

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

INVESTIGATION OF PLAN SHAPE FEATURES IN COMPOUND MEANDERING CHANNELS AND CLASSIFICATION OF FLOOD FLOW CHARACTERISTICS USING SINUOSITY AND RELATIVE DEPTH

岡田将治¹・福岡捷二²・貞宗早織³
Shoji OKADA, Shoji FUKUOKA and Saori SADAMUNE

¹ 学生員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 博士課程後期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² フェロー会員 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

³ 正会員 株式会社 ウエスコ 環境設計部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

According to previous studies of compound meandering channel flow based on laboratory and natural streams data, two different flow characteristics have been identified; simple meandering channel flow and compound meandering channel flow. The existence of both characteristics depends on sinuosity, depth ratio and other parameters. These results become important information to design river structures and for river improvement. However, quantitative evaluations of the effect of plan shape, cross-sectional shape and hydraulic condition on the flow characteristics have not been investigated well. In this paper, we conducted experiments with small sinuosity channel ($s=1.028$) to study the effect of sinuosity and main channel width and relative depth. Thereafter, we compared our laboratory results with field data from 10 Japanese compound meandering rivers so that the effect of plan shape was analyzed. Finally, it showed that classification of the different flow characteristics of compound meandering channels were based on the representative parameters sinuosity, depth ratio, location of maximum velocity filament and maximum scouring depth at meander apex section.

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

1. 序論

複断面蛇行流路の流れと河床変動に関する研究から、蛇行度や相対水深(高水敷水深/低水路全水深)によって高水敷上を流れる複断面蛇行流れの中にも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現れる複断面的蛇行流れが生じ、それに伴い河床変動、流砂量特性が異なることが明らかにされた^{1), 2)}。この2種類の流れが存在することは実河川の洪水実測データを分析し、最大流速線の発生位置と河岸の被災箇所との関係を調べた結果からも裏付けられている³⁾。これらの情報は、複断面蛇行河道の設計、維持管理を行ううえで重要となるが、平面形状や相対水深の違いが、どの程度流れや河床変動に影響を及ぼすのか十分な理解に及んでいない。福岡ら¹⁾は実験結果および実河川の洪水データ分析から、蛇行度を平面形状の、そして相対水深を水理量の代表パラメータとして、洪水流において単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れが現れる領域を区分

している。この中で、日本の大河川の蛇行度は、1.00から1.04までに集中し、大きくても1.10程度の大きさであることを示している。しかし、これまでの複断面蛇行流路に関する実験水路の蛇行度 S は、複断面直線流路を除けば1.10前後を対象としている場合が多い。そこで本研究では、最初に蛇行度がその中間の領域に位置する $S=1.028$ の複断面蛇行流路を用いて実験を行い、蛇行流路の平面形状および相対水深の違いが流れ、河床変動に及ぼす影響を明らかにする。次に実河川の平面形状を調べ、蛇行河川の平面形状特性を明確化し、本実験およびこれまでに行われた実験水路の平面形状と比較を行い、これらの実験の意味を検討している。最後に複断面蛇行流路の実験結果のまとめとして、蛇行度、相対水深を変化させた場合の蛇行部最大曲率断面における最大流速および最大洗掘の発生位置によって複断面蛇行流路における流れを分類する領域図を示し、先に提案した領域区分図との比較を述べている。

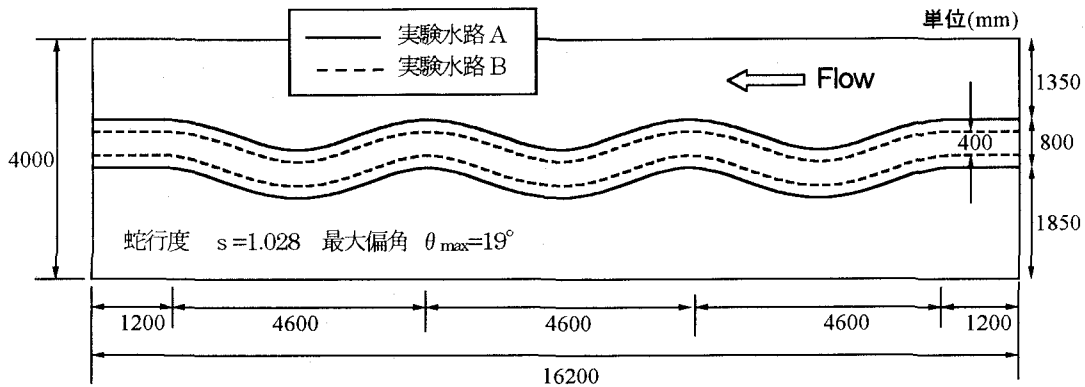


図-1 実験水路平面図

2. 低水路蛇行度が小さい複断面蛇行流路における移動床実験

(1) 実験概要

図-1 に実験に用いた移動床複断面蛇行水路を示す。全長 16.2m、幅 4m の直線水路に蛇行長 4.73m、最大偏角 19° の *Sine-generated curve* で蛇行する低水路が 3 波長あり、堤防法線に対する低水路の蛇行度は 1.028 である。蛇行 3 波長のうち、水路中央部の 1 波長を測定区間としている。表-1 に実験条件を示す。本実験では、平面形状、相対水深の違いを検討するために、実験 A では低水路幅を 80cm、実験 B では低水路幅を 40cm に変えて行っている。高水敷のマニングの粗度係数は、コンクリートの場合(実験 A)が $n_{fp}=0.009$ 、人工芝を貼り付けた場合(実験 B)が $n_{fp}=0.018$ である。相対水深 Dr (高水敷水深/低水路全水深)は、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($Dr=0.40$)を想定して 3 通りの相対水深を用いて実験を行っている。どのケースについても河床勾配 1/600、高水敷高さ 5.5cm の平坦河床を初期状態として通水を開始し、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て、平衡状態に達したと考えられる 7~9 時間程度まで通水を行っている。

(2) 河床変動に及ぼす低水路幅、相対水深の影響

図-2 に実験 A および実験 B における平衡状態に達した状態の河床変動高コンターを示す。平均縦断河床勾配に対して色が濃いほど洗掘深が大きく、薄いほど堆積傾向になっている。実験 A と実験 B の Case1~Case3 をそれぞれ比較すれば、低水路幅の違いによる河床変動への影響を検討できる。両者の高水敷粗度は異なるが、粗度の影響は水路全体に広がるため、同程度の相対水深に対して河床変動高は小さくなるものの、河床形状パターンはほぼ同じになることがわかっている⁴⁾。CaseA-1 と CaseB-1 を比較すると、単断面蛇行流れの場合には低水路幅によって洗掘箇所が大きく異なっているのがわかる。CaseA-1 では最大曲率断面の内岸部で洗掘が生じている

表-1 実験条件

	実験 A			実験 B		
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
低水路幅 b_m (cm)	80			40		
流量 Q (l/sec)	14.8	50.5	96.6	7.0	26.8	46.5
相対水深 Dr	0	0.30	0.41	0	0.30	0.40
初期高水敷高さ (cm)	5.5					
初期河床勾配	1/600					
高水敷粗度係数 n_{fp}	0.009 (コンクリート)			0.018 (人工芝)		

のに対し、CaseB-1 では遠心力に起因する二次流が発達することによって変曲断面外岸部に洗掘が生じている。実験条件は低水路幅のみが異なることから、これは 3 章で後述するように同じ水路中心蛇行長に対して、低水路幅を大きくすることによって断面内の二次流が発達しにくくなるためと考えられる。高水敷にも水が流れる複断面流れになると、実験 A、実験 B においても河床高が横断方向にはほぼ一様化する傾向を示し、高低差が小さくなっている。CaseB-2($Dr=0.27$)、CaseB-3($Dr=0.40$)では高水敷流れが低水路内に流入することにより、最大流速線の生じる位置が変化し、滯筋は蛇行部外岸側から低水路の中央付近に生じる。CaseA-2、CaseA-3 では相対水深の増加によって、単断面流れの場合と比して洗掘深は小さくなるものの、水衝部は最大曲率断面の内岸に残ったままである。実験 A と実験 B の比較から、この場合、低水路幅の違いが河床形状に与える影響は大きい。次に蛇行度の違いによる影響を見るために図-3 に蛇行度が 1.10 で実験 A、実験 B と同程度の相対水深の実験結果(実験 C)¹⁾を示す。実験 C では蛇行度が大きいため単断面蛇行流れにおいては洗掘深が大きくなっているが、相対水深の増加による河床形状の変化は実験 A よりもむしろ実験 B に近いといえる。このことから、蛇行度のみで流路の平面形状特性を代表させるのは必ずしも十分でなく、低水路幅も合わせて考慮する必要がある場合も考えられる。次章では、どのような平面形状特性を持つ複断面蛇行流れであるなら平面形状パラメータとして低水路幅も考慮に入れる必要があるかをまず検討し、この結果を用いて複断面蛇行流れの領域区分図について議論する。

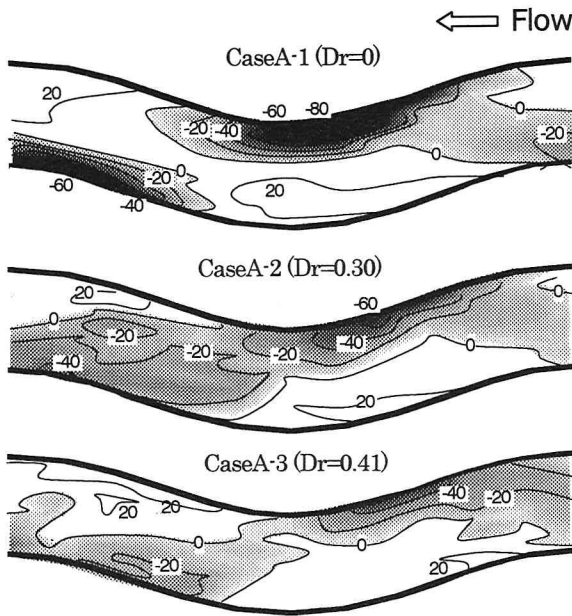


図-2 実験 A (S=1.028) における河床変動コンター

3. 複断面蛇行流路の流れ, 河床変動に影響を及ぼす平面形状パラメータ

(1) 蛇行流路の平面形状を規定するパラメータ

複断面蛇行流路の流れ, 河床変動に関する研究は, これまで数多く行われてきている。蛇行水路を用いる実験では, *Sine-generated curve* ($\theta = \theta_{\max} \sin(2\pi s/L_m)$, θ_{\max} : 最大偏角, L_m : 蛇行長) で近似する 경우가多く, 低水路の平面形状を代表するパラメータとして, 蛇行度 S (=蛇行長/蛇行波長) が用いられている。しかし, 2章の実験結果からも明らかのように, 平面形状を表すのに低水路中心線の蛇行度 S だけでは不十分な場合があることが明らかになった。

いま, *Sine-generated curve* で表される低水路幅 b_{mc} の複断面蛇行流路を仮定すると, 蛇行河川の平面形状を表すパラメータは, 蛇行長 L_m と最大偏角 θ_{\max} と低水路幅 b_{mc} であり, これらは, また, 蛇行波長 L , 蛇行振幅 A_{mp} , 低水路幅 b_{mc} と書き換えることができる。ここでは, この3つのパラメータが蛇行流路の平面形状を規定するとして, わが国の複断面蛇行河川の平面形状を調べ, その形状特性を考察する。さらにわが国でこれまでに行われた主要な複断面蛇行実験における水路の平面形状と比較する。最後にそれらの実験結果から複断面蛇行流路の流れと河床変動に影響を及ぼす平面形状特性について明らかにする。図-4に平面形状を決めるパラメータの定義を示す。蛇行帯幅 B_m は, 2倍の蛇行振幅 A_{mp} に低水路幅 b_{mc} を足し合わせたものである。表-2に著者らが調査したわが国の複断面蛇行河川の平面形状の緒元⁵⁾を示す。これらは全国10河川の河道平面図から, 複断面蛇行部を取り出して各値を求めている。表-3にわが国で行われた蛇行度が $S=1.17$ までの実験例として, 福岡ら¹⁾, 芦田, 江頭ら²⁾, 石垣ら⁵⁾が用いた複断面蛇行移動床水路の平面形状の緒元を示す。図-5は

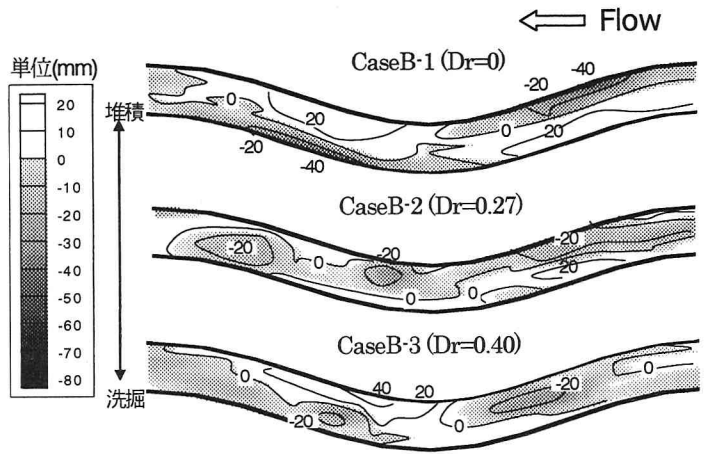


図-3 実験 B (S=1.028) における河床変動コンター

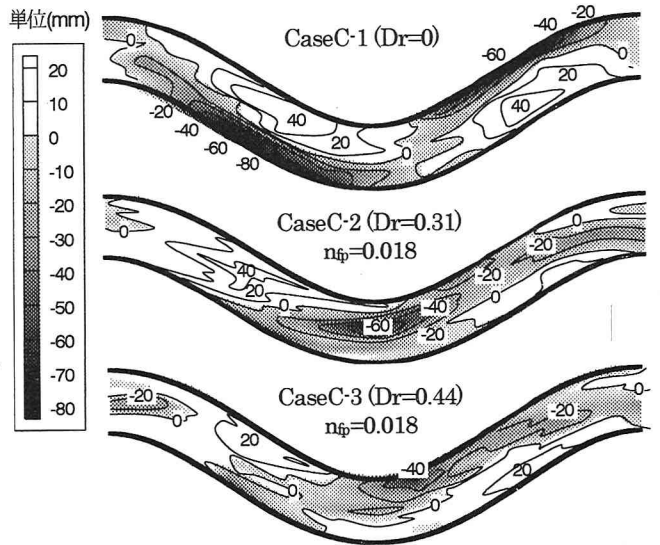


図-4 実験 C (S=1.10) の河床変動コンター

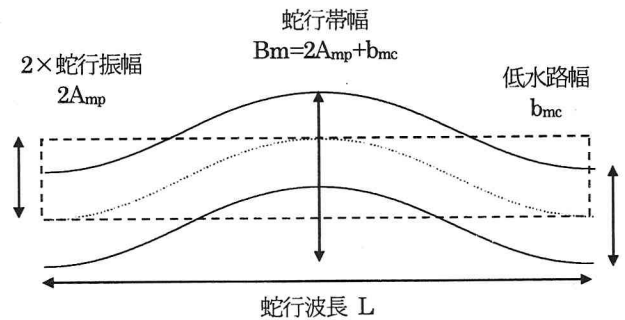


図-4 平面形状パラメータの定義

表-2 および表-3 に示した 3つのパラメータを用いて平面形状特性を示す。横軸は蛇行帯幅 B_m に占める低水路幅 b_{mc} の割合であり, その最大値は直線水路の場合で $b_{mc}/B_m=1$ となる。縦軸は蛇行波長 L に対する蛇行振幅 A_{mp} の比であり, これは図-6 に示すように蛇行度 S に関連するパラメータである。図-5 の各線は, 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 が各値をとるときの b_{mc}/B_m と $2A_{mp}/L$ の関係を求め, 示したものである。この図から, 実河川の平面

表-2 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)	低水路幅の影響	
				b _{mc} /B _m	b _{mc} /L
石狩川	4000	1175	200	0.17	0.05
	6400	1550	200	0.13	0.03
	3850	1150	250	0.22	0.06
	2450	850	200	0.24	0.08
雄物川	2750	830	230	0.28	0.08
赤川	1750	550	100	0.18	0.06
阿賀野川	4420	1270	270	0.21	0.06
	3770	1710	270	0.16	0.07
利根川	5370	1280	330	0.26	0.06
越辺川	790	75	35	0.47	0.04
矢作川	2160	340	150	0.44	0.07
木津川	2660	1180	200	0.17	0.08
江の川	3060	550	190	0.35	0.06
	3840	1260	140	0.11	0.04
	2900	940	140	0.15	0.05
仁淀川	3840	770	260	0.34	0.07

表-3 実験水路の平面形状特性

実験水路	蛇行波長 L(cm)	蛇行帯幅 B _m (cm)	低水路幅 b _{mc} (cm)	低水路幅の影響	
				b _{mc} /B _m	b _{mc} /L
A(本実験)	460	129	80	0.62	0.17
B(本実験)	460	89	40	0.45	0.09
C(福岡ら)	680	220	80	0.36	0.12
D(福岡ら)	600	157	80	0.51	0.13
E(福岡ら)	1200	425	100	0.24	0.08
F(芦田ら)	220	61	20	0.33	0.09
G(石垣ら)	307	100	30	0.30	0.10

形状特性として、縦軸の蛇行振幅/蛇行波長は0.4より小さくなっていること、横軸の低水路幅/蛇行帯幅は0.1~0.5の範囲にあること、低水路幅と蛇行帯幅の比は概ね0.04~0.08の間に集中していることがわかる。各値について考察すると、縦軸は図-6から、 $2A_{mp}/L < 0.4$ は、用いた実河川の蛇行度が1.35より小さいことを示している。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-7($b_{mc}/B_m = 0.6$ の場合)に示すように、複断面蛇行流れで b_{mc}/B_m が0.5を超えると低水路内に直線的に速く流れる部分(斜線部)が生ずる。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流路蛇行に起因する二次流は発達しにくい。したがって、蛇行帯幅に占める低水路幅の割合が0.5を超えるような流路平面形状は自然河川の蛇行が発達する過程では生じにくいといえる。調査を行った複断面蛇行河川は、すべてが自然河川でなく、改修を行われた河川が多く含まれているが、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。

既往の研究で用いられた複断面蛇行実験の水路A~Gの平面形状をみると、 b_{mc}/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く、特に水路A(0.17)、水路C(0.12)、水路D(0.13)が大きい。この理由は、実験水路で

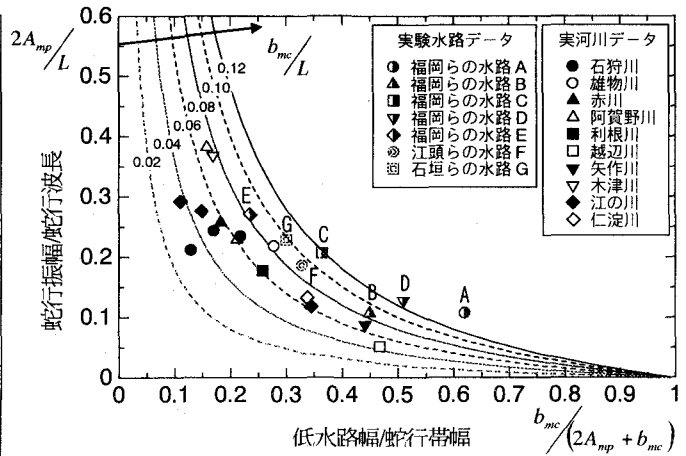


図-5 実河川と実験水路の平面形状特性の比較

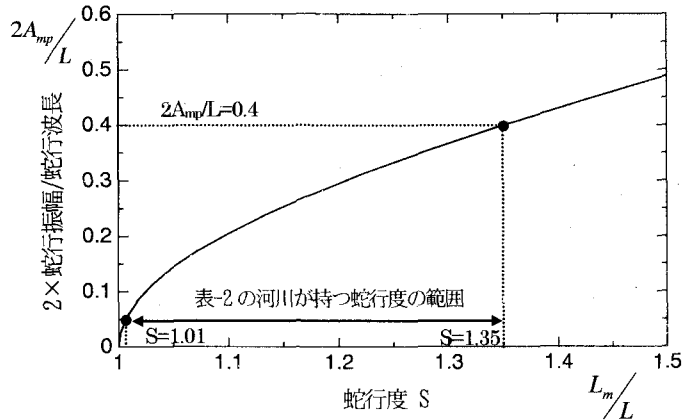


図-6 蛇行度 S と $2A_{mp}/L$ の関係

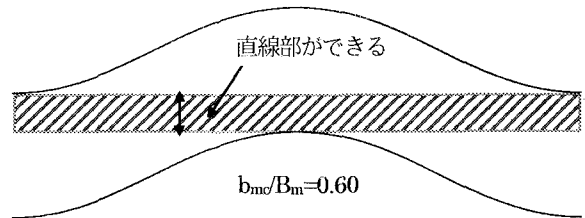


図-7 $b_{mc}/B_m = 0.50$ を超える場合

は水路長に制約を受けるため、実河川の比に対応するように低水路幅を決めると幅が小さくなるためである。また、 b_{mc}/B_m は水路Dで0.51、水路Aでは0.62となり、0.5を大きく超えている。水路Aは、2章の実験から単断面蛇行流れにおいて内岸部に速い流れが生じている。この結果は図-7に示した b_{mc}/B_m が0.5を超える場合の流れ特性から説明できる。したがって、実河川の平面形状特性を考慮すれば、蛇行流路の平面形状としては、実験Bの方が一般的であり、実験Aはやや特殊な場合に相当することがわかる。図-3に示した水路Cは $b_{mc}/L = 0.12$ であるが、水路Aのように最大曲率断面の内岸部に水衝部は生じていない。これは蛇行度が大きい場合には、蛇行波長に対して低水路幅が多少大きくても二次流が発達しやすいためと考えられる。以上のことから、複断面蛇行水路実験を行う際には、実河川の平面形状特性を考慮して、低水路幅/蛇行帯幅を0.5より小さくすること、低水路幅/蛇行波長をおよそ0.04~0.08

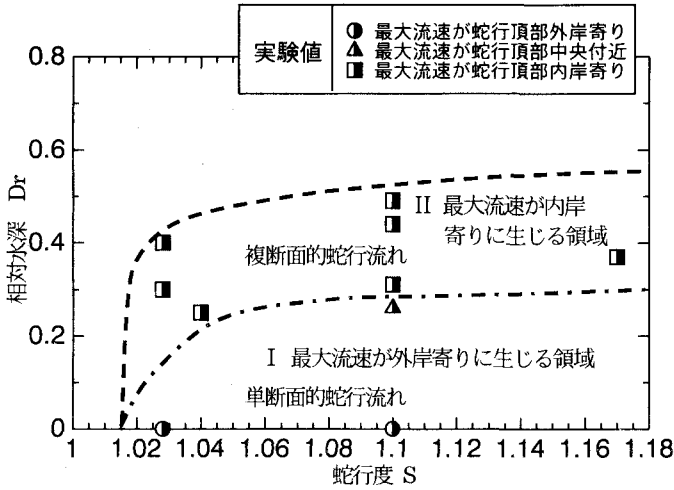


図-8 蛇行頂部における最大流速発生位置の実験値にもとづく流れの領域区分

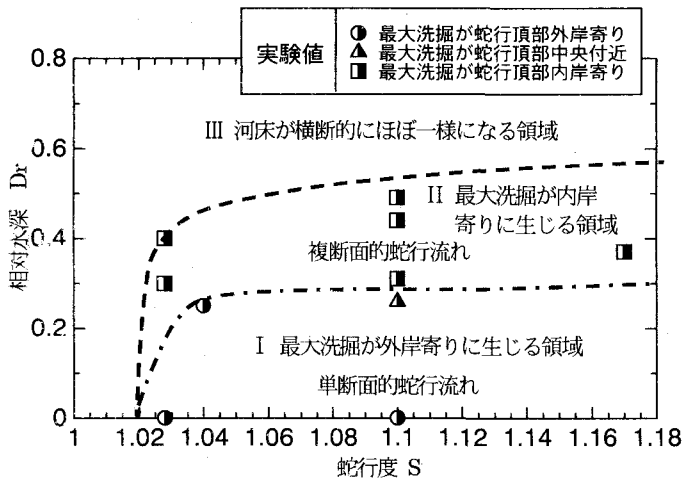


図-9 蛇行頂部における最大洗掘発生位置の実験値にもとづく流れの領域区分

となる範囲で平面形状を与えることが重要である。この条件を満たす範囲内であれば、低水路幅が変化しても同じ相対水深に対して流れと河床形状のパターンが大きく異なることはないと言える。したがって、複断面蛇行流路の流れと河床変動特性を蛇行度で平面形状を、流れを相対水深で代表し、分類することが可能である。

(2) 低水路蛇行頂部における最大流速発生位置及び最大洗掘深発生位置に着目した河川の洪水流の領域区分

(1)の実河川データを参考に、本実験結果とこれまで著者らが行った実験結果のまとめとして、複断面蛇行流路において現れる特有な流れである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ことから^{1),3)}、各実験条件について最大曲率断面における最大流速および最大洗

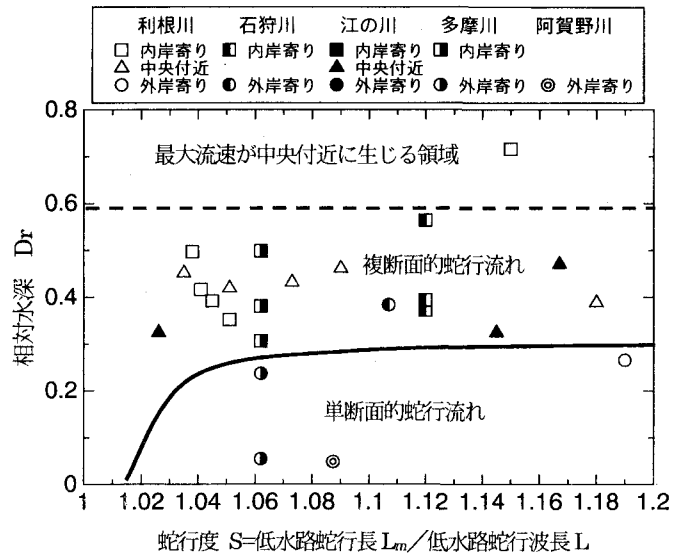


図-10 蛇行頂部における最大流速発生位置にもとづく実河川の洪水流の領域区分 (蛇行度を式(1)から算定した場合)

掘が生じている位置を調べる。図-8、図-9は蛇行頂部における最大流速および最大洗掘の発生位置を実測し、蛇行度 S と相対水深 Dr に対してプロットし、示している。最大流速の発生位置は、トレーサーを用いて表面流速を測定した結果から求めている。横軸の平面形状パラメータには蛇行度 S をとっているが、先に述べた実河川の形状特性に近い (b_m/B_m が 0.5 より小さく、 b_m/L がおよそ 0.04~0.08 の条件を満たす)水路の実験結果のみを用いることにする。したがって、 $S=1.028$ の代表する実験は、実験 A ではなく、実験 B を用いる。

最大流速の発生位置に着目すると、図-8に示すように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が混合により、二次流分布が縦断的に変化することによって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、蛇行度が小さい場合には二次流強度が大きくないため、もう少し相対水深が小さくとも考えられる。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、低水路線形の影響が小さくなり、全体的に流れの直進性が増すことにより、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いえば、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。河川の洪水時には、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が、最大流速の発生位置を観測することは可能であるため、図-8は実河

川の洪水流の流下形態を知るうえで特に重要である。また、図-9に示すように最大洗掘の発生位置に着目しても、図-8とほぼ同様な領域区分図が得られることを示している。

著者らは、文献¹⁾で実河川における洪水中の航空写真から求めた表面流速分布を用いて、蛇行頂部の最大流速発生位置を判定し、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの発生領域区分を示した。このとき、提案された領域区分線は図-8の実験水路で得られた区分線と蛇行度の小さい領域で異なっている。この差は、実河川は実験水路のように規則的な蛇行線形を持たないのが一般的であるため、その上流側の河道線形の影響を大きく受けたデータを用いていること、蛇行度の算定に低水路の蛇行波長ではなく、堤防法線の中心線距離を用いていることの2つの原因が考えられる。

実河川のように堤防法線も蛇行する複断面蛇行流路の蛇行度の定義について、これまで十分に検討されていなかった。そこで、低水路、堤防法線が共に蛇行し、位相差がある複断面蛇行河道の流れに影響を及ぼす平面形状パラメータについて再考察を行った。著者らの実験結果⁸⁾によれば、堤防法線の形状および低水路との位相差は、低水路内の流速分布形および最大流速の発生位置にほとんど影響を及ぼさないことが明らかにされている。すなわち、低水路と堤防法線に位相差がある複断面蛇行流路においても、流れの混合の大部分は低水路の蛇行帯の中で生じ、低水路法線形が支配的であることを示している。このことから、複断面蛇行河道における洪水流の領域区分図に用いる平面形状パラメータには、低水路線形に着目した蛇行度を用いるのが合理的であることが明らかとなった。そこで、複断面蛇行河道の流れ特性を考慮した蛇行度を式(1)で定義しなおす。

$$\text{Sinuosity} = \frac{\text{低水路蛇行長 } L_m}{\text{低水路蛇行波長 } L} \quad (1)$$

蛇行度の定義を先の論文¹⁾のものから、式(1)に変更して再度計算を行った。その結果を用いた実河川における洪水流の領域区分を図-10に示す。プロットしたデータは、先に提案した領域区分¹⁾に比して全体的に右方向にシフトしている。図-10に蛇行頂部における洪水流の最大流速発生位置を指標とする単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの区分線を引けば、実験結果にもとづいた図-8の領域区分と類似したものになっている。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 低水路蛇行度の小さい $S=1.028$ の水路を用い、低水路幅を変化させた実験では、低水路幅が水深や流路の曲率に

対して大きくなると、単断面蛇行流れであっても二次流の縦断的な発達が悪く、蛇行頂部内岸に洗掘が生じる場合がある。

- (2) 全国の複断面蛇行河川の平面形状データを用いて、蛇行流路の平面形状特性(蛇行波長 L 、蛇行帯幅 B_m 、低水路幅 b_m)を調べた結果、 b_m/B_m は0.5より小さいこと、 b_m/L は概ね0.04~0.08の間に集中していることがわかった。これらの値の持つ意味を考察し、(1)の低水路幅の広い実験(水路A)において内岸部に洗掘が生じる機構を説明して、この水路の平面形状がやや特殊な場合であることを示した。さらに既往の研究で用いられた水路平面形状とその実験結果から、実河川の平面形状特性の条件をほぼ満たす流路であれば、低水路幅によって流れ、河床形状のパターンは変化せず、流路平面形を蛇行度で代表できる。
- (3) 実河川の平面形状特性とほぼ同じ関係を満たす複断面蛇行流路の実験結果を用いて、蛇行頂部における最大流速および最大洗掘が生じる位置を調べ、蛇行度と相対水深を代表パラメータとする複断面蛇行流れの領域区分図を示した。最後に、著者らが以前に示した実河川の洪水流データにもとづいた複断面蛇行河道における流れの領域区分図について、河道の平面形状パラメータの再考察を行い、これにもとづいて、より合理的な洪水流の領域区分図を示した。

参考文献

- 1) 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/II-47,pp.11-22,1999.
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 福岡捷二,貞宗早織,岡田将治:複断面河道の河床変動に及ぼす蛇行度,相対水深,高水敷粗度の影響,土木学会第56回年次講演会,2001.
- 6) 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.
- 7) 岡田将治,福岡捷二,小俣篤:複断面蛇行河道の低水路内岸寄り砂州上における洪水時の河床変動,土木学会第56回年次講演会,2001.
- 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.

(2001.10.1受付)