

河道における洪水流の貯留機能とその評価

福岡捷二¹・渡邊明英²・關浩太郎³・栗栖大輔⁴・時岡利和⁵

¹フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 社会環境システム工学専攻(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 広島大学大学院助教授 社会環境システム工学専攻(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 工修 清水建設株式会社 東京支店土木第3部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

⁴正会員 工修 都市基盤整備公団 大阪国際文化公園都市開発事務所工事課
(〒562-0031 大阪府箕面市小野原東6丁目2番1号)

⁵正会員 独立行政法人土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

我が国の洪水流は、洪水位上昇時の時間変化率が大きい特徴を持っている。さらに、大河川中下流域の河道横断面形状は低水路と高水敷からなる複断面形状が採用されている。このことは複断面河道における洪水流の水理現象は、洪水ごと、河川ごとさらには、河川の区間ごとに異なることを示しており、複断面河道の洪水流を深く理解することが必要である。本文では、複断面河道における洪水流の非定常水理現象に焦点を当て、洪水流の水理現象のうち、特に河道内における貯留に及ぼす河道特性と洪水流特性の影響について詳細に検討した。これより、洪水流の非定常性、河道の平面形、横断面形状などの断面形状および下流端条件が、洪水流の流下に与える影響を明らかにし、洪水流の河道内「貯留」の評価を行い、今後の治水計画の新しい方向性を示した。

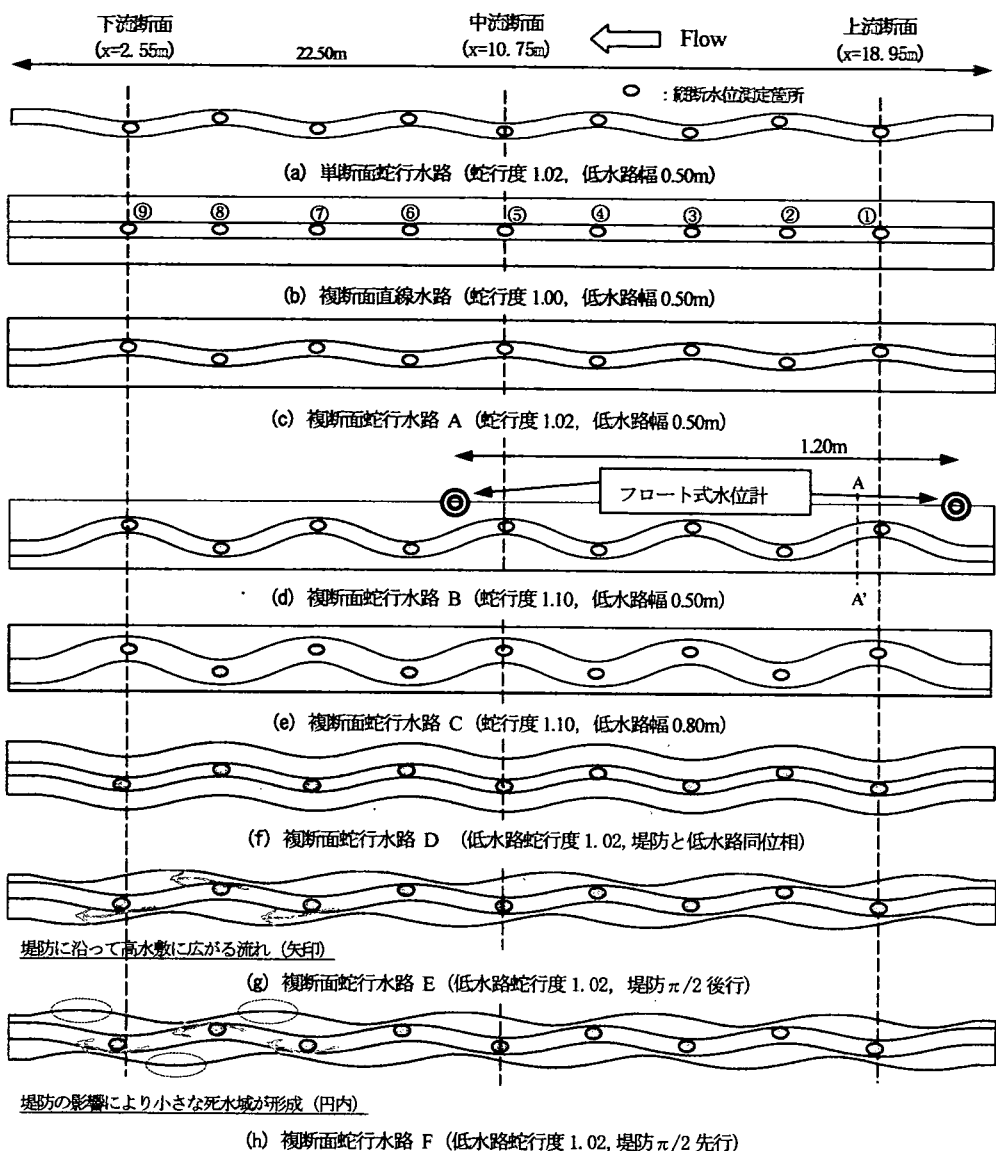
Key Words: flood flow, compound meandering channel, straight compound channel, peak discharge attenuation, storage in channels, main channel sinuosity, boundary condition

1. はじめに

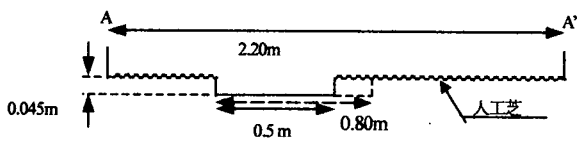
我が国の河川の治水施設整備は十分と言えないまでも洪水対策は着実に進展してきた。治水事業では洪水流を出来るだけ早く無害な形で海へ放出することが第一に考えられてきた。その結果、強固で連続的な堤防が築かれ、市街地ではコンクリート護岸を持つ河道が形成されることにより、川らしさが損なわれる結果となった。近年では、地域の人々の意見を反映した川づくりが重視され、1997年の河川法改正によって「治水」「利水」の他に「河川環境の整備と保全」も目的に加わり、新しい河川計画制度による河川整備が検討されている。これらの計画策定にあたって、流域における河川のあるべき姿、安全性、治水と環境の調和等を十分に考慮する必要がある¹⁾。

我が国の大河川中下流域では、河道横断面形状は、主に低水路と高水敷とからなる複断面形状が採用されている。低水路が蛇行している複断面河道では、低水路と高水敷間の流れの混合により、単断面の場合とは流れの3次元構造や抵抗特性が大きく異なることが明らかにされている²⁾。しかし、洪水流特性、河道特性と河道内貯留に関する水理現象の理解が十分進んでいないため、河川が有す

る洪水流の貯留現象を水理的な考慮に基づいて治水計画に取り込むまでには至っていない。流量が時間的に変化する洪水流においては、洪水流の非定常性と河道の平面形状や横断面形状の影響を受けて河道内で貯留が生じ、洪水の流下に伴ってピーク流量の通減などハイドログラフの変形が生じる^{3),4)}。また、水位上昇期における高水敷への氾濫と水位下降期における高水敷から低水路への流水の落ち込みはハイドログラフを大きく変形させ、顕著な貯留効果をもたらすことが、これまでの研究から明らかになっている^{5),6),7),8)}。従来の一次元不定流解析では、低水路と堤防の平面的な線形の違いに起因した水平混合や高水敷への乗上げ・高水敷からの落ち込み時に生じる横断的な運動量輸送によって引き起こされる抵抗特性の変化や河道内における貯留の効果、その結果として生じるハイドログラフの変形等を十分に表現し得ない。複断面河川流が持つ特徴を表すためには少なくとも2次元不定流解析が必要となる⁵⁾。一方、大河川における計画流量は、貯留現象と時間遅れを考慮した貯留関数法等の水文学的手法によって算出されている。しかし、この手法では様々な波形を持つ出水に対して、流下に伴うハイドログラフの変形とピーク流量の通減などを評価できない。



実験水路平面図



複断面水路断面図 (水路 A, B, C)

図-1 固定床大型実験水路

洪水上昇期の水位変化率の大きい我が国の洪水流では、広い高水敷と複雑な平面形を持つ大河川の貯留効果は無視し得ない大きさになるものと考えられる⁵⁾。さらに、洪

水流が潮汐のある海に流入する場合や 2 つの大小河川が合流しているなど、時間的に下流端境界条件が変化する場合、これらの下流端境界条件の影響を受けて感潮域や

表-1 実験水路諸元

実験水路	水路長(m)	全水路幅(m)	低水路幅(m)	高水敷高さ(m)	水路床勾配	蛇行度	低水路蛇行波長(m)	備考	
単断面蛇行水路	21.50	0.50	—	—	1/1000	1.02	4.10	—	
複断面直線水路		2.20	0.50	0.045		1.00	4.10		堤防は直線
複断面蛇行水路 A						1.02			
複断面蛇行水路 B						1.10			
複断面蛇行水路 C						0.80			
複断面蛇行水路 D		1.30	0.50	0.045		1/1000	1.02	4.10	堤防も蛇行
複断面蛇行水路 E									
複断面蛇行水路 F									

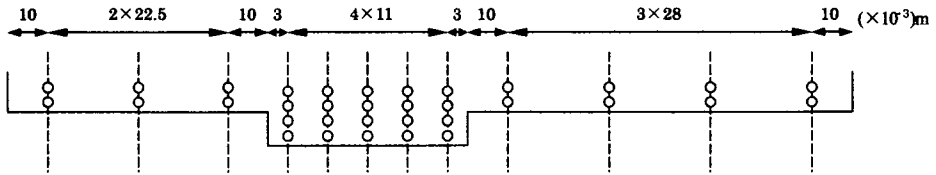


図-2 中流断面での流速分布測定点 (例 複断面蛇行水路 A)

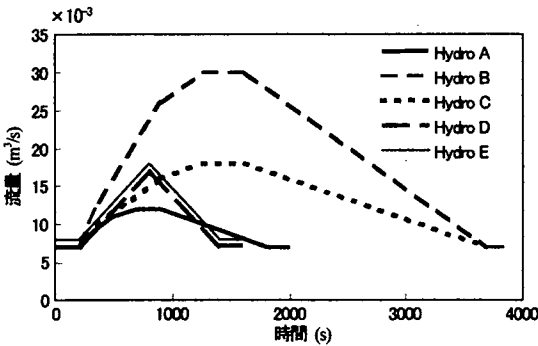


図-3 設定ハイドログラフ

合流点水位影響域ではかなりの貯留が生ずる。これらの影響領域の貯留量を定量的に評価し、河道計画に役立つ方法について検討する必要がある。

以上のような背景のもとに、本研究では実河川で起こり得る河道条件、水理条件、下流端条件について複断面水路の水理特性、特に洪水流の河道内貯留とピーク流量の低減機構に及ぼす洪水流の非定常性、平面形、横断面形、下流端条件の影響を実験によって明らかにする。これによって治水計画の新しい展開と本研究成果の適用可能性を示すことを目的としている。

2. 大型水路を用いた非定常流(洪水流)実験

(1) 実験水路

図-1および表-1に、本研究で用いた実験水路及びその諸元を示す。本研究では単断面蛇行水路、複断面直線水路、低水路の蛇行度・低水路幅が異なる三種類の複断面蛇行水路 (A, B, C)、及び堤防と低水路の蛇行の位相差がそ

れぞれ異なる複断面蛇行水路 (D, E, F)を用いている。単断面蛇行水路(図-1(a))は水路長 21.50 m, 水路幅 2.20 m の鋼製可変勾配開水路の中に、一定の蛇行度をもつ連続した 5 波長からなる河床勾配 1/1000 の木製の低水路部と高水敷部からなる複断面水路の低水路部に、アクリル製の仕切り板を入れて水深を変化できるようにした水路である。複断面水路は、高水敷に人工芝(粗度係数 0.018)を張り付けることによって、高水敷の粗度係数を低水路粗度係数 0.012 よりも大きくし、低水路蛇行度は 1.00 (直線)(図-1(b)), 1.02 (図-1(c)), 1.10 (図-1(d), (e))の三種類を用いている。複断面蛇行水路 A, B は低水路幅を 0.50 m, 水路 C は 0.80 m に設定している。さらに、堤防と蛇行低水路に位相差がある複断面蛇行水路(図-1(f), (g), (h))を用いている。

単断面、複断面、いずれについても水路下流端には、空隙の大きなプラスチック製の多孔体(空隙率 91%)を設置することにより、十分な抵抗を付加させることによって、通水中の各時間の水深が下流端で低下背水とならないように注意した。

(2) 測定方法

図-1 に示した大型水路を用い、洪水流の流下機構、貯留量やピーク流量を評価する実験を行った。水路上流端に接続する管路に設置された電磁流量計および自動開閉バルブをコンピューター制御することにより、あらかじめ設定したハイドログラフを持つ洪水流を流下させる。

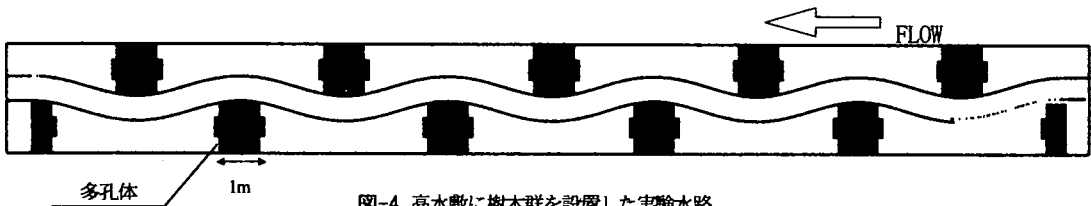
水位はサーボ式波高計を用い、図-1 に示した 9 箇所測定した。流速は I 型電磁流速計を用い、 $x = 1075\text{cm}$ の断面において図-2 に示した測定点で測定した。水位、流速の測定は何れも洪水継続時間中、1 秒間隔で連続的に行った。

表-2 実験条件

ケース	水路形状	高水敷 粗度係数	低水路蛇行度	ハイドログラフ	低水路 満杯流量 ($\times 10^{-3}$) m ³ /s	ピーク流量 ($\times 10^{-3}$) m ³ /s	最大相対水深
Case1	単断面蛇行	—	1.02	Hydro A	—	12.0	—
Case2	複断面蛇行 A	0.018		Hydro B	7.0	30.0	0.51
Case3				Hydro C		18.0	0.41
Case4				Hydro D		17.0	0.40
Case5	複断面蛇行 A 樹木群設置		0.41				
Case6	複断面直線	1.00	1.10	Hydro D	7.0	17.0	0.36
Case7	複断面蛇行 B 下流端水位自由	0.018					0.42
Case8	複断面蛇行 B 下流端水位調節		1.10	Hydro E	8.0	18.0	0.42
Case9	複断面蛇行 C	1.02	HydroD				
Case10	複断面蛇行 D						
Case11	複断面蛇行 E						
Case12	複断面蛇行 F						

表-3 ハイドログラフの特性

ハイドログラフ	ピーク流量 $\times 10^{-3}$ (m ³ /s)	最大相対水深	高水敷 冠水時間(s)	増水時間(s)	実河川換算 ピーク流量(m ³ /s)	実河川換算 高水敷冠水時間(h)
Hydro A	12.0	—	—	500	6792	—
Hydro B	30.0	0.51	3500	1000	16980	13.6
Hydro C	18.0	0.41	3500	1000	10188	13.6
Hydro D	17.0	0.4	1200	800	9622	4.7
Hydro E	18.0				10188	
太田川(矢口第一) S. 58洪水	—	0.34	—	—	3500	6.0
利根川(栗橋) S. 58洪水	—	0.56	—	—	8100	64



(3) 実験条件

本研究では異なる 12 ケースの実験を行い(表-2), それぞれの結果を比較検討している。また用いた 5 種類のハイドログラフを 図-3 に示し, それぞれの諸元とフルード相似則(縮尺 1/200)による実河川換算値, 利根川と太田川での実際の洪水特性を表-3 に示す。これにより実験で用いたハイドログラフの特性は実河川の洪水ハイドログラフに概ね対応していることがわかる。

Case 1 は単断面蛇行水路での実験であり, 他の複断面蛇行水路に対する洪水流特性の違いを検討する。Case 2 はピーク流量の大きいハイドログラフを用い, 定常流での実験結果及び Case 3, Case 4 と比較し, 非定常性の影響を評価する。Case 5 では複断面蛇行水路において高水

敷上に樹木群に見立てた空隙率 91%の多孔体を設置し(図-4), 樹木群が河道内貯留に及ぼす影響を調べる。

Case 6 は複断面直線水路での実験であり, Case 7 の複断面蛇行水路 B 及び Case 4 の複断面蛇行水路 A と比較することにより蛇行度の違いが河道内貯留に及ぼす影響を検討する。低水路幅の異なる Case 7 と Case 9 を比較することにより, 低水路幅の違いが河道内貯留に及ぼす影響を検討する。なお, Case 7, Case 9 の比較においては同じ相対水深で実験を行う必要があり, 低水路容積の大きい Case 9 では Hydro C と相似形で若干流量の多い Hydro E を流下させる。

Case 8 では水路下流端に設置してある可動堰を制御することにより, 洪水期間中, 河道の下流端境界条件の変

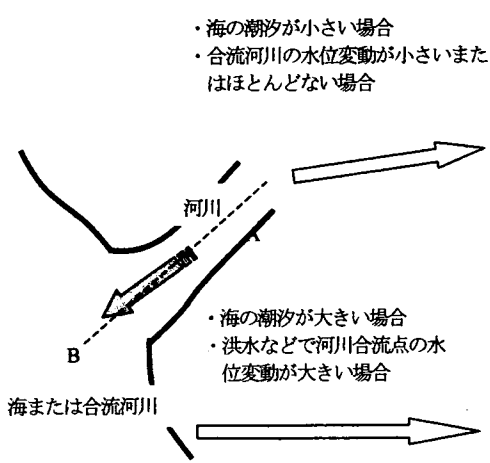


図-5 河川の合流部、河口域の課題

化が河道内貯留に及ぼす影響を検討している。図-5には本研究が対象としている境界条件が変化する2つのケース、すなわち中小河川が大河川に合流することによる中小河川への背水に伴う貯留及び感潮域での貯留の課題を示す。図-6は、これらの現象を実験室でシミュレートするための下流端境界条件の与え方を示している。本来河川の洪水は、程度の異なる不等流・不定流状態となっており全ての条件(不等流・不定流条件)を考慮することは出来ない。そこで検討のための基準として洪水の各時間での流量に相当する等流状態が下流域で起こっているように、下流端条件を制御し河道内貯留量の検討を行う。図-1(d)に示した2つのフロート式水位計で測定した水位データを基に洪水期間中一秒毎の二点間の水面勾配を算出し、制御プログラムを通して水路下流端に設置してある可動堰を調節することによって、算出された水面勾配が水路床勾配と同じほぼ1/1000を保持するように堰高を制御している。以上の実験は、いずれも堤防法線が直線の場合である。

本研究では、堤防法線形と低水路が同位相及び位相差がある形で蛇行している場合についても検討を行った。Case 10では堤防と低水路が同位相(図-1(f)), Case 11では堤防が $\pi/2$ 後行(図-1(g)), Case 12では堤防が $\pi/2$ 先行(図-1(h))になるように高水敷上にアクリル製蛇行堤防を設置している。堤防が直線的なCase 4とCase 10, Case 11, Case 12を比較することによって河道内貯留量に及ぼす堤防法線形及び低水路蛇行との位相差の影響を検討した。

3. 河道における洪水流の貯留効果の検討

(1) 非定常流(洪水流)と定常流との比較

非定常流と定常流における水理現象の違いを明確にす

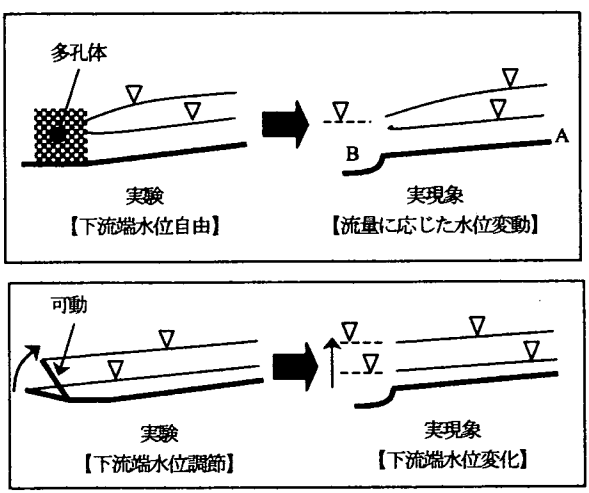


図-6 下流端境界条件変化と実現象との対応関係(河川縦断面)

るためにCase 1, 2, 3の非定常実験に先立ち、それぞれの水深・流量、水深・低水路平均流速の関係を調べた。図-7(a), (b)は、それぞれの水深と流量、および水深と低水路平均流速の関係を示す。図中の矢印は、洪水の増水期から減水期への変化過程を示す。一樣断面水路での定常流では水深に対する流量、流速の関係は一義的に決まるが、非定常流では、単断面、複断面蛇行水路ともに、水深に対する流量、流速の関係はループを描く。すなわち単断面の場合、同じ水深に対する増水期の流量は減水期よりも若干大きい、流量と水深の関係はほぼ線形をなす。一方、複断面蛇行水路の場合、洪水流の非定常性と断面形の影響が顕れ、ループの幅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は流量が大きく異なる。相対水深 Dr (高水敷水深/低水路全水深)がある大きさ以上($Dr \geq 0.4$)になると、高水敷上流れは低水路線形の影響が小さくなることにより流れの直進性が高くなり、高水敷の抵抗が増大する。このため、単断面蛇行流れに近い流況となり、ループの幅は著しく小さくなる(図-7(a))。

水深と低水路流速の関係を図-7(b)に示す。単断面蛇行水路では定常流と非定常流のピーク流速が一致し、増水期と減水期で両者の関係はほとんど変わらない。

しかし、複断面蛇行水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で低水路の流速が一度ピークを示し、その後減じて再び水深の増大とともに増大し、最大水深で再びピークを示している。一方、非定常流の場合には、複断面形の影響が顕著となり、定常流と同じ水深で低水路流速はさらに大きくなり、非定常複断面蛇行流に特有の大きなループ形を描く。

(2) 単断面蛇行水路と複断面蛇行水路における洪水流

単断面蛇行水路での実験(Case 1)と複断面蛇行水路での実験(Case 2, 3)で得られた流量-時間、水深-時間、

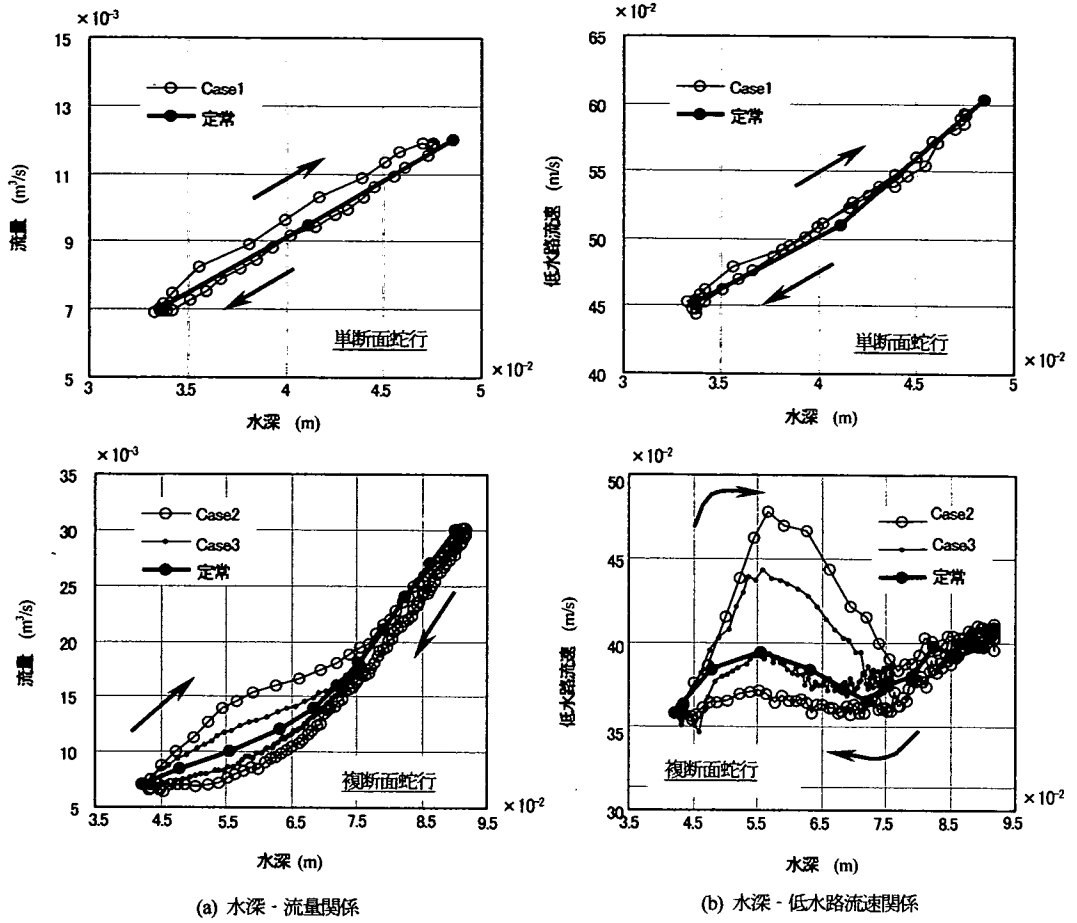


図-7 水深 - 流量および水深 - 流速関係の比較

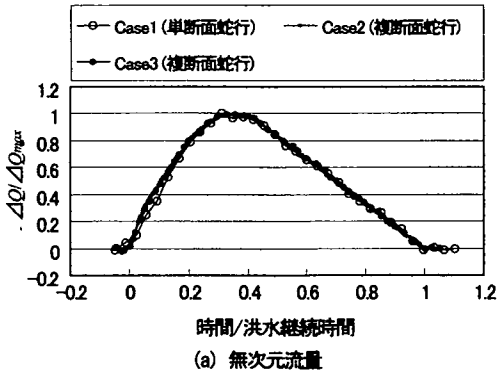
低水路流速-時間の関係をそれぞれ無次元化し、図-8(a), (b), (c)に示す。ここでは、洪水流が低水路満杯流量から増加を始める時間を初期値0とし、再び低水路満杯流量まで戻るまでの時間を洪水継続時間としている。各時間を洪水継続時間で無次元化し、流量、水深、低水路流速に関しては低水路満杯流量時でのそれぞれの値を0とし、それからの増分値 ΔQ を最大増分値 ΔQ_{max} 等で無次元化している。

与えられた無次元流量ハイドログラフは、各ケースともほぼ同じであるにもかかわらず、結果としての水深、流速の時間変化特性は、単断面蛇行水路と複断面蛇行水路で大きく異なる。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、減水期では水深の低下が遅い。すなわち、複断面蛇行水路では洪水期間中高い水深が維持されており、単断面蛇行水路に比べて水路内で大きな貯留が生じていることがわかる。低水路流速についてみると、単断面蛇行水路では流量ハイドログラフと水深ハイ

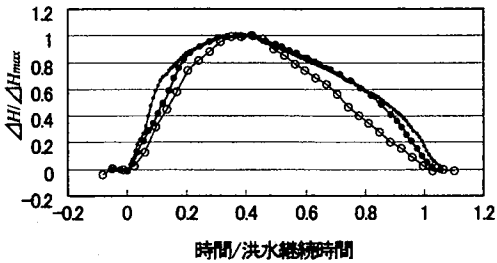
ドログラフの変化の過程がほぼ一致するのに対して、複断面蛇行水路の場合には高水数冠水の比較的早い時間帯で鋭いピークが現れる。これは、浅い高水数水深では急激な抵抗増大のため、流れが低水路に集中するためである。その後急激に減じ、高水数冠水末期に再び浅い高水数水深となるため、第二のピークを示す。上昇時と下降時の流量変化率の差により、ピーク流速の大きさに差が生じている。

(3) 洪水流の非定常性が河道内貯留に及ぼす影響

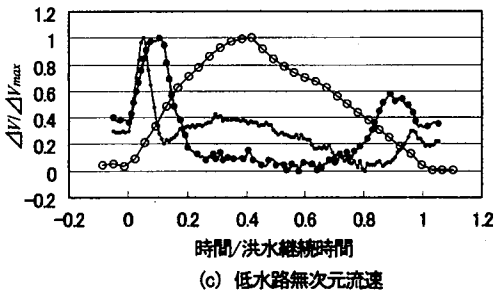
図-9、図-10にCase3 (Hydro C 流下), Case4 (Hydro D 流下)の洪水流について縦断水位の時間変化を示す。増水期(実線)と減水期(破線)で最下流端の水位が同じになるときのそれぞれの時間における水面形状を示している。これらの図から、増水期は水面勾配が大きく、減水期には水面勾配が小さいことがわかる。また洪水波形が上流から伝わってくる状況が、水面形の折れ曲がり点の下流への



(a) 無次元流量



(b) 無次元水深



(c) 低水路無次元流速

図8 複断面蛇行水路と単断面蛇行水路
における洪水流下形態の違い

移動で判断できる。任意の2つの時間における縦断水面形から、その時間内での水路内の貯留量 dS/dt を求め、この dS/dt と上流断面 ($x=1895$ cm) で与えたハイドログラフ $Q_{in}(t)$ から、下流断面 ($x=255$ cm) での流量ハイドログラフ Q_{out} を式(1)より求めることができる。

$$Q_{out} = Q_{in} - \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

このようにして求めた Q_{out} と Q_{in} の関係を図-11に示す。洪水流は流下に伴い、低水路の線形や高水敷粗度、高水敷上の流れと低水路の流れの混合による影響を受け、下流断面ではピーク流量の低減、ピーク流量発生時刻の遅れおよび洪水継続時間の延長といった波形の変形を生じている。このような波形の変形は、非定常性の高いHydro Dで顕著である。流量ハイドログラフの時間的な遅れ、および最大流量の低減は、洪水流の水路内での貯留から

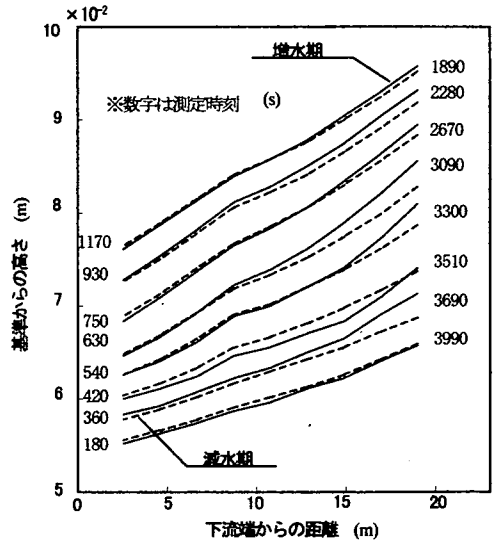


図9 縦断水位 (Case 3)

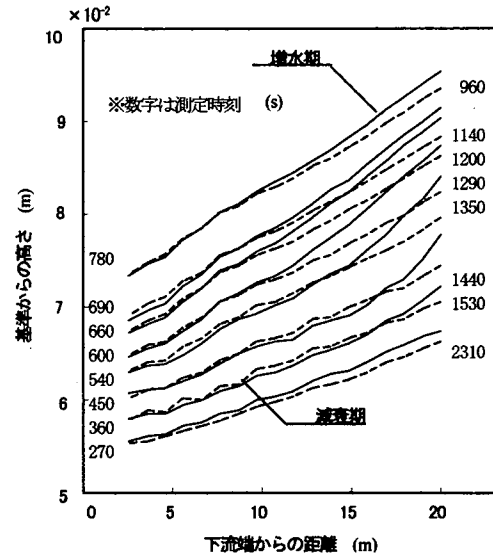


図10 縦断水位 (Case 4)

起こっていることは明らかである。単位時間あたりの貯留量 dS/dt は、上流断面から流入する流量 Q_{in} から流出する流量 Q_{out} を差引くことによっても得られる。しかし、下流での流量観測値 Q_{out} よりも水面形の観測値のほうが精度の高い測定が出来るので、本研究では、水面形の時間変化から貯留量を求め、 Q_{out} を計算から求めている。

図-12は、この貯留量 dS/dt の経時変化を上流断面からの流量 Q_{in} に対する量 $(dS/dt)/Q_{in}$ で示したものである。 $(dS/dt)/Q_{in}$ が正の区間では流入流量 Q_{in} に対し流出流量 Q_{out} の値が下回り、洪水流が水路内に貯留される。これに続く負の区間では Q_{in} が Q_{out} の値を下回るために、水路内に貯留されていた流量は流出することになる。Hydro

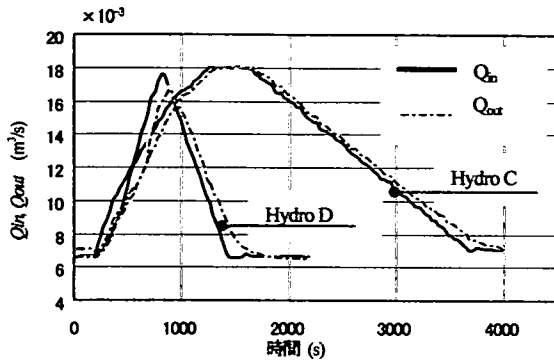


図-11 上流と下流断面での流量の比較

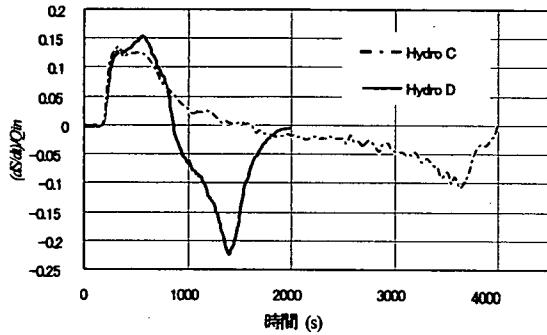


図-12 流入流量に対する dS/dt の割合

D 流下時では、ピーク流量流入時での dS/dt は Q_{in} に対して 5%であり、最大値は 15%もの値を示している。

(4) 樹木群が河道内貯留に及ぼす影響

図-13は、図-4に示す方式で樹木群を配置した Case 5 の縦断水位分布を示す。また図-14には、水路中央区間(下流から 1485 cm-665 cm 区間)の水深と水面勾配の経時変化を示す。樹木群を配置した Case 5 は、樹木群の存在しない Case 4 の水面形(図-10)と比較して水面勾配の増大が顕著である。水面勾配のピークの発生は、樹木群のない Case 4 では複断面蛇行流れの特徴である高水敷上の流れと、低水路の流れの混合が大きい時間帯(水深が 5.5 cm-6.0 cm となる時間帯)で現れるのに対し、Case 5 では樹木群の存在の影響すなわち流れに及ぼす抵抗が最も大きくなるピーク水深付近で現れている。

図-15、図-16に、樹木群が存在する場合の水路中央断面における水深-流量関係と水深-低水路平均流速関係を示す。Case 5 では樹木群の影響により、水面勾配が大きくなるために、Case 4 に比べて水深-流量関係は大きなループを描く。つぎに、水深-低水路平均流速関係を見ると、Case 4 では複断面蛇行流れの混合の影響が大きい水深(5.5 cm-6.5 cm)で水面勾配がピークを迎え、低水路平

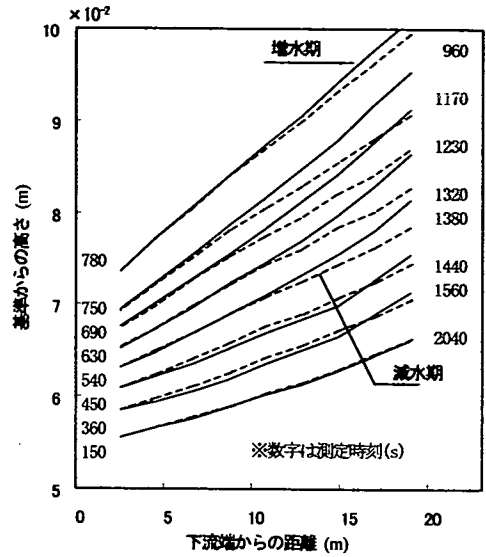


図-13 縦断水位 (Case 5)

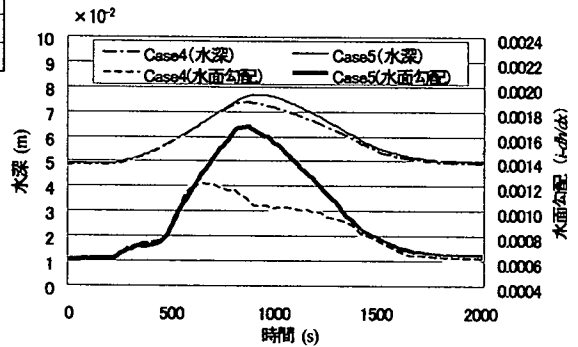


図-14 水深と水面勾配の経時変化

均流速も同じ時間で流速のピークを示している。一方、Case 5 では高水敷水深の増加と共に樹木群の抵抗が増加していくため、水面勾配、水深の最大付近で低水路流速のピークを迎えている。

図-17は、Case 4、Case 5 の流入流量 (Q_{in})、流出流量 (Q_{out}) ハイドログラフを示す。これを見ると、Case 5 では下流端におけるピーク流量の低減量は、Case 4 の約 2 倍の量となっている。図-18は、流入流量 (Q_{in}) に対する貯留量 dS/dt の時間変化を示す。樹木のある Case 5 は Case 4 と比較して、 Q_{in} に対する dS/dt の割合が大きく、増水期では常に 12~13%の洪水流を貯えており、上流断面でピーク流量が生じる時間においては、Case 4 では Q_{in} に対して 6.2%の dS/dt であったのに対し、Case 5 では 10.7%もの値を示している。樹木群は河道における洪水貯留量の増加とピーク流量の逓減をもたらしていることがわかる。

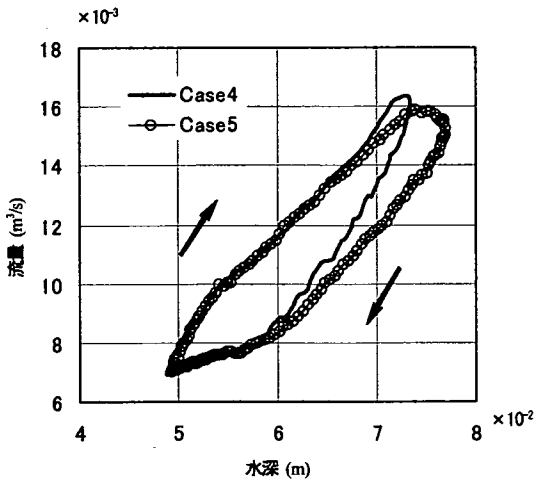


図-15 水深 - 流量関係

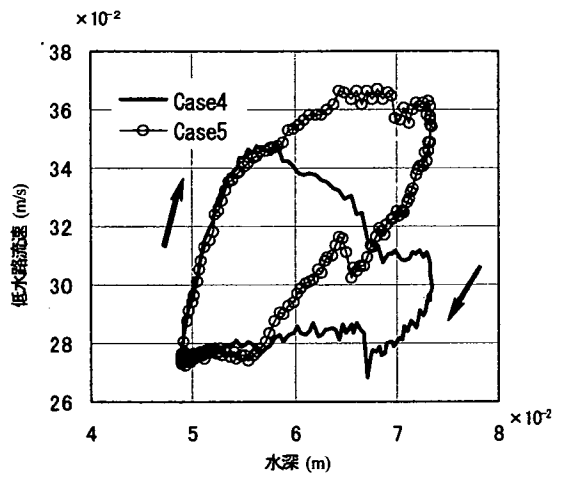


図-16 水深 - 低水路流速関係

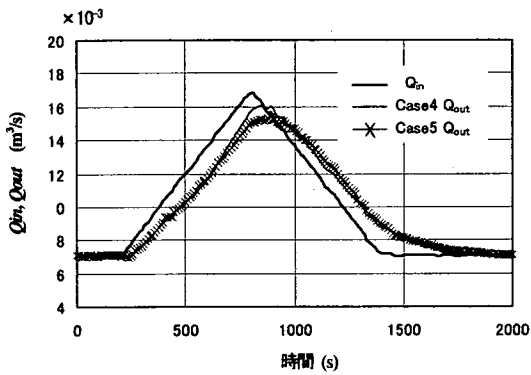


図-17 Case 4 と Case 5 の流量ハイドログラフ Q_{out} の比較

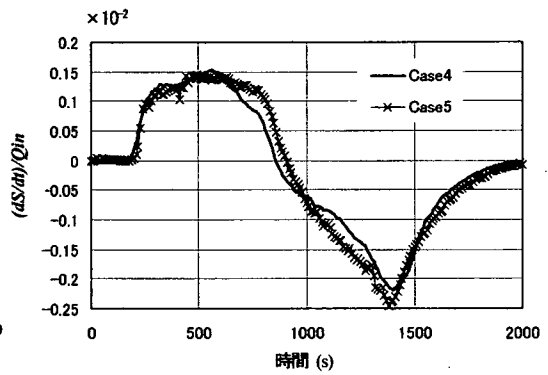
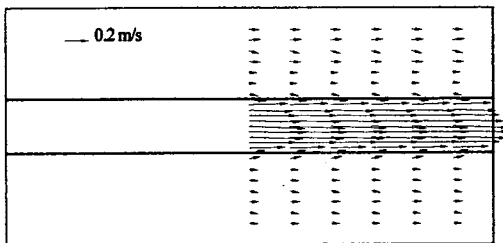
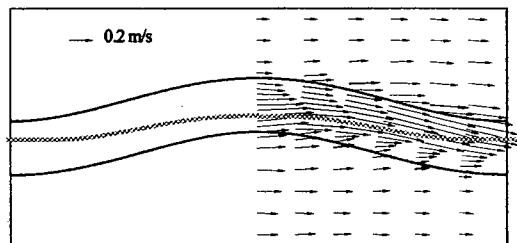


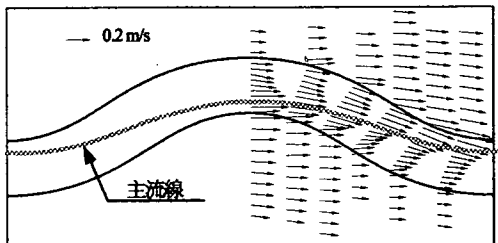
図-18 樹木群の存在が貯留量に及ぼす効果



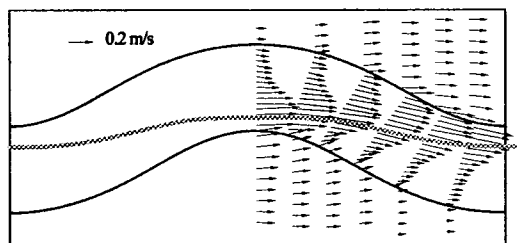
(a) 直線路での平面流況 (Case 6)



(b) 蛇行路 A での平面流況 (Case 4)



(c) 蛇行路 B での平面流況 (Case 7)



(d) 蛇行路 C での平面流況 (Case 9)

図-19 平面流況ベクトル図

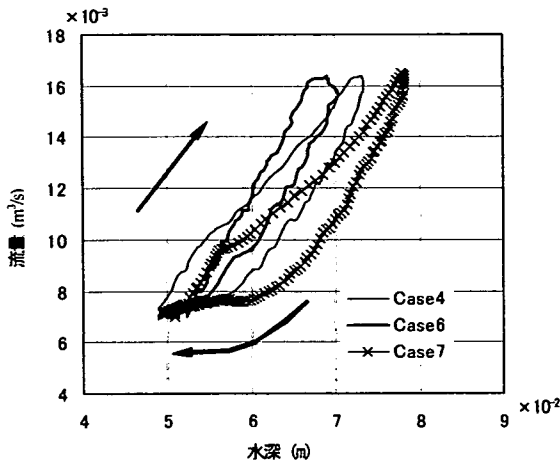


図-20 水深 - 流量関係

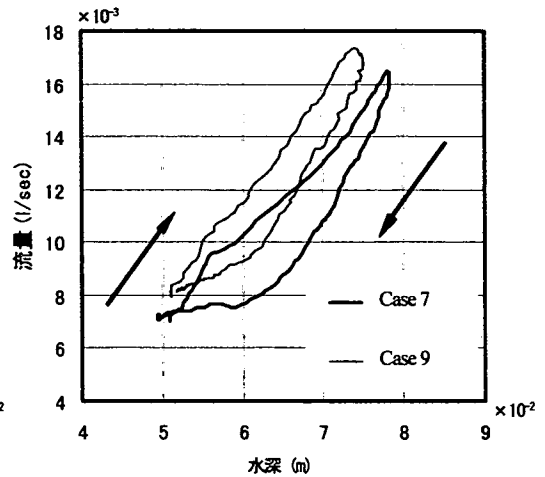


図-23 水深 - 流量関係

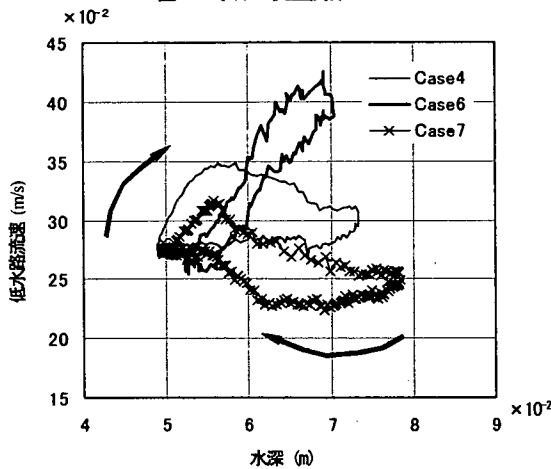


図-21 水深 - 低水路流速関係

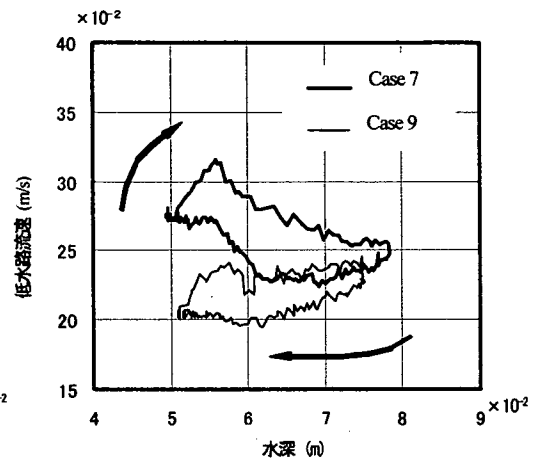


図-24 水深 - 低水路流速関係

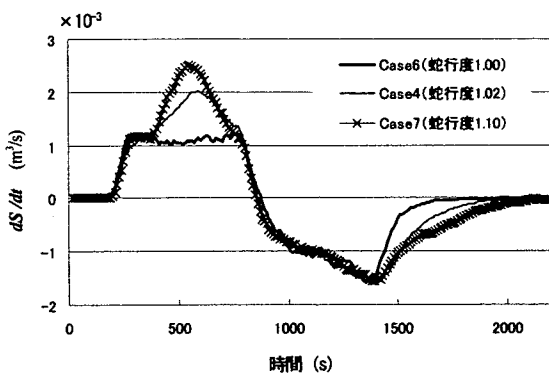


図-22 貯留量の比較

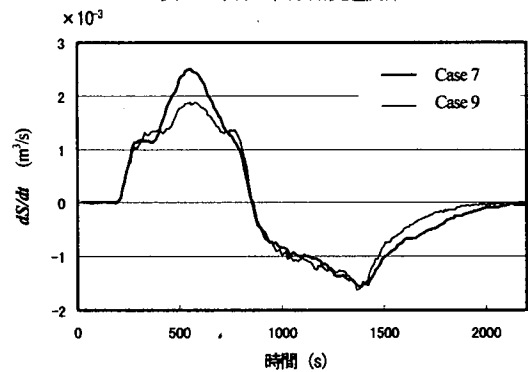


図-25 貯留量の比較

(5) 蛇行度の違いが河道内貯留に及ぼす影響

図-19, (a) (b) (c) は複断面直線水路, 複断面蛇行水路 A, 複断面蛇行水路 B での定常流 (流量 17 l/sec) における高水敷上 1 cm の高さの測定流速を用いて描かれた, 平面流速が生じている。また低水路内の流れの主流線は, 低水路内岸から内岸を結ぶ複断面蛇行流れ特有の傾向を示し

れが集中し, 高水敷上の流速と低水路内の流速の間には大きな差が出ている。複断面蛇行水路 A では低水路内の流れが若干卓越しているが, 高水敷上にもある程度の流速が生じている。また低水路内の流れの主流線は, 低水路内岸から内岸を結ぶ複断面蛇行流れ特有の傾向を示し

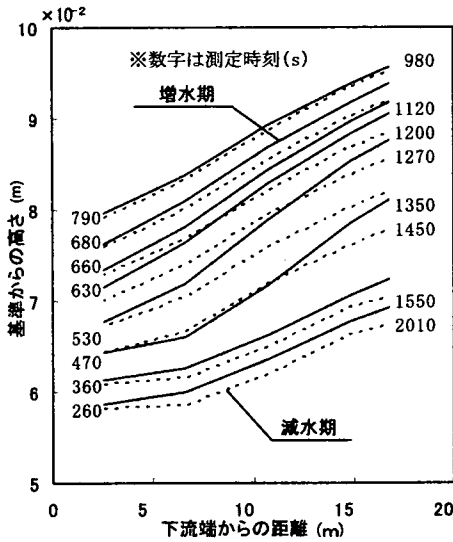


図-26 縦断水位 (Case 7)

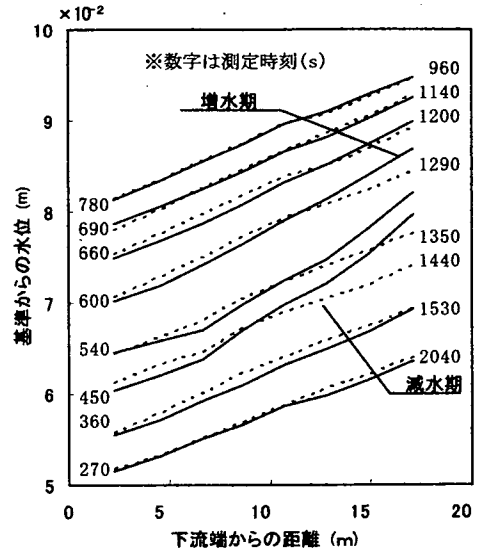


図-27 縦断水位 (Case 8)

ている。複断面蛇行水路 B も複断面蛇行水路 A と同様の傾向を示すが、蛇行度が 1.10 と大きくなったことにより、主流線の曲率が大きくなっている。

同一ハイドログラフ (Hydro D) による非定常流 (洪水流) の流下特性を H-Q および H-v 関係で比較し、図-20、図-21 に示す。複断面直線水路 Case 6 の H-Q 関係は、増水期と減水期とで同一水深における流量差が小さく、かつ洪水開始時からピーク流量発生時までの水深変化幅は、他のケースに比して小さい。これに対して Case 4、Case 7 の H-Q 関係は徐々に右に傾き、ループの大きさも大きくなっている。また、H-v 関係では Case 6 は水深の増加に伴い流速も増加する単断面的な特性を示す。これに対して複断面蛇行水路を用いた Case 4、Case 7 では高水敷冠水後に流速のピークを示した後、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合により流速は大きく減速する。この時、流速の低下の程度は Case 7 の方で大きく現れている。これは、低水路の蛇行度が小さいと、低水路内の流れの直進性が増し、高水敷上の流れが低水路内の流れと混合する範囲、即ち蛇行帯幅が小さくなるためである。このため、H-Q 曲線は蛇行度が小さいほどループ形状は単断面的な特性を示す。これに対して蛇行度が大きくなると、H-Q 曲線は大きなループを描き、ピーク水位が増す。また H-v 関係は、蛇行度が大きいほど低水路内の流れの直進性が失われ、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合が活発に行われるため、流速は大きく減速するループを描く。

図-22 には、水路の上流断面～下流断面区間について Case 4、Case 6、Case 7 それぞれの貯留量 (dS/dt) を示す。前述したように蛇行度が小さい水路では流れの直進性が増し、貯留量が小さい。これに対し、蛇行度が大きい水

路では、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合幅 (蛇行帯幅) が大きくなるため、貯留量のピークは大きくなる。また、洪水継続時間もこれに対応し、蛇行度が小さいほど短くなる。

(6) 低水路幅の違いが河道内貯留に及ぼす影響

図-19(d) に蛇行度 1.10 で低水路幅の広い複断面蛇行水路 C での平面流況ベクトルを示す。ここでは低水路幅の狭い他の複断面蛇行水路と異なり流れの大部分が低水路内に集中し、高水敷上の流れと低水路内の流れに大きな流速差が生じている。低水路幅が広がったことにより、主流線はほぼ直線状であり、蛇行低水路とはいえ低水路内の流れはほぼ直線水路と同様の流れ場となった。図-23 に示した Case 9 の H-Q 関係は Case 7 よりも立ち、ループ幅も狭い。また図-24 に示した Case 9 の H-v 関係は水深の増加に伴って緩やかに増加している。このことから Case 9 の流れは単断面的な特性を持っている。これは低水路幅が大きいことよって、低水路内の主流線が小さい曲率を示すため、低水路蛇行度が大きな水路においても、弱い単断面的な洪水流の流下特性が現れることになる⁹⁾。図-25 に貯留量の比較を示す。Case 9 の洪水流の流下特性は単断面的であったことから、Case 9 において、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合による影響は小さい。このため、貯留量は Case 7 に対して少なくなり、また洪水継続時間も短くなる。

(7) 時間的に変動する下流端条件が河道内貯留に及ぼす影響

図-26 に Case 7 の水面形を、図-27 に Case 8 の水面形を示す。下流端水位自由の Case 7 と比較してみると、下流端

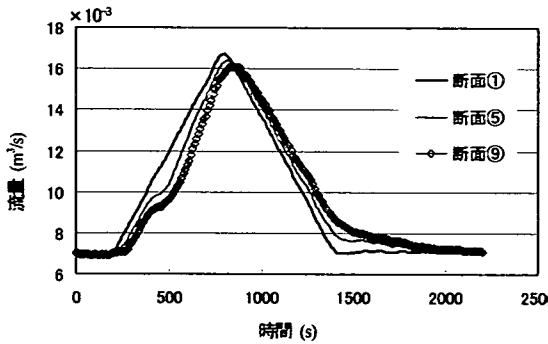


図-28 流量ハイドログラフの縦断変化 (Case 7)

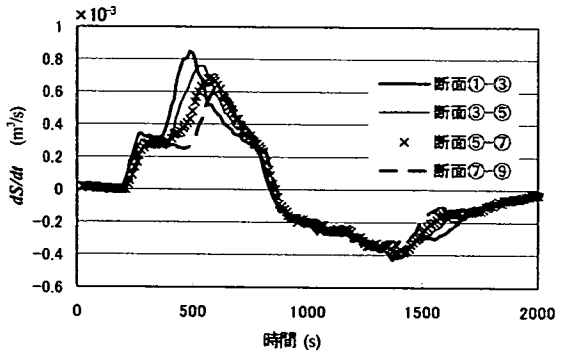


図-30 水路各区分での貯留量 (Case 7)

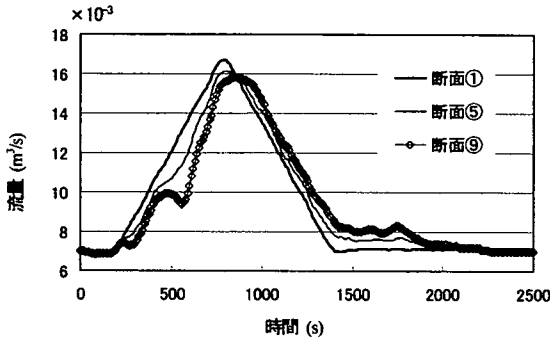


図-29 流量ハイドログラフの縦断変化 (Case 8)

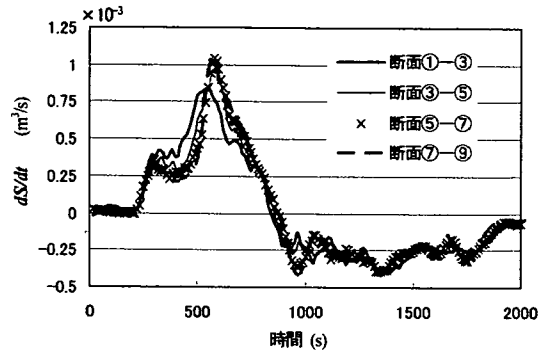


図-31 水路各区分での貯留量 (Case 8)

水位を変動させた Case 8 は増水期の 400 秒～600 秒付近を除いてほぼ等流に近い水面形を保っている。増水期で水面勾配が大きくなっているのは、変動する下流端水位の影響が上流まで伝わるよりも上流から進んでくる水位上昇の方が速いためである。次に図-28、図-29 に Case 7 と Case 8 の各断面での流量ハイドログラフを示す。(断面番号は図-1 (b) を参照) 両ケースとも流下に伴いハイドログラフの変形が生じているが、下流端水位条件を調節した Case 8 では増水期において最下流測定断面⑨で流量が減少している時間帯がある。これは下流端水位の時間的変動により、下流端付近で流れが滞留していることを示している。また、ピーク流量の遞減量も Case 8 の方が大きくなっている。

図-30、図-31 に下流端条件が自由な場合 (Case 7) と調節されている場合 (Case 8) について水路の各区分での貯留量を示す。これは水路を断面①、③、⑤、⑦、⑨で 4 区間に分け、それぞれの区分での貯留量を評価したものである。Case 7 では増水期に時間と共に貯留量のピークが下流の区間に移っている。Case 7 の場合は、上流から下流に向かって貯留量が伝播することを示している。また、上流ほど水面勾配が大きくなり、これにより上流区間の方が貯留量が大きくなっている。これに対して Case 8 では断面①-③以外の区間で貯留量のピークがほぼ重なっている。これは①-③区間を除き水位の調節によって各時

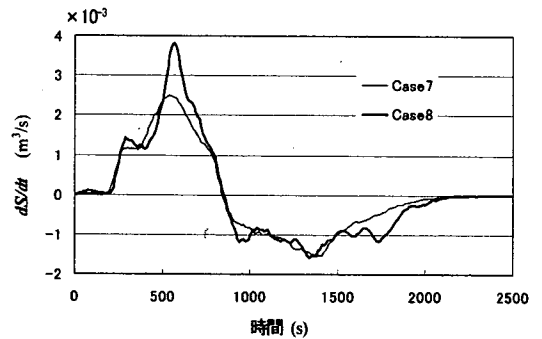


図-32 貯留量の比較

間等流に近い状態が保たれている。即ち、水深がほぼ等しく増加するため区間別の貯留量も等しく増加する。

したがって、Case 8 では上流から伝播してくる洪水の貯留に加えて下流端水位の影響により下流からも貯留が伝播してきている。

図-32 には Case 7、Case 8 の流れにおける水路全体での貯留量の比較を示す。前述したように Case 8 では下流端水位変化の影響により下流からも貯留が伝播し、上流から伝播してくる貯留分に加わるため、全体では Case 7 より貯留量が増えている。また洪水継続時間も Case 7 に比べて Case 8 の方がかなり長くなっている。

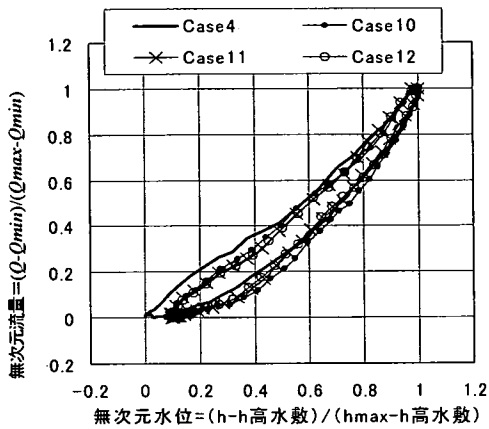


図-33 無次元水深-無次元流量関係

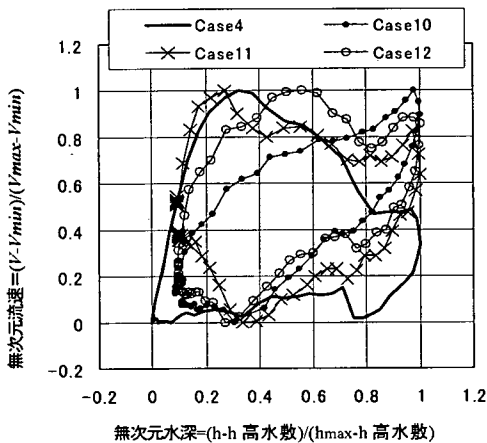


図-34 無次元水深-無次元流速関係

この機構が合流河川の影響域での貯留であり、潮位変動のある区間の貯留である。

(8) 堤防の蛇行と低水路の蛇行の位相差が河道内貯留に及ぼす影響

堤防が直線的な Case 4 と、これと同一の水路諸元を有し、堤防が蛇行している Case 10, Case 11, Case 12 では高水敷幅が異なり、全水路幅が異なるため、水深-流量、水深-低水路平均流速を同じスケールで比較することは適切でない。このため、これらの諸量を無次元化して図-33、図-34 に示す。ここで示す無次元量は高水敷高さを無次元量 0 とし、1 をピーク水深としている。また、無次元流量および無次元低水路流速については 0 を最小値、1 を最大値としている。

水深-流量関係は、高水敷幅が相対的に大きく、粗度の与える影響が大きい Case 4 が他のケースと比較して大きなループを描いているが、Case 10~Case 12 では堤防に位相差があるにも関わらず、それぞれのケースのループにほとんど違いは見られない。

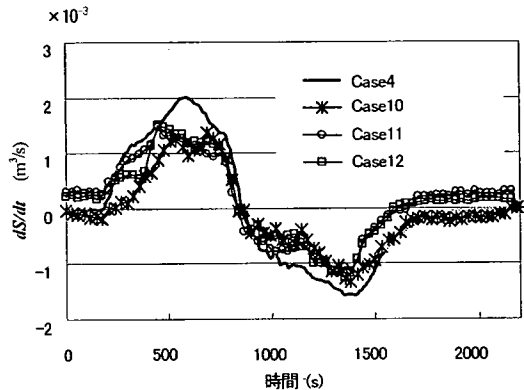


図-35 貯留量の比較

水深-低水路平均流速関係は各ケースで異なった関係が見られる。直線堤防の Case 4 では高水敷幅が広いため、高水敷冠水後の第二次ピークの流速はそれほど大きな値を示さない。堤防と低水路が同位相の Case 10 では低水路蛇行帯の外側に流速の小さい領域が現れ、直進性の高い流れになる。高水敷上の遅い流れが低水路内の流れと干渉する度合いが小さく、Case 4, Case 11, Case 12 に比較して最も抵抗の小さい流下形態をとっている。堤防 $\pi/2$ 後行の Case 11 では、低水路から流出した流れが高水敷上で堤防を沿うように流れ (図-1 (g) 内に矢印で示す)、水路全体に広がった流れとなる。このような流れでは、Case 4 と同様に高水敷冠水直後に第一次ピークをむかえる。その後高水敷の抵抗によって流速は減少するが、高水敷幅が相対的に大きくないため、その抵抗はあまり大きく影響せず、水深の増加とともに流速の第二次ピークは大きな値を示す。堤防 $\pi/2$ 先行の Case 12 では、低水路から高水敷へと流出する流れが堤防との位相差のために低水路内へと戻されるため、蛇行帯の外に死水域を形成する (図-1 (h) の円内)。このため高水敷の抵抗は小さく第一次ピークの発生時刻が遅れ、その後 Case 11 と同じ傾向を示す。

図-35 に各ケースの上流断面と下流断面の間での貯留量 (dS/dt) の経時変化を示す。高水敷幅が相対的に大きい Case 4 の貯留量が最も大きく、蛇行堤防を用いた Case 10~Case 12 の貯留量は高水敷幅が相対的に小さく、粗度の抵抗の影響が小さいために貯留量が小さい。また Case 10~Case 12 の貯留量にはほとんど違いがない。このことから堤防と低水路の位相差は流下形態には影響を及ぼすものの、貯留量を支配する要因としては二次的であると言える。

4. 結論

本論文では複断面河道に着目し、非定常特性をもつ洪水流の流下機構の解明と、貯留量の定量的な評価を目的と

して検討を行った。相似則を満足する水路で非定常実験を行い、洪水流の流下形態や貯留量に及ぼす非定常性、河道の平面形、横断面形、樹木群、下流端条件の影響を明らかにした。本研究の主な結論を以下に示す。

- 1) 非定常流では、水深に対する流量、流速の関係は単断面水路よりも複断面水路のほうが大きなループを描き、非定常性が強いほど大きい。
- 2) 非定常複断面蛇行流れでは単断面蛇行流れと異なり、高水敷流れと低水路流れの交換による抵抗増大によって、洪水期間中高い水深が維持され、貯留効果が高くなる。また低水路の平均流速は高水敷冠水直後と高水敷冠水末期にピークを示す。
- 3) 洪水流の縦断面水形は、増水期の強い非定常性、低水路の平面形に起因する高水敷上の流れと低水路の流れの混合、高水敷粗度の影響を受け、減水期よりも大きな水面勾配が現れる。また、洪水流は、流下するに従ってその波形を変形させ、ピーク流量の低減やピーク流量発生時刻の遅れ、洪水継続時間の延長といった現象を引き起こす。この水理現象は、非定常性の高い洪水流でより顕著に現れる。
- 4) 高水敷上の樹木群設置に伴う抵抗増は、貯留量を増大させる効果をもつ。
- 5) 下流端水位を時間的に変動させた場合、下流側からの貯留量と、上流からの貯留量に加わり全体として貯留量は増加する。また洪水継続時間も大きくなる。
- 6) 堤防が蛇行している場合、低水路との位相差によって流下形態に違いが現れるものの、貯留量にはほとんど違いがない。
- 7) 貯留効果は、洪水流の非定常性、河道の形状、粗度、下流端境界条件に依存する。ピーク流量の通減、ピーク流量発生時刻の遅れおよび洪水継続時間の延長が顕著になって現れる。

本論文で得られた知見は治水上のみならず、樹木管理など環境との関連で有用である。実洪水について「貯留」について理解を深め、これを河川計画に取り込むことに

よって、「治水」と「環境の整備と保全」を統合化した新しい河川計画技術に発展させることが望まれる¹⁾。

参考文献

- 1) 福岡捷二：水理的に立った治水と環境の調和した川づくり、21世紀の技術者像と地域の安全に向けて、継続教育制度創立記念講習会、土木学会、pp. 1-1~1-23, 2002。
- 2) 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。
- 3) Ven Te Chow : Open channel Hydraulics, McGROW-HILL, Chapter 20, pp. 586-609, 1956。
- 4) 福岡捷二：洪水流と土砂水理の新展開、水工学シリーズ 99-A-2, pp. 1-24, 1999。
- 5) 渡邊明英、福岡捷二、A. G. Mutasingwa、太田勝：複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常二次元解析、水工学論文集、第46巻、pp. 427-432, 2002。
- 6) 福岡捷二、渡邊明英、岡部博一、關浩太郎：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、水工学論文集、第44巻、pp. 867-872, 2000。
- 7) 福岡捷二、關浩太郎、栗栖大輔：河道における洪水流の河道内貯留とピーク流量低減機能の評価、河川技術に関する論文集、Vol. 6, pp. 31-36, 2000。
- 8) 栗栖大輔、福岡捷二、森川数美、關浩太郎：複断面蛇行流路における洪水流の河道内貯留とピーク流量低減機構、第55回年次学術講演会講演概要集、第二部、pp. 276-277, 2000。
- 9) 岡田特治、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。
- 10) 福岡捷二、栗栖大輔、Alex G. Mutasingwa、中村剛、高橋正則：洪水流の河道内貯留に及ぼす堤防と低水路の位相差および高水敷幅の影響、水工学論文集、第46巻、pp. 433-438, 2002。

(2003. 1. 20 受付)

ASSESSMENT AND MECHANISM OF FLOOD FLOW STORAGE IN CHANNELS

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Kotaro SEKI, Daisuke KURISU
and Toshikazu TOKIOKA

Flood flow in Japan possesses characteristics that the rate of water level change in rising stage is large. Cross-sectional shapes of middle and down-stream region of Japanese rivers employ compound ones consisting of main channel and flood channels. It is, therefore, required to understand the hydraulics of flood flow through various shapes of compound channels for design of safe and environmentally rich rivers. But, there are almost no reliable reference books describing such hydraulic hydraulics. We focused on unsteady hydraulic phenomenon of flood flows in compound meandering channels, and made a study on effects of channel characteristic and of flood characteristics on storage of flood flow. As a result, we clarified influences which plan and cross-section shapes of rivers, boundary condition at the downstream end and unsteadiness on propagation of flood flow and also evaluated the storage volume of flood flow in a channel.