

洪水流の伝播機構に及ぼす 河道状況の変化とその解析

ANALYSIS OF CHANGES IN CHANNEL SITUATION
ON THE PROPAGATION MECHANISM OF FLOOD FLOWS

佐藤宏明¹・福岡捷二²・出口桂輔³

Hiroaki SATO, Shoji FUKUOKA and Keisuke DEGUCHI

¹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)

²フェロー会員 Ph.D 工博 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)

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 to grasp the hydraulic characteristics of flood flow in compound channels for the river management. This study aims to clarify the propagation mechanism of flood flow and compare observed propagation speed with those of the theoretical expression derived for compound channels with vegetations.

As a result, we explain the relationship between the delay of propagation speed and various changes with the time in the channel situation in the Tone River and Edo River. The theoretical expression provides a good explanation for transverse velocity profile and propagation speed of flood flow through compound channels. Furthermore, perspectives for the river vegetation management are stated on the basis of the result of this study.

Key Words : *propagation mechanism, flood flow, compound channel, vegetation, theoretical analysis, river management*

1. 序論

近年, 河川改修や河道内の樹木繁茂により, 河道状況が変化してきている。河道特性の変化は洪水流の流下特性と密接な関係にあると考えられ, 洪水時に観測される水位や流量, 流速にそれらの影響が現れる¹⁾。特に河道内に繁茂する樹木群は, 水位の上昇や河道貯留量の増大を引き起こすため, 洪水流にとって大きな抵抗要素となることが既往の研究により明らかとなっている¹⁾。同時に, 河道内樹木群は河川に生息する動植物にとって重要な生育・生息場となっており, 環境面において大きな役割を果たしている。集中豪雨や台風が頻発する今日において, 洪水流下に及ぼす河道状況の変化の影響を水文学的視点から適切に評価し, 河川整備や河道の維持管理に反映していくことが治水と環境の調和した川づくりを目指す上で重要である。

本研究では, 利根川, 江戸川における洪水流の伝播機構に着目し, 昭和57年9月, 平成10年9月洪水の実測水位

データを基に洪水の伝播特性を河道状況の変化との関係において検討する。次に, 河道が複断面形状によることの特²⁾に加えて, 河道内に樹木群が繁茂していることの特²⁾を直接考慮した洪水流の伝播速度の理論式を導出し, その理論式の実河川に対する適応性を検討する。最後に, 本研究から得られた知見を基に, 河道の維持管理のあり方について述べる。

2. 利根川, 江戸川における洪水流の伝播機構

(1) 実測水位データに基づく洪水伝播特性の検討

検討に用いた洪水は, 流量規模, ピーク水位がほぼ同じであった昭和57年9月, 平成10年9月洪水を対象とした。検討対象区間を図-1に示す。利根川は八斗島から須賀までの江戸川への分派区間を含む約116km, 江戸川は西関宿から野田までの約20kmである。図-2, 3に昭和57年, 平成10年の各洪水時に観測された水位ハイドログラフを基に, ピーク水位が(a)八斗島から栗橋, (b)栗橋から芽

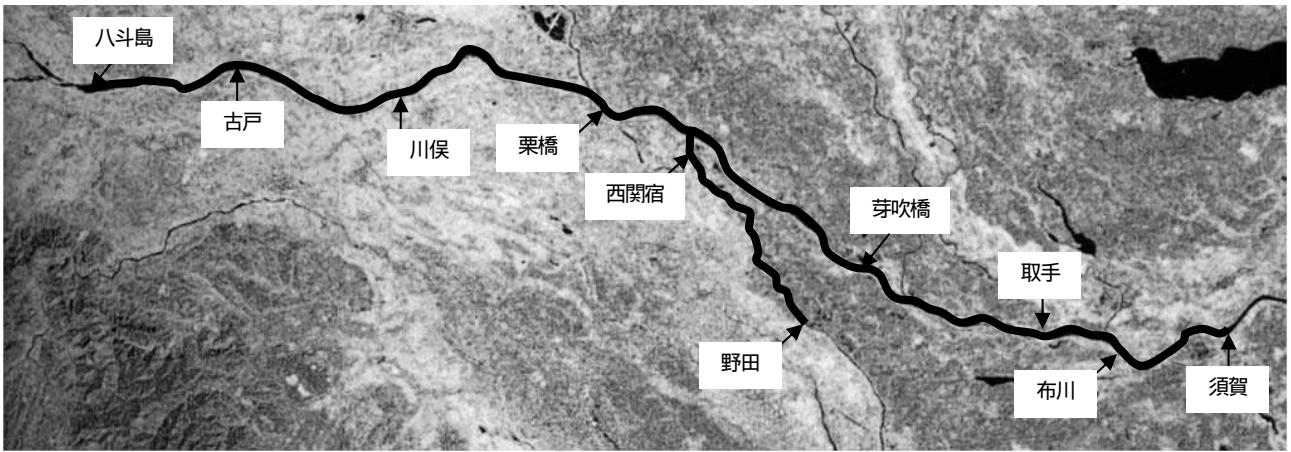


図-1 利根川対象区間平面図

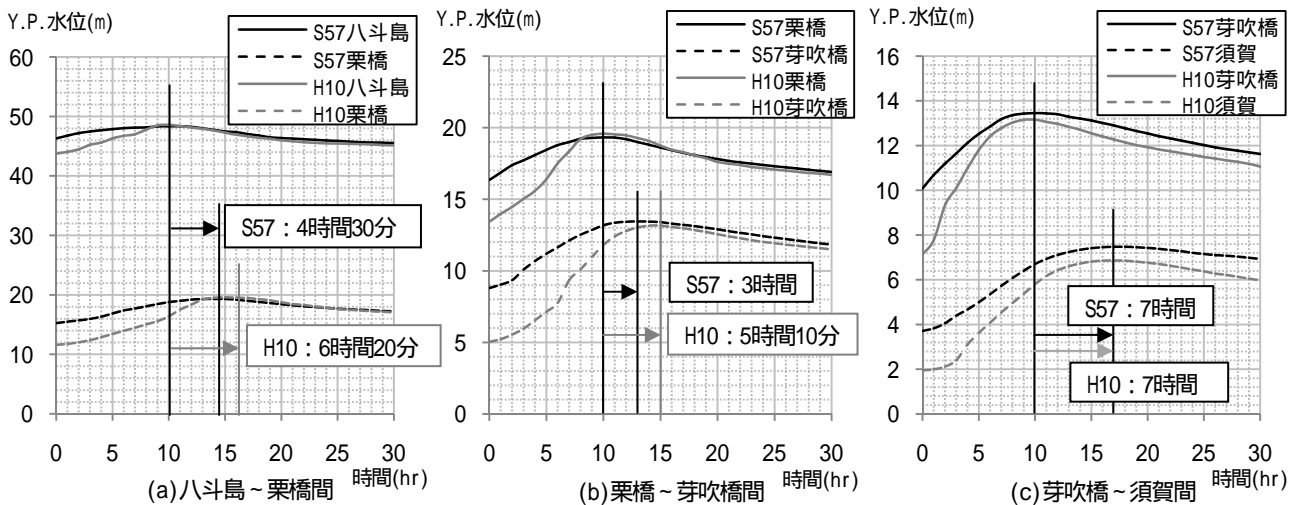


図-2 利根川における昭和57年，平成10年ピーク水位の所要伝播時間と波形比較

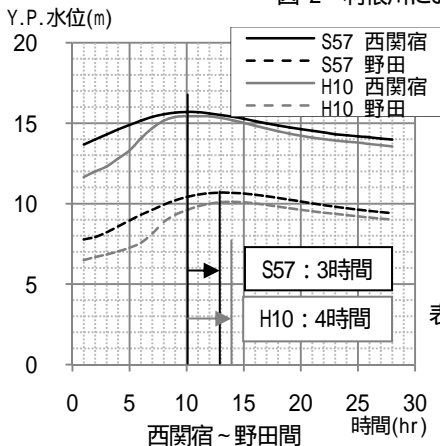


図-3 江戸川における昭和57年，平成10年ピーク水位の所要伝播時間と波形比較

表-1 利根川における昭和57年，平成10年ピーク水位の所要伝播時間と波形比較

区間	利根川 区間(a)				利根川 区間(b)			
	八斗島～古戸		古戸～川俣		川俣～栗橋		栗橋～芽吹橋	
区間距離	(17.0km)		(15.5km)		(18.6km)		(26.2km)	
	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度
昭和57年	1時間30分	3.15	1時間	4.31	2時間	2.58	3時間	2.42
平成10年	2時間30分	1.89	1時間10分	3.69	2時間40分	1.94	5時間10分	1.40

表-2 利根川，江戸川における昭和57年，平成10年ピーク水位の所要伝播時間と波形比較

区間	利根川 区間(c)						江戸川	
	芽吹橋～取手		取手～布川		布川～須賀		西関宿～野田	
区間距離	(18.9km)		(8.8km)		(11.1km)		(19.3km)	
	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度	伝播時間	伝播速度
昭和57年	4時間	1.30	1時間	2.44	2時間	1.54	3時間	1.79
平成10年	4時間	1.30	2時間	1.22	1時間	3.08	4時間	1.29

吹橋，(c)芽吹橋から須賀，西関宿から野田の各区間を流下する際に要した時間と波形の比較を示す．図-2，3は昭和57年，平成10年の各洪水のピーク発生時刻を各区間の上流側地点で一致させて描いたものである．同様にして，各水位観測所間のピーク水位の伝播時間と伝播速度を表-1，2のように整理した．詳細なピーク発生時刻を評価するために，昭和57年洪水は八斗島，栗橋の各水

位観測所，平成10年洪水は八斗島，川俣，栗橋，取手，布川の各水位観測所において10分毎の実測水位データを用いている．これらを基に利根川，江戸川の洪水流の伝播特性について検討を行う．

利根川の八斗島から芽吹橋までの区間，江戸川の西関宿から野田までの区間では，昭和57年から平成10年にかけて洪水伝播に遅れが生じてきていることが分かる．特



撮影日時：1978年³⁾



撮影日時：1995年⁴⁾

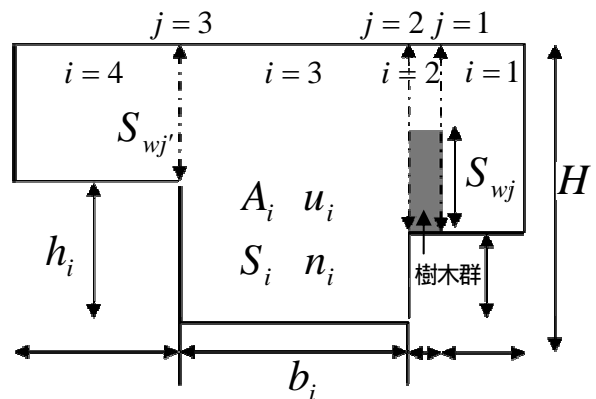
図-4 利根川130km地点航空写真

に、栗橋から芽吹橋までの区間での遅れが顕著に見られる。一方で、芽吹橋から須賀までの区間では洪水伝播に遅れが見られず、芽吹橋までの区間で生じた遅れがそのまま須賀まで伝わっていくことが分かる。このような洪水伝播に遅れが生じる原因を明らかにするため、各区間における洪水伝播特性の違いについて昭和57年から平成10年の間の河道特性の変質に着目して検討を行う。

(2) 河道特性の変質と洪水伝播機構

昭和57年洪水時から平成10年洪水時の間の河道特性の変化について述べる。河道の平面形、縦断面については、経年的に大きな変化は見られない。河床勾配は、対象とした区間の上流から下流にかけて1/750～1/9000と縦断的に変化している。河道横断面形については、利根川では昭和57年から平成10年の間に対象としたほぼ全区間にわたり低水路河床高が低下し、河積が増大している。江戸川では、利根川に比してそれほど大きな河積の変化は見られない。また、八斗島から栗橋、布川から須賀間では低水路幅が高水敷幅に対して広く、高水敷水深が小さいため、流下の際の断面形が単断面に近い河道となる特徴を有している。このように河床勾配や河道横断面形が縦断的に変化するため、表-1、2に示した洪水伝播速度は、昭和57年、平成10年ともに利根川区間(a)では相対的に値が大きく、区間(c)は区間(b)に比べ河床勾配が緩やかになるにも関わらず比較的近い値を示していると考えられる。

次に、河道内の樹木群の繁茂状況については、洪水伝播に遅れが見られた利根川上流区間(八斗島～芽吹橋)と江戸川において、昭和57年から平成10年までの間の航空写真や地情情報等から、河道内の樹木群の繁茂範囲の拡大が見られる。特に、伝播の遅れが顕著であった栗橋から芽吹橋の区間において、図-4に示すように樹木群の繁茂範囲の拡大を確認することができる。逆に伝播に遅れが小さい芽吹橋から須賀の区間では、樹木群自体は存在するものの、経年的な変化はあまり見られず、絶対的な樹木群量としても他の区間に比べて少ないことを確認した。



記号の説明(A :河積, u :断面平均流速, B :全幅, b :低水路幅, n :粗度係数, S :壁面せん断力が働く潤辺, S_{wj} : τ_j' が働く潤辺, S_{wj} : τ_j が働く潤辺, h :高水敷高さ, H :低水路底からの水深, 添字 i は各分割断面を, j は各境界面を表す.)

図-5 任意の複断面河道の横断面形

以上のことから、利根川、江戸川では昭和57年から平成10年にかけての低水路河床高の低下や河道内の樹木群の繁茂範囲の拡大等といった河道状況の質的な変化に起因して洪水伝播に遅れが生じてきていることが分かる。低水路流れと高水敷流れの流速差が大きくなることや樹木群が河道に多く存在することにより、低水路と高水敷流れの混合による抵抗や貯留量の増大が生じ、その結果として洪水流の伝播速度を低下させていることが考えられる。

3. 樹木群のある複断面河道における洪水流の

伝播速度

(1) 洪水流の伝播速度の理論式

著者らがこれまで検討を行ってきた理論式²⁾⁵⁾では左右対称な横断面形状に矩形近似しなければならない点、樹木群の影響は実測の水深とエネルギー勾配に陰的に含む形でしか考慮できない点に問題を残していた。本論文

では、その点を修正し、樹木群のある複断面河道について、新たに理論式を提案する。考え方は従前のものと同様であるため、修正を加えた部分について述べる。

図-5に示すように任意の複断面河道を考える。断面分割については、樹木群が存在する場合には樹木群による死水域を河積から除いた後、横断面を河道形状や樹木群の繁茂状況に従って分割する⁶⁾。導いた基礎式を以下に示す。

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

$$C = \frac{dQ}{dA} = \left[\frac{5b_{mc}}{3B} - \frac{2}{3} \left(\frac{h_{fpr} + h_{fpl}}{H} \right) \frac{R_{mc}}{B} \right] \frac{n_{mc}}{N_c} \frac{1}{n_{mc}} R_{mc}^{2/3} I_b^{1/2} \\ + \left[\frac{5b_{fpr}}{3B} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H} \right) \frac{R_{fpr}}{B} \right] \frac{n_{fpr}}{N_c} \frac{1}{n_{fpr}} R_{fpr}^{2/3} I_b^{1/2} \\ + \left[\frac{5b_{fpl}}{3B} \left(1 - \frac{h_{fpl}}{H} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fpl}}{H} \right) \frac{R_{fpl}}{B} \right] \frac{n_{fpl}}{N_c} \frac{1}{n_{fpl}} R_{fpl}^{2/3} I_b^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_i + \frac{\sum (\tau'_j S'_{wj})}{\rho g} + \frac{\sum (\tau_j S_{wj})}{\rho g} = A_i I_b \quad (3)$$

$$\tau' = \rho f (\delta u)^2 \quad (4)$$

$$\tau = \rho f u_i^2 \quad (5)$$

$$Q = \sum (A_i u_i) \quad (6)$$

$$N_c = \frac{\sum (A_i)}{Q} \cdot R_c^{2/3} \cdot I_b^{1/2} \quad (7)$$

$$R_c = \left\{ \frac{\sum [A_i (A_i / S_i)^{2/3}]}{\sum (A_i)} \right\}^{3/2} \quad (8)$$

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

ここに、式中の記号は、 Q :流量、 C :伝播速度、 R :径深、 N_c :合成粗度係数、 I_b :河床勾配、 R_c :合成径深、 ρ :水の密度、 τ' :分割境界面に働くせん断力、 τ :樹木群境界に働くせん断力、 f :境界混合係数(既往の研究⁶⁾より、表-3に示す数値を使用した。)、 δu :隣り合う断面の断面平均流速の差、 v :断面平均流速、添字 mc は低水路を、 fpr は右岸高水敷を、 fpl は左岸高水敷を表す。

横断方向の流速分布を求める方法は従来の準二次元解析の方法と同様に、各分割断面の境界に働くせん断力

表-3 境界混合係数 f の値⁶⁾

混合現象の区別	境界混合係数の値
低水路流れと高水敷流れとの混合	0.17
河岸に接している樹木群主流部との混合	0.03
二つの流れにはさまれた樹木群と主流部との混合	0.10

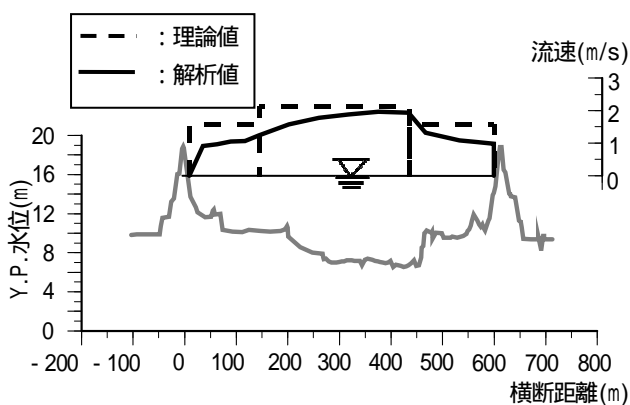
τ' を式(4)、樹木群境界に働くせん断力 τ を式(5)で表現し、式(3)を用いた各断面の力のつり合い式を解くことによって各断面の平均流速を求める。算出した各断面の流速分布を、低水路、右岸高水敷、左岸高水敷と3つの断面となるように平均化し、式(2)に示す任意の河道断面に対応する洪水流の伝播速度の理論式に断面諸元と共に代入することで伝播速度が求まる。

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むこと、高水敷の遅い流れと低水路の速い流れが混合すること、樹木群の繁茂による河積の減少や混合の程度の増大等の影響を考慮することが可能である。式(2)は一次元的な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変化については直接的には考慮できない。しかし、蛇行や樹木群等の平面形状の変化や混合による洪水流の伝播速度に及ぼす影響は式(2)において、実測最大水深と合成粗度係数等を用いることにより、間接的に考慮した形で伝播速度を求めることが可能である。

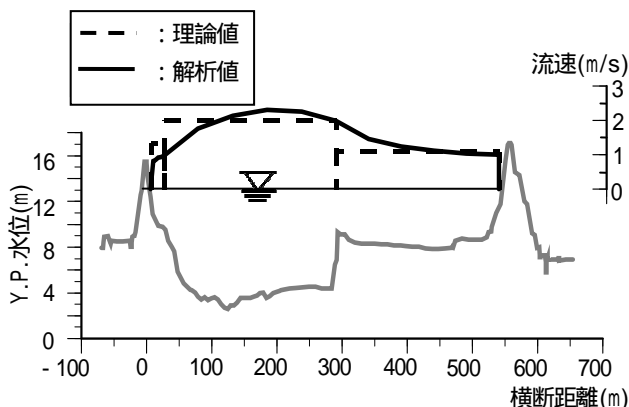
(2)理論と実測の流速分布および伝播速度の比較検討

検討区間は図-1に示した利根川の栗橋から芽吹橋の区間とする。この区間は、既往の研究⁷⁾により昭和57年、平成10年洪水を対象として解析が行われている区間であり、任意の地点における水位、流量、流速分布を知ることが可能である。現地の洪水時における水位観測値および水面形には、洪水の規模、河川の縦横断面形状の変化、樹木群の抵抗等が積分された形で表れている。水面形の時間変化を再現するように解析を行った既往の研究においても、それらの影響が含まれている。本研究では解析から得られた各地点での水位、流量、流速等は実測値を説明できているとして扱っている。

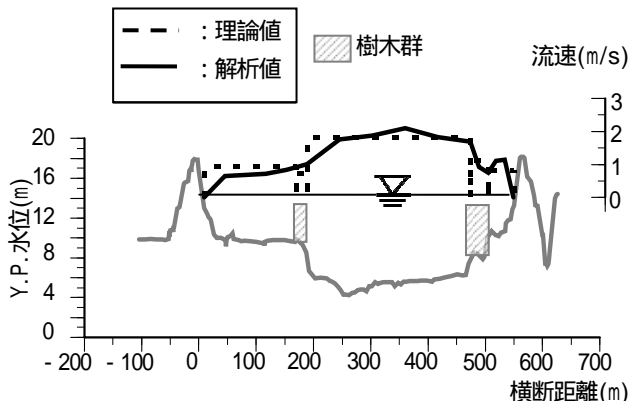
理論値と実測値の比較検討に用いた断面形状は、500m間隔に測量された横断面と断面内に存在するまとまりを持った樹木群を包括するように定めた樹木群領域を各断面において断面分割し、矩形近似したものをを用いた。 I_b には河床勾配を用いた。水深および低水路、高水敷の粗度係数は、福岡らによる⁷⁾解析値を用いた。図-6、表-4、5、6に対象とした地点の横断面形状と理論式から算出した横断流速分布を示す。図-6に示す流速分布の理



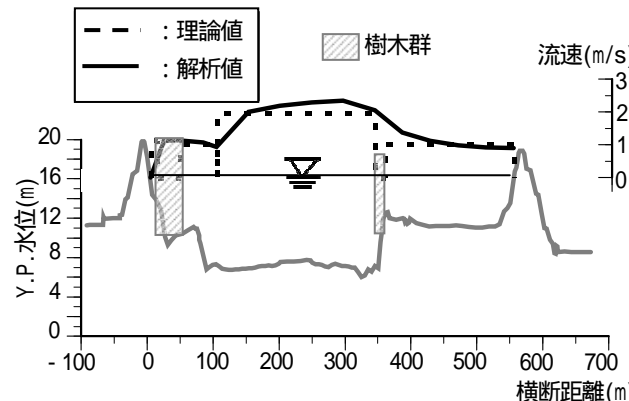
(a)利根川116.5km地点(昭和57年,左右対称な断面形状)



(b)利根川106.5km(昭和57年,左右非対称な断面形状)



(c)利根川112.5km(平成10年,水没樹木群あり)



(d)利根川118.0km(平成10年,非水没樹木群あり)

図-6 利根川の各地点における河道の横断面形と流速分布の理論値と解析値

表-4 利根川106.5km, 116.5km地点の昭和57年洪水ピーク時の横断方向の流速分布の理論値

距離(km)	水深(m)	合成粗度係数	断面平均流速(m/s)				伝播速度(m/s)
			断面1	断面2	断面3	断面全体	
106.5	9.60	0.027	1.31	2.42	1.71	2.09	2.31
116.5	8.64	0.028	1.66	2.45	1.63	2.08	2.70

表-5 利根川112.5km地点の平成10年洪水ピーク時の横断方向の流速分布の理論値

距離(km)	水深(m)	合成粗度係数	断面平均流速(m/s)						伝播速度(m/s)	
			断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面全体		
112.5	樹木:多	8.74	0.040	0.84	1.13	1.83	0.75	0.94	1.57	1.54
	樹木:少	8.74	0.032	0.98	1.48	2.17	1.23		1.86	2.31

表-6 利根川118.0km地点の平成10年洪水ピーク時の横断方向の流速分布の理論値

距離(km)	水深(m)	合成粗度係数	断面平均流速(m/s)							伝播速度(m/s)	
			断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6	断面全体		
118.0	樹木:多	9.26	0.039	1.01	0.00	2.03	1.01	0.00	0.88	1.64	1.56
	樹木:少	9.26	0.033	1.17	1.69	1.70	1.49		1.08	1.91	2.30

表-7 伝播速度の理論値と実測値の比較

対象洪水	伝播速度(m/s)	
	実測値	理論値
昭和57年9月	2.42	2.31 ~ 2.70
平成10年9月	1.40	1.54 ~ 1.56

論と解析値を比較すると、樹木群の多少に関わらず任意の横断面形状に対して理論値は解析値とほぼ一致しており、精度良く表現できていることが分かる。次に、樹木群の多少による流速分布および伝播速度の違いについて検討する。表-5, 6に示すように、樹木群が多く存在することにより隣り合う断面の流速、伝播速度が小さくなっていることが分かる。これは、河道内に樹木群が繁茂することにより、洪水流にとって大きな抵抗要素となっていることを示している。表-6中の断面2および断面5では、樹木群が水位ピーク時に水没せず、理論上は

樹木群を死水域としているために流速を持たない。表-7に伝播速度の実測値と理論値の比較を示す。実測値は、表-1に示すように栗橋から芽吹橋までの区間距離を流下に要した時間で除して求めた。理論値は、図-6, 表-4, 5, 6に示す昭和57年, 平成10年洪水時の断面形, 水深, 粗度係数を用いて求めた伝播速度の理論値の最大値と最

小値を示している。実測値，理論値はともに，先の検討でも示した河道内に繁茂する樹木群の多少による洪水伝播速度の遅れを示している。

八斗島から栗橋，芽吹橋から須賀の区間に対しては洪水伝播速度の理論値と実測値の検討は現時点では行っていない。しかし，洪水伝播速度及び流速分布の理論値は，栗橋から芽吹橋の区間において良好な精度を示していることから，他の区間についても同様に検討を行うことで先に述べた利根川上流から下流にかけての洪水伝播速度の縦断的な変化を表現できると考えている。

このように洪水流に対する河道状況の変質の影響について解析的に検討することは，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，計画で想定される河道改修や樹木管理などに重要な判断材料を与えることになる。

4. 樹木群のある河道の維持管理の方向性

洪水流の伝播機構に及ぼす河道状況の変化の影響について，実現象のデータ分析や理論解析的なアプローチから検討し，河道状況の変化が洪水流下に影響を及ぼしていることを示してきた。特に，河道内に繁茂する樹木群の繁茂範囲の拡大は洪水流の抵抗増大となり，水位上昇や河道貯留の増大をもたらす，その結果として洪水伝播速度に遅れが生じ，また，水位が高い状態が長時間継続することにより，堤防の浸透破壊の危険性が増すことになる。一方において，このことは，下流への洪水流の伝わり方を緩和し，下流の安全性を高めることにもなる。樹木群の洪水流に対する影響の程度は，洪水規模や洪水流の主流に対する樹木群が繁茂する位置，繁茂密度，高さ，樹種等によって異なる⁸⁾。いずれにしても，樹木群等の河道状況の変質が洪水流に及ぼす影響を，水面形の時間変化等の水理量と関係付けて定量的に評価することが，河道の維持管理の際の重要な情報となることに留意すべきである⁹⁾。治水上効率的，効果的に樹木のある河道の管理を考えていく際には，第一に河道内の樹木群の繁茂範囲や高さ，密度等の繁茂形態等といった河道状況の日常的・継続的な点検と状態の把握，第二に樹木群が洪水流に及ぼす影響の定量的な評価，第三に状態評価を受けての管理の検討を一連の流れとすることになる。一方において，河道に繁茂している樹木群は，河川敷を生活の場とする生き物にとって重要な住処を提供する。したがって，樹木群を介して治水と河川環境の調和を検討することが重要であり，このためには対象とする河川敷に繁茂している樹木群の種類，大きさ，密度，配置，その連続性等を調べる必要がある。さらに，対象河川区間の樹木群内に住んでいる生き物の種類とその住処（ハビタット）を調査し，これらの生き物が，樹木群とともに

どのような生態系システムを構成しているかを明らかにしなければならない。次に，そのような調査を受けて，対象河道に洪水流が流れたときの洪水の水面形の時間変化から，流れに悪影響を与える樹木群は，どのようなものを明らかにし，これらの樹木群の伐採が，そこを住処とする生物群に与える生態的な影響の程度を検討することになる。これらの検討を通じて，治水上からも環境上からも河道内の樹木群伐採の影響を小さくする樹木管理のあり方を検討することが今後の大きな課題である。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 利根川，江戸川において昭和57年，平成10年洪水時の実測水位データを用い，河道状況の変質による洪水水位の上昇，河道貯留の増大が主要因となって洪水流の伝播に遅れが生じてきていることを示した。
- 2) 河道内に樹木群を含む複断面直線河道における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。
- 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。河道内に繁茂する樹木群の有無による洪水流の伝播速度の遅れを理論解析的に示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 2) 福岡捷二, 佐藤宏明, 出口桂輔: 複断面河道における洪水流の伝播機構, 水工学論文集, 第51巻, pp. 661-666, 2007.
- 3) 空から見た 利根川(1978), 関東地方建設局, 1979.
- 4) 空から見た 関東の河川・砂防・ダム(1995), 関東建設弘済会, 1996.
- 5) 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.
- 6) 福岡捷二, 藤田光一, 新井田浩: 樹木群を有する河道の洪水水位予測, 土木学会論文集, No. 447/ -19, pp. 17-24, 1992.
- 7) 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.
- 8) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, 607-612, 2007.
- 9) 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.