

複断面河道における洪水流特性と 流砂量・河床変動の研究

岡田将治¹・福岡捷二²

¹正会員 博(工) 中央大学助手 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

(前 広島大学大学院助手 工学研究科 社会環境システム専攻)

shoji915@civil.chuo-u.ac.jp

²フェロー 工博, Ph.D. 広島大学大学院 教授 工学研究科 社会環境システム専攻

(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

河川の複雑な平面形状を単純化するために、洪水時の流れ場を規定するパラメータを論理的に導き、全国14河川の河道データの分析から、わが国の複断面河道の平面形状特性を示した。次に、複断面水路を用いて蛇行度 S および相対水深 Dr を種々変化させた定常流実験を行い、低水路幅蛇行帯幅 <0.5 、蛇行度 $S < 1.10$ では、低水路満杯流量程度の水利条件で流砂量、洗掘深が最大となることを明らかにした。さらに、洪水ハイドログラフを与えた非定常流実験から、わが国の洪水規模では、複断面的蛇行流れの継続時間が短いため、定常流実験で見られた内岸河床の洗掘は生じにくいことを示した。最後に、低水路蛇行度 S と相対水深 Dr を指標とした単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの発生領域区分図を示し、洪水流の水利特性をこの2つの指標によって推定可能であることを示した。

Key Words : *compound meandering rivers, flood, simple meandering channel flow, compound meandering channel flow, bed topography, sediment discharge*

1. 序論

わが国の河川の中・下流域では、横断面形が低水路と高水敷からなる複断面蛇行河道が多く見られる。複断面蛇行流路の流れに関する研究は、近年、移動床水路実験、数値解析を用いた検討や現地河川における観測・調査等さまざまな方法によって行われ、流れと河床変動の特性が徐々に明らかにされてきた。

これまでに行われた複断面蛇行流路の流れと河床変動に関する主要な研究を以下に概観する。

木下¹⁾は、1988年に堤防法線と低水路法線の位相差に着目し、表面流速と河床変動に及ぼす影響を調べたパイオニア的研究によって、いわゆる木下の適正複断面河道を提案している。この研究は、当時としては先進的であり、河道計画に、重要な提案として位置づけられるが、複断面蛇行河道の流れと河床変動について、今日ほど、

よく理解されていなかったために、多くの検討課題を含んでいる。特に、木下が対象とした複断面流路の平面形状は、低水路蛇行度が小さく、堤防法線の蛇行度が相対的に大きい場合である。しかし、著者らの調査²⁾によれば、わが国の複断面蛇行河道の平面形状は、堤防法線の蛇行度が低水路蛇行度に比して小さく、低水路法線が大きく蛇行する場合には堤防法線も同位相に近い蛇行線形をなすことが多いことから、木下の用いた水路形状は、かなり特別な場合に相当し、得られた結果は限定的であると考えられる。

芦田・江頭³⁾は、単断面蛇行流れと複断面蛇行流れの違いに着目し、*underbank flow*, *bankfull flow*, *overbank flow* ($Dr=0.32$)の3ケースの実験(蛇行度 $S=1.10$)を行い、水位、流速分布および河床形状等の詳細な測定によって、流れと河床変動特性を比較している。その結果、複断面蛇行流れの流れ構造は、単断面蛇行流れの場合と大きく異なり、深掘れの位相が下流にシフトすること、洗掘深が小さくなること等を示している。

福岡⁴⁾は、蛇行度 $S=1.10$ の複断面蛇行流路において、

注) 本論文は、既発表の結果^{2, 3)}にその後の研究成果を加え、まとめ直したものである。

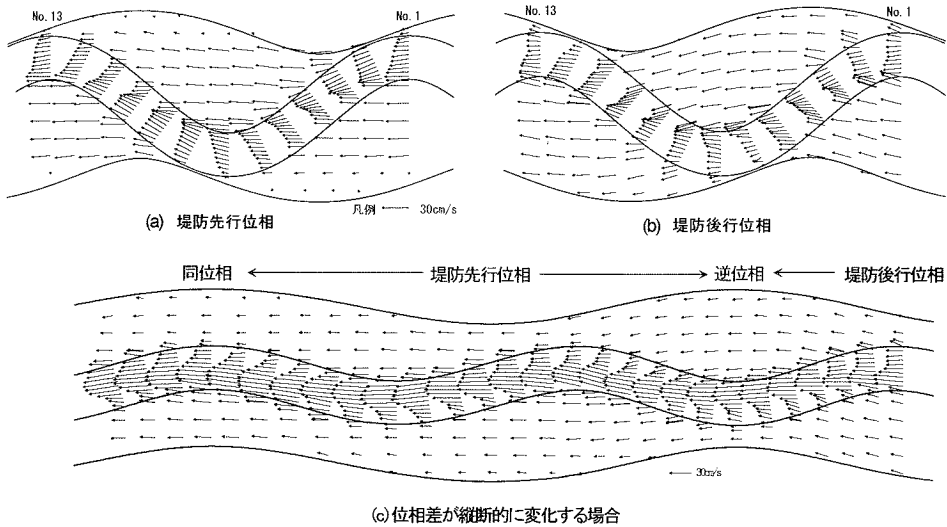


図-1 堤防法線と低水路が位相差をもって蛇行する場合の平面流況⁹⁾

相対水深 D_r (高水敷水深/低水路全水深)を変化させた5ケース($D_r=0\sim 0.49$)の実験を行って、平衡河床形状および流砂量を測定している。その結果、高水敷上を流れる複断面蛇行流れの中にも相対水深がおよそ0.3を境として、最大流速が外岸寄りに現れる単断面的蛇行流れと低水路中央寄りに現れる複断面的蛇行流れが生じ、その2つの流れでは、河床変動および流砂量特性に違いが生じることを明らかにした。これらの流れ特性の違いについては、数値解析を用いた検討も行われ、福岡・渡邊⁹⁾は文献⁹⁾の実験の再現計算を行っている。また、福岡ら⁹⁾は、実河川において洪水流の実測データを分析し、洪水中の最大流速線の発生位置と河岸被災箇所の関係からこの2種類の流れが存在することを示している。さらに、江の川の蛇行部内岸砂州上にボーリングを行い、その中に着色砂を入れることによって、洪水中の砂州上の河床変動高の測定を可能にし、複断面的蛇行流れが現れる場合には内岸砂州上においても河床変動が生じていることを示した⁴⁾。

複断面蛇行河道における洪水時の流れと河床変動特性を把握することは、河道設計、維持管理を適切に行ううえで重要である。しかし、これまでに得られた実験水路を用いた流れと河床変動に関する知見が複雑な平面形状を有する現地河川の洪水流と河床変動をどの程度説明できるのか等、十分明らかにされていないのが現状である。

本研究では、複断面蛇行河道における洪水流と河床変動特性を移動床実験、実河川データおよび洪水流観測データから以下の課題を検討している。

①複雑な平面形状を有する複断面蛇行河道を単純化する

ために、洪水時の流れ場を規定する平面形状パラメータを既往の実験結果から論理的に導く。さらに、全国14河川のデータを分析し、わが国の複断面蛇行河道の平面形状特性を示す。②実河川と同様な平面形状特性を持つ複断面蛇行流路を用いて、流れと流砂量・河床変動に及ぼす水路の平面形状および水理条件の影響を明らかにする。さらに、洪水ハイドログラフを与えた非定常流実験を行って、洪水時の流れと河床変動および流砂量の関係を考察する。③②の実験結果および洪水観測データから、平面形状、水理条件を代表する指標を用いて、複断面蛇行河道において洪水中に現れる2つの特徴的な流れ、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの発生条件を示す。

2 複断面蛇行河道の流れ場を規定する平面形状パラメータと平面形状特性²⁾

複断面蛇行河道の平面形状は、堤防と低水路が共に蛇行し、位相差をもつ複雑な形状をなしている。水理模型実験の利点は、このような複雑な平面形状を有する実河川で生じている現象を一般性を失わずに単純化し、再現を可能にすることである。しかし、これまで複断面蛇行流路を用いた実験が数多く行われているが、その際にどのような平面形状を与えればよいのかについて、その判断材料がなかった。

2ではこの課題に対するアプローチとして、堤防と低水路線形を種々変化させた実験結果に基づいて、複断面蛇行流れを規定する平面形状パラメータを特定する。さらに、全国14河川の河道データを調べ、わが国の複断面蛇行河道の平面形状特性を明らかにする。

表-1 実河川の平面形状特性

	蛇行波長 $L(m)$	蛇行帯幅 $B_m(m)$	低水路幅 $b_{mc}(m)$	b_{mc}/B_m	$2\Delta_{mp}/L$	b_{mc}/L	b_{mc}/B	B/B_m
石狩川	4000	1175	200	0.17	0.24	0.05	0.28	0.61
	6400	1550	200	0.13	0.21	0.03	0.25	0.52
	3850	1150	250	0.22	0.23	0.06	0.29	0.76
	2450	850	200	0.24	0.27	0.08	0.28	0.86
雨竜川	900	165	50	0.30	0.13	0.06	0.39	0.77
雄物川	2750	830	230	0.28	0.22	0.08	0.47	0.60
赤川	1750	550	100	0.18	0.26	0.06	0.42	0.43
阿賀野川	4420	1270	270	0.21	0.23	0.06	0.20	1.05
	3770	1710	270	0.16	0.38	0.07	0.37	0.43
利根川	5370	1280	330	0.26	0.18	0.06	0.46	0.57
越辺川	790	75	35	0.47	0.05	0.04	0.22	2.14
多摩川	1450	250	70	0.28	0.12	0.05	0.54	0.52
矢作川	2160	340	150	0.44	0.09	0.07	0.31	1.42
木津川	2660	1180	200	0.17	0.37	0.08	0.54	0.33
江の川	3060	550	190	0.35	0.12	0.06	0.29	1.21
	3840	1260	140	0.11	0.29	0.04	0.64	0.17
	2900	940	140	0.15	0.28	0.05	0.64	0.23
仁淀川	3840	770	260	0.34	0.13	0.07	0.50	0.68
那賀川	2050	410	100	0.24	0.15	0.05	0.33	0.78
嘉瀬川	1540	410	50	0.12	0.23	0.03	0.25	0.48

(1) 堤防法線形および低水路法線との位相差が低水路の流れ場に及ぼす影響

複断面流れになると、高水敷上の流れは堤防法線に沿うように流下するため、堤防法線の形状や低水路法線との位相の違いによって、低水路への流入形態が異なる。そこで、本節では堤防法線形の形状および位相の違いが低水路内の流れ場に及ぼす影響を明らかにする。ここで対象とする複断面河道は、堤防法線形が直線および蛇行する場合、堤防法線と低水路法線が同位相、位相差がある場合の全ての条件を含む。

既往の研究で多く用いられている堤防法線形が直線の水路では、高水敷上の流れも直線的に流れるために、低水路と高水敷間の流れの混合は蛇行帯幅内で生じている。図-1に堤防法線と低水路法線が共に蛇行し、位相差をもつ場合の平面流況⁹⁾を示す。各実験条件は、堤防法線形が低水路法線形に対して、(a)先行する場合、(b)後行する場合および(c)同位相や逆位相を含んだ縦断的に変化する場合である。(a)と(b)の比較、(c)の縦断方向の平面流況をそれぞれ比較すると、堤防法線の蛇行パターンおよび低水路法線との位相差に関わらず、低水路内、高水敷上の流速分布形および最大流速の発生位置に大きな違いは見られない。すなわち、堤防法線が直線、あるいは低水路と堤防法線が共に蛇行し、位相差を有する複断面流路においても、図-1のように堤間幅と蛇行帯幅が同程度か、堤間幅が十分大きい場合には、複断面蛇行流れを特徴づける低水路流れと高水敷流れの混合は、主に低水路

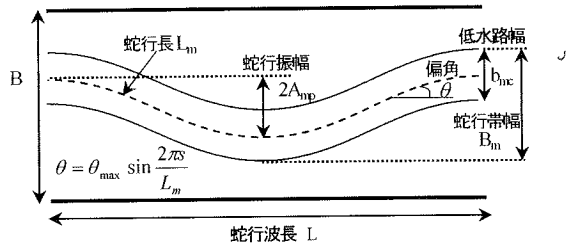


図-2 Sine-generated curve の蛇行低水路をもつ複断面流路の平面形状

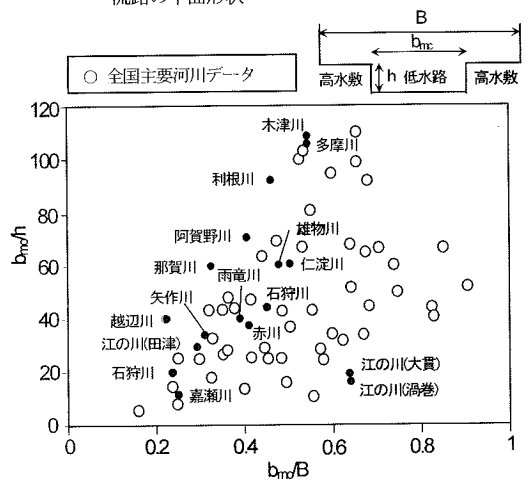


図-3 横断面形状の特性と全国主要河川データ⁹⁾との比較

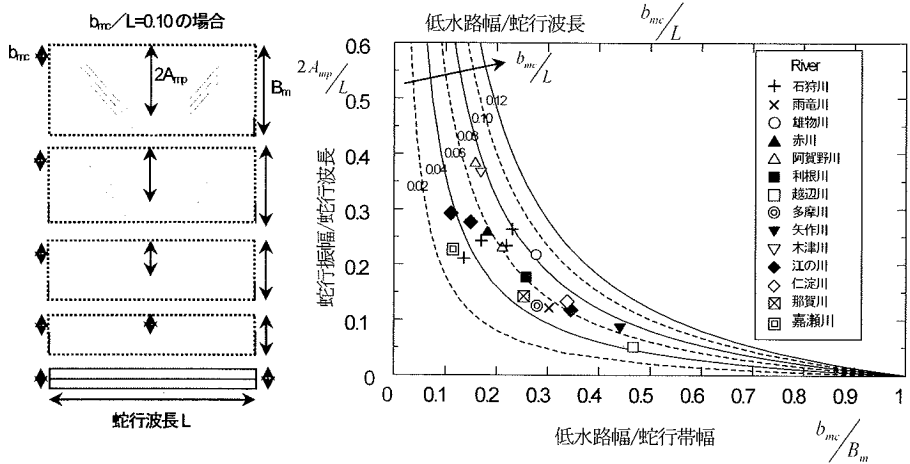


図-4 Sine-generated curveで流路線形を近似した場合の無次元平面形状パラメータ($b_{mc}/B_m, 2A_{mp}/L, b_{mc}/L$)の関係

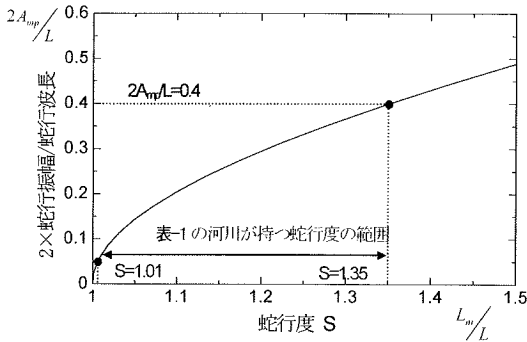


図-5 蛇行度 S と $2A_{mp}/L$ の関係

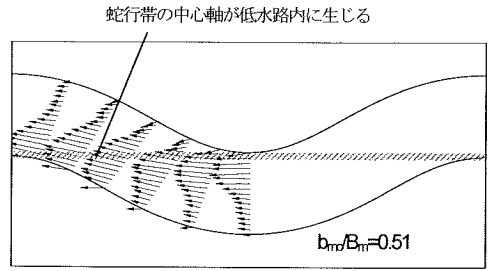


図-6 b_{mc}/B_m が0.5を超える場合の平面流況 (平坦固定床水路)

の蛇行帯の中で生じている。堤防法線形と低水路法線形が共に蛇行し、異なる位相差をもつ複断面流路の移動床実験⁹⁾においても、同じ低水路線形をもつ同じ相対水深の流れでは同様な河床形状が生じている。このことから、低水路法線形と関係する蛇行帯幅が低水路の河床変動に対して支配的であることを示している。

(2) 低水路の平面形状パラメータと実河川の平面形状特性

前節の結果より、低水路法線形に着目し、平面形を構成するパラメータについて考察する。河道の低水路中心線形は、一般に式(1)のSine-generated curveで近似できる場合が多い。

$$\theta = \theta_{max} \sin\left(\frac{2\pi s}{L_m}\right) \quad (1)$$

流路平面形を表す指標として、蛇行度 S を用いる場合が多いが、この値は低水路の中心線形を表しているに過ぎず、低水路幅は考慮されていない。そこで、低水路の中心線形を式(1)で、低水路幅を b_{mc} によって表される蛇

行低水路を仮定すれば、その平面形状は、図-2に示した蛇行長 L_m 、最大偏角 θ_{max} 、低水路幅 b_{mc} の3つのパラメータによって表される。しかし、実河川において最大偏角というパラメータは取り扱い難いことから、Sine-generated curveで近似できるとする仮定のもとで式(2)、式(3)に示すように、蛇行長 L_m と最大偏角 θ_{max} は、蛇行波長 L と蛇行振幅 A_{mp} に書き換えることができる。

$$L = \int_0^{L_m} \cos \theta ds = \int_0^{L_m} \cos\left(\theta_{max} \sin\left(\frac{2\pi s}{L_m}\right)\right) ds \quad (2)$$

$$2A_{mp} = \int_0^{L_m} \sin \theta ds = \int_0^{L_m} \sin\left(\theta_{max} \sin\left(\frac{2\pi s}{L_m}\right)\right) ds \quad (3)$$

これより、 L 、 B_m および b_{mc} の3つの平面形状パラメータ(蛇行帯幅 B_m は、 $2A_{mp}$ と b_{mc} の和で表される)が蛇行低水路の平面形状を規定することになる。本節では、この考えに基づき、表-1に示す全国14河川の平面形状データを用いて実河川の平面形状特性を調べる。用いた河川データは、中・下流域で見られる複断面蛇行河道で、蛇行頂部の内岸部に固定砂州が形成される低水路蛇行特性をもつ区間を対象とした。

表-2 既往の研究において使用された実験水路の諸元

実験水路	L (cm)	B _m (cm)	b _{mc} (cm)	h (cm)	b _{mc} /B _m	b _{mc} /L	b _{mc} /h
A(福岡ら) ⁹	460	89	40	5.5	0.45	0.09	7.3
A'(福岡ら) ⁹	460	129	80	5.5	0.62	0.17	14.5
B(福岡ら) ⁹	680	220	80	5.5	0.36	0.12	14.5
C(福岡ら)	600	157	80	5.0	0.51	0.13	16.0
D(福岡ら)	1200	425	100	6.0	0.24	0.08	16.7
E(芦田ら) ⁹	220	61	20	3.0	0.33	0.09	6.7
F(石垣ら) ¹⁰	307	100	30	5.0	0.30	0.10	6.0

これらの河川データを図-3 に示す福岡・藤田⁹が示した全国主要河川の横断面形状特性図にプロットした。その結果、本研究で対象とする河川が、わが国の主要河川データと同様な横断形状特性を有すると判断できる。また、表-1において蛇行帯幅 B_m と堤間幅 B の大きさを比較すると、図-1(c)の実験水路のように蛇行帯幅 B_m < 堤間幅 B となっている河川は、阿賀野川、越辺川、矢作川、江の川(田津)等の数地点であり、多くの場合は蛇行帯幅よりも堤間幅が小さくなっている。これは、各河川の対象区間が中・下流域の比較的蛇行度の大きい地点を選定していることが原因と考えられる。

図-4 は、低水路の平面形状を表す3つの特性量を無次元化し、それぞれの関係を示したものである。縦軸は、蛇行波長 L に対する2倍の蛇行振幅 2A_{mp}/L の比である。蛇行度 S は定義より L_m/L で表されることから、2A_{mp}/L は蛇行度の大きさを表す特性量である。横軸は蛇行帯幅 B_m に対する低水路幅 b_{mc} の比を示し、この値が大きくなるほど直線水路(b_{mc}/B_m=1)に近づく。図中に示す各線は低水路中心線を Sine-generated curve で近似した場合に、低水路幅と蛇行波長の比 b_{mc}/L が 0.02~0.12 の各値をとるときの b_{mc}/B_m と 2A_{mp}/L の関係を示したものである。したがって、図-4 は縦軸によって低水路中心線の蛇行度 S を示し、横軸およびパラメータ軸によって、低水路幅の影響を表している。この図から、対象とした河川の平面形状特性は、蛇行振幅/蛇行波長は 0.05~0.4 の範囲にあること、低水路幅/蛇行帯幅は 0.5 より小さくなっていること、低水路幅/蛇行波長の比は概ね 0.04~0.08 の間に集中していることがわかる。図-5 の蛇行度 S と 2A_{mp}/L の関係から明らかのように、縦軸の 0.05 ≤ 2A_{mp}/L ≤ 0.4 は、調査を行った河道区間の蛇行度が 1.01 ≤ S ≤ 1.35 の範囲にあることを示している。横軸の低水路幅/蛇行帯幅が 0.5 より小さい理由は次のように考えられる。図-6 (b_{mc}/B_m=0.51 の場合)に示すように、b_{mc}/B_m が 0.5 を超えると低水路内に直線的に流れる部分(斜線部)が生じる。この場所では流速が大きく、それが縦断方向に連続しているために、単断面蛇行流れであっても流路の蛇行線形に起因する二次流は発達しにくい。したがって、b_{mc}/B_m > 0.5 となるような流路平面形状は蛇行が発達している自然河川では生じ得ないといえる。

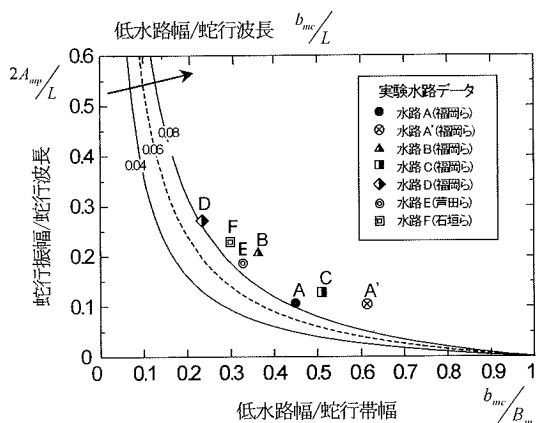


図-7 既往の研究で用いられた複断面蛇行水路の無次元平面形状パラメータ(b_{mc}/B_m, 2A_{mp}/L, b_{mc}/L)の関係

b_{mc}/B_m が 0.5 を超える場合の河床変動については、実験結果および 3 次元解析モデルを用いた解析結果を併せて付録に示す。本調査では、中・下流域に位置する改修の行われた複断面蛇行河道区間を対象としているが、低水路幅と蛇行帯幅の比が 0.5 より小さく、低水路幅と蛇行波長の比 b_{mc}/L が 0.04~0.08 に集中している結果は興味深い。以上より、複断面蛇行流路の流れや河床変動を模型実験によって明らかにしようとする、低水路幅/蛇行波長が 0.04~0.08 程度であること、低水路幅/蛇行帯幅が 0.5 より小さいという条件をほぼ満たす水路を用いる必要がある。

3. 複断面蛇行流路における流れと河床変動

(1) 既往の研究で用いられた複断面蛇行流路の平面形状特性

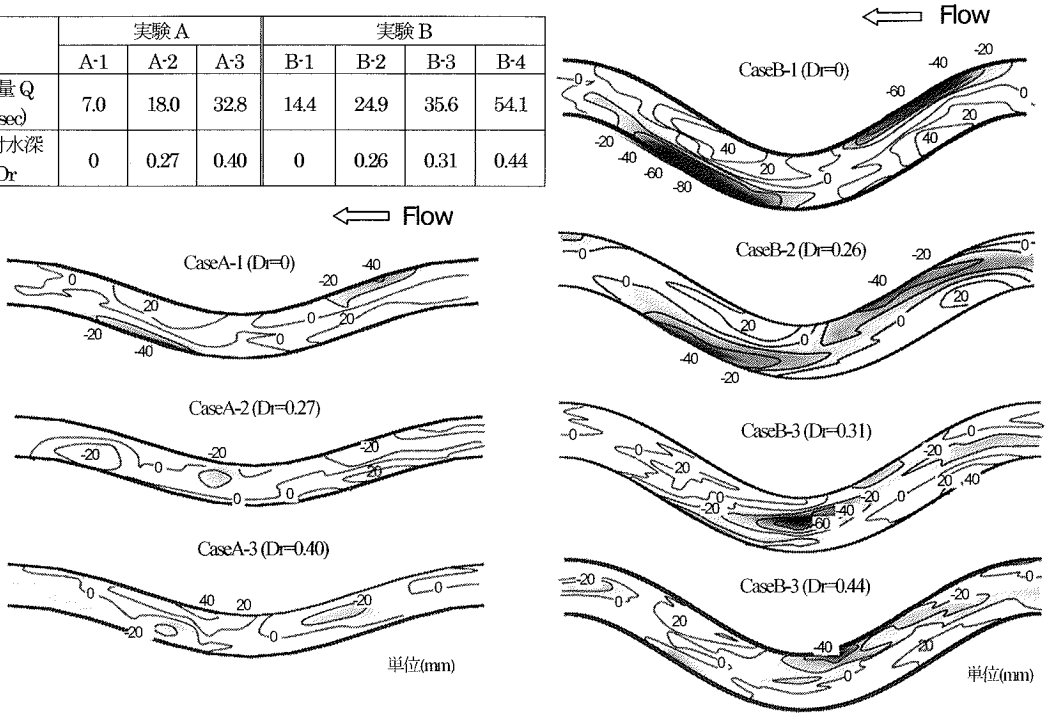
複断面蛇行流路の流れと河床変動に関して、わが国で用いられた実験水路の諸元を調べ、2章で得られた実河川の平面形状特性と比較する。表-2に既往の研究で用いられた複断面蛇行水路の諸元を示す。実験水路の b_{mc}/h (低水路幅/高水敷高さ)の値を見ると、図-3に示した実河川の場合に比して小さい。これは、実河川の相似則を満たす水路形状を作成しようとする、大規模な水路

表-3 水路Aおよび水路Bの諸元

	蛇行度 $S(=L_m/L)$	最大偏角 $\theta_{max} (^{\circ})$	蛇行長 $L_m(\text{cm})$	低水路幅 $b_{inc}(\text{cm})$	水路幅 $B(\text{cm})$	初期河床勾配 I
水路A	1.028	19.0	473	40	400	1/600
水路B	1.10	35.0	750	80		

表-4 実験Aおよび実験Bの水理条件

	実験A			実験B			
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	B-4
流量 Q (l/sec)	7.0	18.0	32.8	14.4	24.9	35.6	54.1
相対水深 Dr	0	0.27	0.40	0	0.26	0.31	0.44



(a) 水路A($S=1.028$)における平衡河床形状⁰

(b) 水路B($S=1.10$)における平衡河床形状⁰

図-8 蛇行度 S 、相対水深 Dr の違いによる平衡河床形状

が必要となる等の施設上の問題が生じるためである。しかし、福岡ら⁷⁾が示した既往の研究で用いられた実験水路諸元を参照すると、 b_m/h が10を超えるような水路を用いている研究は少ないことから、著者らが行った実験水路A-Dは、他の水路に比して、より実現象を想定していることがわかる。

図-7に図-4と同様な無次元平面形状パラメータの関係を示す。水路Aは、水路Aと蛇行度が同じで、低水路幅を2倍にしたものである。この水路では、 b_m/B_m が0.62と0.5を大きく越えており、他の複断面蛇行河道の平面形状特性とは異なる。この結果から、水路Aの実験結果は本研究では対象外とする(付録参照)。その他の水路A~F($S=1.028\sim 1.17$)についてみると、 b_m/L は実河川の分布する範囲0.04~0.08よりも全体的に大きい値を示している。この理由は、室内実験水路では、水路長に制約を受けるためである。しかし、水路Bは、 $b_m/L=0.12$ ではあるが、低水路満杯流($Dr=0$)において、流路線形に起因する遠心

力の作用によって主流は外岸側に曲げられ、低水路河岸に当たることによって、潜りこむ二次流が生じ、洗掘が大きくなっている。他の水路についても同様な河床形状パターンが見られることから、低水路幅/蛇行波長の値が実河川のものに対して多少大きくても、蛇行度が大きい場合には、二次流が発達し、外岸部に洗掘が生じる。

(2) 流砂量・河床変動に及ぼす平面形状、相対水深の影響 (実験1)

3(1)において、水路Aを除く水路A~Fが、低水路幅/蛇行波長の値は多少大きくなるものの、実河川の平面形状特性と同様な特性を有していることを示した。そこで、水路Aと水路Bの実験結果の比較により、蛇行度や相対水深の違いが流砂量、河床変動に及ぼす影響を検討する。

表-3に水路A、水路Bの諸元を、表-4に実験条件を示す。実験水路は堤防法線形が直線で、その中に *Sine*-

generated curve で一様に蛇行する低水路を有している。本実験では、蛇行長 L_m 、最大偏角 θ_{max} を変化させることにより、蛇行度の異なる水路を用いている。低水路の河床材料には、粒径 0.8mm の一様砂を用い、高水敷には粗度付けのために人工芝 ($n_p=0.018$) を貼っている。

水理条件は、相対水深 Dr (高水敷水深/低水路全水深) を変化させ、単断面蛇行流れ ($Dr=0$)、単断面的蛇行流れから複断面的蛇行流れに遷移する流れ ($Dr=0.30$) および複断面的蛇行流れ ($Dr=0.40$) を想定した 3 通りの定常流実験を行っている。どのケースについても高水敷高さ 5.5cm の平坦河床を初期状態として、水位、河床高および下流端における流砂量の経時変化を測定し、平衡状態に達したと考えられる 7~20 時間程度まで通水を行っている。また、測定機器として、水位測定にはポイントゲージを、河床高測定には超音波式河床形状測定器を用いている。

図-8 に各実験における平衡河床形状のカウンター図を示す。縦断平均河床高に対して色が濃いほど洗掘深が大きく、淡いほど堆積傾向であることを示す。水路 B ($S=1.10$) の実験 ⁴ から、 $Dr=0$ の場合には低水路の法線形による遠心力に起因する二次流の発達により、洗掘深が最大になること、 $Dr=0.30$ 付近で低水路と高水敷の間の流れの混合が大きくなり、二次流構造の変化により最大流速線は低水路中央寄りにシフトし、そのラインに沿って洗掘が生じる典型的な複断面的蛇行流れに移行する。蛇行度を小さくした水路 A ($S=1.028$) では、流路の曲率半径が大きくなることから、単断面蛇行流れにおける遠心力に起因する二次流は小さくなり、蛇行部外岸に生じる洗掘深は小さくなっている。このため、Case A-2 の複断面蛇行流れでは、相対水深が 0.3 よりも小さい値で高水敷からの流れの影響が卓越するため、最大流速線が低水路中央付近に生じ、複断面的蛇行流れに移行しているのがわかる。

図-9 に実験 A²、実験 B⁴ において水路下流端で測定された平衡流砂量を無次元化し、無次元掃流力との関係をプロットしたものを示す。また、本実験結果と比較するために、低水路の横断形状がほぼ同じである複断面直線流路 (低水路幅 90cm、高水敷高さ 6cm) を用いた実験の平衡流砂量 ¹⁰ を併せて示す。これらの実験水路は、低水路の横断形状がほぼ同じであることから、単断面流れの場合には低水路蛇行度の違いによる影響として比較できる。また、複断面流れの場合についても、直線流路では低水路と高水敷の境界付近で大規模平面渦が見られるものの、平均的な流れ場は蛇行度に応じた低水路の蛇行帯幅に規定される。したがって、図-9 に示すように、蛇行度 S と相対水深 Dr をパラメータとして、流砂量に及ぼす影響を検討することができる。

摩擦速度 u_* の算定には、近似的に低水路の平均水深

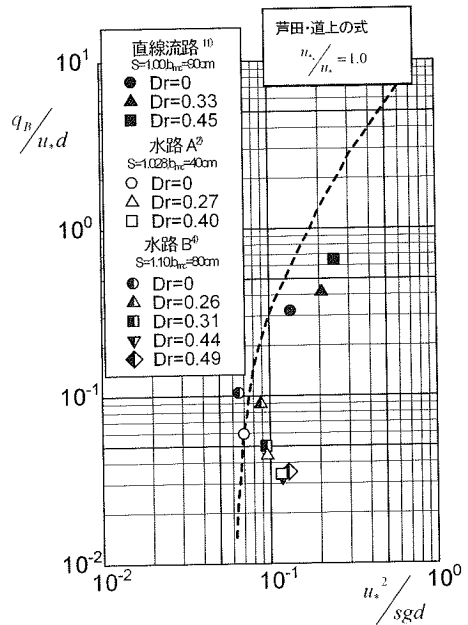


図-9 無次元せん断力と無次元流砂量の関係

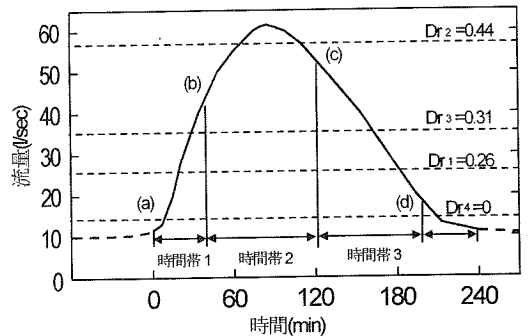


図-10 洪水ハイドログラフと各時間帯の実効流量およびその相対水深

と低水路中心線に沿った水面勾配を用い、 $u_* = \sqrt{ghI}$ から求めている。複断面直線流路では、相対水深が大きくなるほど掃流力は大きくなり、流砂量は増加する。一方、複断面蛇行流路の水路 A ($S=1.028$) および水路 B ($S=1.10$) では、流砂量は共に低水路満杯流の $Dr=0$ の場合で最大となり、相対水深の増大とともに高水敷流れの流入による混合によって、低水路内の流速が小さくなり、流砂量が減少する傾向が見られる。水路 A と水路 B の無次元流砂量を比較すると、同程度の相対水深に対して、水路 B の方が大きくなっている。両者の差は、相対水深が小さく、遠心力に起因する二次流が卓越する単断面的な蛇行流れ特性を示す条件で顕著に見られる。すなわち、蛇行度の大きい水路 B ($S=1.10$) では、二次流強度が増加することによって外岸に生じる洗掘深も大きくなる。その結果、主流は外岸の深掘れ部を集中するようになり、掃

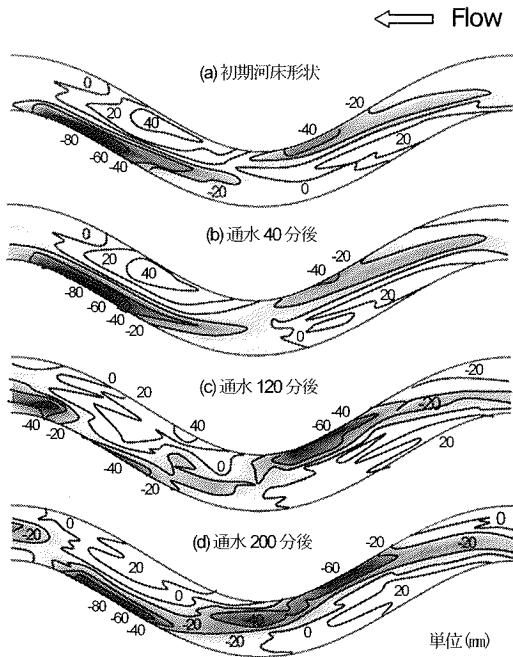


図-11 各通水時間における河床形状

流力の増大によって流砂量が多くなったと考えられる。このことは、相対水深が大きくなると、低水路線形の影響が小さくなるため、流砂量が蛇行度に関わらず同程度となっていることからわかる。

これらの実験結果を芦田・道上の流砂量式と比較すると、単断面流れでは流砂量式を用いて概ね説明することができるが、複断面流れでは同じ無次元掃流力に対して無次元流砂量は小さくなっている。これは次のように理由づけられる。複断面直線流路では、低水路と高水敷の境界部に生じる大規模平面渦の影響により、低水路河岸際の河床波の波高が大きくなり、水路全体の抵抗を増加させている¹⁰⁾。複断面蛇行流路の流れでは、高水敷流れの流入による付加的な抵抗増加が生じる。この機構を考慮に入れた河床に働くせん断力を用いていないことが大きな原因である。

複断面蛇行流れにおける低水路河床に働くせん断力は、複断面直線水路に比して小さく、縦横断的な変化が大きく、かつ水理条件によっても異なる複雑な特性を持つことがレーザー流速計による河床付近の流れ場の測定結果から示されている¹⁰⁾。流砂量の正しい評価のためには、低水路底面に働くせん断力の評価方法の確立と流砂量式について検討することが今後の重要な課題である。

本節で得られた流れ場と河床変動の重要な知見は、複断面蛇行流路における低水路護岸の設計に適用される。複断面直線水路にあっては、流砂量、洗掘深とも相対水深が大きいかほど大きくなることから、計画規模の洪水に

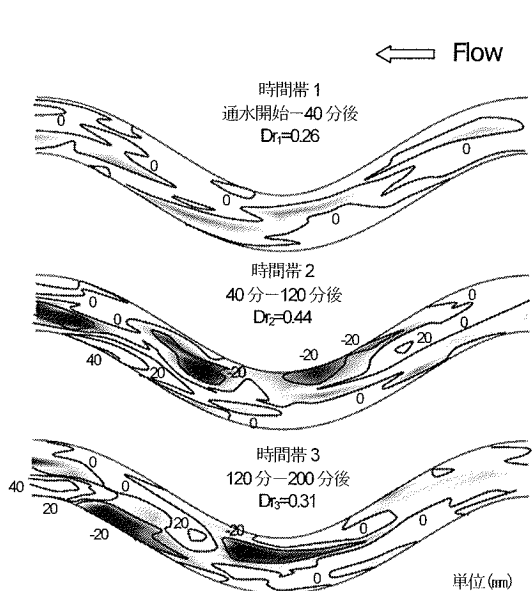


図-12 各時間帯における河床高の実質変動量

表-5 各時間帯における実効相対水深、継続時間と定常流における平衡流砂量

時間帯	実効相対水深 Dr_n	継続時間 (min)	平衡流砂量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{hour}$)
1	0.26	40	6.8
2	0.44	80	2.9
3	0.31	80	4.0
4	0	40	6.8

対応する水量を用いて護岸等構造物の根入れ深さを決めるのが適切である。一方、複断面蛇行流れでは、低水路の平面形状が $b_n/B_m < 0.5$, $S < 1.10$ において、流砂量、洗掘深ともに、低水路満杯流量付近で最大となることから、護岸の根入れ深さは、低水路満杯水深での水量を用いて設計するのが望ましいことが明らかとなった。

(3) 流砂量・河床変動に及ぼす非定常性の影響(実験2)

複断面蛇行流路における洪水時の河床変動、流砂量を把握するために、水路 $B(S=1.10)$ に洪水ハイドログラフを与えた非定常流実験を行って、同じ水路を用いて行った定常流実験の図-8(b)および図-9 と併せて検討することにより、流れの非定常性がこれらに及ぼす影響を明らかにする。図-10 に実験水路に与えたハイドログラフと各時間帯の実効流量に相当する4種類の相対水深 Dr_1 , Dr_2 , Dr_3 , Dr_4 を示す。ここで、実効流量とは、各時間帯の時間平均流量によって定義し、各流量に対応する相対水深を実効相対水深とする。ピーク時の相対水深を $Dr=0.47$ 、洪水継続時間は4時間としている。フルード相似則から、実験水路で与えたハイドログラフは、実河川

のハイドログラフにほぼ相当するものであることが示されている¹⁹⁾。初期河床は実河川の洪水前の河床形状を想定して、平坦河床から低水路満杯流れで2時間通水を行い、外岸側では河床洗掘、内岸側では河床堆積形状となっている。通水開始後40分毎に水位と河床形状を測定し、実験終了後に全流砂量を測定した。

a) 非定常流れにおける河床変動

図-11に各通水時間(a)-(d)における河床形状を示す。初期河床形状は、通水時間が2時間であったために、平衡状態の河床形状まで発達しておらず、同条件で8時間通水を行った図-8 Case B-1に比して、上流側の最大洗掘深は小さく、洗掘位置も若干蛇行頂部の内岸付近に生じている。

図より、洗掘箇所や洗掘深は、経時的に変化しており、複断面蛇行流路における非定常流れの特徴が現れている。さらに、ハイドログラフの各時間毎にどの箇所でも河床変動が生じているかを詳細に調べるために、図-12に各時間帯の河床高の実質変動量を示す。この変動量は、各時間帯の始点と終点において測定された河床高の差から求めている。通水開始から40分後までの時間帯1では、通水40分後に $Dr=0.37$ の複断面的蛇行流れとなるものの、その継続時間が短く、実効相対水深は $Dr_1=0.26$ であることから、初期河床からの変化はほとんど生じていない。時間帯2では、実効相対水深($Dr_2=0.44$)が大きく、複断面的な蛇行流れの特性が現れる時間帯となる。低水路の内岸部では洗掘が生じ、洗掘された砂は下流の変曲断面外岸の水衝部に堆積することにより、洗掘深は小さくなっている。したがって、外岸側洗掘、内岸側堆積の初期形状から相対水深が大きくなるにつれて最大流速線は内岸寄りに現れ、低水路内岸部付近で河床変動が生じる。ピーク水位を過ぎ、減水期にあたる時間帯3($Dr_3=0.31$)では、単断面的蛇行流れが卓越するようになり、時間帯2に埋め戻されていた水衝部は再び洗掘され、洗掘深が大きくなっている。以上より、この複断面蛇行流路における非定常実験において明らかになった結果をまとめると、①低水路外岸に生じる洗掘深は、低水路満杯流量程度で最大となり、洪水時は砂の堆積によって減少する。②蛇行部内岸河床では、相対水深の大きい複断面的蛇行流れの時間帯に洗掘が生じるものの、減水期の単断面的蛇行流れになると再び埋め戻されるため、洪水直後には図-11(d)に示すような、図-11(a)の洪水前の河床形状に低水路中央の洗掘部が若干残る程度となる。さらに、図-11(a)の河床形状を初期状態として、複断面的蛇行流れの相対水深 $Dr=0.44$ を20時間以上通水し続けても、河床形状は洗掘部が徐々に埋め戻されて平坦化傾向になるだけで、内岸河床に洗掘が生じることはなかった。以

上より、余程大規模な洪水が起こらない限り、内岸河床の洗掘が問題になることはないといえる。

b) 非定常流れにおける掃流砂量

3.(2)の定常流実験で得られた各相対水深における平衡流砂量を参考に、非定常流実験における掃流砂量を考察する。図-8(b)(定常流実験)と図-12 非定常流実験の各相対水深に対応する河床形状を比較すると、非定常流実験では定常流実験に比して通水時間が短いため河床の変動高は小さいものの、全体的な河床形状はそれぞれの相対水深での河床形状によく対応している。洪水ハイドログラフを与えた実験2の掃流砂量を各時間帯の実効流量によって生じる流砂量の和とみなし、実験1(定常流実験)の各相対水深における平衡流砂量とその継続時間から各時間帯の流砂量を算定した。表-5に各時間帯の実効相対水深、継続時間および平衡流砂量を示す。その結果、非定常流実験(通水時間2時間)における掃流砂量 $17.2 \times 10^3 \text{m}^3$ に対して、定常流実験における平衡流砂量の重ね合せから算定された掃流砂量は $18.3 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、ほぼ等しい値をとる。実験がほぼフルード相似則を満たしていることから、洪水時の掃流砂量は、複断面蛇行河道においても各時間帯の実効流量に相当する流砂量を見積もることができれば、その重ね合せとして考え得る可能性を示している。

4. 洪水期間中の流れの構造の変化

～単(複断面的蛇行流れから複(単)断面的蛇行流れ～

3.(2)で得られた実験結果と実河川の洪水データを用いて、複断面蛇行流路の2つの特有な流れ、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れが、どのような条件で発生するのかを調べる。この2つの流れは最大流速の発生する位置が異なり、河床の洗掘箇所もそれに伴って移動する。特に最大曲率断面における最大流速および最大洗掘の生じる位置に注目すれば、これらの2つの流れの判別が容易である⁹⁾ことから、各実験条件について最大曲率断面付近における最大流速および最大洗掘が生じている位置を調べる。

これらの流れを規定するパラメータとして、水理条件を相対水深 Dr で代表させる。また、3.(2)から明らかのように、実験水路のように堤間幅が蛇行帯幅よりも十分大きい複断面蛇行流路では、低水路の平面形状が実河川の平面形状特性をほぼ満たせば、低水路幅が多少変化しても、同じ相対水深に対する流れと河床形状のパターンが大きく変化することはない。すなわち、複断面蛇行流路の平面形状を低水路中心線の蛇行度 S のみで表すことができる。

図-13は実験水路の蛇行頂部における最大流速の発生位置をトレーサーによる表面流速測定から調べ、蛇行度

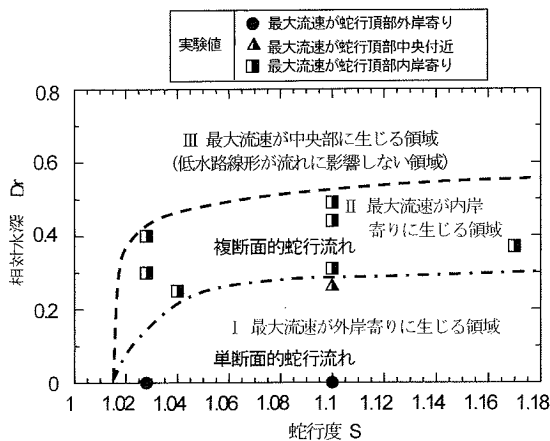


図-13 蛇行頂部における最大流速発生位置の実験値にもとづく流れの領域区分

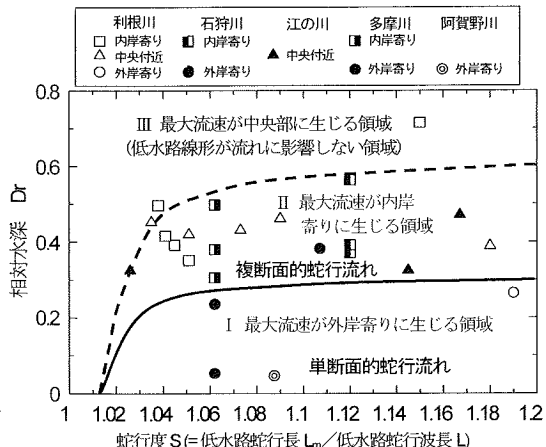


図-16 蛇行頂部における最大流速発生位置にもとづく実河川の洪水の領域区分

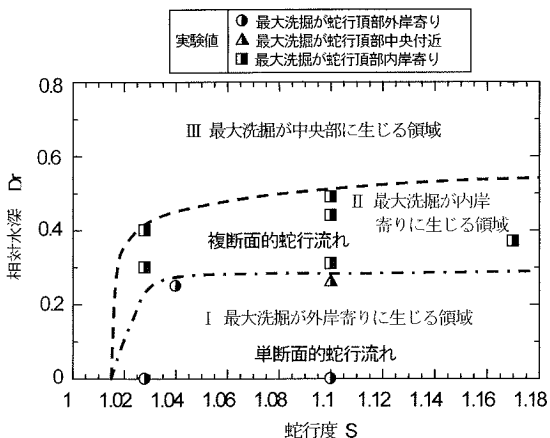


図-14 蛇行頂部における最大洗掘発生位置の実験値にもとづく流れの領域区分

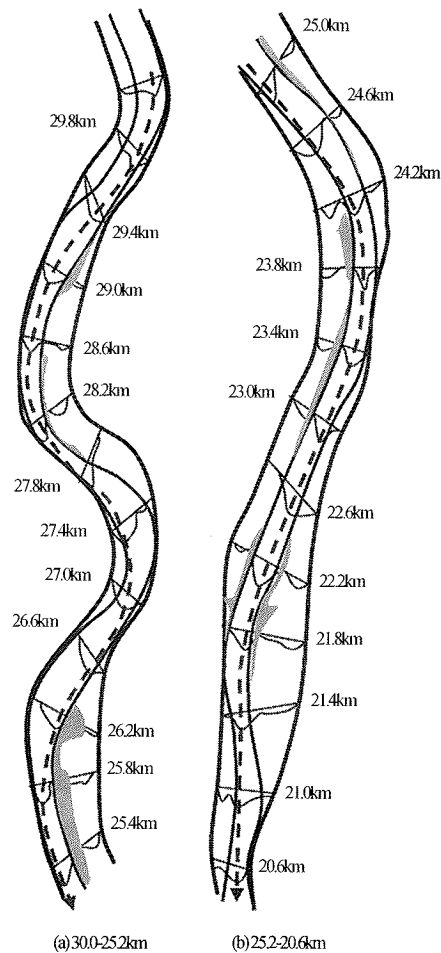


図-15 江の川昭和 58 年 7 月洪水における表面流速分布と最大流速線(航空写真を用いた洪水流況分析)

S と相対水深 D_r に対してプロットしたものを示している。流れ特性は、3 つの特徴的な領域に区分される。領域 I は、相対水深が小さい領域で、低水路の蛇行による遠心力が卓越し、二次流の発達によって蛇行頂部外岸寄りに最大流速が現れ、単断面的蛇行流れの特性を示す。相対水深がある程度大きくなる領域 II では、低水路流れと高水敷流れの混合により、最大流速線は水路中央から内岸寄りに現れ、複断面的蛇行流れの特性を示す。領域 I と領域 II を区分する相対水深は、これまでの研究から 0.3 程度であることがわかっているが、実験 1 の水路 A(S=1.028)の結果から、これよりもう少し相対水深が小さくなくとも考えられる。さらに相対水深が 0.50 を超えるような領域 III では、複断面蛇行流れではあるが、流れの直進性を増すことによって低水路線形の影響はほとんど及ぼさなくなり、最大流速は低水路中央付近に生じる。ただし、わが国の大河川の規模からすると、ピーク時の相対水深が 0.50 を超える洪水は、よほど大規模な洪水でない限り起こり得ないことが知られている。

図-14 は各実験から得られた平衡河床形状の蛇行頂部における最大洗掘深の発生位置に着目した区分図を示す。この図から、最大洗掘の発生位置で区分した場合でも、最大流速で区分した場合とほぼ同様な図が得られることがわかる。河川の洪水時に蛇行頂部における河床の最大洗掘位置を判定することはできないものの、最大流速の発生位置を観測することは可能である。このことから、洪水流の最大流速の発生位置を調べることによって、実河川の洪水流の流下形態や洪水時の河床変動を推定することが可能と考えられる。

つぎに実河川の洪水流についても、実験データと同様に洪水水中に撮影された航空写真から表面流況を調べ、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの領域区分を行った。例として、図-15 に江の川昭和 58 年 7 月洪水における表面流速分布および最大流速線を示し、江の川を含む計 5 河川の洪水流の領域区分を図-16 に示す。図-1 の実験結果より、堤間幅が蛇行帯幅に比して、同程度か、大きい場合には、複断面蛇行河川の流れに及ぼす堤防線形の影響は小さいことが明らかになったことから、横軸の蛇行度 S には、従来用いていた定義⁴ (蛇行度 S = 低水路法線の中心線距離 / 堤防法線の中心線距離) を修正し、低水路法線形に着目した式(4)を用いている。

$$\text{蛇行度} = \frac{\text{低水路蛇行長 } L_m}{\text{低水路蛇行波長 } L} \quad (4)$$

しかし、図-15(a)に示す江の川の蛇行区間では、図-1 の実験水路の平面形状と異なり、堤間幅 $B <$ 蛇行帯幅 B_m で、高水敷幅が小さくなっている。そのため、高水敷流れの低水路に流入する影響は、 $B > B_m$ の場合に比して小さくなると考えられる。図-15 に用いた各河川の堤間幅 B と蛇行帯幅 B_m の比は表-1 に示すように、石狩川(0.52~0.86)、阿賀野川(0.43~1.05)、利根川(0.57)、多摩川(0.52)、江の川(0.17~1.21)である。

図-16 に示した蛇行頂部における最大流速発生位置を用いた洪水流の領域区分図では、上流側の河道線形の影響を受けるために、各流れの領域区分に入らないデータが若干あるものの、実験水路の最大流速発生位置に基づいた図-13 と類似した区分図が得られたことから、本実験水路で生じている現象が実河川に適用できるものと考えられる。さらに、これらの結果は、複雑な平面形状を有する実河川においても、低水路法線形が流れ場を規定する主要因子となっていることを示すと同時に、流れに影響を及ぼす平面形状特性量として低水路蛇行度を選び、水理条件に相対水深を用いることによって、複断面蛇行河道における洪水流特性の簡易な見積もりが可能であることを示唆している。

5. 結論

本研究で得られた複断面蛇行河道における洪水流と流砂量、河床変動の特性を以下に示す。

- (1) 複断面蛇行流れの流れ場は、堤防法線形よりも低水路法線形に規定される。全国 14 河川の河道特性データを用いて複断面蛇行河道の平面形状特性を調べた結果、低水路幅 b_m 、蛇行帯幅 B_m が 0.5 よりも小さいこと、低水路幅 b_m 、蛇行波長 A_{np} が 0.04~0.08 程度である。
- (2) 低水路の平面形状が $b_m/B_m < 0.5$ 、蛇行度 $S < 1.10$ の複断面蛇行流路では、低水路満杯流量程度の水理条件で土砂の輸送が活発に行われ、最大洗掘深が生じる。また、蛇行度が大きいほど、二次流の発達によって洗掘現象は顕著に見られる。このため、護岸構造物等の水際構造物の設計には、低水路満杯流量時の水理条件を与える必要がある。
- (3) 洪水ハイドログラフを与えた非定常流実験から、わが国の河川の洪水規模では、複断面的蛇行流れの継続時間が比較的小さいために、内岸河床の洗掘が生じにくいことを明らかにした。また、洪水時の河床変動および流砂量は、各時間帯を定常流として組み合わせた準定常流として考えることができ、各時間帯の実効流量に対する平衡流砂量の和によって推定可能であることを示した。
- (4) 複断面蛇行流路の実験結果および洪水流データ分析によって、低水路蛇行度 S と相対水深 Dr を指標とした単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの発生領域を提示し、複雑な平面形状をなす複断面蛇行河道においても、これらの指標を用いて洪水流の水理特性の推定を可能にした。

謝辞: 本論文で用いた実河川の平面形状特性データは、国土交通省各地方整備局河川計画課から提供して頂いた。記して謝意を表します。

付録: b_m/B_m が 0.5 を超える場合の流況と河床変動

図-17 に実験から得られた水路 A' ($b_m/B_m = 0.62$) の平衡河床形状を示す。図-8(a) に示した水路 A ($b_m/B_m = 0.45$) とは蛇行度が同じで、低水路幅が 2 倍になった場合である。水路 A と水路 A' の河床形状を比較すると、低水路満杯流 ($Dr = 0$) の単断面的蛇行流れにおいて、洗掘部の位置が大きく異なっている。図-6 に示したように、 b_m/B_m が 0.5 を超える場合には、直線的に流れる部分が支配的となり、流路線形に起因する二次流が発達できないために、洗掘が低水路の蛇行頂部内岸に生じている。相対水深を

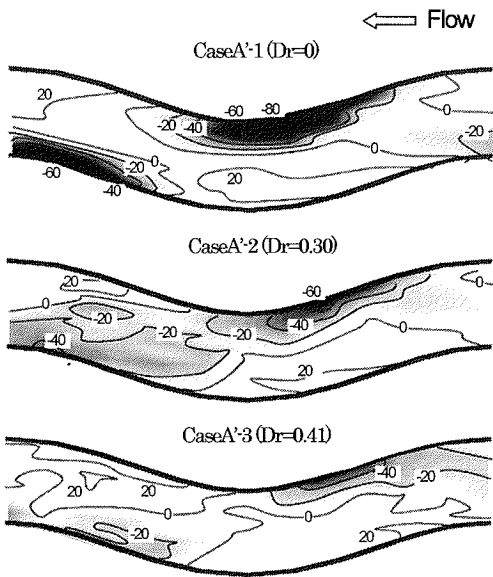


図-17 水路 A' ($b_m/B_m=0.62$) における平衡河床形状 (実験結果)

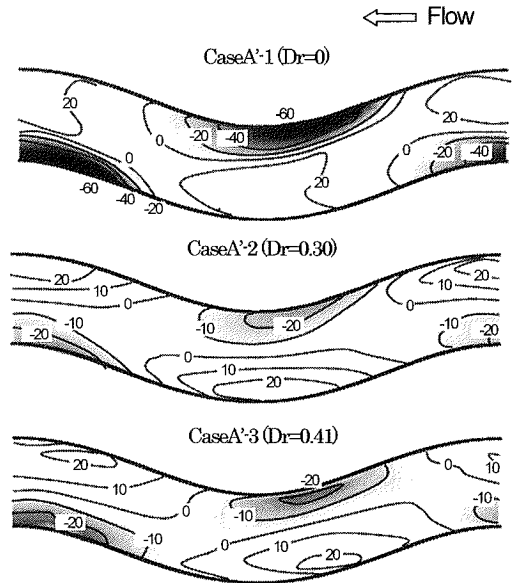


図-19 水路 A' ($b_m/B_m=0.62$) における平衡河床形状 (解析結果)

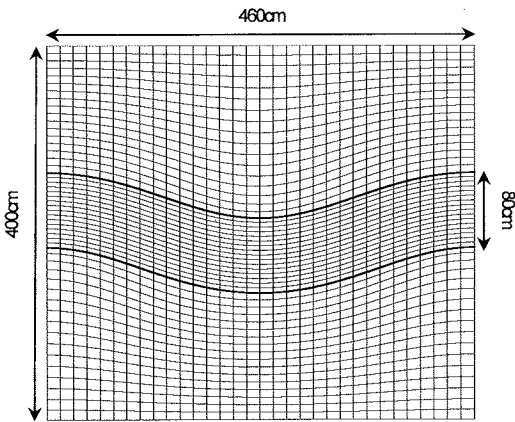


図-18 水路 A' ($b_m/B_m=0.62$) の解析メッシュ

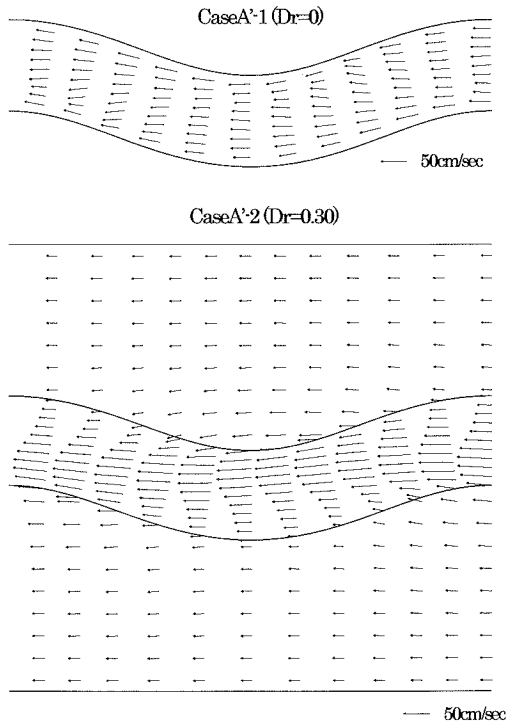


図-20 水路 A' ($b_m/B_m=0.62$) における平面流況 (解析結果)

大きくした複断面蛇行流れのケースにおいても、高水敷からの流入の影響によって、洗掘深は小さくなるものの、低水路満杯流れと類似した河床形状をしているのがわかる。

これらの実験結果を数値解析からも考察するために、渡邊らの非静水圧3次元解析モデル¹⁴⁾を用いて再現計算を行う。渡邊らはこのモデルを水路Bの実験結果に適用し、複断面的蛇行流れ特有の主流部の潜り込みによって生じる二次流を再現し、最大流速が低水路中央付近に現れ、その最大流速線に沿って河床変動が生じることを示している。

図-18に解析に用いたメッシュを示し、図-19、図-20に実験A'における平衡河床形状と平面流況の解析結果を

示す。解析結果は、実験結果に比して洗掘深が小さくなってきているものの、河床形状パターンはほぼ同様である。また、図-20のCase A'-1の水深平均流速ベクトルを見ると、ベクトルの向きは低水路線形の影響を受けず、流下方向

に直線的になっている。以上より、 b_m/B_m が0.5を超える水路線形では、通常、蛇行流路で見られる低水路線形に応じた遠心力に起因する二次流が発達しにくいことを移動床実験および数値解析により示した。この理由から、本研究において水路A'の実験結果は検討対象外とした。

参考文献

- 1) 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。文部省科学研究費自然災害特別研究(I)、沖積地河川における洪水流の制御と治水安全度に関する研究(研究代表者岸力)、pp.55-68, 1986.
- 2) 岡田将治, 福岡捷二, 貞宗早織：複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度, 相対水深を用いた洪水流の領域区分, 水工学論文集, 第46巻, pp.761-766, 2002.
- 3) 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, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp.527-551, 1989.
- 4) 福岡捷二, 小俣篤, 加村大輔, 平生昭二, 岡田将治：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集, No.621/I-47, pp.11-22, 1999.
- 5) 渡邊明英, 福岡捷二：複断面蛇行流路における流れと河床変動の3次元解析, 水工学論文集, 第43巻, pp.665-670, 1999.
- 6) 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.
- 7) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二：複断面蛇行流路における洪水流の水理, 土木学会論文集 No.579/II-41, pp.83-92, 1997.
- 8) 福岡捷二, 大串弘哉, 岡部博一：複断面蛇行流れに及ぼす堤防と低水路の蛇行度と位相差の影響, 水工学論文集, 第42巻, pp.961-966, 1998.
- 9) 福岡捷二, 藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.63-72, 1989.
- 10) 石垣泰輔, 武藤裕則：緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面開水路流れに関する実験的検討, 水工学論文集第42巻, pp.943-948, 1998.
- 11) 福岡捷二, 松井俊樹, 岡田将治：複断面直線水路の河床変動・流砂量・抵抗特性, 土木学会第55回年次講演会論文集, II-260, 2000.
- 12) 渡邊明英, 福岡捷二, 坂本博紀：複断面蛇行水路における底面せん断応力分布, 土木学会第57回年次講演会論文集, II-82, 2002.
- 13) 岡田将治, 福岡捷二, 田中淳一：複断面蛇行流路の河床変動に及ぼす流入土砂と流れの非定常性の影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.861-866, 2000.
- 14) 福岡捷二, 渡邊明英：複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.39-50, 1998.

(2002. 8. 19 受付)

CHARACTERISTICS OF FLOOD FLOW, SEDIMENT DISCHARGE AND BED TOPOGRAPHY IN COMPOUND RIVERS

Shoji OKADA and Shoji FUKUOKA

Characteristics of the flood flow, bed load and bed topography in compound rivers were investigated using laboratory tests and field data. Based on experimental resulting a series of non dimensional parameters were deduced to characterize flood flow. Plan shape features were showed by 14 Japanese compound rivers data analysis. Steady flow experiments were conducted in compound channels with different value of sinuosity and relative depth. As a result, for the case of bankfull flow, maximum rate of bed load and scouring occurred caused by large secondary flow under plan shape conditions of $b_m/B_m < 0.5$ and $S < 1.10$. From unsteady experimental results with a given hydrograph, we have showed that the possibility of occurring inner bed scouring of main channel was very low due to the short duration of compound meandering channel flow. Finally, the classification diagram of the flood flow characteristics (simple & compound meandering channel flow) in compound channels was presented in term of representative parameters such as sinuosity S and relative depth D_r , allowing the estimation of flood flow characteristics.