

# 複断面蛇行河道における洪水流と河床変動

福岡捷二<sup>1</sup>・小俣篤<sup>2</sup>・加村大輔<sup>3</sup>・平生昭二<sup>4</sup>・岡田将治<sup>5</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 Ph. D. 広島大学教授 工学部第四類建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 建設省中部地方建設局 河川部河川情報管理官 (〒460-0001 名古屋市中区三の丸2-5-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 佐藤工業株式会社 土木本部 (〒103-0023 中央区日本橋本町 4-12-20)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京支社 (〒103-0012 中央区日本橋堀留町 1-7-7)

<sup>5</sup>学生員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 博士課程前期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

河道平面形と相対水深を種々変化させた複断面蛇行実験を行い、河床変動に及ぼすこれらの影響を明らかにしている。さらに、5河川における洪水流の実測データと航空写真撮影データの分析より、河道の蛇行度、洪水流の相対水深、最大流速の発生位置の関係を調べ、蛇行度が1.015より大きな河道では、相対水深が約0.3の値を境界として、それより大きな水深では最大流速が低水路内岸寄りに現れる複断面的蛇行流れが、それより小さな水深では外岸寄り現れる単断面的蛇行流れが現れることを明らかにした。また、江の川について洪水中に内岸側河床で起こっている河床変動、特に洗掘深、堆積深および最大洗掘深の大きさを調べ、実験水路で生じている河床変動と同様の現象が実河川でも生じていることを確認している。最後に複断面蛇行河道の合理的な設計を行う上での課題を挙げ、検討方法を示している。

**Key Words:** *compound meandering channel flow, simple meandering flow, sinuosity, relative depth, flood, hydrograph*

## 1. 序論

我が国では、堤防の安全性、河道の安定性、河川の利用性等から、河道の横断面形状は複断面形が望ましいとして計画が立てられてきている。これまで複断面河道に関する研究は、低水路、高水敷とも直線部からなる直線複断面流路や堤防法線と低水路法線が共に同位相で蛇行している流路を想定したものが主であった。しかしながら実河川では低水路と高水敷がそれぞれ異なる蛇行度を有して蛇行している場合がほとんどであり、また堤防法線と低水路法線との間には通常位相差が存在している。その結果、低水路と高水敷の間で規模の大きい流出が生じ、移流効果が卓越した流れとなる。この移流効果によって、複断面蛇行流れの水力現象が直線複断面流れや位相差のない弯曲流れの水力現象とは異なることが明らかにされつつある<sup>1)</sup>。

これまでに行われてきた複断面蛇行流れに関する主要な研究を以下に概観する。平坦固定床の複断面蛇行水路を用いた実験では、Kiely<sup>2)</sup>は、直線的な水路内に設置された一定の蛇行度を有する複断面蛇行水路において相対水深 $r$ (=高水敷水深/低水路全水深)を変化させた実験を行い、複断面流れの流況について調べている。Willettsら<sup>3)</sup>、Ervineら<sup>4)</sup>、Sellin<sup>5)</sup>は、円弧と直線の組み合わせにより構

成される蛇行水路を用いて、低水路の蛇行度と水位-流量の関係について明らかにしている。武藤・塩野ら<sup>6)</sup>は、蛇行度の異なる3種類の水路を用いて詳細に流速分布を測定し、主流速分布、二次流の発達過程、せん断層の発達過程等の流れ構造を検討している。福岡ら<sup>7)</sup>は、高水敷高さ/低水路幅が大きく、高水敷粗度を大きくした実河川に近いスケールで実験を行い、大スケールでの複断面蛇行流れの主流、二次流構造を明らかにしている。これらの研究から、複断面蛇行流れでは、低水路と高水敷の間で主に低水路の線形に応じた流れの出入りが存在するため、低水路の高水敷高さ付近で大きな水平せん断力が作用し、低水路内二次流の回転の向きが単断面蛇行流れと逆向きになること、最大流速線は内岸から内岸に連ねた最短距離で生じること等が明らかにされている。しかし、これらは平坦固定床蛇行水路を用いた研究であり、河床の変動に関する考察は行われていない。

複断面移動床蛇行水路を用いた実験では、木下<sup>8)</sup>は、堤防法線と低水路法線の位相差に着目して実験を行い、表面流速と河床変動から複断面蛇行河道の法線形の影響について調べている。芦田・江頭ら<sup>9)</sup>は、複断面蛇行流と単断面蛇行流の相違点に着目し、underbank flow, bankfull flow, overbank flowの3ケースについて流れと河床変動の特性を考察している。しかし、これらの流れと河床の構

表-1 水路諸元および実験条件(実験1)

水路長	27.5m
水路幅	4.8m
低水路幅	1.0m
高水敷高さ	0.06m
蛇行長	12.0m
蛇行度S	1.17
水路勾配	1/500
流量	68.8l/sec
相対水深	0.37
河床材料	平均粒径 0.8mm

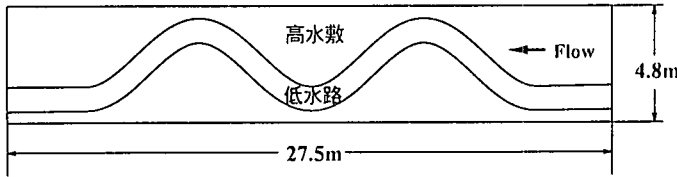
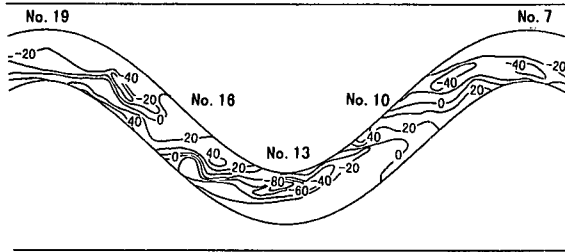
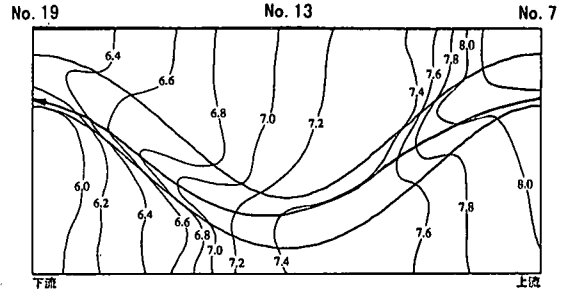


図-1 実験水路平面図(実験1)



単位(mm)

図-2 河床変動コンター



単位(cm)

図-3 水位コンター

造は、流路の平面形や水理条件によって異なり、特に高水敷水深、高水敷粗度、蛇行度、位相差等の諸条件の違いによる流れや河床への影響について十分な検討がなされなければならない。

本研究では、実河川の複断面蛇行流れにおいて、明らかにされていない次の3課題について検討している。(1)複断面蛇行水路の堤防と低水路の平面形と相対水深を変化させた実験を行い、これらの諸量が流れと河床変動に与える影響について明らかにする。(2)複断面蛇行を有する5河川について、河道平面形を表す指標として蛇行度、洪水特性を表すものとして相対水深と洪水継続時間を算定し、これらの指標を用いて複断面蛇行流れの洪水流特性である単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを分類する。(3)複断面蛇行河川である江の川において、洪水中に起こっている内岸側河床の洗掘深、堆積深および最大洗掘深を調べ、(1)の実験水路で起こっている水理現象と比較する。

最後に複断面蛇行河道の合理的な計画を立てるために残された主要な調査・研究課題とその解決方法についてまとめている。

## 2. 複断面蛇行流路における流れと河床変動<sup>1)</sup>

低水路が移動床の複断面蛇行水路を用いた実験によって、複断面の蛇行流路における流れと河床変動について考察する。水路平面図を図-1に、水路諸元及び実験条件を

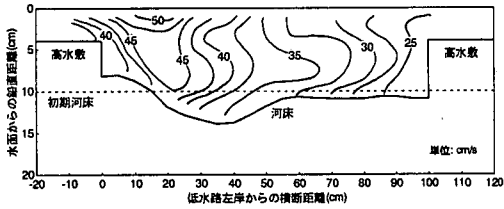
表-1に示す。(これを実験1とする。)実験に用いた水路は、直線的な堤防の間に蛇行低水路があり、高水敷には粗度付けのために人工芝を貼り付けている。河床がおおよそ安定する8時間まで通水を行った後、トルエンで薄めたセメダインで河床を固定し、電磁流速計を用いて詳細な流速分布の測定を行った。

### (1) 河床形状

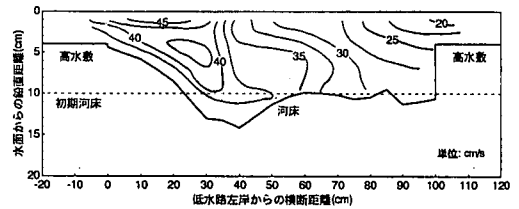
図-2に通水8時間後の河床変動コンターを示す。これを見ると、最大曲率断面(No. 7, No. 13)の内岸付近からその直下流の断面(No. 9, No. 15)まで、大きな洗掘が見られる。また、蛇行変曲点(No. 10, No. 16)から次の蛇行部内岸側の直上流(No. 18付近)まで堆積が生じている。場所によっては、高水敷にまで砂の乗り上げが見られた。一方、この蛇行度の水路では、蛇行部の外岸側で砂の移動はほとんど見られず、通水中初期河床のままに残っている。河床変動は低水路の内岸及び内岸から内岸に向かうラインに沿って顕著に現れている。

### (2) 水位分布

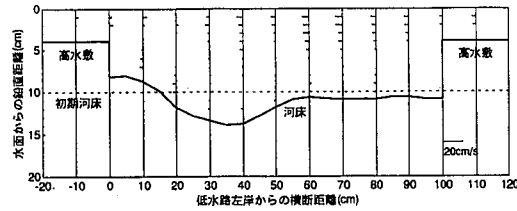
図-3に水位のコンターを示す。低水路内では最大曲率を持つ断面(No. 7, No. 13, No. 19)で外岸側の水位が内岸側の水位よりも高くなっている。図内の実線は低水路内の水深平均最大流速の発生位置を連ねた線を示しており、水位の低い位置とほぼ一致している。この線は、低水路内の最短経路を通るように蛇行流路の内岸から内岸に現れ、



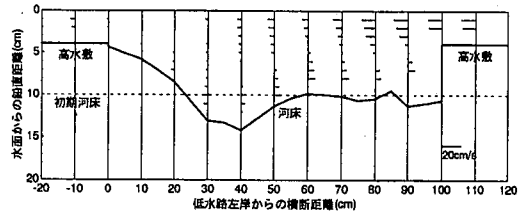
(a) No. 19の主流速分布



(b) No. 17の主流速分布

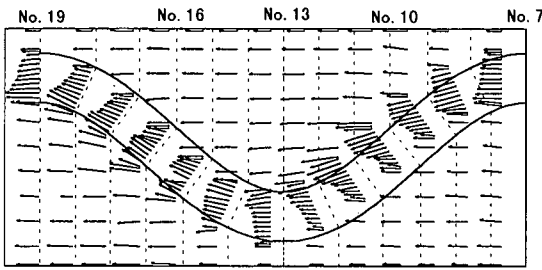


(c) No. 19の二次流分布

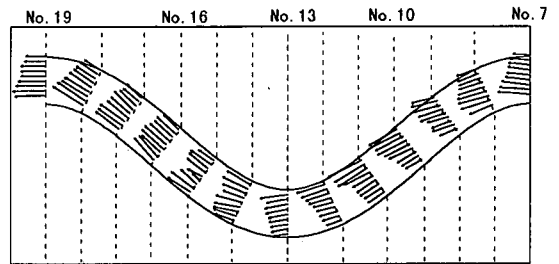


(d) No. 17の二次流分布

図-4 主流・二次流分布



(a) 高水敷高さより上層



(b) 高水敷高さより下層

図-5 高水敷高さを境界とした上・下層の平面流況

移動床においても固定床と同様な分布を示す。また、高水敷からの流入・流出が起こる蛇行変曲断面付近の水面勾配をみると、固定床実験<sup>9)</sup>に比べ流入部では緩く、流出部で急になっている。この原因は、河床高さの違いと関係づけられる。すなわち、堆積域にあたる流入部では、高水敷からの流れが漸拡となり固定床に比べ損失が小さい。一方、洗掘域にあたる流出部では、高水敷への流れが急拡となり損失が大きいためである。

### (3) 主流速分布と二次流速分布

複断面蛇行流路において、低水路内の流れ場は高水敷流れの流入によって大きく影響を受ける。これを示すものとして、図-4にそれぞれ最大曲率断面(No. 19)と蛇行変曲断面付近(No. 17)の主流・二次流速分布をあげる。(a)、(b)において、最大主流速は内岸側に発生している。主流速コンター線は高水敷の高さ付近で折れ曲がっており、河床付近を除くこの付近で最も流速が変化していることがわかる。図-4(c)、(d)の二次流の分布についても高水敷の高さで流れの向きが逆になったり、あるいはその下で0になっている。(c)、(d)の二次流の分布を詳細

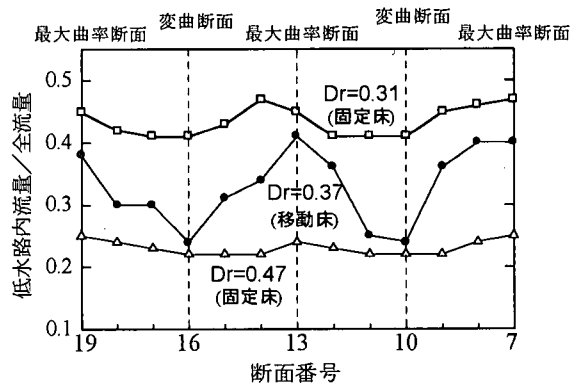


図-6 (低水路下層流量/全流量)の縦断変化

に見ると、最大曲率断面のNo. 19では外岸から内岸に向かう弱い二次流セルが見られる。No. 17では低水路右岸に高水敷からの流入があるが、高水敷高さより上では高水敷からの流入を示す強い流れのために逆向きの二次流セルが発達している。

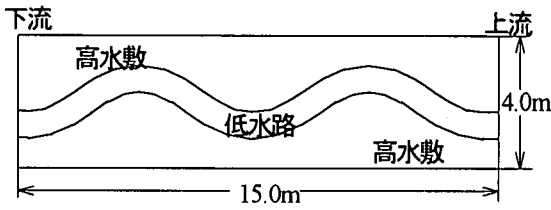


図-7 実験水路平面図(実験2)

(4) 各水深における平面流況の変化

高水敷高さを境界とした上層, 下層での平面流況を図-5に示す。ベクトルは, 上層, 下層における平均流速の分布を示す。まず, 高水敷高さより上層について見ると, 蛇行変曲断面付近(No. 10, No. 16)では, 低水路の内岸で流入, 外岸で流出を示す流れの構造が示されている。また, 高水敷上では低水路に向かう流れが生じている。高水敷高さより下層では, 高水敷上の流れの影響を若干うけるものの低水路に沿う流れが顕著になる。以上のことから, 低水路内で高水敷との間に流れの顕著な出入りがあるのは, 高水敷の高さよりも上層で, 下層では低水路に沿うような流れとなる。図-6は, 全流量に対する低水路下層流量の割合の縦断的な変化を本実験と平坦固定床実験<sup>9)</sup> ( $Dr=0.31, 0.47$ ) について示したものである。低水路下層流量の割合は, 固定床では全断面を通じてほぼ一定であるのに対し, 移動床では最大曲率断面で大きく, 変曲断面で小さくなる周期性を持つ。この周期的変動は, 各断面での低水路平均流速がほぼ等しいことから, 流水断面積の増減に起因している。

このように複断面蛇行流路では, 流速分布が横断方向および縦断方向にも変化する。特に最大流速線の縦断変化により, 洗掘による土砂の輸送およびその下流で堆積が生じ, 直線流路に比べて河床変動が大きくなる。この土砂の非平衡移動が複断面蛇行流れ特有の性質である。

3. 複断面蛇行流路の河床変動に影響を及ぼす

要因<sup>11), 12), 13)</sup>

(1) 低水路法線形

低水路の法線形および相対水深  $Dr$  (=高水敷水深/低水路全水深) が河床変動に与える影響を検討するため以下の実験的検討を行った (これを実験2とする。). 図-7に実験水路の平面図, 表-2に実験水路諸元を示す。水路長15.0m, 水路幅4.0mで, その中に幅0.8m, 蛇行度 $S=1.10$ の低水路がある。実験2の結果を実験1(蛇行度1.17)の結果と比較することにより, 低水路法線形の影響を検討する。

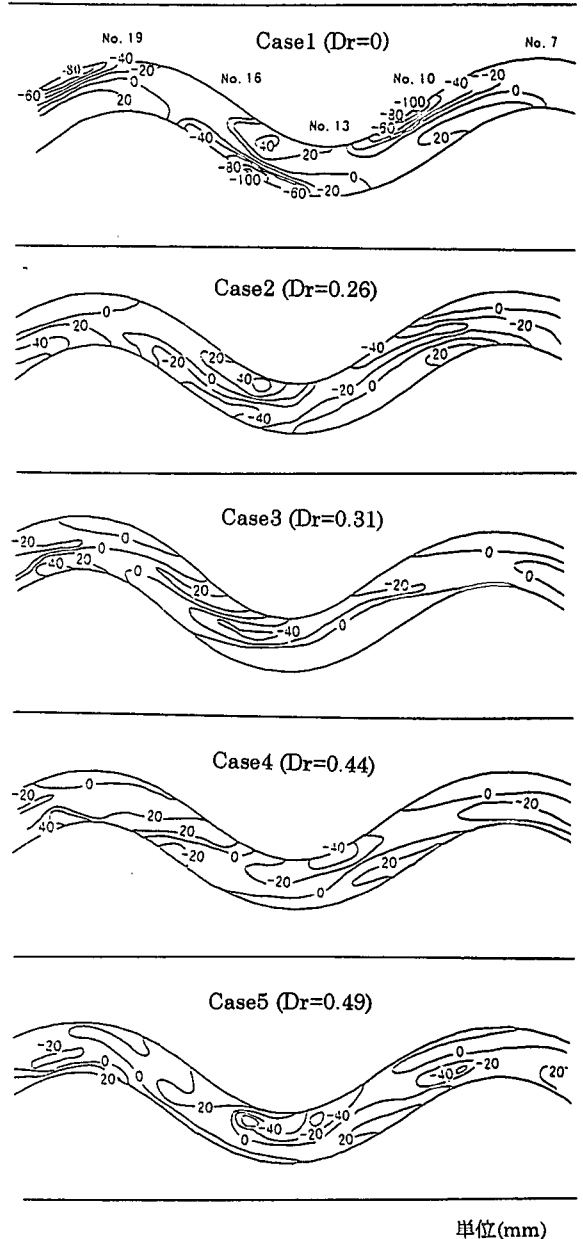
図-8に相対水深を変化させた実験2の河床変動コンターを示す。実験2のCase4は実験1<sup>11)</sup>と相対水深 $Dr$ がほぼ同値であることから, 河床変動に及ぼす蛇行度の影響につい

表-2 水路諸元(実験2)

水路長	15.0m
水路幅	4.0m
低水路幅	0.8m
水路勾配	1/600
蛇行長	7.5m
蛇行度S	1.10

表-3 実験2の水利条件

	流量 (1/sec)	相対水深 $Dr$
Case1	14.4	0
Case2	24.9	0.26
Case3	35.6	0.31
Case4	54.1	0.44
Case5	63.9	0.49



単位(mm)

図-8 実験2 河床変動コンター

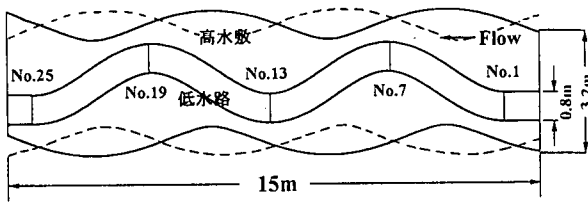


図-9 実験水路平面図(実験3,4)

表-4 実験3,4の水理条件

		流量 (l/sec)	相対水深 Dr
実験3 (堤防先行型)	Case6	19.0	0.23
	Case7	25.2	0.30
	Case8	40.3	0.40
実験4 (堤防後行型)	Case9	19.0	0.23
	Case10	25.2	0.30
	Case11	40.3	0.40

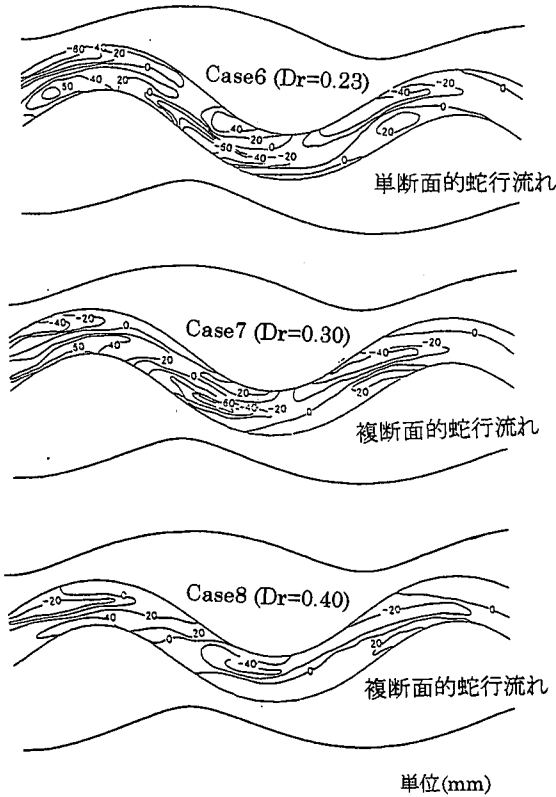


図-10 実験3 河床変動コンター

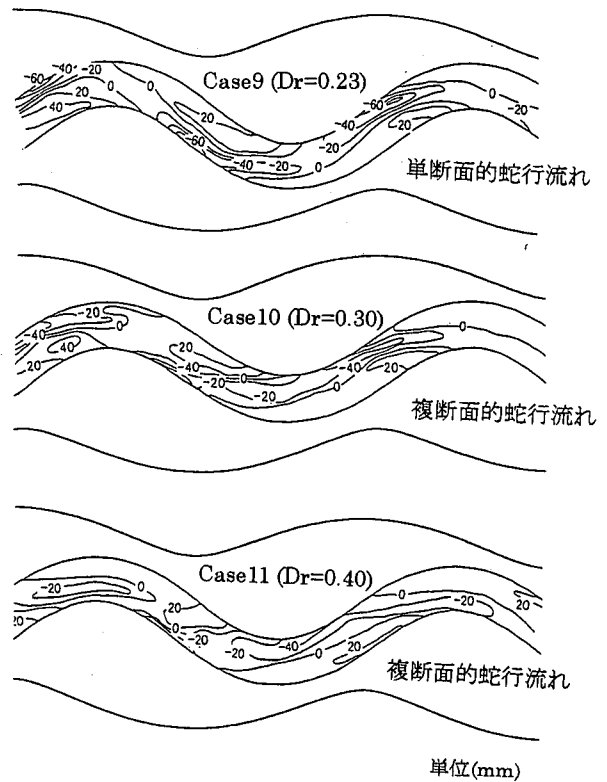


図-11 実験4 河床変動コンター

て両者を比較し検討する。洗掘箇所は実験1と同様に蛇行部の内岸と蛇行変曲点付近の水当たり部に発生し、その直下流で堆積が発生している。蛇行部内岸側の洗掘に大きな変化は見られないが、低水路の蛇行度が小さくなったことによって、低水路内の水当たり部が下流に移動し、それに伴い洗掘箇所も若干下流に移動している。

(2) 相対水深

複断面蛇行流れの河床変動に及ぼす相対水深の影響を実験2によって検討する。表-3にその条件を図-8に実験結果を示す。Case1は低水路満杯状態の単断面蛇行流れ、Case2~5は高水敷にも流れている複断面蛇行流れである。Case1 (Dr=0)は蛇行部外岸側に洗掘が発生する典型

的な単断面蛇行流れの河床形状である。Case2 (Dr=0.26)は、高水敷に冠水して流れる複断面蛇行流れである。洗掘深は小さくなるものの、今なおCase1に近い河床形状が現れている。これは相対水深が比較的小さい流れのために、高水敷からの流入による複断面効果よりも低水路内の流れの遠心力に起因する二次流が卓越し、外岸側に深掘れを生じる単断面的蛇行流れとなっている。一方、それよりも相対水深が大きくなるCase3, 4, 5では、内岸側河床が洗掘される複断面的蛇行流れの構造となる。したがって、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを洗掘位置に着目した河床形状特性から区分すれば、両者を区分する相対水深Drは0.30程度である。また、複断面的蛇行流れの最大洗掘深は、低水路満杯流量程度のときに発生する。最大洗掘

深の大きさは相対水深の増加と共に減少し、低水路満杯流量のときの4～6割程度となる。このことは河岸侵食およびその対策を考える際に、複断面蛇行流路では低水路満杯流量程度の水量を外力として設計することが重要であることを示している。

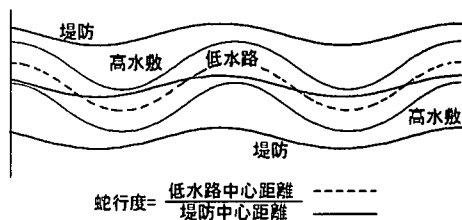


図-12 蛇行度の定義

(3) 堤防蛇行と低水路蛇行の位相差

3. (1), (2) では、堤防が直線的でその中を低水路が蛇行する複断面流れについて低水路線形と相対水深の影響を考察した。ここでは実験2と同じ低水路線形で、堤防が低水路に対して1/4波長先行する場合(実験3), と1/4波長後行する場合(実験4)の河床変動を調べ、両者の位相差の影響を検討する。図-9に水路の平面図、表-4に水理条件、図-10、図-11は実験3, 実験4の相対水深がDr=0. 23, 0. 30, 0. 40の場合の河床変動コンターを示す。直線堤防(実験2), 実験3, 実験4の相対水深がほぼ同一の場合についての河床形状を比較すると、3つの実験ともほぼ同様の河床形状を示している。単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを区分する相対水深も位相差によって多少変化するものの、ほぼDr=0. 28~0. 30となっている。このことから大局的にみると、十分広い高水敷を持つ複断面蛇行河川では、洪水流の流下形態、低水路の河床形状に及ぼす堤防と低水路の位相差の影響は、低水路線形および相対水深の影響に比して小さいと考えてよい。

表-5 河川の蛇行度

河川	区間	蛇行度
利根川	132. 0k~125. 0k	1. 034
	124. 0k~116. 0k	1. 010
	108. 5k~100. 5k	1. 018
	98. 0k~91. 5k	1. 023
	95. 0k~89. 5k	1. 022
	92. 5k~86. 5k	1. 021
	85. 0k~75. 0k	1. 011
	80. 0k~69. 0k	1. 035
	69. 0k~62. 0k	1. 060
	66. 0k~58. 5k	1. 023
	62. 0k~53. 0k	1. 002
	47. 5k~38. 5k	1. 012
43. 0k~33. 5k	1. 010	
石狩川	84. 0k~76. 0k	1. 013
	75. 5k~72. 0k	1. 043
	70. 5k~64. 5k	1. 075
	64. 5k~56. 5k	1. 036
	60. 5k~53. 5k	1. 020
	57. 0k~50. 0k	1. 023
	50. 0k~38. 0k	1. 003
	34. 0k~29. 0k	1. 077
27. 0k~20. 0k	1. 028	
多摩川	52. 6k~50. 0k	1. 012
	42. 0k~38. 0k	1. 002
	38. 0k~34. 0k	1. 005
	31. 6k~29. 0k	1. 006
	29. 4k~26. 2k	1. 018
	25. 0k~22. 0k	1. 027
22. 0k~18. 0k	1. 018	
江の川	29. 8k~27. 0k	1. 072
	28. 7k~26. 0k	1. 093
	27. 2k~24. 0k	1. 073
	26. 0k~23. 0k	1. 030
	23. 8k~20. 6k	1. 029
阿賀野川	22. 2k~18. 4k	1. 052
	20. 4k~16. 2k	1. 087
	18. 0k~14. 2k	1. 025
	16. 2k~11. 0k	1. 016

4. 複断面蛇行河川の洪水流の特性<sup>14)</sup>

前章では、複断面蛇行流路において相対水深の違いによって生じる単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを実験的に検討した。実河川ではどのような条件でこれら2つの流れが現れるのか、検討する必要がある。本章では、河川の洪水流と河床変動の関係を明らかにする目的で実測データに基づいた検討を行う<sup>14)</sup>。用いたデータは、洪水時の航空写真より求められた表面流速分布、各観測所で観測された水位時間曲線、洪水前後の河床横断測量結果である。(1)河道平面形と洪水流の特性を表す指標、まず河道の平面形と洪水流の特性を示す指標を選び、数値化する。実験水路では蛇行度を直線流下距離に対する蛇行波長の比で表した<sup>9)</sup>。堤防も蛇行する河川においては、この蛇行度の定義では堤防蛇行の影響を適切に表現できない。そこで、蛇行度を図-12に示す様に堤防中心距離に対する低水路中心距離の比として定義する<sup>14)</sup>。堤防が蛇行していれば、それだけ堤防中心距離は長くなり蛇行度は小さく計算される。河道の平面図を調べると、高水敷と低水路は、ほぼ同位相であり、位相差があっても小さいことから、図-12に示される蛇行度により実河川の複断面蛇行流れの平面形を考慮できるものと考えられる。また河川では、高水敷高さは両岸で異なる場合が多い。相対水深の算定

には低水路内の断面平均水深と両高水敷高さの平均値を用いる。洪水継続時間は河道の複断面形の影響が現れる高水敷に冠水している時間とし、水位時間曲線と河道の横断形状から算出する。

(1) 蛇行度, 相対水深, 洪水継続時間

蛇行度は利根川, 石狩川, 多摩川, 江の川, 阿賀野川の5河川について算定した。表-5に示すように利根川, 石狩川, 多摩川, 阿賀野川では蛇行度 $S=1.000\sim 1.050$ の範囲に集中しており, 河川の中, 下流部の蛇行度の値は, 概ねこの程度であると言える。峡谷を流れ, 高水敷というよりも河岸段丘と低水路からなる河道形状を示す江の川では, 河道が大きく蛇行している。この区間の蛇行度は $1.072\sim 1.093$ と大きな値を示している。表-6に利根川, 石狩川, 江戸川, 小貝川, 江の川, 阿賀野川を対象に高水敷(江の川は河岸段丘)に冠水している継続時間と洪水ピーク時の相対水深の算定結果を示す。対象洪水は, 各河川において戦後最大級の大洪水である。利根川の $181.5k\sim 40.1k$ の間では, 洪水継続時間は $47\sim 64$ 時間, つまり2~3日程度でほぼ一定している。洪水ピーク時の相対水深は, 上流で大きく下流になるにつれて小さくなる。佐原(40.1k)より下流ではほとんど低水路満杯に近い状態で流下している。石狩川では下流にいくに従って洪水継続時間が長くなる傾向にある。江戸川, 小貝川, 江の川では, 利根川や石狩川に比較して低水路の断面が小さいため, 洪水継続時間が長い。特に江の川の下流(谷住郷, 14.8k)では, 5日間以上河岸段丘が冠水した状態が続いている。

(2) 複断面蛇行河道に現れる単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れ—相対水深, 蛇行度, 最大流速発生位置による洪水流の分類

複断面蛇行流路では, そこを流れる洪水の相対水深によって, 単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの状態が存在することを3章で明らかにした。ここではさらに河道平面形を表す蛇行度も考慮に入れて洪水流の特性について検討する。実験水路では, 定常的に通水を行い, 河床が概ね形成された状態の洗掘状況から, 洗掘が外岸寄りに生じている場合を単断面的蛇行流れ, 内岸寄りに生じている場合を複断面的蛇行流れに分類した。しかし, 実河川ではこのような分類法をとることはできないので, 単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを以下のように定義する。図-13に示すように, 低水路の蛇行頂部で低水路幅(b)に対する内岸河岸から最大流速発生位置までの距離(y)の比 $y/b$ を指標とする。 $y/b \geq 0.5$ となる場合には最大流速は外岸寄りに現れると判断し, 単断面的蛇行流れ,  $y/b < 0.5$ となる場合には最大流速は内岸寄りに現れると考え, 複断面的蛇行流れとする。表面流速ベクトルの解析結果から $y/b$ と蛇行度 $S$ , 相対水深 $D_r$ の関係を示したものが

表-6 洪水継続時間とピーク時の相対水深

河川	水位観測所	洪水継続時間	相対水深
利根川 S56.8	八斗島(181.5k)	57時間	0.33
	川俣(150.0k)	47時間	0.53
	栗橋(130.5)	64時間	0.56
	芽吹橋(104.0k)	59時間	0.42
	取手(85.3k)	59時間	0.41
	須賀(61.5k)	61時間	0.42
	佐原(40.1k)	60時間	0.16
石狩川 S56.8	橋本町(93.9k)	17時間	0.13
	奈井江(76.8k)	67時間	0.46
	月形(58.0k)	37時間	0.20
	岩見沢(44.5k)	75時間	0.39
	石狩(26.6k)	88時間	0.58
江戸川 S56.8	西関宿(58.0k)	56時間	0.70
	野田(39.0k)	80時間	0.58
	松戸(19.5k)	100時間	0.48
小貝川 S61.8	黒子(53.0k)	90時間	0.60
江の川 S58.7	川本(36.3k)	100時間	0.60
	谷住郷(14.8k)	120時間	0.76
阿賀野川 S53.6	横越(13.5k)	52時間	0.19
	満願寺(17.1k)	66時間	0.26

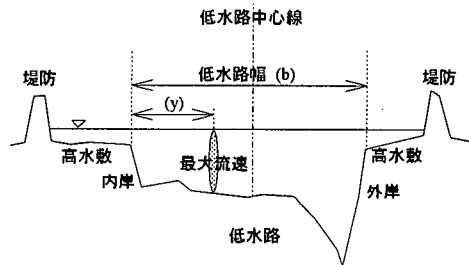


図-13 河川の最大流速発生位置  $y/b$ の定義

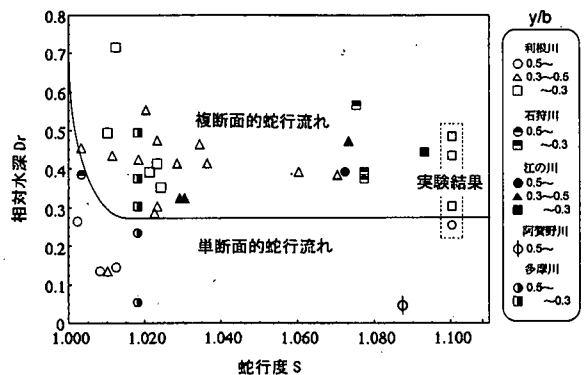


図-14  $y/b$ と蛇行度, 相対水深の関係

が図-14である。この図より $y/b \geq 0.5$ , すなわち単断面的蛇行流れ(図中○シリーズ)は, 図中の左下に集中していることが分かる。実験結果も併せて図中にプロットすると, 蛇行度が $1.015$ より大きい場合, 現地河川, 実験結果と

も相対水深が0.28~0.30程度で単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れは区分される。一方、蛇行度が1.015より小さくなると、直線流路に近い特性が現れてくる。入手し得るデータを用いる限り、相対水深の大きい範囲まで流れは単断面的蛇行流れとなるようである。以上より、これらを用いて単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの2つの流れを実線で概ね区分することができる。さらに複断面的蛇行流れの程度、すなわち $y/b < 0.5$ のグループ(図中△と□のシリーズ)の現れ方について見る。利根川では両者の区分が必ずしも明確ではないが、石狩川では蛇行度が大きくなるに伴い、最大流速が内岸に寄る流れとなることを示している。しかし、江の川については明確な特性を見いだすことができない。江の川のこの区間では、低水路河岸沿いに水防林が多く見られ、これらが洪水流に影響を及ぼすためであると考えられる。以上のことより、複断面蛇行河川では蛇行度と相対水深を知ることによって、対象とする洪水流が単断面蛇行流れの特性を持つか、複断面的蛇行流れの特性を持つか知ることができる。図-14の中に実河川のデータをさらに充実させていくことが重要である。これより河岸被災の発生箇所、すなわち内岸または外岸のどの位置で河岸被災が起こるかといった推定や河道の堤防、低水路の平面計画や護岸計画に有益な情報を与えることになる<sup>1)</sup>。

## 5. 複断面蛇行河道における洪水期間中の内岸寄り河床の最大洗掘深と変動高<sup>15)</sup>

洪水前後の河床変動は河川の横断形状から知ることができるが、私たちが最も知りたい洪水時の河床変動高については確かな知識を有していないのが実状である。さらにこれまで複断面蛇行河道では、外岸側の河床が洗掘されやすく、内岸側は河床洗掘や河岸侵食の面から安全と考えられ、構造物の設置や多自然型川づくり上のポイントとされてきた。しかしながら前章までに述べたことから、洪水時に相対水深が増大し、複断面的蛇行流れになれば内岸寄りに最大流速が発生し、継続時間によっては内岸側に洗掘が生じることが明らかになった。そのため洪水時の内岸側河床の局所洗掘深についても十分把握しておくことが必要である。そこで、洪水時に内岸側の河床がどのような変動高を示すかを明らかにするために、平常時には露出している蛇行内岸側の砂州上にボーリング孔を設け洗掘深さを調べることにした。すなわち、ボーリング掘削した土層ごとに着色した砂を埋め戻す。そして、洪水後にボーリング孔を掘り返して洪水中に流された色砂の深さを調べることによって、洪水時の内岸側河床の最大洗掘深と洪水減水時の土砂堆積深、および洪水期間中の河床変動高さを調べる。この調査は、全国の河川で行われているが、ここでは江の川の調査結果について

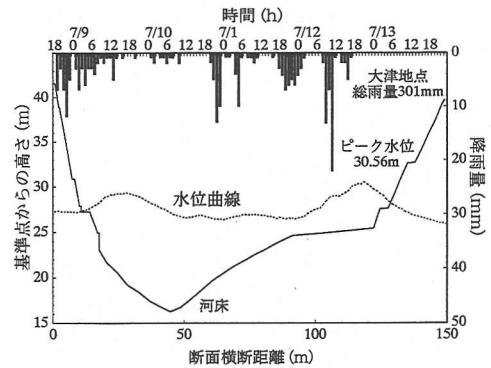


図-15 川本地点の河床横断形状と水位曲線および大津地点における降雨量

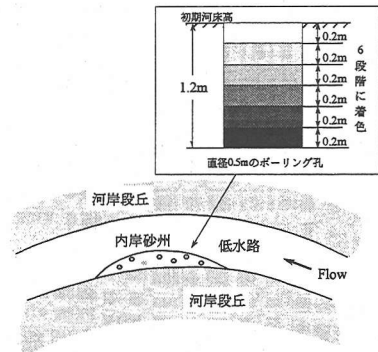


図-16 ボーリング孔と着色した層および調査地点述べる。

### (1) 対象洪水

平成9年7月8日~13日の梅雨前線による洪水を対象とした。図-15に水位観測所のある川本地点における河床横断断面形状と洪水ハイドログラフ、および大津地点(86.5km)での降雨量を示す。この時の総雨量は、大津地点で301mm、ピーク流量は川本地点で3600m<sup>3</sup>/secであった。水位変化は二山型で、河岸段丘上を5日間以上流れており、ピーク時の相対水深は0.40であった。

### (2) 調査方法

図-16に示すような江の川の3地点の内岸砂州上に直径0.5m、深さ1.5m程度の6本の円形ボーリング孔を掘削する。各深さの位置にあった掘削土を0.2mごとに1.2mまで6段階に着色した後、埋め戻し初期河床高を測量する。洪水後着色した土層がどの深さまで洗掘され、移動したか、また堆積し、埋め戻されたかをボーリング孔ごとに調べる。これにより、洪水時の最大洗掘深、堆積深、洪水前後の河床変動量の分布を知ることができる。調査箇所は、弯曲部で高水敷幅が広く河道の蛇行度が1.02よりも大きく、低水路と堤防に位相差があり、平水時に内岸砂州が露出している区間を選定する。



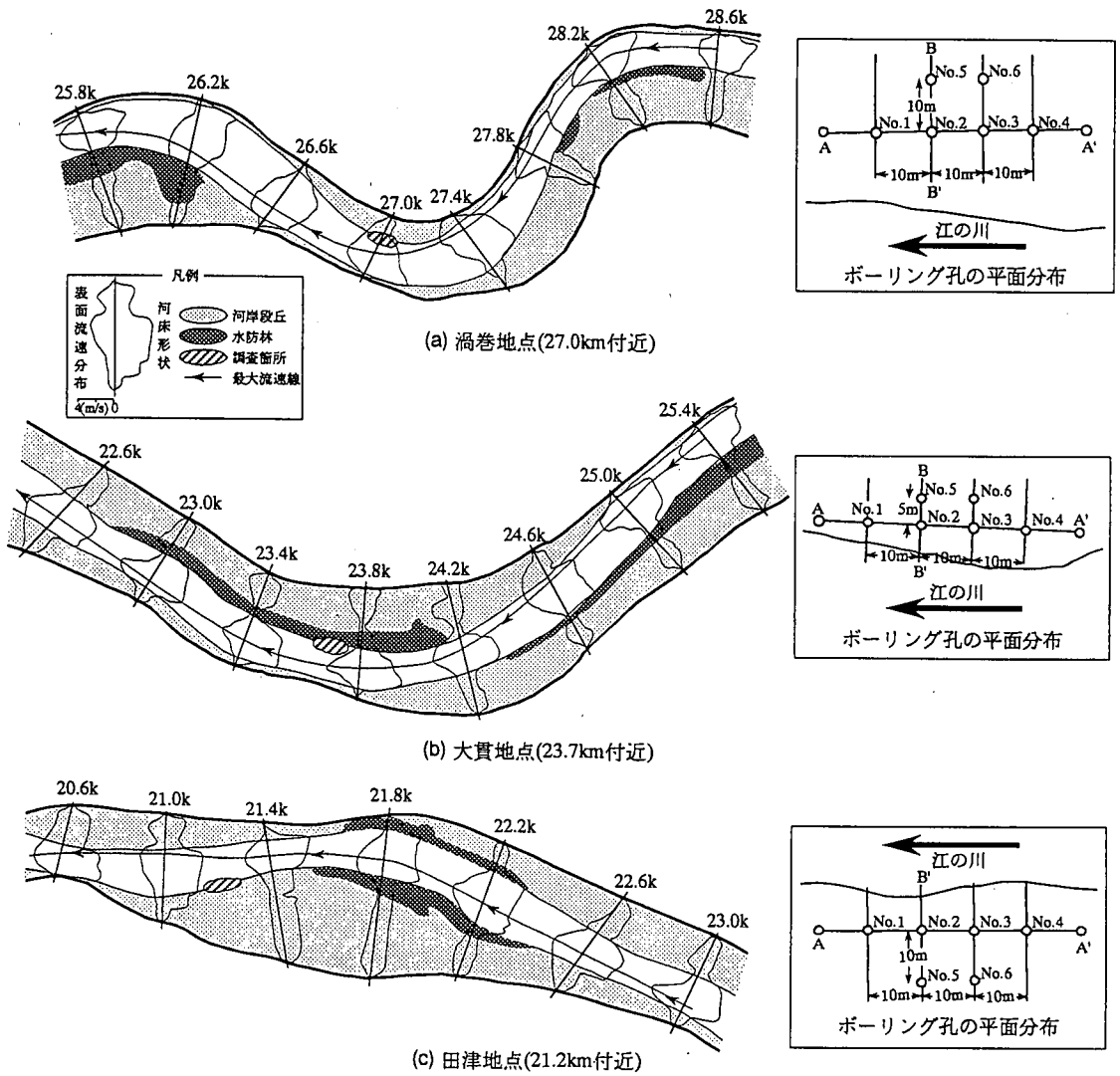


図-17 江の川の平面形と昭和58年7月洪水時の表面流速分布, 河床形状  
および調査地点におけるボーリング孔の平面分布

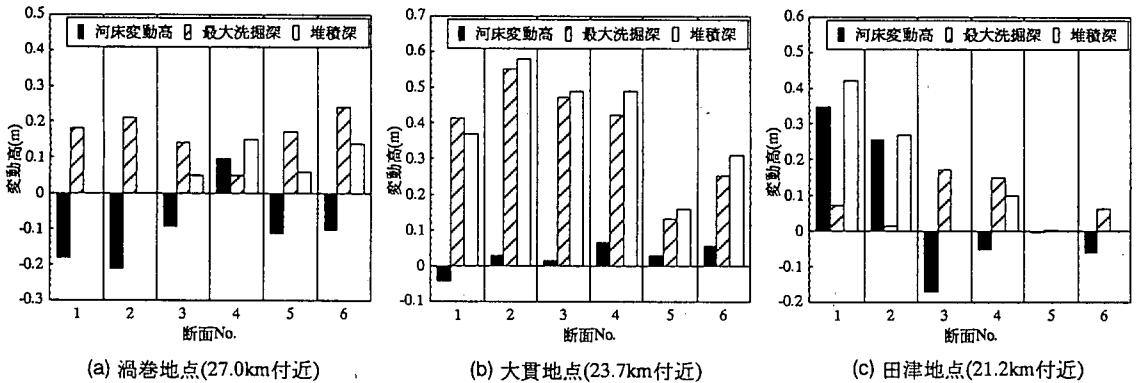


図-18 各調査地点の測定結果

### (3) 調査区間

洗掘深調査を行った区間(20km~30km)は、両岸に河岸段丘が発達している河道である。調査地点は渦巻(27.0km付近)、大貫(23.7km付近)、田津(21.2km付近)の3箇所であり、それぞれの調査区間を含む河道平面形と孔の平面的な位置関係を図-17に示す。

これらの区間の蛇行度は、それぞれ1.093、1.030、1.029である。河床構成材料は、渦巻地点が砂、大貫、田津地点が礫である。

### (4) 調査結果

#### a) 渦巻地点(27.0km地点)(図-18(a))

この地点は、調査区間の中で蛇行度が最も大きい地点(S=1.093)である。調査位置も最大曲率断面付近下流の内岸に位置している。調査結果より洪水時の最大洗掘深は、No.4を除くすべてのボーリング孔で0.2m程度を記録した。このことは、少なくとも洪水ピーク時(相対水深Dr=0.40)には蛇行部内岸寄りに最大流速が発生する複断面的蛇行流れが現れていたことを示している。

#### b) 大貫地点(23.7km地点)(図-18(b))

洪水中の最大洗掘深は、No.1~4のボーリング孔で0.4m以上となっているにもかかわらず、洪水の前後で内岸河床高はほとんど変動していない。これは、洪水のピーク時付近では、複断面的蛇行流れとなり内岸側の洗掘が生じたものの、減水期に現れるbankfull流れの時間帯に外岸側河床の洗掘、内岸側河床の堆積が起り、洪水前の河床高近くまで復したものと考えられる。このように本調査では、従来行われてきた洪水前後の横断測量では明らかにされていなかった内岸の河床変動高を測定することができた。また、この地点は、渦巻地点と蛇行度に違いはあるものの、ほぼ同様な平面的位置関係にある。しかし、最大洗掘深、堆積深に差が生じている。この原因としては、内岸側に繁茂する水防林が影響を及ぼしたものと考えられ、他の河川の結果と比較を要する。

#### c) 田津地点(21.2km地点)(図-18(c))

田津地点は、平面的な位置が他の2地点とは異なり、変曲断面付近の内岸に位置している。この地点は、他の2地点と比べ洪水時の洗掘深が小さい。先の実験結果からも変曲点付近の内岸側河床は、複断面的蛇行流れ、単断面的蛇行流れ、単断面流れを問わず殆ど変動せずに、むしろ堆積を生じる箇所にあたる。

以上より、江の川においても実験結果と同様に相対水深が大きく、洪水継続時間が長い場合には蛇行の最大曲率断面付近で内岸側河床に洗掘が生じ、変曲断面付近はほとんど変動しない結果が得られた。

これらの調査地点は、平常時には露出している蛇行部内岸砂州上に位置しており、洪水後の河床状態は次の出水まで残っている。そのため洪水後に各調査地点付近の

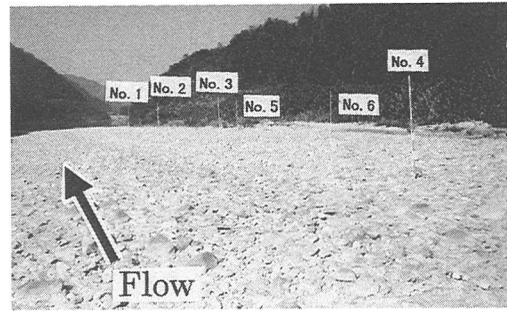


写真-1 大貫地点における洪水後の河床状況

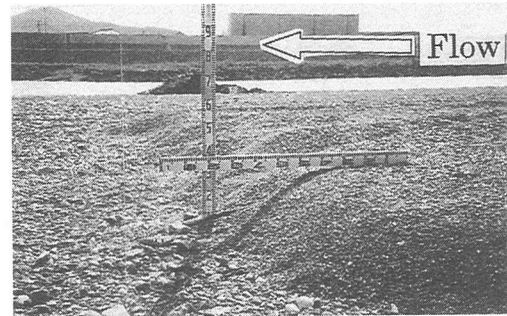


写真-2 仁淀川における洪水後の河床状況  
(最大波高30cmの砂礫堆)

現地踏査を行うことにより、土砂の堆積状況、粒径分布等を調べることができる。

大貫地点における洪水後の河床の状況を写真-1に示す。大貫地点においては河床波、砂礫堆等は見られず、他の渦巻、田津地点においても河床波の形成は認められなかった。砂礫堆が確認された仁淀川の状況<sup>10)</sup>を写真-2に示す。この場合の砂礫堆の最大波高は、洪水時の河床高の変動幅約70cmに対して、30cm程度であった。以上のことから、図-18に示した江の川の調査結果には、河床波等による河床変動の影響は小さいと考えられる。

## 6. 複断面蛇行河道設計法の課題<sup>1)</sup>

複断面蛇行河道の計画、特に低水路計画を新しい知見を入れてより合理的なものとするために必要な調査・研究課題を以下に挙げ、考えられる検討方法を示す。

### (1) 洪水の流下形態に及ぼす洪水ハイドログラフと河道の平面形の影響把握

洪水航空写真を用いた流速ベクトルの解析結果、洪水ハイドログラフ(相対水深、継続時間)と河道の蛇行度から複断面蛇行河道における洪水流を図-14に示す複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れに分類した。さらに多くの河川で同様な検討を行い、より多くのデータをプロットすることによって、図-14の精度を高める必要がある。

さらに同一洪水について、同一河川の同一区間において異なる相対水深の航空写真を撮影し、流速ベクトルの解析を行うことにより、相対水深に対する最大流速の発生位置の変化を調べ、洪水流下過程の変化を明らかにする。

## (2) 洪水ハイドログラフの河道計画への反映

河道計画に洪水ハイドログラフを考慮することは、ダム、遊水地、合流部や河口部等の計画以外はまずないといっている。しかし、複断面蛇行河道において洪水ハイドログラフは流れと河床変動を決定する重要な要素であることから、洪水ハイドログラフを適切に計画に反映することが必要である。例えば、堤体の浸透被災を考えるときは、外力として高い水位と継続時間が重要であり、河岸の侵食被災を対象とするときは前述のように低水路満杯程度の水位時の水理量を外力として考慮することが重要である。さらに、高水敷を流れている洪水継続時間とその間の水深が河床および河岸の洗掘、堆積箇所を支配する要因となる。これらの理解は河川構造物を設計する際の基本的な情報である。複断面蛇行河道の計画には洪水ハイドログラフを取り込むことが課題である。

## (3) 低水路法線形と河川構造物の構造、配置

従来は、洪水時にあっても内岸側の流速が外岸側より十分に小さいという前提のもとに、護岸、水制、橋脚などの構造や設置位置を決めてきた。複断面河道の平面形、横断面形、洪水ハイドログラフを考慮に入れ、洪水流の流下形態、河床変動について理解した上で、河川構造物の構造、配置等を決めることが求められる。

## (4) 河道の平面計画と河川環境計画

堤防と低水路の蛇行の位相差は、堤防に近いところの高水敷流れの構造に影響を与える。すなわちこれらの場所は、洪水時の生物の避難場所となり得る流速の小さい場所を作り出すこと等から<sup>17)</sup>、治水と河川環境の両面に有効な低水路法線形について検討することも必要である。また河道内の水防林、樹林帯の配置も低水路法線計画との関連で検討されるべきであろう<sup>18)</sup>。環境面、生態面からは、高水だけでなく、低水も意識した低水路法線形、水際の作り方についても検討していくことが求められる。

## (5) 複断面蛇行河川の三次元流れと河床変動計算法の確立

複断面蛇行流れの三次元計算は平坦固定床<sup>19)</sup>、移動床<sup>20)</sup>に対して行われ、実験結果<sup>9)</sup>、<sup>12)</sup>をかなりの程度説明できるようになっている。本章であげた課題についても、これらのシミュレーションモデルの適用によって、治水上也環境上も優れた河道の設計技術をつくりあげていくことが求められる。

## 7. 結論

本研究の結論をまとめると以下の通りである。

- (1) 複断面蛇行流路を用いた移動床実験より、平面形と相対水深が複断面蛇行流れと河床変動に及ぼす影響を検討した。その結果、行った実験条件においては、相対水深 $D_r=0.30$ 付近を境界として河床横断面形が異なることを示した。すなわち $0.30$ より小さな水深では単断面的蛇行流れ、大きな水深では複断面的蛇行流れが現れる。
- (2) 複断面蛇行河道では、河床の最大洗掘深は低水路満杯流量規模で外岸側に生ずる。河岸の侵食対策を考える際の水理量は、低水路満杯流量時の水理量を外力として用いることが合理的である。
- (3) 実河川の洪水実測データから、河川の蛇行度、洪水流の相対水深、最大流速の発生位置から複断面蛇行河道の洪水流の流下形態を分類することができた。すなわち、蛇行度が $1.015$ より大きな複断面河川では、相対水深が $0.3$ より大きい場合には複断面的蛇行流れが、小さい場合には単断面的蛇行流れが現れる。河岸被災の少ない河道線形計画をたてるためには、このような洪水流の流下特性、平面形との関係を検討していく必要がある。
- (4) 江の川において洪水時の低水路内岸側寄り河床の最大洗掘深および河床変動高調査を行った。調査結果は、複断面蛇行水路実験で見出された河床の洗掘特性とよく対応する。

謝辞: 本研究をまとめるに当たって、建設省河川局治水課、関東地方建設局河川計画課、中国地方建設局河川計画課、北陸地方建設局河川計画課、四国地方建設局河川計画課、北海道開発局河川計画課より貴重なデータの提供を頂いた。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二: 複断面蛇行河道設計法の課題, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 1~8, 1997.
- 2) Kiely, G.: Overbank flow in meandering compound channels, the important mechanism, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.207-217, 1990.
- 3) Willetts, B.B. and Hardwick, R.I.: Stage dependency for overbank flow in meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.45-54, 1993.
- 4) Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J. and Lonera, M.: Factors affecting conveyance in meandering compound channels, Jour. Of Hydraulic Engineering, Vol.119, No.12, pp.1383-1398, 1993.
- 5) Sellin, R.H.J., Ervine, D.A. and Willetts, B.B.: Behavior of

- meandering two-stage channels, Proc. Instn. Civ. Engineers Wat. Marit. & Energy, Vol.101, pp.99-111, 1993.
- 6) 武藤祐則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面蛇行開水路流れの水利特性について(1), 京大防災研究所年報, 第38号B-2, pp. 561~580, 1995.
  - 7) 武藤祐則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面蛇行開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集第40巻, pp. 711~716, 1996.
  - 8) 福岡捷二, 大串弘也, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集, No. 579/ II-41, pp. 83-92, 1997.
  - 9) 木下良作: 洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究, 文部省科学研究費「沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究(代表 岸力)」, 1988.
  - 10) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構, 京大防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 527-551, 1989.
  - 11) 福岡捷二, 宮崎節夫, 大串弘哉, 加村大輔: 堤防と低水路の法線の間に位相差が存在する複断面蛇行流路の流れと河床変動, 水工学論文集, 第40巻, pp. 941~946, 1996.
  - 12) 福岡捷二, 渡邊明英, 加村大輔, 岡田将治: 複断面蛇行流路における流砂量, 河床変動の実験的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 883~888, 1997.
  - 13) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 堤防と低水路が共に蛇行して
  - いる複断面蛇行流路における河床変動, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, II-252, pp. 504-505, 1997.
  - 14) 福岡捷二, 高橋宏尚, 加村大輔: 複断面蛇行河道に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ-洪水航空写真を用いた分析-, 水工学論文集, 第41巻, pp. 971~976, 1997.
  - 15) 福岡捷二, 道中貢, 平生昭二: 複断面蛇行河川における洪水時の低水路内岸側河床の最大先掘深調査, 水工学論文集第42巻, pp. 973~978, 1998.
  - 16) 平生昭二, 福岡捷二: 洪水期間中の蛇行部内岸側河床の変動高調査, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, II-238, pp. 476-477, 1998.
  - 17) 福岡捷二, 大串弘哉: 堤防の蛇行が複断面蛇行流路に及ぼす影響, 水工学論文集, 第41巻, pp. 1137~1140, 1997.
  - 18) Fukuoka, S.: Flood Control vegetation and Main channel Alignment in Flood Control Plans, Int. Seminar on Recent Trends of Floods and Their Preventive Measures, Post Seminar Proceedings, pp.145-174, 1996.
  - 19) 福岡捷二, 渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場との3次元解析, 土木学会論文集, No. 586/ II-42, 1998.
  - 20) 福岡捷二, 渡辺明英, 岡田将治: 静水圧近似3次元解析モデルによる複断面蛇行流路河床変動解析, 水工学論文集, 第42巻, 1998.

(1998. 2. 19受付)

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLOOD FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN A COMPOUND MEANDERING RIVER

Shoji FUKUOKA, Atsushi OMATA, Daisuke KAMURA,  
Shoji HIRAO and Shoji OKADA

Characteristics of flood flow and bed topography in compound meandering channel were investigated by the result of laboratory experiments and using hydraulic and velocity vector data of flood flows, river configuration, and bed topography obtained at several natural rivers. From the data analysis of meandering compound channel flow in the laboratory natural streams, the flood flow was classified into two categories the meandering compound channel flow and meandering single channel flow, according to the relative depth above and below of 30% respectively, in case the sinuosity of the meandering compound channel flow is above 1.015. We also investigated inner bed topography through boreholes of inner bed of Gonokawa-river during flood. For both the natural river and laboratory channel, similar phenomenon of scouring occurred at the inner bed for compound meandering flows. Finally, we indicated several problems and proposed investigation method for the rational river planning of a compound meandering river.