表す。

ここで、 U は断面平均流速、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数である。マンニングの粗度係数 n は直線自然河川では 0.03 程度であるといわれており、ここでもこの値を用いることとする。また、式 (2) の D は平均水深であるが、ここでは式 (1) で求めた中央水深で近似する。そのとき式 (2) より 8.5 km および 2 km 地点における平均流速がそれぞれ 1.43 m/s および 1.25 m/s と求められる。この流速と水深で、与えられた流量を流すために必要な川幅 B が次の式から求められる。

$$Q = UBD \quad (3)$$

ここで、 Q 全流量である。以上より川幅を求めると 8.5 km のところで 370 m、2 km のところで 200 m となる。

(3) 比較結果と考察

実際の横断面形状は図-8(a) と (b) の実線のようにになっているが、理論との比較に際して、図中点線のような広幅矩形断面とみなす。すると河口から 2 km 地点における川幅は 240 m、水深は 0.28 m となり、8.5 km 地点における川幅は 420 m、水深は 0.88 m となる。解析結果と実測値の比較を表-2 に示す。表-2 によると概ね良好な一致を示しているが、いずれも理論の方が、水深は若干大きく川幅は若干小さく見積もっている。これは中央水深を平均水深として算出していることが原因の一つと考えられる。また、特に河口から 8.5 km 地点における川幅が過小に見積もられているが、これは図-8(b) からわかるように、砂州の発達が顕著で

表-1 理論の適用に用いた水理諸量

河口からの 距離 (km)	流量 Q (m ³ /s)	粒径 D_s (mm)	勾配 S
2 km	782	0.2	0.0003
8.5 km	496	38	0.002

表-2 理論解析の結果

河口からの 距離 (km)		川幅 B (m)	水深 D (m)	川幅 水深比
2 km	実測値	240	2.8	86
	理論値	200	3.2	61
8.5 km	実測値	420	0.88	470
	理論値	370	0.94	390

あり、実測値として仮定した川幅 420 m という値が過大であった可能性が考えられる。

以上の結果から、太白大橋付近（河口から 8.5 km 付近）では広瀬川合流点より下流よりも川幅水深比が大きくなる傾向があるが、この原因は太白大橋付近と広瀬川合流点より下流における河床材料および河床勾配の大きな変化であることが明らかになった。すなわち太白大橋付近では礫床河道であり勾配が大きく、広瀬川合流点より下流では砂床河道であり勾配が小さい。これによって太白大橋付近では水深が浅く川幅が大きい河道が、広瀬川合流点より下流では水深が深く川幅が小さい河道が形成されている。また理論との比較結果から、河道断面形状を決定している流量がほぼ 2 年に 1 回生じる程度の洪水に相当していることが示唆された。

4. 砂州の形成理論

(1) 理論の概要

河床中の規則的な堆積と侵食によって形成される河床形態として単列交互砂州、複列砂州が知られている。これらは河床と流れの間の不安定性によって発生するもので、線形安定解析によってその発生機構が説明されている。また実験や実際の河川の観察から複列砂州は安定的に存在することが稀であり、不安定化によって複雑な幾何形状へと移行することが知られている。ここでは網状流路の成因を複列砂州の形成と仮定し、複列砂州の形成について砂州の発生理論を用いて理論的考察を試みる。

砂州の形成理論により、砂州のモード m を求めることができる。砂州のモードとは川幅方向に存在する砂州の数を表すパラメータである。 m は整数であり、 $m = 1$

表-3 砂州の形成理論の適用に用いた諸量

河口からの 距離 (km)	川幅水深 比 β	フルード数 F	勾配 S
2	86	0.22	0.0003
8.5	472	0.46	0.002

表-4 砂州形成理論による解析結果

河口からの距離 (km)	砂州のモード m	砂州形状
2	1	単列交互砂州
8.5	8	複列砂州

が交互砂州に対応し、 $m = 2$ 以上が複列砂州に対応する。線形安定解析により、任意のモード m ，流下方向の波数 $k (= 2\pi B/L$ ， L ：砂州の流下方向の長さ) を持つ砂州に対し、その発達速度 Ω を求めることができ、 Ω が最大となるような砂州が実際に現れる。 Ω は勾配、川幅水深比、砂州が形成される前の状態のフルード数などを与えると、 k および m の関数として求めることができる。

(2) 理論の適用

太白大橋付近と合流点より下流の河床形状の違いを考察するために、河口から 8.5 km と 2 km の地点において砂州の形成理論から m を求める。川幅、水深としては 3. で使用した実測値を用いて計算を行った。勾配、流量も 3. で用いた値を使用している。これより川幅水深比 β が求められる。

$$\beta = \frac{B}{D} \quad (4)$$

また断面平均流速 U が次式より求められる。

$$U = \frac{Q}{BD} \quad (5)$$

これよりフルード数 F が次のように求められる。

$$F = U/\sqrt{gD} \quad (6)$$

河口から 8.5 km および 2 km の二地点における β および S 、 F を用いると Ω は m と k の関数となる。それぞれ用いた β 、 S 、 F の値を表-3 に示す。

(3) 解析結果と考察

以上の値を用いて計算した結果を図-9 および 10 に示す。図-9 および 10 はそれぞれ河口から 2km および 8.5km 地点における実測値を用い、いくつかのモード

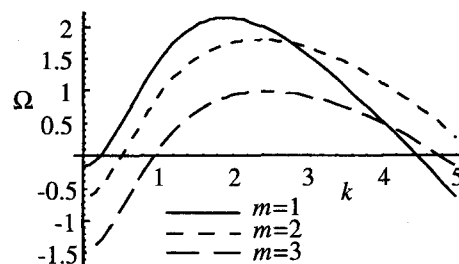


図-9 河口から 2 km 地点における砂州の安定解析結果。実測値のアスペクト比 86 を用いている。

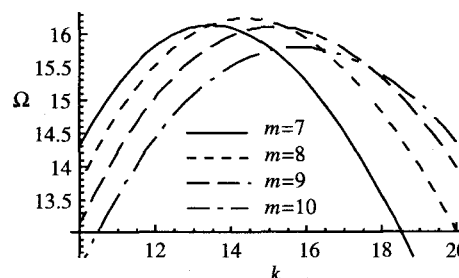


図-10 河口から 8.5 km 地点における砂州の安定解析結果。実測値のアスペクト比 472 を用いている。

m に対して Ω と k の関係を示した図である。図-9 より増幅率 Ω が最大となる m は 1 である。よってこの場合単列交互砂州が発生することがわかる。一方図-10 より増幅率 Ω が最大となる m は 8 である。よってこの場合は複列砂州が発生することが予想される。

ただし、この理論結果が実際の河床形状にそのまま当てはまるものではないことに注意する必要がある。下流には顕著な交互砂州は見られないし、太白大橋付近にもそれほど多くの砂州は見られない。このように理論結果から得られる砂州の形状が実際の河道に見られない原因としては次のようなことが考えられる。

広瀬川との合流点より下流では砂床河道であるため、洪水の減水時や平水時にも河床の変動が容易に生じ、交互砂州は容易に形状を変化させる。また潮位変動の影響を受ける領域でもあり、それによって理論と一致しないことも考えられる。さらに河川流が卓越する洪水時には本理論の結果が適用できるとしても潮位変動の影響が大きくなる平水時に河床形状が変化している可能性もある。いずれにしても単列交互砂州の発生レジームでは河床は比較的安定となることが知られており、名取川下流側の河道の安定性については本理論を用いて概ね説明できる。

一方、太白大橋付近については以下のように説明できる。複列砂州は通常安定的に存在できず、網状流路へ移行してしまうことが知られている。したがって太

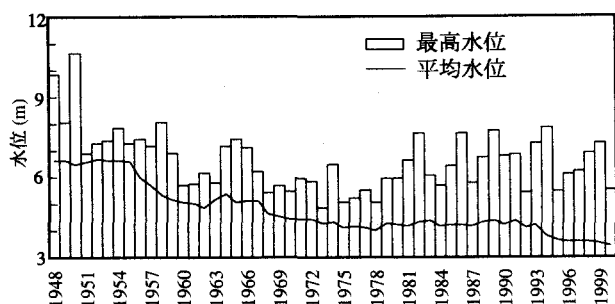


図-11 名取川太白大橋付近の流況変化。

白大橋付近でも網状流路へ移行した後の河床形態が現れているものと考えられる。

5. 流況の変化に伴う河道形態の変化

図-3によると、特に1975年ごろから河道内の植生が増加し、河道が安定化しているのがわかる。図-11に1948年から2000年までの名取川の名取橋における年平均水位と年間最大水位を示した。年間最大水位は1960年以降大きな変化がないが、平均水位は年を追うごとに減少しているのがわかる。少なくとも1969年以降においては、名取橋における川幅や河床高の変化がないことから、この原因として農業取水や1970年の釜房ダムの建設などが考えられる。それ以前の水位の減少が流量の減少によるものか、河床の低下によるものかは現在のところ明らかではない。

流量が減少しているとすると、次のように考えられる。流量の減少は、砂州をフラッシュする効果を減退させ、砂州上における植生の繁茂を助長する。つまり、流量の減少が植生の増加の原因となり、植生により河道が安定化したということになる。

一方、水位の低下が河床低下によるものであるとすれば、過剰な流砂量の減少が河道安定化の直接の原因であると考えられる。堆積きみの流路では砂州が不安定になり、逆の場合には安定化することが知られている。すなわち植生の増加は河道の安定化の結果として現れたものということになる。植生の増加、河道の安定化がどちらの理由によるものであるかは現在のところ不明であり、その詳細については今後の課題である。

6. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 太白大橋付近と広瀬川合流点より下流の川幅水深比の違いは合流点を境に河床勾配と河床材料の粒径が大きく変化していることに起因している。すなわち礫床で勾配が大きい太白大橋付近では川幅

水深比の大きい河道となり、砂床で勾配が小さい広瀬川合流点より下流では川幅水深比の小さい河道となることが明らかとなった。

- 名取川は太白大橋付近では網状流路、広瀬川合流点より下流では安定した河床形状を呈しているが、このような河床形態の違いは川幅水深比の違いによって生じた砂州のモードの違いによるものである。すなわち太白大橋付近では複列砂州が、広瀬川合流点より下流では単列交互砂州が形成されるレジームにある。太白大橋付近では複列砂州の不安定化によって網状流路が形成されるものと考えられる。

謝辞 本研究を行うに当たって、国土交通省東北地方整備局仙台工事事務所より研究費の助成およびデータの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Fujita, Y.: Bar and channel formation in braided streams, *River Meandering*, Ikeda, S. and Parker, G. eds., Water Resources Monograph, AGU, pp. 500-560, 1985.
- 2) 泉 典洋, Adichai Pornprommin: 振幅展開法を用いた砂州の弱非線形解析, 土木学会論文集, No. 712/II-60, 73-86, 2002.
- 3) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. The gravel river, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, Part 1, pp. 127-146, 1978.
- 4) 池田駿介, Gary Parker, 千代田将明, 木村善孝: 直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール, 土木学会論文集, No. 375/II-6, pp. 117-126, 1986.
- 5) 泉 典洋, 池田 駿介: 側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状, 土木学会論文集, No. 411/II-12, pp. 151-160, 1989.
- 6) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. The sand-silt river, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, Part 1, pp. 109-125, 1978.
- 7) 泉 典洋, 池田 駿介: 直線砂床河川の安定横断河床形状, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 57-69, 1991.
- 8) 山本晃一, 藤田光一, 赤堀安宏: 沖積河道縦断面形の形成機構に関する研究, 水工学論文集, 第37巻, pp. 681-686, 1992.
- 9) 清水康行: 沖積河川の縦断面形と河床材料分布形の形成について, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 69-78, 1995.
- 10) Parker, G. and Cui, Y.: The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers, Part 1: Simplified analytical solution, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, pp. 75-100, 1998.
- 11) Kellerhals, R.: Stable channels with gravel paved beds, *J. WW Div., ASCE*, Vol. 93, WW1, pp. 63-84, 1967.
- 12) Bray, D. I.: Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *J. Hydraulics Div., ASCE*, Vol. 105, HY9, pp. 1103-1122, 1979.

(2002. 9. 30受付)