

複断面蛇行河道の洪水流に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ —洪水流航空写真を用いた分析—

Compound Meandering Flow and Simple Meandering Flow in a Compound Meandering Rivers
— Analysis by the Use of Aerophotograph Flood Flow Velocity Vector —

福岡捷二* 高橋宏尚** 加村大輔***

By Shoji Fukuoka, Hironao Takahashi and Daisuke Kamura

In this paper, flood flow characteristic of compound meandering river was investigated by using the measurement values such as hydrograph, river configuration and bed topography. The duration of a flood on a flood channel was studied, and an example scoring inner bank was found in the compound meandering flow. The river configuration represented rate of sinuosity and phase difference and the discharge represented relative depth of the channel. The velocity vector measured by aerophotograph made a correlation among the rate of sinuosity, the phase difference and the relative depth. Therefore, in this experiment, requirements of compound meandering flow and single section meandering flow were investigated.

Keywords : compound meandering river, aerophotograph, hydrograph, planform, depth ratio, maximum velocity filament

1.序論

複断面的蛇行流れの構造及び河床変動の機構については、これまでの研究から以下のようなことが明らかにされている。堤防が直線で低水路が一定の蛇行形状を持つ、平坦固定床水路を用いた実験は数多く行われている¹⁾²⁾³⁾。しかしこれらの結果は流れの構造の理解を助けるが、河床の変動については十分な説明を与えることができない。著者ら⁵⁾は低水路が移動床で、高水敷上の粗度が大きい水路を用いて実験を行い、実河川により近い条件で流れと河床変動の再現を試みている。すなわち一定の蛇行度と位相差を持つ水路の場合に、低水路内における最大流速発生位置や低水路と高水敷の間の流れの出入り、二次流セルの形成等の流況と、洗掘、堆積位置等の河床変動について検討している。実河川については福岡・五十嵐ら⁷⁾が江の川と利根川を対象に、洪水時の航空写真から得られた表面流速ベクトル解析結果を用い、複断面蛇行河道の流況特性を考察している。堤防と低水路法線の間位相差が存在する区間では、実験水路で見られたのと同様に洪水時の最大流速は低水路の内岸側から内岸側の最短経路に現れること、蛇行の度合いがそれほど大きくなく、かつ堤防と低水路法線の位相がほぼ一致している区間では、最大流速は外岸側に寄っていることが示された。この研究で複断面蛇行河道では、その平面形状によっては2つの異なる流れの特性が現れることを示した。第一は弯曲部外岸側に最大流速が現れる流れ（これを単断面的蛇行流れと呼ぶ。）、第二は弯曲部内岸側に最大流速が現れる流れ（これを複断面的蛇行流れと呼ぶ。）である。これらの流れの出現には流路の平面形状だけでなく水理量も関係すると考えられるが、この点については現地河川の洪水資料に基づいて検討されていない。

* 正会員 工博, Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類地域環境工学講座 (広島県東広島市鏡山 1-4-1)

** 正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント 総合河川部

*** 学生員 広島大学大学院工学研究科 博士課程前期

複断面蛇行河道内の流れを支配する主要な要因には、次の3つが挙げられる。第一に低水路水深に対する高水敷水深の比で表される相対水深 D_r ¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾がある。複断面蛇行流路実験では、低水路満杯状態よりやや大きい水位を境界として、それより下の水位では単断面的の蛇行流れ、上の水位では複断面的の蛇行流れの特徴が現れることが示されている⁹⁾。 D_r を調べることで、どちらの流れが現れるか、さらにその境界がどの程度かを検討する。第二に蛇行度 (Sinuosity, S)¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾、第三に位相差 (Phase Shift, P)⁶⁾⁷⁾がある。蛇行度が大きくなれば、低水路と高水敷の流向の相違が大きくなり、複断面蛇行流れにおける低水路と高水敷の流れの出入りが活発になる。位相差は低水路と堤防の頂部のずれを示し、これが大きくなると高水敷幅の流下方向変化の度合いが異なる。蛇行度と位相差は河道の平面特性を代表し、複断面蛇行流れの構造を支配する流れの出入りの程度を決定する⁴⁾⁶⁾。そこで実河川の洪水時に測定された表面流速分布の特性と、この時の相対水深 D_r 、河道の蛇行度 S 、位相差 P の関係を調べ、複断面蛇行河道において複断面的流れと単断面的流れが形成される条件について検討する。

2. 蛇行度と位相差の定義

複断面蛇行河道の流れを検討するには、流況に影響を与える堤防と低水路の線形関係が重要である。本研究では次に定義される、蛇行度と位相差を用いる。まず蛇行度を定義する。B.B.Willets, R.I.Hardwick¹⁾²⁾ら、武藤³⁾、福岡⁴⁾⁵⁾⁶⁾は直線の間には蛇行低水路が存在する水路を用いて、蛇行の度合いを変化させた実験を行っている。このような蛇行では、直線流下距離に対する低水路の蛇行に沿う距離の比を蛇行度と定義している。様々な形状が複雑に混在する実河川では、直線流下距離が堤防の距離とはならない場合が多い。そこで蛇行度を図-1に示すように蛇行帯軸の長さである河道中心線に対する低水路中心軸の長さの比と定義する⁹⁾。この定義では堤防に沿った距離を取ること、堤防の線形によって規定される高水敷の流向を考慮している。次に堤防と低水路の法線の位相差についてはその定義を図-2に示す。図のように位相差は、蛇行1波長に対する堤防の頂点と低水路の頂点のずれの比とする。

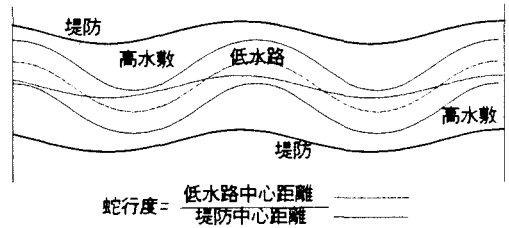


図-1 蛇行度の定義

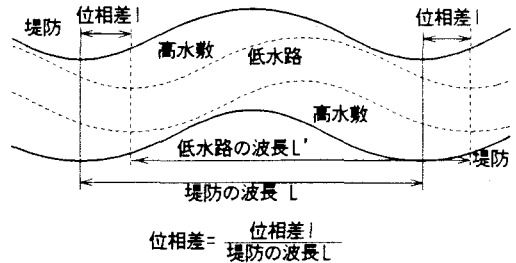


図-2 位相差の定義

しかし両者、特に位相差を決定するとき、河道線形が実験水路と比較して非常に複雑である為、区間をどのように区切るのか、蛇行の頂点を決定する基準を何にするか等の問題が生じる。本研究ではこれらは視覚によって判断した。

3. 洪水ハイドログラフ

複断面蛇行流路の実験で、高水敷水深の変化による流況の変化を定常流れの条件で検討し、低水路内の最大洗掘が最大流速発生位置で起こり、内岸河岸の洗掘の危険性が指摘された⁹⁾。実河川では高水敷に水が乗っている時間と低水路内の河床変動の関係について調べられていないため、洪水時にどの程度の内岸河岸の侵食の危険性があるかは定かでない。実験では、河床は平坦河床の状態から行われてきたが、実河川では外岸河床が洗掘されている状態が初期状態である。洪水時には内岸河床を洗掘するまでには、外岸河床の深掘れを埋め戻し、平坦な河床を形成した後内岸を洗掘するという過程を経過するために、内岸河床の洗掘までに著しく時間がかかると考えられる。そこで実河川の洪水ハイドログラフにおいて高水敷に水が乗っている時間及び洪水ピーク時の相対水深 D_r を見積もり、洪水前後で測定された河床形状からどの程度内岸河床が洗掘されているかを実測値をもとに調べることにする。

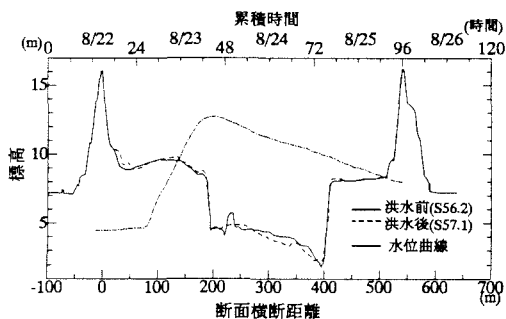


図-3 利根川・芽吹橋の河床横断形状と水位曲線図

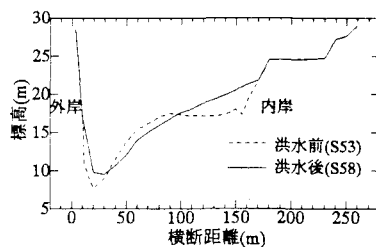
表-1 は基準点で観測された水位と河床横断形状をもとに算定された、高水敷に水が乗っている時間と洪水ピーク時の Dr を示している。対象洪水は利根川が昭和 56 年 8 月洪水、石狩川が昭和 56 年 8 月洪水、江戸川が昭和 56 年 8 月洪水、小貝川が昭和 61 年 8 月洪水、江の川は昭和 58 年 7 月洪水である。高水敷高さは実河川では兩岸で異なることが多い。例として図-3 に利根川、芽吹橋 (104.0k) における河床横断形状と水位曲線図を示す。右岸高水敷は左岸高水敷より 1m 程度低い。 Dr を兩岸で計算すると右岸で 0.49、左岸で 0.35 と異なる。 Dr はどちらの高水敷に水が乗る時間で表すかに大きく依存するが、ここでは基本的に兩岸の平均高さをを用いた。なお江の川は高水敷ではなく河岸段丘の高さである。

利根川では 181.5k-40.1k の区間で航測が行われているが、高水敷に水が乗っている時間は 47-64 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 Dr 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となっている。石狩川では下流にいくに従って高水敷に水が乗っている時間が長くなる。 Dr は各場所によってばらつきがあるが、これは局部的に高水敷の高さが大きく変化しているためである。江戸川、小貝川、江の川と低水路の通水能力が小さくなるに従って高水敷に水が乗っている時間が長くなり、特に江の川の下流 (谷住郷、14.8k) では 5 日間以上乗っていることとなる。

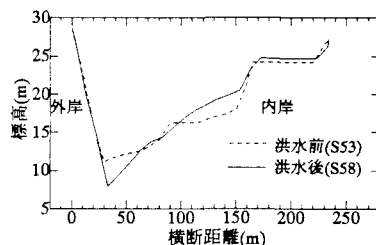
図-4 は洪水水中に低水路が洗掘された例として、江の川の(a)27.2k と(b)27.0k の河床横断形状を示す。図-5 に江の川の検討区間の平面図を示す。洪水前の河床形状と平面図から 27.2k が蛇行部頂点である。後述するが、この区間では $S=1.093$ 、 $P=0.074$ 、 $Dr=0.45$ 、高水敷の水が乗っている時間は非常に長く 4-5 日にも及んでいる。平常時には両断面付近が水当たり部になっており、外岸河床が洗掘されている。洪水前後で河床形状を比較すると、27.2k では低水路中央から外岸寄りに、27.0k では外岸河岸に近い部分で洗掘が現れている。洪水流が複断面蛇行流れの特性を示し、 Dr が大きくしかも非

表-1 高水敷に水が乗っている時間と Dr

河川	観測所 (距離)	高水敷に水が乗っている時間	Dr
利根川	八斗島(181.5k)	57 時間	0.33
	S.56.8		
	川俣(150.0k)	47 時間	0.53
	栗橋(130.5k)	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)	58 時間	0.16
石狩川	橋本町(93.9k)	17 時間	0.13
	S.56.8		
	奈井江大橋(76.8k)	67 時間	0.46
	月形(58.0k)	37 時間	0.20
	岩見沢大橋(44.5k)	75 時間	0.39
	石狩大橋(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 時間以上	0.58
	松戸(19.5k)	100 時間以上	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 時間以上	0.60
	谷住郷(14.8k)	120 時間以上	0.76

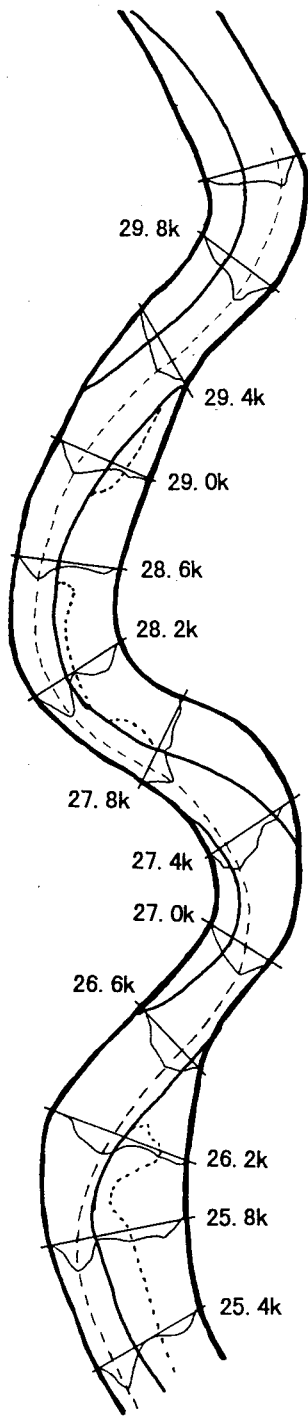


(a) 27.2k

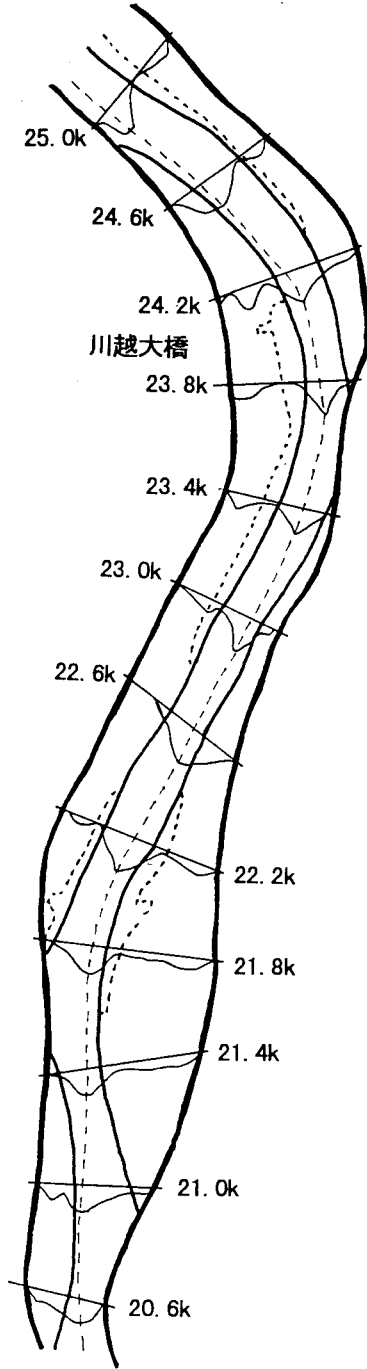


(b) 27.0k

図-4 江の川の洪水前後の河床形状 (複断面蛇行流れにより 27.2k の内岸が洗掘されたと推定される場合)

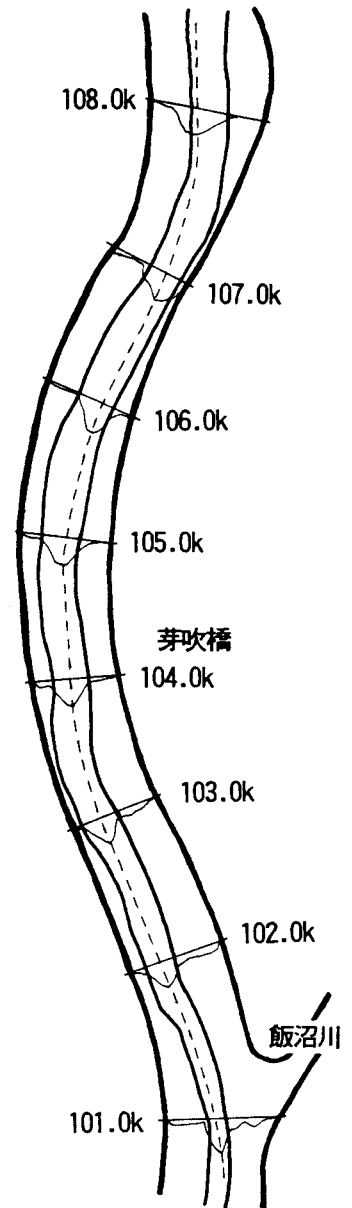
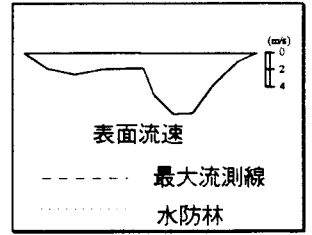


(a) 30.0k~25.2k
 (29.8k~27.0k, S=1.072, P=0.030)
 (28.7k~26.0k, S=1.093, P=0.074)
 (27.2k~24.0k, S=1.073, P=0.023)



(b) 25.2k~20.6k
 (26.0k~23.0k, S=1.030, P=0.067)
 (23.8k~20.6k, S=1.029, P=0.082)

図-5 江の川の検討区間の平面形と表面流速分布
 (縮尺 1/20000)



108.5k~100.5k
 (S=1.018, P=0.156)

図-7 利根川の検討区間の
 平面形と表面流速分布
 (縮尺 1/40000)

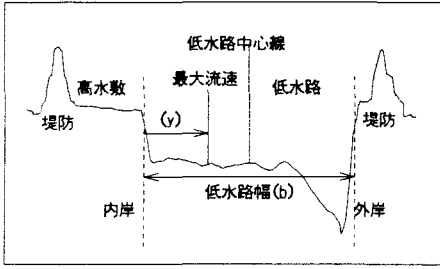


図-6 y/bの模式図

常に長い時間段丘上に流れがあるため、最大流速が内岸に寄っている、このため27.2kでの洗掘が低水路中央に移り、下流の27.0kの外岸河岸付近への水当たりが顕著になったと考えられる。

4.単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れを形成する条件

ここでは利根川と江の川で区間毎に相対水深 Dr と蛇行度 S 、位相差 P を見積もり、低水路内の最大流速が横断面内のどの位置に現れるかを調べる。その方法は以下の通りである。蛇行頂部を中心として1波長を抽出し、その区間の低水路中心距離と河道中心距離から蛇行度を算定する。さらに蛇行頂部に最も近く、その直上流で流速分布が測定されている断面において、低水路幅(b)に対する低水路内岸からの最大流速の横断距離(y)の比、 y/b を調べる(図-6)。直上流を選ぶ理由は以下の通りである。低水路内の最大流速は最大曲率断面の上流側では内岸にすりつこうとするが、下流になるに従って徐々に外岸側に寄り、次の蛇行部の内岸を通る⁶⁷⁾。もし下流断面で y/b を算定すると、単断面蛇行流れの状態で最大流速が外岸側に現れた場合と区別が付きにくくなるためである。

4.1.利根川と江の川の蛇行特性

利根川の検討区間は180.0k~30.0kである。表-2にその諸量を示す。図-7には例として $S=1.018$ 、 $P=0.156$ の区間108.5k~100.5kの平面図を示している。表より波長は80.0kより上流で6km~8km程度が多い。それより下流は概ね上流より長い波長を有しており、最大で13.5kmである。蛇行度は低水路中心距離と河道中心距離が等しい1.000から1.040の範囲、位相差は0.2以下にほとんどが集中している。江の川は穿入河川で、ほぼ左右交互に河岸段丘が形成されているため、利根川と比較して河道が大きく蛇行している。本研究における検討区間は29.8k~20.6kで表-3に利根川と同様に検討断面と波長、蛇行度を、図-5の(a)と(b)に平面図を示している。波長はほぼ3km前後である。この区間では24.0k付近の川越大橋を境界として上流を「蛇行河道部」、下流を「蛇行直線部」という分類がなされているが、江の川の蛇行度は利根川のそれと比較して、「蛇行河道部」で1.072~1.093と大きく、「直線河道部」で1.030程度とほぼ同じである。位相差は利根川ほど小さくなく、0.1以下となっている。図-5、図-7を見ると明らかのように、表面最大流速は弯曲部の外岸側に現れているわけではない。特に蛇行度の大きい江の川では、最大流速は内岸寄りに、蛇行度の小さい利根川では中央から内岸寄りであることが分かる。次にこの事実の定量化を試みる。

表-2 利根川における諸量

区間	検討断面	波長(km)	蛇行度	位相差
151.3k~146.5k	149.0k	5.8	1.003	0
146.0k~139.0k	143.0k	7.0	1.012	0.064
132.0k~125.0k	129.0k	7.0	1.034	0
124.0k~116.0k	120.0k	8.0	1.010	0
108.5k~100.5k	103.5k	8.0	1.018	0.156
98.0k~91.5k	93.5k	6.5	1.023	0.267
95.0k~89.5k	91.0k	5.5	1.022	0.182
92.5k~86.5k	89.5k	6.0	1.021	0
85.0k~75.0k	79.0k	10.0	1.011	0.164
80.0k~69.0k	74.0k	11.0	1.035	0.115
69.0k~62.0k	66.0k	7.0	1.060	0.100
66.0k~58.5k	62.0k	7.5	1.023	0.035
62.0k~53.0k	58.0k	10.0	1.002	0.080
47.5k~38.5k	43.0k	9.0	1.012	0.076
43.0k~33.5k	38.0k	9.5	1.010	0.078
38.5k~25.0k	34.0k	13.5	1.008	0

表-3 江の川における諸量

区間	検討断面	波長(km)	蛇行度	位相差
29.8k~27.0k	28.6k	2.8	1.072	0.030
28.7k~26.0k	27.4k	2.7	1.093	0.074
27.2k~24.0k	26.0k	3.2	1.073	0.023
26.0k~23.0k	23.8k	3.0	1.030	0.067
23.8k~20.6k	21.8k	3.2	1.029	0.082

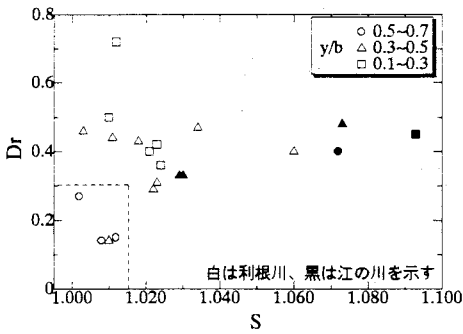


図-8 S-Dr と y/b の関係

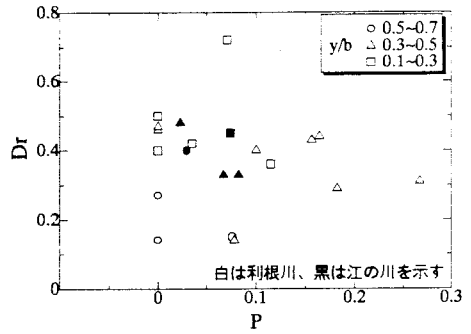


図-9 P-Dr と y/b の関係

4.2. 相対水深 Dr 、蛇行度 S 、位相差 P と最大流速発生位置 y/b の関係

利根川と江の川における各検討区間の y/b と相対水深 Dr 、蛇行度 S 、位相差 P の関係を図-8 と図-9 に示す。図中、白抜きは利根川、黒塗りは江の川でのデータを示している。S-Dr 関係を示す図-8 から、 S がほとんど 1.000~1.040 の範囲にある利根川では、 $0.5 \leq y/b \leq 0.7$ (図中○) は図中左下の $S \leq 1.015$ 、 $Dr \leq 0.3$ に分布しており、 S と Dr が大きくなるにつれて y/b が小さくなり、内岸側に最大流速が現れることが分かる。しかし江の川では、データが少なく明確な特性を示さない。この原因として、江の川のこの区間は図5に示すように低水路河岸沿いに水防林が多く存在し、低水路と高水敷の間の流れの出入りに変化を与えていることが挙げられる。図-9 から P-Dr と y/b の関係は S-Dr と y/b の関係ほど明確でない。本研究で定義した位相差では、高水敷幅の縦断方向変化を十分に捉えきれない為である。実河川の線形を示す指標としては、位相差より蛇行度が適している。

著者らの実験⁹⁾の S と Dr は (1.17, 0.37) と (1.10, 0.42) の2種類である。 Dr は2河川の洪水ピーク時とほぼ同程度の値であるが、蛇行度は大きいようである。他の研究者による実験も S の大きい範囲で行われており、実験結果を河道設計に活用するためには、 S の小さな移動床水路を用いた検討も必要である。

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。(1)洪水時に高水敷に水が乗っている時間は、低水路流下能力の大きい利根川で2-3日、小さい江の川で4-5日である。(2)河川の蛇行度は1.000~1.040に集中する。(3)江の川の $S \geq 1.070$ の区間において、 $Dr=0.45$ 、段丘に水が乗っている時間4-5日の洪水で、典型的な複断面的蛇行流れが生じていることが明らかになった。このとき主流は長時間にわたって低水路の内岸側に寄っていたことにより、洪水前後の河床形状から判断して内岸側の洗掘が見られた。(4)河道の線形を示す指標は、位相差より蛇行度が適している。(5)利根川においては、最大流速が低水路中央より外岸側に近づき単断面蛇行流れの特性を示すのは、蛇行度が1.015、相対水深が0.3以下の時である。江の川では水防林の影響で利根川のような明確な特性が示されない。

謝辞：本研究を進めるに当たり、建設省関東地方建設局、中国地方建設局、北海道開発局のそれぞれの河川計画課より貴重なデータを提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) B.B.Willems : Model studies of overbank flow from a meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.197~205, 1990.
- 2) B.B.Willems and : Stage dependency for overbank flow in meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.45~54, 1993.
- 3) 武藤・塩野ら: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 [40], pp.711~716, 1996.
- 4) 福岡ら:複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集投稿中
- 5) 福岡ら:複断面蛇行河道の低水路における水制配置法, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.622~623, 1996.
- 6) 福岡ら:堤防と低水路の法線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 [40], pp.941~946, 1996.
- 7) 福岡ら:江の川の川水防林の特性とその治水効果, 水工学論文集 [39], pp.501~506, 1995.
- 8) 福岡ら: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 [41], 1997.
- 9) 高山茂美著:河川地形, 5.4-3, 共立出版, 1974.