

洪水流の水理特性に及ぼす非定常性, 流路平面形, 横断面形の影響

EFFECTS OF UNSTEADINESS, PLANFORM AND CROSS-SECTIONAL FORM
OF CHANNELS ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF FLOOD FLOW

福岡捷二¹・渡辺明英²・岡部博一³・関浩太郎⁴

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Hirokazu OKABE and Koh-tarou SEKI

¹フェロー会員 Ph.D. 工博 広島大学教授 工学部第四類地域環境工学講座 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類地域環境工学講座 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工修 北海道開発局 石狩川開発建設部幾春別川ダム建設事業所 (〒060-0004 札幌市中央区北 4 条西 18-2)

⁴学生会員 広島大学大学院工学研究科 博士課程前期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

We have conducted laboratory flood experiments by applying the similarity law to real flood in meandering compound rivers. Comparing steady and unsteady flow in meandering compound channel with unsteady flow in meandering single channel, we investigated the hydraulic effects of plan and cross-sectional shapes of channel on flood flow.

In the case of a unsteady meandering compound channel flow, the discharge and velocity had two values for the same depth; on rising and falling stages. Comparing stage hydrographs for meandering compound channel and meandering single channel it was observed that, compound meandering channel had early response giving high values during rising stage and delayed response giving high values during falling stage. Also for both compound meandering channel and meandering single channel, increase of sinuosity and unsteadiness the maximum velocity occurred early on flood flow.

Key Words: flood flow, unsteady flow, meandering compound channel, plan-form, stage-discharge curve, velocity in main channel.

1. 序論

我が国の大河川の中下流域では、治水と環境への配慮から河道の横断面形状は主に低水路と高水敷からなる複断面形が採用されている。また、洪水流はその時間変化が緩やかであるという仮定のもとに、流れを準定常として扱うことが一般的である。その結果、最大洪水流量を与え、不等流計算から水位、流速を求めている。

河道が複断面蛇行形状を持つ場合、低水路と高水敷の間の流れの混合が起こり、単断面の場合と抵抗特性が大きく異なることが明らかにされている¹⁾。また、複断面直線流路の洪水流の検討から、流路の断面形は単断面形より複断面形の方が流れの非定常性の影響が顕著に現れることが示されている²⁾。複断面蛇行流路における流れと河床変動に及ぼす非定常性の検討も行われ、非定常流で起こっている水理現象は各相対水深

での定常流の重ね合わせとして考えてもよいことが示されている³⁾。本研究では、実河川で起こり得る河道条件、水理条件を与えて、複断面蛇行流路の水深、流速の変化を連続的に計測し、複断面河道の水理特性に及ぼす非定常性、平面形及び横断面形の影響を明らかにすることを目的としている。

2. 大型蛇行水路を用いた非定常流実験

(1) 実験条件

先ず、図-1(a)に示す単断面蛇行流路において実験を行うことにより、単純な横断面形を有する蛇行流路の洪水流の流下形態、特に非定常性の影響についての基本的な性質を理解する。これと(b)の複断面蛇行流路の場合を比較することにより複断面形状が洪水流の水理に与える影響を検討する。

さらに、(c)の移動床複断面蛇行流路を用いて、蛇

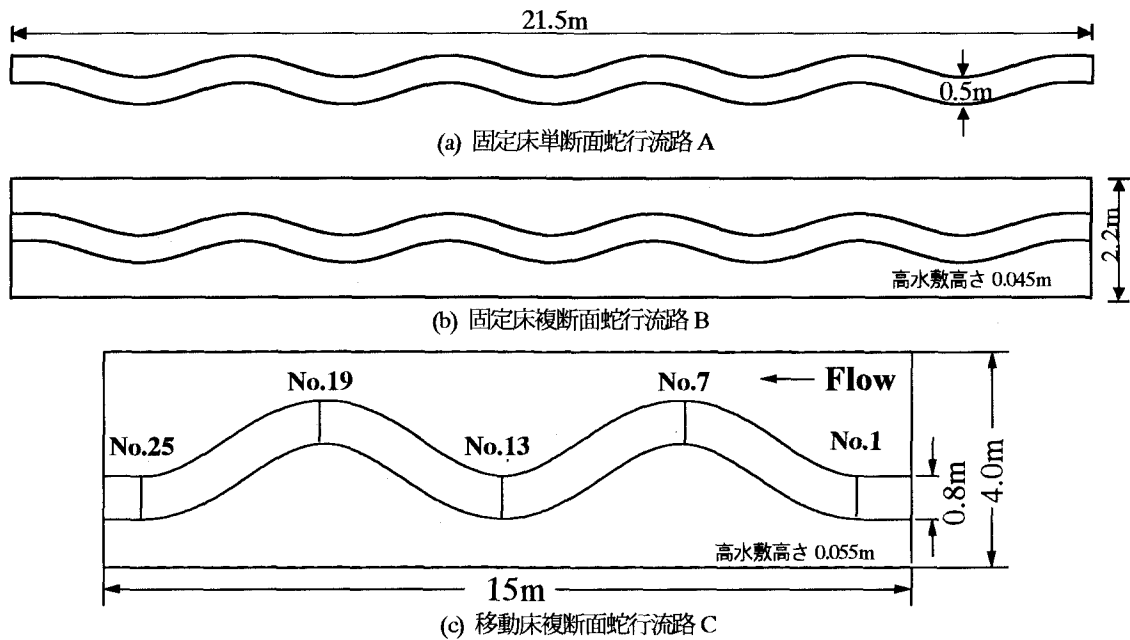


図-1 実験水路

表-1 実験条件

	低水路満杯流量(l/s)	最大流量(l/s)	最大相対水深	低水路河床条件	高水敷粗度係数	水路(蛇行度)	備考
Case1	7.0	12.0	0	平坦固定床	0.02	A(1.02)	単断面蛇行
Case2		30.0	0.51		0.02	B(1.02)	複断面蛇行
Case3		18.0	0.41		0.02		複断面蛇行
Case4		18.0	0.40		0.02	複断面蛇行, 二等辺三角形 ハイドログラフ	
Case5	13.0	56.0	0.38	平坦移動床	0.014	C(1.10)	複断面蛇行, n_b 小
Case6		56.0	0.38	Bankfull で 3 時間通水後の移動床	0.014		複断面蛇行, 履歴河床
Case7		56.0	0.40	平坦移動床	0.019		複断面蛇行, n_b 大

表-2 実河川の洪水流

河川名(観測所)	最大相対水深	最大流量	高水敷冠水期間
利根川 s56.8 (川俣)	0.53	7,800(m ³ /s)	47(hr)
(栗橋)	0.56	8,100(m ³ /s)	64(hr)

表-3 実験水路での実洪水換算

	最大相対水深	最大流量	高水敷冠水期間
Case2	0.51	17,000(m ³ /s)	13.3(hr)
Case3	0.41	10,200(m ³ /s)	13.2(hr)

行度, 低水路の河床条件, 高水敷粗度係数(n_b)が異なる条件で実験を行い, それぞれの影響を検討している。

表-1 に実験ケースを示す。単断面蛇行流路について1ケース, 複断面蛇行流路については条件の異なる6ケースについて実験を行っている。Case1 は単断面蛇行流路, Case2, Case3, Case4 は固定床複断面蛇行流路において, Case5, Case6, Case7 は移動床複断面蛇行流路においてそれぞれ行った実験である。

与えたハイドログラフを図-2(a)(b)に示す。低水路満杯流量を定常流量とし, その上にハイドログラフを重ねている。利根川の洪水諸量を表-2 に, 水路(a)の縮尺を 1/200 とした場合の複断面蛇行流路の実洪水相当諸量を表-3 に示す。これより, 水路に与えられたハイドログラフが実河川の洪水ハイドログラフをほぼ

再現し得ていることがわかる。

水路下流端の条件の与え方は次の通りである。固定床実験では下流端に空隙の大きなプラスチック製の多孔体(空隙率 91%)を設置し, 抵抗を付加することによって流量の増減に応じそれぞれの等流水深に近い水深となるようにしている。移動床実験では bankfull で等流となるように下流端の堰高を一定に設定している。

(2)測定方法, 測定箇所

流量ハイドログラフは流量制御装置付きの電磁流量計によって与えられる。水位計測には容量式波高計, サーボ式波高計を用い, 流速測定には X,Y 成分 I 型電磁流速計を用いている。

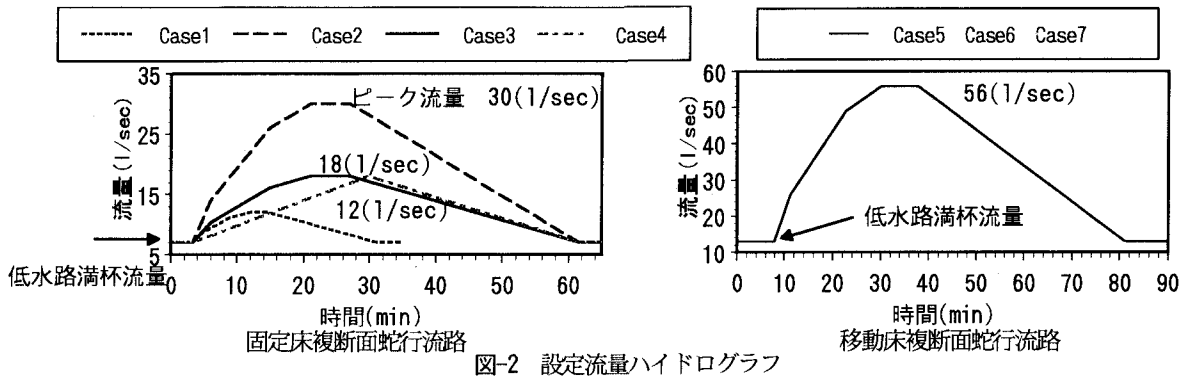


図-2 設定流量ハイドログラフ

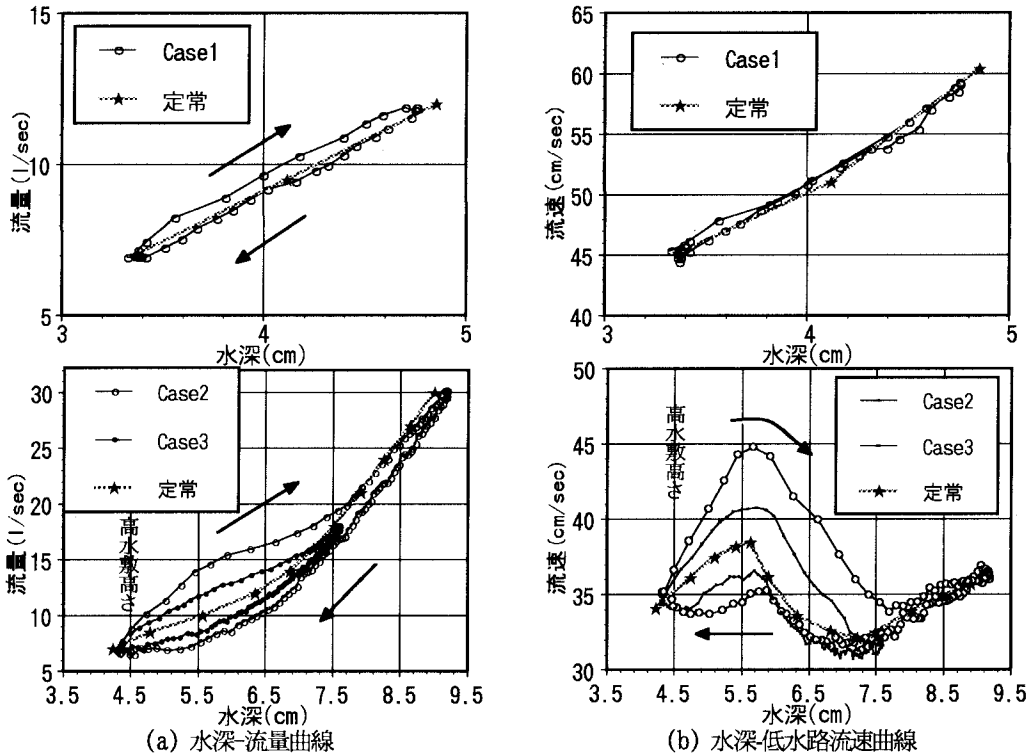


図-3 水深流量及び水深流速曲線

測定は水路中央断面において行っている。水深は低水路中央で測定し、流速は低水路（3点）、高水敷（3～5点）の水深の6割程度において1秒間隔で連続的に測定している。

3. 実験結果及び考察

(1) 非定常性の影響

各非定常実験と定常実験を比較するため、それぞれの水深と流量、及び低水路平均流速の関係を図-3(a),(b)に示す。水深は低水路中央水深値、流速は低水路3点の流速平均値を用いている。図中の→は時間の増加方向を示す。単断面、複断面ともにループを描くが単断面の場合増水期の流量は同じ水深に対し減水期よりも若干大きい。流量と水深の関係はほぼ線形関係をなす。一方、複断面蛇行流路の場合、その関係は単断面と大きく異なり非定常性と断面形の影響が顕著になる。そのループは単断面の場合よりも大きく、増水期と減

水期の同じ水深で流量が大きく異なる。

水深と低水路流速の関係について単断面蛇行流路では水深と低水路流速のピークが一致し、増水期と減水期でその関係はほとんど変わらない。しかし、複断面蛇行流路では、定常流の場合低水路満杯水深よりもやや大きい水深(5.5cm)で低水路の流速が一度ピークを示しその後減じ再び水深の増大とともに増大し最大水深で再び第二ピークを示している。非定常流の場合は定常流と同じ水深で更に大きな流速を発生する。そして、非定常複断面蛇行流路特有の大きなループを描く。

また、図4に高水敷流速をも考慮した断面平均流速と低水路水深との関係を示す。この断面平均流速とは低水路3点、高水敷5点の平均である。平均流速は低水路の最大流速発生時と同じ時点（相対水深 $Dr=0.18$ ）でピークを示し、そこから流水断面積の増加に伴い大きく減少する。そして、高水敷水深が増加するに従って再び平均流速は増大する。

(2) 洪水ハイドログラフの影響

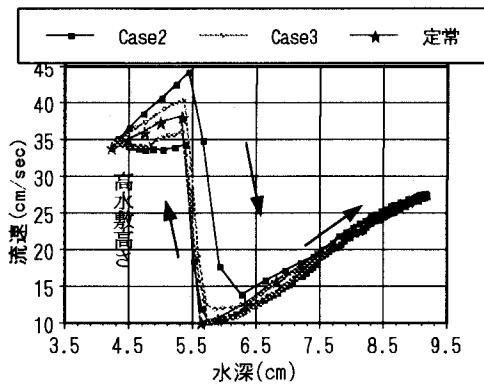


図-4 水深-断面平均流速曲線

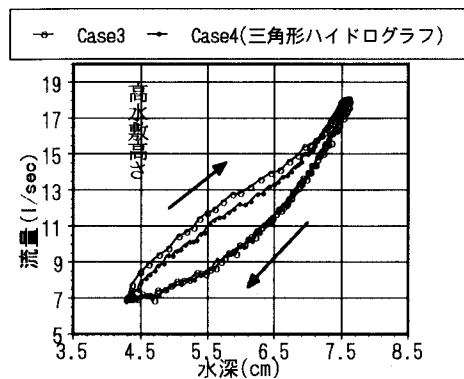


図-5 洪水ハイドログラフの水深-流量関係に及ぼす影響

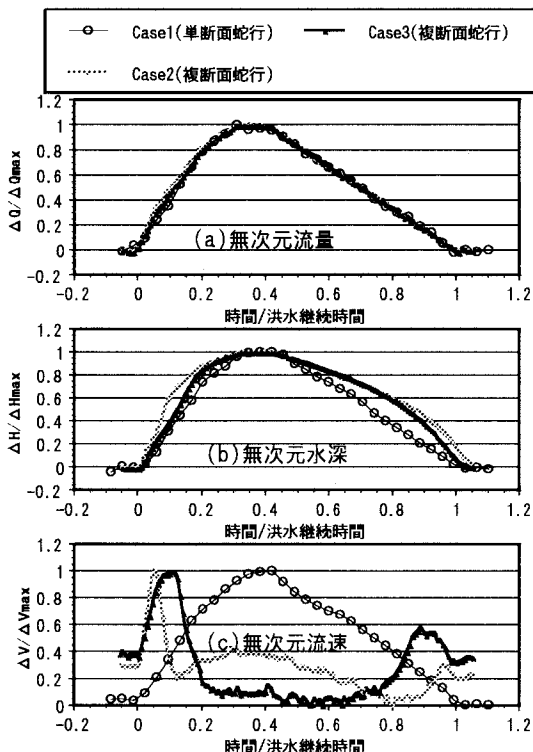


図-6 複断面蛇行流路と単断面蛇行流路の流下形態

水深-流量曲線のループ，すなわち増水期と減水期の違いはハイドログラフの形に起因すると考えられる。この影響を明確にするために，最大流量が等しいが増水期と減水期で対象な二等辺三角形のハイドログラフ (Case4) を与え，比較検討したものが図-5 である。

これより複断面蛇行流路の水深-流量曲線のループ特性は特に増水期の流量変化率に起因していると考えられる。図-3 に示すように減水期の水深-流量関係は Case2 と Case3 でほとんど異なることから，減水期の水深-流量関係はハイドログラフにほとんど依存しないことがわかる。

(3) 流路の平面形の影響

図-6 に単断面蛇行流路 (Case1) と複断面蛇行流路 (Case2, Case3) の流量，水深，流速について無次元化を行い各ケースを比較した図を示す。

洪水が低水路満杯流量から増加をはじめる時間を 0，再び低水路満杯流量まで戻る時間を洪水継続時間とし，

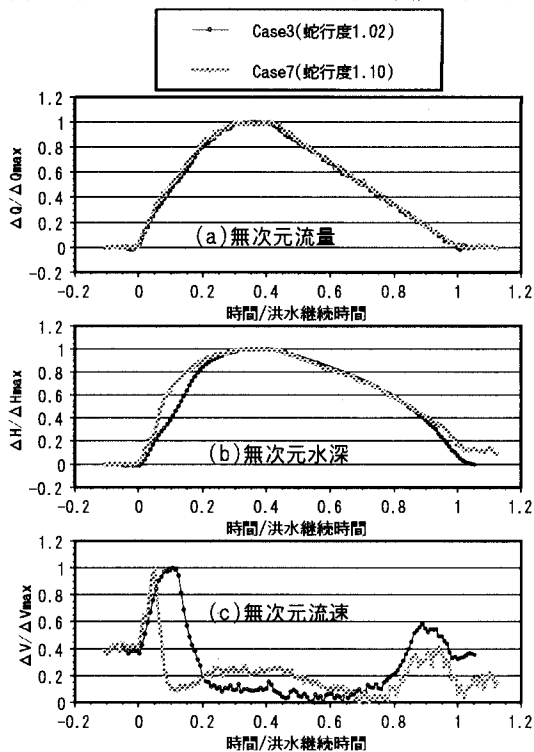


図-7 蛇行度の違いによる流下形態

各時間を洪水継続時間で無次元化している。流量，水深，流速に関しては，低水路満杯流量の値を 0 とし，それからの増分を最大増分値で無次元化している。

流量は各ケースとも，ほぼ相似形であるが，水深，流速の時間変化特性は単断面と複断面では大きく異なる。複断面の場合，単断面に比べて増水期に水深の上昇が速く，減水期では水深の減少が遅い。すなわち，複断面蛇行流路では洪水期間中高い水深が維持されていることがわかる。

流速については，単断面蛇行流路の場合，そのピークは流量，水深のピークとほぼ一致するのに対し，複断面蛇行流路の場合には高水敷冠水初期にあたる時間で鋭いピークを示している。これは，この時間帯に上流側からの高水敷の浸水が始まることにより高水敷粗度の影響が増加し，それによって水面勾配が増大したため引き起こされる現象である。また，複断面蛇行流路の Case2 と Case3 を比較すると流量増加率の高い Case2 のピークの発生が早いことがわかる。これは非

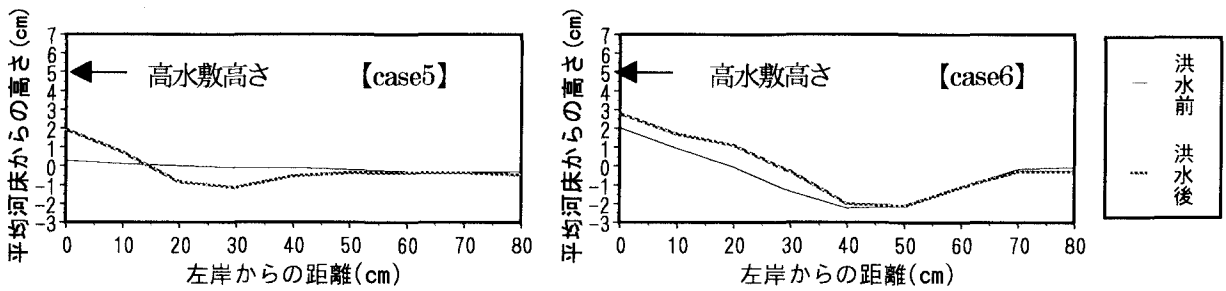


図-8 移動床水路における洪水前後の河床高

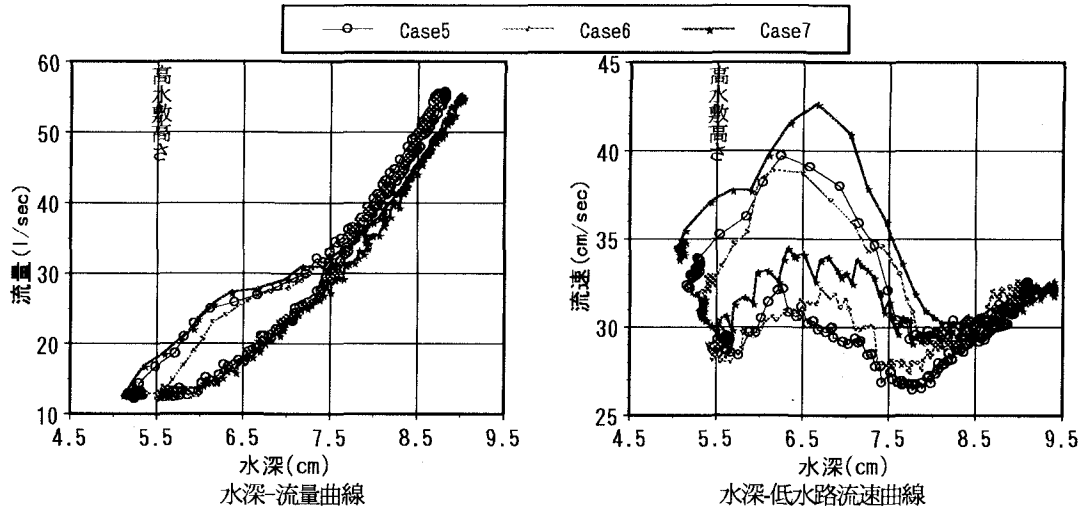


図-9 粗度、河床条件の違いによる比較

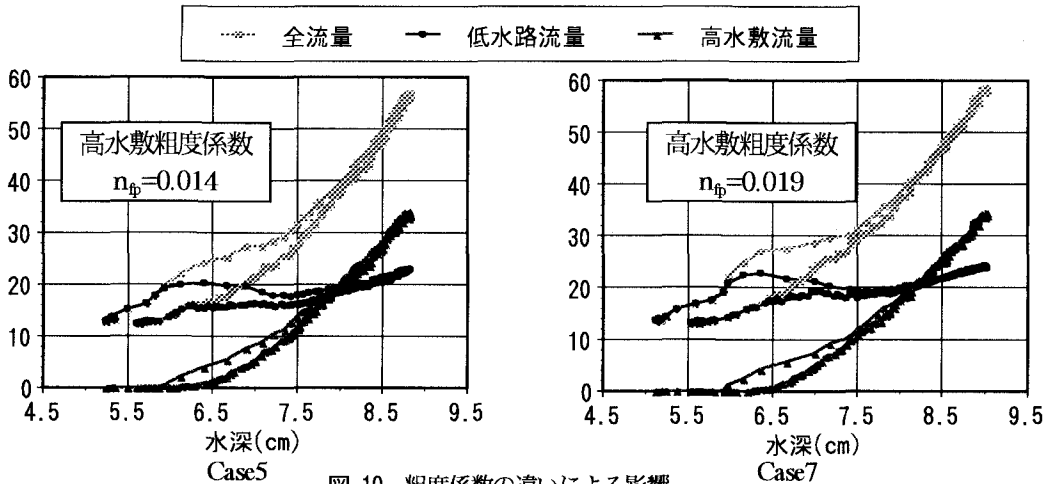


図-10 粗度係数の違いによる影響

定常性が強いほどピークの発生が早いことを示している。そして、複断面では高水敷冠水末期において再び小さなピークを示す。この高水敷冠水末期のピークは比較的小さな洪水条件の Case3 の方が顕著である。

(4) 低水路の蛇行度の影響

低水路平面形の影響を調べるため蛇行度 1.02 の Case3 と蛇行度 1.10 の Case7 について、前項と同様の方法で流量、水深、低水路流速に関して無次元化操作を行い図-7 で比較している。無次元流量については、ほぼ同様であるが両者の水深増加特性は異なる。蛇行度が大きい Case7 の方が増水期に水深の上昇が速いことが分かる。流速に関しても蛇行度の大きな Case7 は

Case3 と比較して流速のピークが明らかに速く発生している。これらのことから、複断面蛇行水路では低水路の蛇行度が大きいと低水路と高水敷の流れの交換が著しくなり、複断面蛇行形状の影響を大きく受けることになる。

(5) 低水路の河床形状の影響

次に実際の河川の河床形状に近い蛇行水路の水深-流量関係を検討する。低水路満杯状態で3時間通水し、河床形状を作った場合を Case6 とする。一方、平坦な移動河床を有する場合を Case5 とする。流速測定は洪水時の河床変動が小さい上流側断面(No.7)で行っている。図-8 に流速測定断面での一洪水時の河床高の変

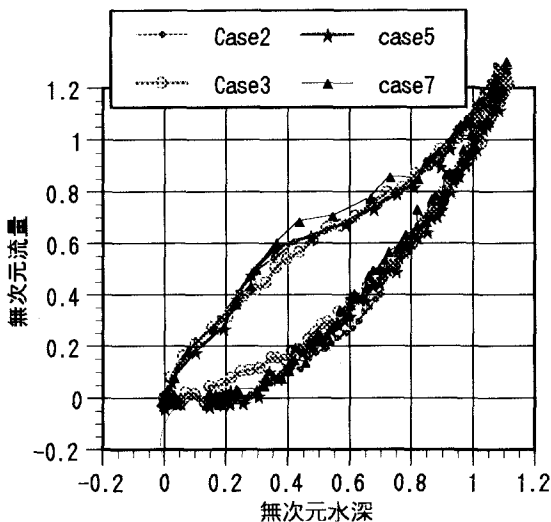


図-11 無次元水深流量曲線

化を示す。高水敷高さは低水路初期平均河床高から5.5cmである。洪水時の河床変動はCase5, Case6ともに小さく、Case5はほぼ平坦とみなすことができる。そこで、Case5とCase6を比較し、河床形状の影響を検討する。

図-9にCase5とCase6の水深-流量曲線、水深-低水路流速曲線を示す。洪水前後で図に示す程度の若干の河床変動が生じ、水深に差が生じたため、ループは閉じていない。水深-流量曲線において、Case6は河床の形状が流れの抵抗となるため、Case5と比較して相対水深が低い段階では水深を上昇させる結果となる。しかし、高水敷水深が増加すると低水路河床形状の影響が小さくなりCase5とCase6はほぼ同じような傾向をたどる。また、水深-流速について河床が平坦なCase5の方が若干流速が速くなっている。このように履歴河床が洪水流に及ぼす影響の程度は低水路幅と高水敷幅の比や相対水深の大きさに関係し、実河川ではこの影響は大きいと思われる。

(6)粗度係数の影響

ここでは高水敷粗度係数の大きさの違いについての考察を行う。図-9においてCase5(高水敷粗度係数0.014)とCase7(0.019)を比較する。水深-流量曲線を見るとCase7のループが若干大きくなっている。また、Case7の水深-低水路流速曲線のループはCase5よりも最大流速の値が上昇しており、全体的に大きな値を示している。図-10は低水路、高水敷においてそれぞれの水深-流量関係を求めたものである。これらの流量は低水路、高水敷においてそれぞれ測定された流速分布から求められている。この結果、低水路、高水敷共にループを描くが、Case5と比較してCase7では水深6.2cmより大きい水深のところでは低水路流量の割合が増加していることがわかる。これは高水敷粗度の

増加によって相対的に低水路に流れが集中したためである。

(7)無次元化した水深-流量曲線

図-11は各ケースのそれぞれの水深と流量について水深-流量曲線のループが閉じる箇所の流量と水深の値でそれぞれ無次元化し、そのループの形を比較したものである。蛇行度の大きなCase7はCase3と比較して若干大きなループを示している。低水路と高水敷の混合を活性化させる蛇行度の影響はこの図にも現れている。また、それぞれのケースは比較的似た形状を示し、特に減水期にいたってはほぼ同一の関係を描いている。

4. 結論

単断面蛇行流路と複断面蛇行流路を用いた実験を行い、流路の平面形、横断面形と洪水流の非定常性が複断面蛇行流路の洪水流の水利特性に与える影響を明らかにした。主な結論は以下の通りである。

- 1.非定常単断面蛇行流では水深-流量曲線が増水期、減水期でその差は小さくほぼ線形関係となる。また、最大流速は流量、水深のピークとほぼ一致する。しかし、非定常複断面蛇行流では同一水深に対して増水期と減水期で流量が異なり、ループを持つ。また、増水期に水深の上昇が早く、減水期では水深の下降が遅い。低水路及び断面全体の平均流速の最大値は高水敷に水がのってまもなく発生し、同水深の定常流の場合よりも大きな値を示す。
- 2.非定常複断面蛇行流では、非定常性が強くなるほど、また、蛇行度の大きな場合ほど、最大流速のピークが早く発生し、増水期の水深増加率が大きくなる。
- 3.低水路の河床変動及び高水敷粗度の増大による抵抗増は特に増水期の水位を上昇させる。

参考文献

- 1)福岡捷二, 大申弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集 No.579/II-41, pp.83-92, 1997.
- 2)富永晃宏, 長尾正志, 三尾憲史, 劉建: 複断面水路を通過する洪水波の水利特性, 水工学論文集第38巻, pp.443-448, 1994.
- 3)岡田将治, 福岡捷二, 藤原昌典: 複断面蛇行流路の非定常流れと河床変動, 第53回年次学術講演会講演概要集, 第II部, pp.666-667, 1998.
- 4)福岡捷二: 洪水流と土砂水利の新展開, 水工学シリーズ 99-A-2, ppA-2-1-A-2-25, 1999.

(1999.9.30 受付)