

複断面河道における洪水流の伝播機構

PROPAGATION MECHANISM OF FLOOD FLOW IN COMPOUND CHANNELS

福岡捷二¹・佐藤宏明²・出口桂輔³

Shoji FUKUOKA, Hiroaki SATO and Keisuke DEGUCHI

¹ フェロー会員 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² 正会員 (財)河川情報センター 研究第一部長 (〒102-8474 東京都千代田区麹町 1-3 ニッセイ半蔵門ビル)

³ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 博士課程前期 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

It is very important for the river management to grasp the hydraulic characteristics of flood flow in compound channels. The propagation speed of flood flow in compound channels has not yet been known, although that in simple cross-section channels was showed by Kleitz-Seddon. This study aims to clarify the propagation mechanism of flood flow and compare propagation speed from laboratory experiments with those of the theoretical expression derived for compound channels. As a result, theoretical formula provides a good expression for propagation speed of compound channels. Furthermore, we explain the effect of change in the channel cross-section on the flood propagation speed in rivers. Finally, we investigate propagation characteristics of various flood flows in the Tone River and Edo River.

Key Words: propagation mechanism, flood flow, compound channel, channel cross-section, theoretical analysis

1. 序論

洪水流が河道を流下していく際の様々な水理特性の変化について、より深い理解を得ることは、河川管理上重要な意義を持つ。我が国の大河川の多くが有する複断面河道について、これまで様々な研究が行われ、多くの知見が得られてきた¹⁾²⁾。

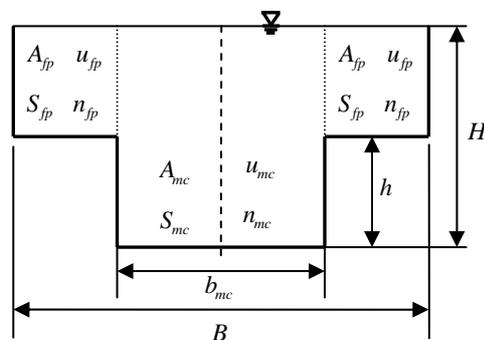
洪水伝播速度について、古くは Kleitz-Seddon によって十分幅の広い単断面流路では波速が流速の 5/3 倍となることが示されている¹⁾。しかし、複雑な断面形状を有する実河道においては、Kleitz-Seddon 式はその特徴をうまく捉えられないことが既に示されており、複断面河道における洪水流の伝播を含む水理現象を数値解析的に検討されるのが一般的となっている²⁾。しかし、Kleitz-Seddon と同様に解析的に複断面河道の洪水伝播について検討することは、現象を物理的視点に基づいて考察する上で重要であり、また、治水計画で想定される河道改修や樹木管理、水防活動、避難の際の情報など重要な判断材料を与えることになる。

本研究は、河道が複断面形状によることの特性を考慮した洪水流の伝播速度について、理論式の導出

と理論式と広島大学における洪水流室内実験から得られたデータ⁴⁾との比較検討を行う。加えて、利根川、江戸川における昭和 57 年、平成 10 年洪水の実測水位データから洪水の伝播特性を調べ、実河川における理論式の適用性の検討を行う。最後に本研究の持つ意義を述べる。

2. 複断面河道における洪水流の伝播速度

図-1 のように断面分割法を用いて左右対称な複断面



記号の説明 (A :河積, u :断面平均流速, B :全幅, b_{mc} :低水路幅, n :粗度係数, S :潤辺, h :低水路深さ, H :低水路底からの水深, 添字 fp は高水敷を, mc は低水路を表す.)

図-1 複断面河道の横断面形

面直線河道を考え、連続式と運動方程式から、以下の式(1)、(2)のように波形を変えずに伝播する最大水深の伝播速度 dQ/dA を算出した。なお、低水路と高水敷の分割面に作用するせん断力を式(5)で表現し、低水路、高水敷それぞれの力のつり合い条件から式(3)、(4)を連立して解くことで低水路、高水敷の流速 u_{mc}, u_{fp} を求め、式(6)より任意の水位に対する流量 Q 、式(2)より伝播速度 C を求めている。 N_c は合成粗度係数、 I_e はエネルギー勾配、 v は断面平均流速、 R_c は合成径深を示す¹⁾²⁾。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{dQ}{dA} \frac{\partial}{\partial x} \right) A = 0 \quad (1)$$

$$C = \frac{dQ}{dA} = \left(\frac{5b_{mc}}{3B} - \frac{4h}{3H} \frac{R_{mc}}{B} \right) \frac{1}{N_c} R_{mc}^{2/3} I_e^{1/2} + 2 \left\{ \frac{5(1-b_{mc}/B)(1-h/H)}{3} - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h}{H} \right) \frac{R_{fp}}{B} \right\} \frac{1}{N_c} R_{fp}^{2/3} I_e^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{\rho g n_{mc}^2 S_{mc}}{R_{mc}^{1/3}} u_{mc}^2 + \tau \cdot (H-h) = \rho g A_{mc} I_e \quad (3)$$

$$\frac{\rho g n_{fp}^2 S_{fp}}{R_{fp}^{1/3}} u_{fp}^2 - \tau \cdot (H-h) = \rho g A_{fp} I_e \quad (4)$$

$$\tau = \rho \cdot f \cdot (u_{mc} - u_{fp})^2 \quad (5)$$

$$Q = A_{mc} u_{mc} + 2A_{fp} u_{fp} \quad (6)$$

$$N_c = \frac{A_{mc} + 2A_{fp}}{Q} \cdot R_c^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (7)$$

$$R_c = \left\{ \frac{A_{mc} (A_{mc}/S_{mc})^{2/3} + 2A_{fp} (A_{fp}/S_{fp})^{2/3}}{A_{mc} + 2A_{fp}} \right\}^{3/2} \quad (8)$$

$$v = \frac{1}{N_c} R_c^{2/3} I_e^{1/2} \quad (9)$$

ここで、 ρ は水の密度である。 f は低水路と高水敷との境界での混合の激しさを表す混合係数で、本研究では既往の研究²⁾³⁾から境界混合係数を $f=0.17$ とした。断面分割法を用いることで、伝播速度に対する様々な複断面形状や、低水路・高水敷の粗度の影響を取り込めること、高水敷の遅い流れと低水路の速い流れが混合することの影響を考慮することが可能である。式(2)は直線河道で洪水が形を変えずに伝播するときの式であり、堤防や低水路の線形、樹木群の違いについては直接的には考慮していない。しかし、蛇行や樹木群等の洪水流の伝播速度に及ぼす影響は式(2)の水深と合成粗度係数等に反映して

表-1 実験条件⁴⁾

実験case	1	2	3	4	5
蛇行度	1.00	1.02		1.10	
低水路幅	50cm			35cm	80cm
初期流量	Bank-full flow				

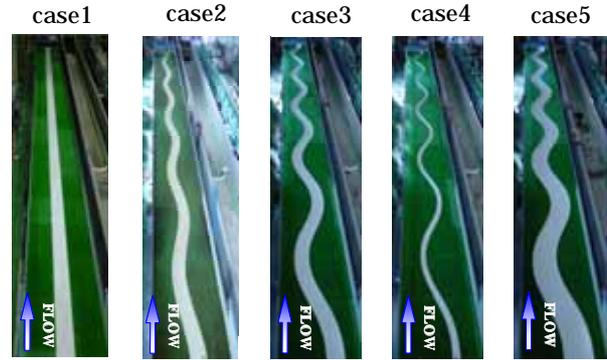


図-2 実験水路⁴⁾

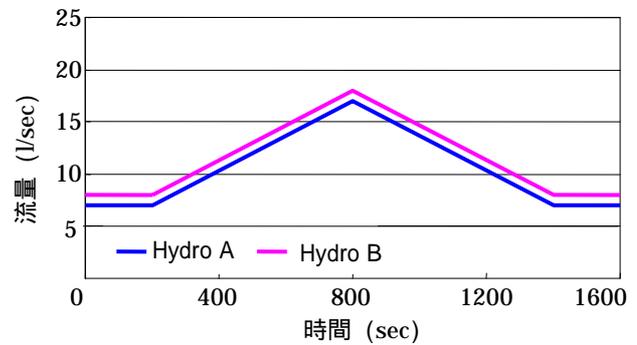


図-3 設定流量ハイドログラフ⁴⁾

いることから、実測の最大水深と合成粗度係数等を用いることにより、間接的にこれらの影響を考慮した伝播速度を求めることが可能である。

3. 実験水路における洪水流の伝播速度の検討

(1) 検討方法

洪水流の伝播速度の理論値と実験値の比較とその考察を行う。検討に用いたデータは、福岡ら⁴⁾が広島大学で行った複断面水路(全長21.5m)を用いた洪水実験データを使用した。実験条件と実験水路、設定流量ハイドログラフをそれぞれ表-1と図-2,3に示す。実験は各caseで蛇行度と低水路幅を変化させて全部で5case行っている。case1~3を比較することで蛇行度の違いによる影響を、case3~5を比較することで低水路幅の違いによる影響を検討する。

実験の初期状態として低水路満杯状態から洪水を流下させるため、case1~4ではHydro Aを、低水路幅の広いcase5では流量の多いHydro Bを用いている。case4では低水路が狭いことから、初期状態で高水敷が冠水した状態となっている。測定項目として、水位は低水路中央で縦断的に9点、横断的には高水敷上で9点、低水路内で5点測定している。

表-2 洪水流の伝播速度の実験値と理論値の比較

単位 : cm/s

	case1		case2		case3		case4		case5	
	No. 1	No.2								
実験値	22.3	15.9	19.0	21.8	26.5	23.1	25.6	20.5	22.1	32.0
理論値(混合なし)	20.5	20.3	22.1	22.0	24.6	24.2	24.9	22.6	26.2	26.9
理論値(混合あり)	19.9	20.0	21.6	21.5	24.2	23.8	22.7	20.6	25.6	26.3

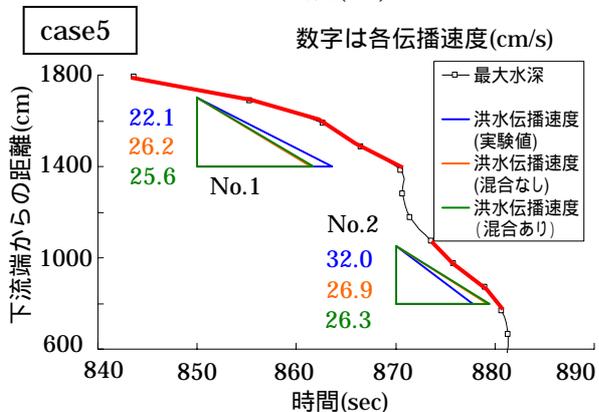
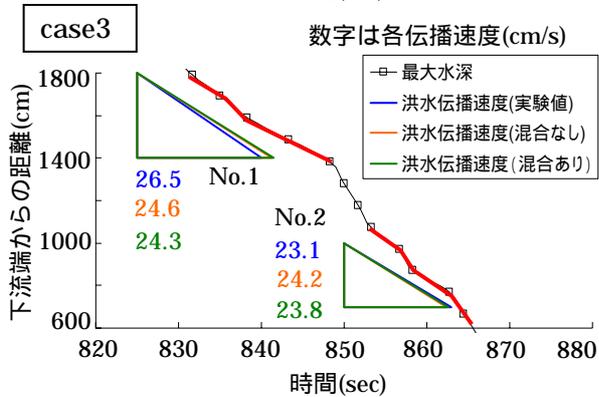
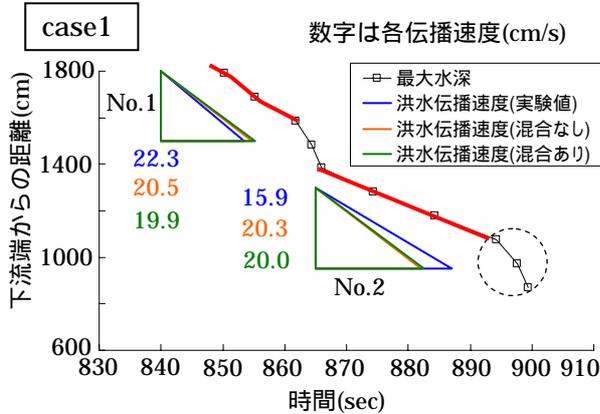


図-4 最大水深の伝播の様子と伝播速度の理論値と実験値の比較

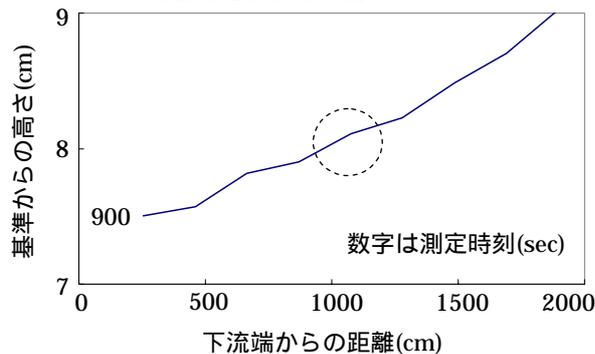


図-5 実験水路水面形(case1)

表-3 蛇行度の違いによる影響

	case1	case2	case3
蛇行度	1.00	1.02	1.10
最大水深(cm)	7.16	7.44	7.69
平均伝播速度(実験) cm/s	19.1	20.4	24.8
平均伝播速度(理論) cm/s	20.0	21.6	24.0
ピーク流量(l/s)	HydroA		

表-4 低水路幅の違いによる影響

	case3	case4	case5
低水路幅(cm)	50	35	80
最大水深(cm)	7.98	9.06	7.64
平均伝播速度(実験) cm/s	24.8	23.1	27.1
平均伝播速度(理論) cm/s	24.0	21.7	26.0
ピーク流量(l/s)	HydroA		HydroB

流速は水位の測定点と同じ位置で鉛直方向に低水路内で4点,高水敷上で2点測定されている(河床より1cmを始点として2cm間隔).流量は上流端の断面では電磁流量計で,それより下流の断面の流量については電磁流量計の流量と各断面で計測した水位から貯留量を求め,算出している.

洪水流の伝播速度は,隣り合う2断面の水位ハイドログラフから,ピーク水位の発生時刻の差と断面間の距離から算出している.

洪水流の伝播速度の理論値は式(2)を用い,実験中に観測した最大水深を与えて求めている.境界における混合の影響は,式(5)で考慮し $f = 0.17$ を与えて算出したものを「混合あり」, $f = 0$ として算出したものを「混合なし」としている.

(2) 実験値と理論値の伝播速度の比較,検討

図-4に case1, 3, 5における実験結果を一例として示す.また,図-5には case1におけるピーク水位時間の水位縦断面を示す.図-4の case1中に丸破線で示した箇所は,水面形に変化が生じている箇所である.図-5中に示した丸破線の水面形の変化点と対応している.水面形の変化は,準等流を作るために下流端の堰を調節したことによる影響が伝播し,水深が変化しているためである.図-4は赤い太線区間について伝播速度の実験値とエネルギー勾配を用いた理論値を傾きで示したものである.図-4,表-2の No.1, No.2 は水面形の区間に対応しており,算出位置を表している.洪水伝播速度について単純化された理論にもかかわらず,実験値を比較的良く表現

できている。表-2 に示すように case2 と case4 についても同様にほぼ説明できている。

洪水流の伝播に及ぼす蛇行度の影響は，case1～3 の比較から検討する。表-3, 4 の平均伝播速度は，表-2 に示した各 case の No.1, No.2 の理論値（混合あり）の平均値である。表-3 の case1～3 は，同じ低水路幅，高水敷幅に対し，最大水深は蛇行度が大きくなるほど増大している。これは蛇行度の増大につれて，蛇行帯幅が大きくなり，低水路流れと高水敷流れの混合による流れの抵抗が大きくなるためである。蛇行度が大きくなるほど伝播速度の実験値も理論値も大きくなっている。理論式は，蛇行を直接的には考慮していないが，前述したように蛇行の影響は水深等に反映して評価されていることによる。

次に，蛇行度は同一であるが，低水路幅の違いによる影響を case3～5 の結果をもとに検討する。表-4 から，低水路幅が大きくなるほど最大水深は小さくなるが，伝播速度は実験値も理論値も大きくなっている。実験時の流況を見ると，低水路幅が広がるにつれて流れの主流線の曲率が小さくなり，流れが低水路に集中して直線的な単断面的な流れに近くなる。このように，蛇行度が同じであっても低水路幅の違いによって流れ方は変化することから，全幅が一定である水路においては，低水路幅が伝播速度を決める支配的な要因となっている。

4. 水路横断面形状を変化させた場合の洪水伝播速度の変化

図-6 に水路幅 B と水面高さ，河床高を固定 (H : 一定) し，断面内の形状 (b_{mc}, h) を変化させた時の伝播速度 C を断面平均流速 v で除した無次元量 C/v の計算結果を示す。計算には実験水路の条件 (n, I_b) を与え，式(2)と式(9)を用いている。このとき，各断面形を流下する流量については，与えた断面形，水位に相当する流量となっている。横軸に b_{mc}/B ，縦軸に h/H を取り， C/v の値は色の濃淡で示している。図中には b_{mc}/B ， h/H の関係から想定される横断面形状のイメージを 9 等分して表現した。この図から， b_{mc}/B が大きく h/H が小さい図中右下の断面形をとるほど， C/v は大きくなり，逆に左上のような低水路が狭く深い河道ほど C/v が小さくなるのが分かる。ここで，実河川の断面平均流速 v については樹木群等があるときにも式(9)が適用可能であるかを検討する必要がある。また，この計算結果は，水路実験等によって具体的に確認することも必要であるが，河道の横断面形状の

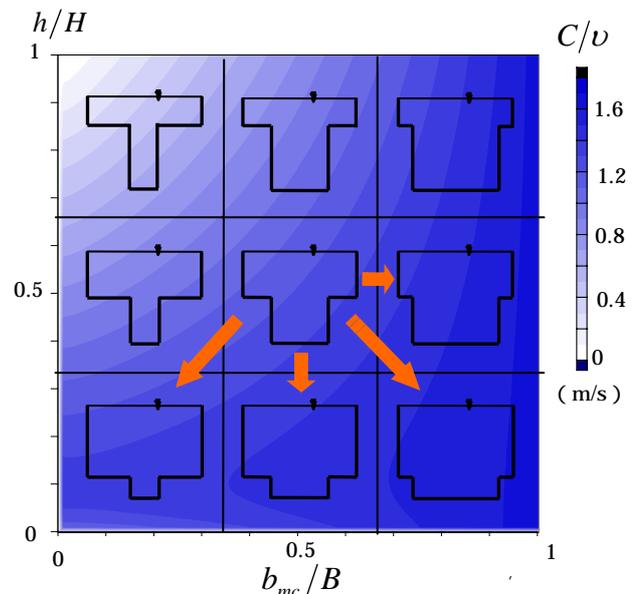


図-6 横断面形状を変化させた場合の伝播速度 断面平均流速比の変化

作り方が洪水流の伝播速度，すなわち洪水継続時間に影響することを示しており，河道改修時にはこの点を十分考慮しなければならない。

5. 利根川，江戸川における洪水流の伝播特性

(1) 利根川，江戸川の河道特性

図-7 に，利根川，江戸川の検討対象区間を示す。利根川は栗橋～芽吹橋までの江戸川への分派区間を含む約 26km，江戸川は西関宿～野田までの約 20km を対象としている。図-8 に栗橋，芽吹橋，西関宿，野田地点の河道横断面形状及び昭和 57 年，平成 10 年の洪水の水位ハイドログラフを示す。利根川，栗橋地点における観測ピーク流量は，昭和 57 年が $11,600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，平成 10 年が $10,400 \text{ m}^3/\text{s}$ で，江戸川，野田地点における観測ピーク流量は，昭和 57 年が $2,900 \text{ m}^3/\text{s}$ ，平成 10 年が $2,500 \text{ m}^3/\text{s}$ である。これより，2 つの洪水は，ほぼ同規模の洪水でありピーク水位もほぼ同じと考えてよい。

次に，昭和 57 年洪水時から平成 10 年洪水時の間の河道の変化を示す。利根川では，図-8 の栗橋，芽吹橋の横断面形状の経年的な変化から見てとれるように，昭和 57 年から H10 年の間に対象としたほぼ全区間にわたって低水路河床高が低下し，河積が増大している。また，昭和 57 年から平成 10 年までの間の航空写真や地被情報等から，河道の平面形の大きな変化は見られなかった。しかし，河道内，特に分派点付近で樹木群が繁茂している。

江戸川では，図-8 の西関宿，野田の横断面形状から若干河床の低下は見られるが，対象とした区間に

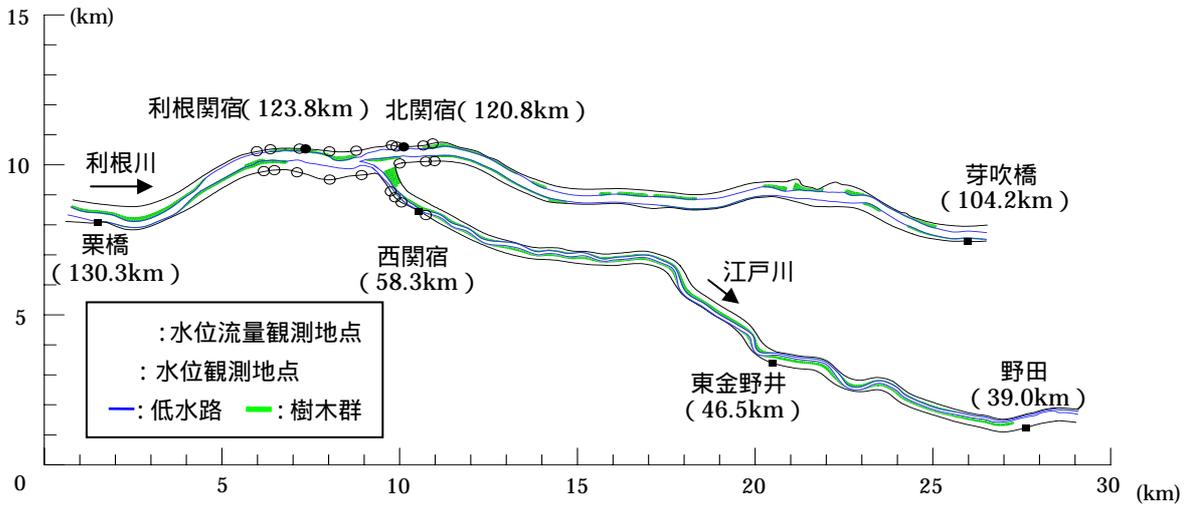


図-7 利根川・江戸川における対象区間の平面形および地被状況

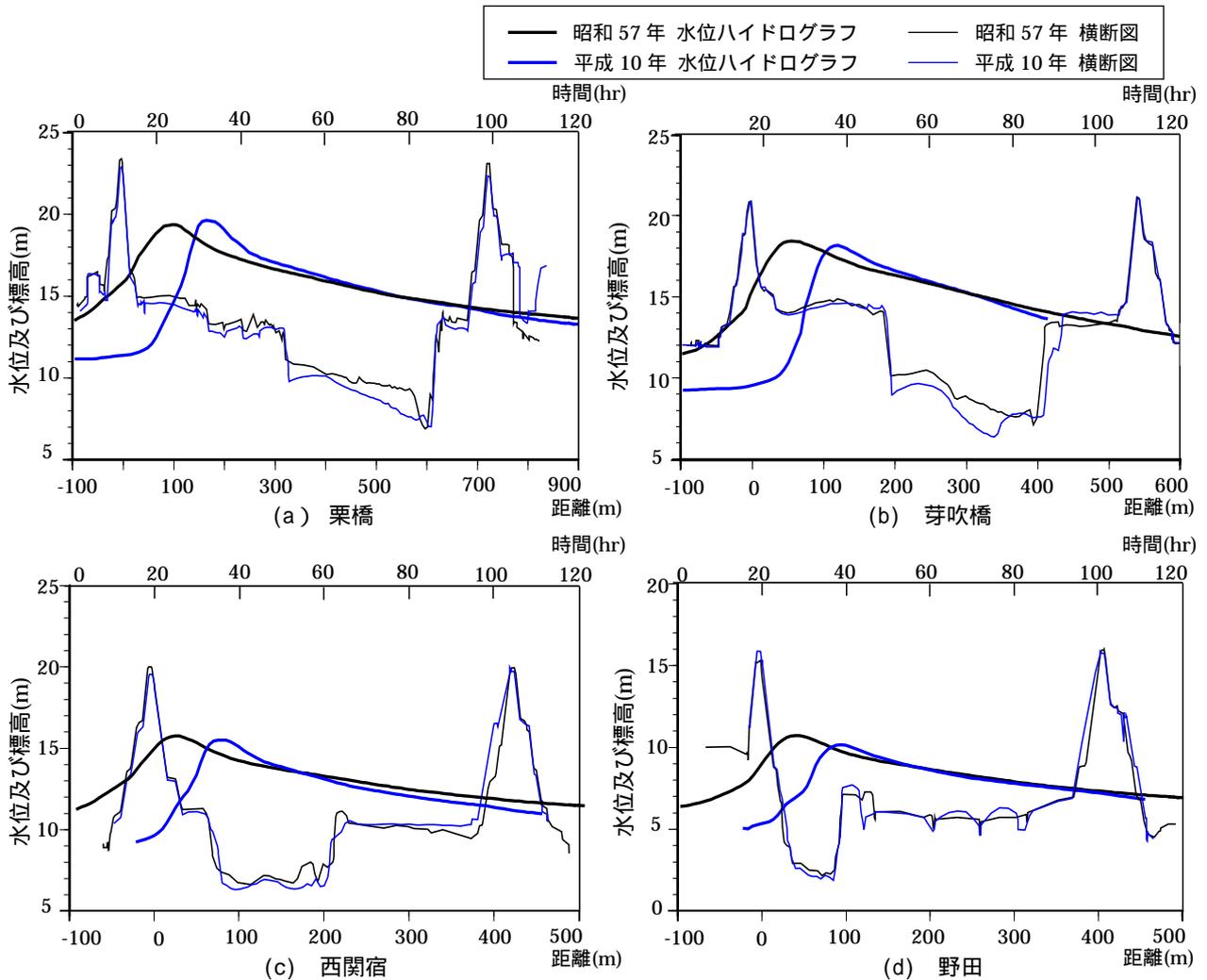


図-8 基準点の横断面形状および水位ハイドログラフ

おいては、それほど大きな河積の変化は見られない。しかし、利根川と同様に航空写真や地被情報等から樹木群の繁茂を確認することができる。このように昭和57年から平成10年の間に利根川、江戸川ともに樹木群によって河積が減じ、洪水流の伝播速度に影響していることが考えられる。

(2) 計算と実測の伝播速度の比較検討

現地の洪水水位ハイドログラフ観測値には、洪水の規模、河川の縦横断面形の変化、樹木群の抵抗等が積分された形で表れている。一方、検討に用いた断面形状は、500m 間隔に測量された定期横断面形を各断面について矩形近似したものをを用いた。水深は

表-5 利根川分派点前後の平均的な水面勾配と計算伝播速度及び実測伝播速度

	栗橋～分派点		分派点～芽吹橋		栗橋～芽吹橋
	水面勾配	伝播速度(m/s)	水面勾配	伝播速度(m/s)	実測伝播速度(m/s)
昭和57年	1/4800～1/5300	1.6～2.3	1/4000～1/5900	1.6～2.1	2.42
平成10年	1/4500～1/5600	1.4～2.2	1/4200～1/6000	1.8～2.5	1.21

表-6 江戸川 47km 地点前後の平均的な水面勾配と計算伝播速度及び実測伝播速度

	47km地点より上流		47地点より下流		西関宿～野田
	水面勾配	伝播速度(m/s)	水面勾配	伝播速度(m/s)	実測伝播速度(m/s)
昭和57年	1/4500～1/5300	1.2～1.7	1/3200～1/3400	1.6～2.1	1.90
平成10年	1/5300～1/5400	1.2～1.8	1/2300～1/2900	1.8～2.1	1.42

基準点断面については実測水位から、基準点以外の断面については福岡らによる⁵⁾計算水位を、 I_e には、実測水面形にほぼ一致する計算水面形の水面勾配を用いている。その理由として、水面形には縦横断的な断面形状の変化や樹木群など洪水流に影響する全ての情報が反映されており^{2) 6)}、水面勾配を用いることでそれらの影響を考慮に入れた解析が可能となると考えたためである。

表-5, 6 は利根川、江戸川における平均的な水面勾配と式(2)を用いて算出した洪水流の伝播速度の理論値及び昭和57年、平成10年のピーク水位の伝播から求めた実測伝播速度を示す。理論値については利根川については分派点で、江戸川では水面形の変化点である47km地点で分けて示した。伝播速度に幅を持たせて示したのは、樹木が繁茂している区間では水面勾配が樹木群の繁茂状況によって変化し、伝播速度に差が見られるためである。実測値を見て分かるように、平成10年洪水は断面形状の変化や河道内に繁茂した樹木群の影響を受けることで、昭和57年洪水よりも洪水流の伝播に遅れが生じている。実測の伝播速度と比較すると、利根川、江戸川の各区間ともに計算値との間に差が見られる。計算では、断面形状の変化は考慮できているものの、蛇行や樹木群の影響については水面勾配を用いることで間接的に考慮している。このため、河道内に樹木が少ない昭和57年洪水については平成10年洪水よりも比較的对応が良い結果となっている。

本研究は、洪水流の伝播機構を単純化し、伝播速度を理論的に求めたものである。実測の伝播速度をより適切に説明するには、水面形の時間変化に着目した著者らが行った非定常平面二次元解析^{2) 5) 6)}を用いればよいであろう。ここで提示した理論は、洪水の伝播機構を物理的に説明する上でも、また河道改修断面を治水面、環境面から検討する上でも重

要な意味を持つと考えている。これらの点については、今後さらに検討する予定である。

6. 結論

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 複断面形状を有する河道の洪水流の伝播速度を洪水波形が一定で伝わるという仮定を用いて理論的に導いた。理論式は実験水路で行われた洪水流実験結果を比較的良く説明できることを示した。
- 2) 洪水流の伝播速度に与える、蛇行度、低水路幅、横断面形状の影響を検討した。さらに、理論式に基づいて、横断面形状を変化させた場合の洪水伝播速度 断面平均流速比変化を調べた。
- 3) 利根川、江戸川の代表的な洪水流に理論式を適用し、洪水流の伝播速度を算出し、実測による伝播速度と比較した。

参考文献

- 1) 水理公式集(平成11年度版), 土木学会, 1999.
- 2) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 3) 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/ -12, pp.63～72, 1989.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 關浩太郎, 栗栖大輔, 時岡利和: 河道における洪水流の貯留機能とその評価, 土木学会論文集 No.740 / -64, pp31-44, 2003.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 田端幸輔, 風間聡, 牛腸宏: 利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.1165-1170, 2006.
- 6) 福岡捷二: 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第12巻, pp.1-6, 2006.

(2006.9.30 受付)