

利根川・江戸川分派を含む河道区間における 非定常準二次元解析法の適用方法の研究

APPLICATION OF UNSTEADY QUASI-2D FLOW ANALYSIS
TO THE TONE RIVER REACH WITH EDO RIVER BIFURCATION

佐藤宏明¹・大沼史佳²・福岡捷二³
Hiroaki SATOH, Fumiyoshi OHNUMA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 財団法人河川情報センター情報基盤整備部長 (〒102-8474 東京都千代田区麹町1-3)

²正会員 東京都建設局河川部計画課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

³フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構 教授 (〒122-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The quasi-2D method is useful for the flood analysis of channels with vegetation. We have extended the quasi-2D method to the unsteady quasi-2D flood flow analysis capable of considering unsteadiness of flood flow. In this paper, at first, three flood flows are analyzed by the unsteady quasi-2D flow method for the reaches with bifurcation section of the Tone River and the Edo River. The validity of the unsteady quasi-2D flow analysis is demonstrated by the result of observed flood flow. The applicability of the unsteady quasi-2D flow method and unsteady 2D flow method is compared.

Key Words : *flood flow, compound channel, river bifurcation, , vegetation, unsteady quasi-2D flood flow analysis*

1. 序論

我が国の河道には樹木が繁茂し、洪水の流下を阻害する等、樹木に関わる河道管理の問題が生じている。また、堤防際まで宅地化が進み、流下能力確保のため河道線形を現在の堤防線形から変更することは難しくなっている。そのため、河道掘削や河道内の樹木群管理による洪水流下能力の確保が検討されている。

近年、直轄河川を中心に、洪水流の観測体制が整備されつつあり、このような整備が行われている河川では河川の管理レベルが向上している。観測体制整備のポイントは、河川管理が特に必要な河道区間に多くの簡易水位計を設置することにより、観測水面形の時間変化や洪水流の流れ方から、河道の維持管理、安全性の判断や流下能力不足区間の河道の作り方などこれまで以上にきめの細かい検討ができるようにすることにある。水面形の時間変化の観測値は洪水流解析にも活用され、計画や管理などの実用面から洪水流解析の信頼度の向上が図られている。具体的には、観測された水面形の時間変化を解として基礎方程式を解くことによって、洪水流の水理量を求めるものである¹⁾。これは、測定された水面形の時間

変化の挙動には、対象とする河道区間の洪水流と河道の特性が反映されており、河道断面形や樹木繁茂状況など河道特性を解析に適切に取り込み、観測水面形を解とするように洪水流の基礎方程式を解くことによって、流量ハイドログラフ、流速分布、水位縦断形等、洪水流の水理量が適切に求まるという考えに基づいている²⁾。

これまで河道の管理や計画のための洪水解析法として、準二次元解析法¹⁾が一般的に用いられている。準二次元解析法では、樹木群領域の縦・横断分割により縦・横断方向の断面変化と流速分布の変化が考慮されており、このことは河道改修や樹木群の伐採による流れの変化を検討することを可能にしており、実用面から河川管理を検討するのに適した方法である。しかし、この方法は定常流解析であり、洪水流に固有の非定常性を取り込んでいないために、洪水流と樹木群による貯留現象を考慮することができず、洪水ハイドログラフの変化の影響が、粗度係数と樹木群の境界混合係数に表れ、これらの値を一義的に決めることが難しいという問題を残している。この課題を解決するために構築された非定常平面二次元解析法は、河道線形や樹木群の平面分布、洪水流の二次元的な流れを適切に評価することができる。非定常二次元解析では、前述した洪水流の水面形の時間変化を解とし

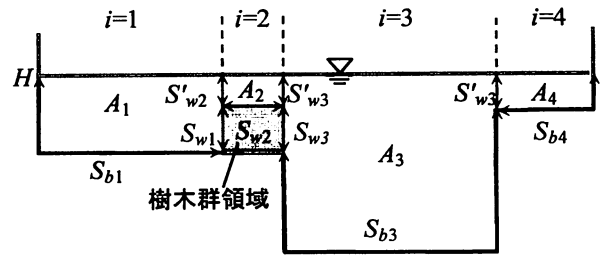
た解析法を採用することにより河道が本来的に有する一定の粗度係数を与え、樹木群の繁茂形態を考慮した樹木群透過係数を用いて河道内の抵抗を定め、樹木群のある河道における洪水流を説明している^{3),4)}。このことは、準二次元解析法に非定常項を加え、実測の水面形の時間変化を再現できるように定常準二次元解析法を非定常準二次元解析法に拡張することの必要性と、これが出来ればより実用的な洪水解析法を提供することが可能となることを意味する。

福岡・佐藤ら⁵⁾は、この視点から定常準二次元解析法を非定常準二次元解析法に拡張し洪水流の検討を行っている。この非定常準二次元解析では、河道の横断形状や河床材料の摩擦等によって判断できる粗度係数と、標準的に用いられてきた境界混合係数によって樹木群のある河道の抵抗値を評価している。しかし、非定常準二次元解析法を実河川の洪水に適用した例は少なく、粗度係数、境界混合係数、樹木群領域の決め方、適用性の限界等について様々な河道の洪水流について検討することが次の課題となっている。

本研究が対象とする分派を含む区間の洪水流については、非定常性を考慮しても複雑な平面形のため、流れの二次元性、三次元性が強まり、一次元解析の枠組みに入る準二次元解析法を適用するには無理があるといわれている。本研究では、非定常準二次元解析法の適用に工夫を施すことによって、利根川・江戸川分派点を含む区間の洪水流についても非定常準二次元解析法が適用できることを示す。最初に、洪水流の水面形が観測されている派川についてこれまで行われてきた非定常準二次元解析⁵⁾を実行し、派川江戸川の流量ハイドログラフを求める。次に求められた派川流量ハイドログラフを既知とすることにより、本川から派川に分派する河道区間を含む本川・派川の洪水流に非定常準二次元解析法を適用する。すなわち、詳細な水面形の時間変化が観測されている江戸川の平成13年洪水について非定常準二次元解析を行い、洪水観測値および非定常平面二次元解析結果³⁾と比較し、新しい解析方法の精度の検証をする。さらに、分派点上流・下流の本川区間についても非定常準二次元解析を適用することにより、対象区間全域における洪水流について本解析法の妥当性を示す。次に、平成13年洪水で決定した粗度係数、境界混合係数、横断面分割法を用いて、平成10年洪水と平成14年洪水を対象に同様に非定常準二次元解析を行い、分派点を含む河道においても非定常準二次元解析法が有用であることを示す。

2. 非定常準二次元解析

非定常準二次元解析法⁵⁾では、式(1)の連続式と準二次元解析の運動方程式の左辺に非定常項を加えた式(2)及び断面内の流速分布に関する式(3)を基礎方程式としてい



H : 水位 (断面内一定値)
 A_i : i における断面積
 S_{bi} : i における底面せん断力 τ_b が作用する潤辺長
 S_{wi} : i における樹木群境界長さの合計 (τ が作用する潤辺長)
 S'_{wi} : i と $i-1$ の間の境界長さ (τ' が作用する潤辺長)

図-1 樹木群を有する一般的な河道横断形と準二次元解析法における断面分割法

表-1 境界混合係数^{6),7)}

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

る。式(2)右辺の第一項の壁面せん断力と第二項の樹木群境界に働くせん断力は、算出した横断面内の流速分布を用いて式(5)、式(6)、式(7)から直接求めている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial VA}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial VA}{\partial t} + \frac{\partial \beta V^2 A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = - \int_{S_b} \frac{\tau_b}{\rho'} dS - \int_{S_w} \frac{\tau}{\rho} dS \quad (2)$$

$$\rho g A_i I = \tau_{bi} S_{bi} + \tau_i S_{wi} - (\tau'_{i+1} S'_{wi+1} - \tau'_i S'_{wi}) \quad (3)$$

$$Q = VA = \sum_i u_i A_i, \quad \beta V^2 A = \sum_i \beta_i u_i^2 A_i \quad (4)$$

$$\int_{S_b} \tau_b dS = \sum_i \tau_{bi} S_{bi}, \quad \int_{S_w} \tau dS = \sum_i \tau_i S_{wi} \quad (5)$$

$$\tau_{bi} = \rho g \frac{n_i^2 u_i |u_i|}{R_i^{1/3}}, \quad R_i = A_i / S_{bi} \quad (6)$$

$$\tau_i = \rho f u_i |u_i| \quad (7)$$

$$\tau'_i = \rho f \delta u_i |\delta u_i|, \quad \delta u_i = u_i - u_{i-1} \quad (8)$$

ここで、図-1 に示した樹木群のある河道の一般的な横断面について、各分割断面に作用するせん断力を考慮したときの、式(4)の各分割断面の連続式と式(3)の流れ方向の運動方程式(せん断力のつり合い式)を連立して解き、横断流速分布を算出する。添え字 i :分割断面番号とし、 u_i :分割断面平均流速、 n_i :粗度係数、 R_i :径深、 τ :樹木群境界に作用するせん断力、 τ' :分割断面境界に働くせん断力、 I :勾配、である。また、式(5)の右辺は、第一項が壁面に働くせん断力、第二項は樹木群境界に働くせん断力、第三項は各分割断面の境界に働くせん断力を示す。せん断力 τ 、 τ' はそれぞれ式(7)、式(8)で評

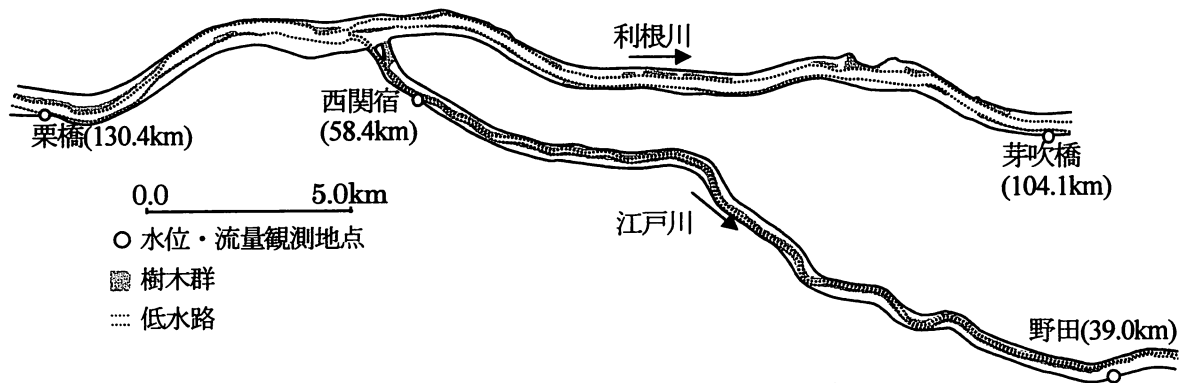


図-2 利根川と江戸川の分派点を含む解析対象区間

価し、ここで、 δu は τ_x が作用する境界に接する2つの流れの流速差を示す。境界混合係数 β は、福岡、藤田ら^{9,7)}によって樹木群がある河道を想定した大型水理実験により決定された表-1 に示す標準的な値を与えている。また、横断流速分布を求める際には、式(1)、式(2)から求まる各時間の流量と、式(4)で求められる各時間の流量が等しくなるように式(3)の各時間の勾配を決定している。

3. 利根川・江戸川分派点を含む区間への非定常準二次元解析法の適用

(1) 解析対象区間

検討対象区間は、図-2 に示す栗橋から芽吹橋までの利根川区間と利根川121.5kmで分派する分派点から野田までの江戸川区間である。この区間の河道は、複断面蛇行形状を有し、低水路河岸を中心に、アカメヤナギやタチヤナギが繁茂している。高水敷上には、樹木群の他に人工草地やオギ・ヨシの群落が存在している。また、江戸川解析対象区間では、洪水時の水面形の時間変化が観測されており⁸⁾、福岡・渡邊^{3),8)}らによって、水面形を用いた非定常平面二次元解析が行われている。

(2) 解析対象洪水

解析対象洪水は、平成10年9月、平成13年9月、平成14年7月の3洪水である。図-2 に示した栗橋、芽吹橋、西関宿、野田において、洪水時の水位と流量が観測されている。表-2 は、対象洪水の観測最大流量を示している。図-3 は、各洪水の栗橋での水位ハイドログラフを横断面図に重ねて示している。これより、いずれの洪水についても、高水敷水深が4m~6m程度となる大規模な出水であること、水位ハイドログラフの波形は、平成10年洪水が最も先鋭で、平成14年洪水、平成13年洪水の順に先鋭である。また、平成13年洪水は、その波形から見て最も規模が大きいもので、9月11日0時~12日21時に、江戸川の39km~46km区間において空間的に密な水位観測が行われ⁹⁾、水面形の時間変化を用いた詳細な解析が可能で

表-2 対象洪水

発生年月	台風	観測ピーク流量(m ³ /s)	
		栗橋	野田
平成10年9月	5号	10,431	2,449
平成13年9月	15号	7,980	2,020
平成14年7月	6号	8,555	1,622

表-3 粗度係数

粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	低水路	左右岸高水敷
利根川	0.030	0.040
江戸川	0.025	0.040

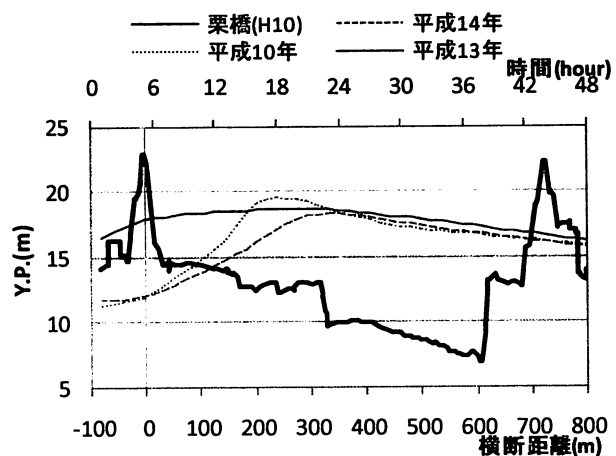


図-3 栗橋の横断面と水位ハイドログラフ

ある。

(3) 分派点の取り扱い

洪水流の非定常平面二次元解析法では、本川で観測された水面形の時間変化を再現するように解析を行い、分流³⁾や合流⁹⁾、堤防決壊に伴う氾濫流¹⁰⁾、遊水地への越流¹¹⁾による分流量、氾濫流量、流入量がそれぞれ実用上十分な精度で求められている。当該区間の洪水流については、利根川の栗橋と芽吹橋、江戸川の野田での水位ハイドログラフを境界条件として、河道の横断形状や河床材料による摩擦等から判断できる粗度係数と、樹木群の繁茂形態を考慮した樹木群透過係数を与えることによって、水面形の時間変化、流量ハイドログラフ、流速分布形等の水理量を適切に算出している³⁾。前述のように、本研究が対象としている非定常準二次元解析法は、その

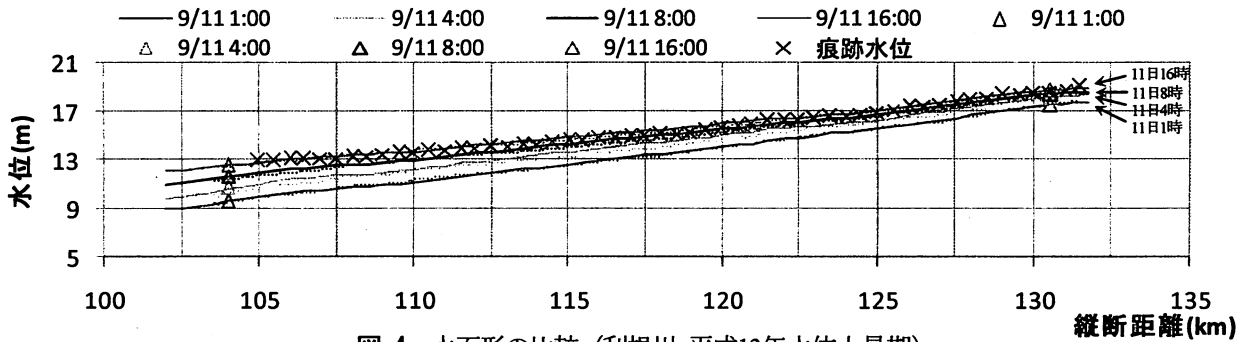


図-4 水面形の比較 (利根川 平成13年水位上昇期)

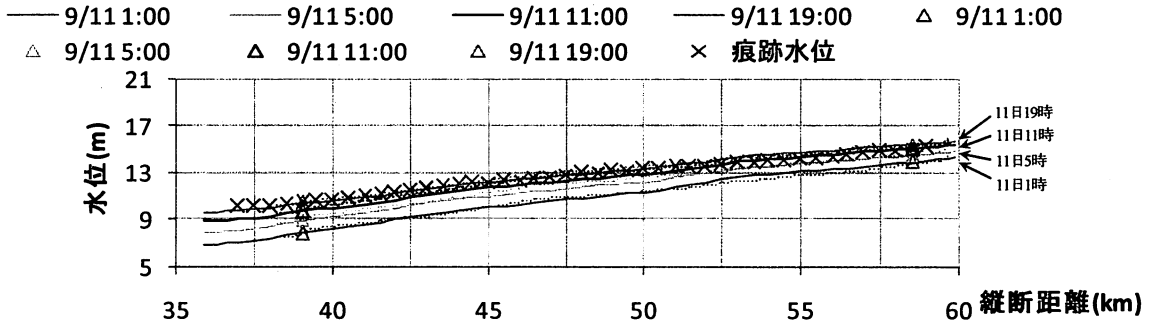


図-5 水面形の比較 (江戸川 平成13年水位上昇期)

考え方が一次元解析法の枠組み内での議論のために、河道分派点での横断方向の流れを直接評価することができない。そのため、非定常準二次元解析では、江戸川下流区間で観測された水面形の時間変化を用いて分派流量ハイドログラフを先に求め、これを利根川本川での分派後の流量ハイドログラフに反映させることを考える。つまり、利根川と江戸川を分けて考え、江戸川流量を先行して算出し、利根川本川流量から江戸川の流量を差し引くことによって、利根川本川の解析を行う。

(4) 解析条件

利根川の栗橋と芽吹橋、江戸川の西関宿と野田において観測された水位ハイドログラフをそれぞれの河道の境界条件として与える。このとき、樹木群はその繁茂形態を考慮して死水域として扱う樹木群領域を決定する。粗度係数は、河道の横断面形状や河床材料の摩擦等によって決まる一定の値、境界混合係数には、標準的な値を与える⁶⁷⁾。観測された水面形の時間変化を再現するように粗度係数と樹木群領域を微調整する。樹木群領域は、平成13年利根川河川情報基図¹²⁾や平成13年江戸川河川環境情報図¹³⁾と航空写真から設定している。洪水水位が時空間的に密に観測されている平成13年の洪水について、江戸川39km~46km区間の実測水面形の時間変化を説明する境界混合係数と粗度係数を表-1と表-3に示す。非定常準二次元解析の結果と福岡・渡邊らの非定常平面二次元解析の結果³⁾、洪水痕跡水位、流量観測値との比較から、解析方法の適合性を確認する。その後、平成10年洪水と平成14年洪水について、決定した粗度係数、境界混合係数、樹木群領域を用い、非定常準二次元解析を

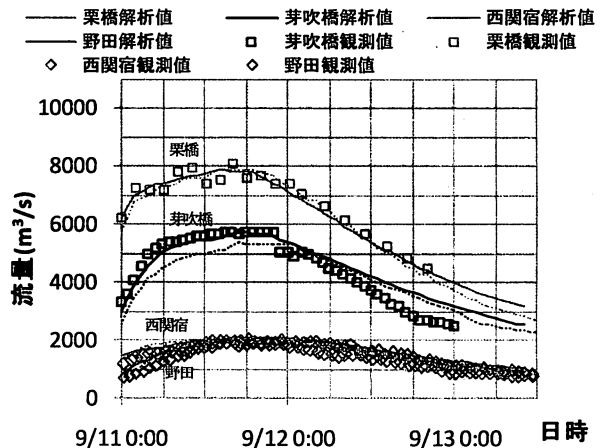


図-6 流量ハイドログラフの比較 (平成13年洪水)

行う。

4. 解析結果

(1) 平成13年洪水

図-4に利根川、図-5に江戸川の平成13年洪水水面形の解析結果を示す。いずれも水位上昇期の水面形の時間変化である。実線が非定常準二次元解析法による水面形、点線が非定常平面二次元解析法による水面形³⁾、×印は痕跡水位、プロットは水位観測値を示している。江戸川では、39km~46km区間で水面形の時間変化が詳細に測られておりこの結果も利用されている。これより、いずれの時間においても、非定常準二次元解析の水面形は、非定常平面二次元解析の水面形及び痕跡水位を概ね説明している。また、図-6に示す流量ハイドログラフの比

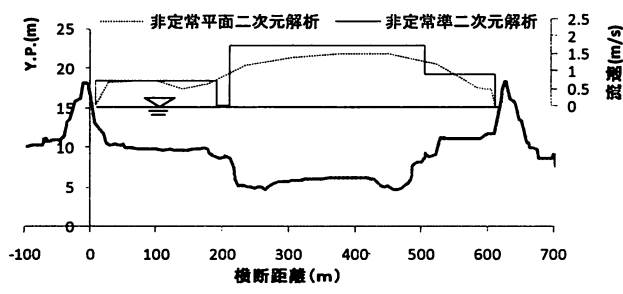


図-7 横断流速分布の比較 (利根川113.5km)

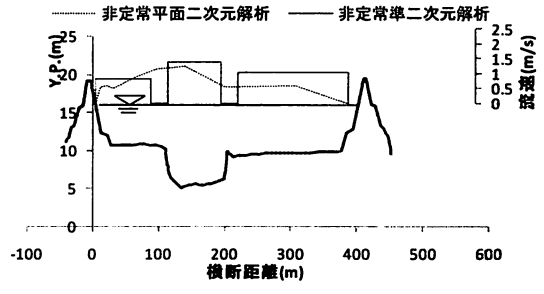


図-8 横断流速分布の比較 (江戸川53.0km)

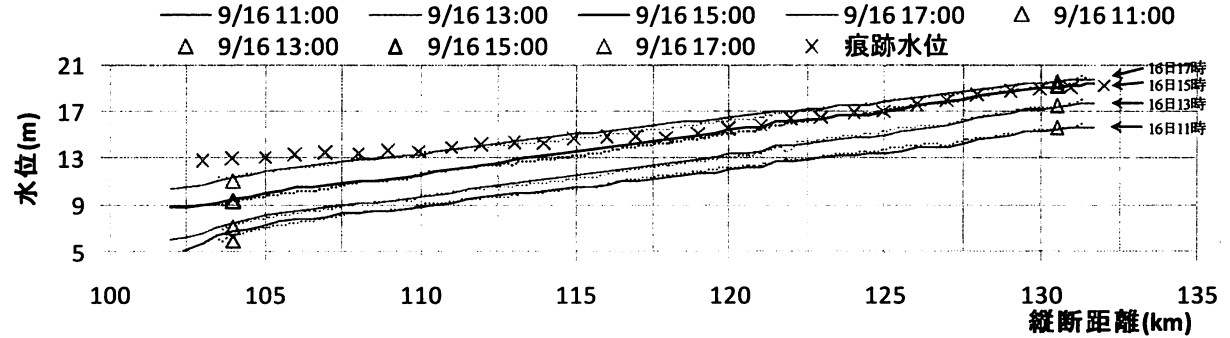


図-9 水面形の比較 (利根川 平成10年水位上昇期)

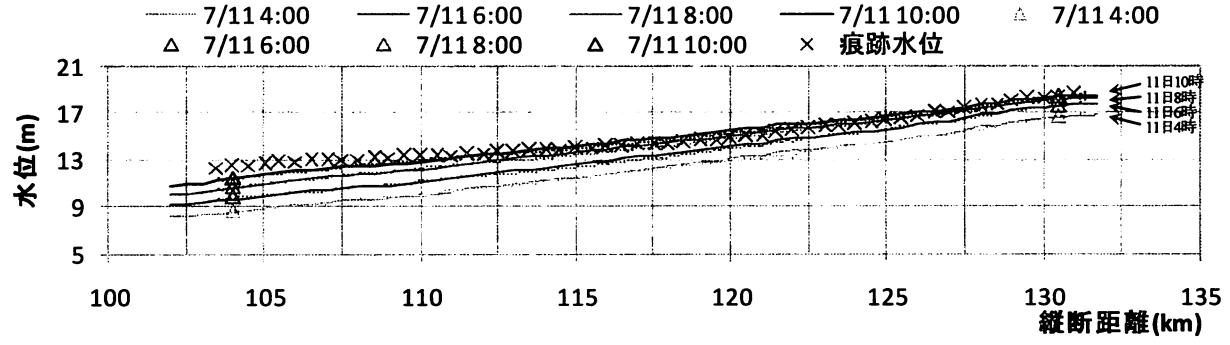


図-10 水面形の比較 (利根川 平成14年水位上昇期)

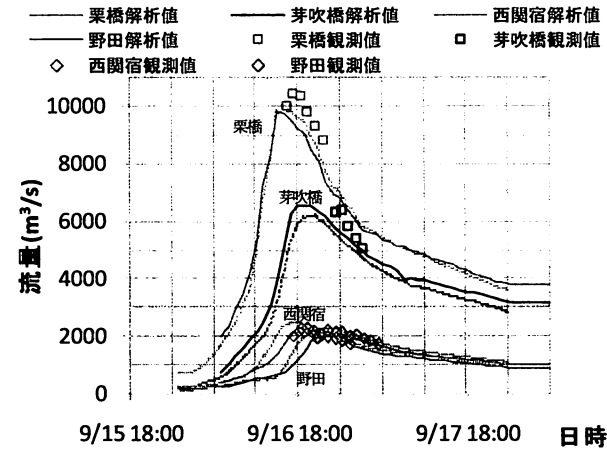


図-11 流量ハイドログラフの比較(平成10年洪水)

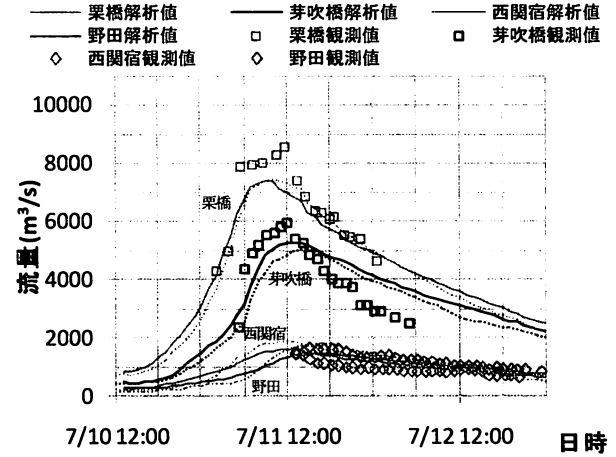


図-12 流量ハイドログラフの比較(平成14年洪水)

較から、非常常準二次元解析により求めた流量ハイドログラフ(実線)は、非常常平面二次元解析の流量ハイドログラフ(点線)と流量観測値(プロット)をほぼ再現している。芽吹橋のピーク流量について、非常常平面二次元解析より非常常準二次元解析が流量観測値を説明しているように見える。この理由は、非常常準二次元解析では、西関宿での水位を境界条件として与えているが、

非常常平面二次元解析では、分派点では水位の境界条件を考慮していないためである。河道線形が比較的直線である利根川113.5kmと江戸川53.0kmにおける水位ピーク時の横断流速分布をそれぞれ図-7と図-8に示す。非常常準二次元解析では、樹木群領域は死水域としているため、樹木群が水没していない場合の樹木群領域の流速はゼロとしている。そのため、非常常準二次元解析法で設

定した樹木群領域付近において非定常準二次元解析と非定常平面二次元解析の流速の差が生じているが、全体的に見ると樹木のある河道の流速分布の特性を表現し得ている。非定常準二次元解析法による洪水流解析では、基本式(1)~(3)に示すように流速分布形を考慮していることが重要である。非定常二次元解析から計算される流速分布との差がこの程度であれば問題がないと判断される。

(2) 平成10年洪水・平成14年洪水

平成13年洪水について決定した粗度係数、境界混合係数、樹木群の存在を考慮した横断分割はそのまま用い、境界条件を与える水位ハイドログラフだけを変更して、平成10年洪水と平成14年洪水について解析を行う。洪水前後で、河道の横断面形状および、樹木群の繁茂状況には大きな変化は生じていないことから平成13年と同一のものを与えている。

図-9 に平成10年洪水、図-10 に平成14年洪水の利根川水位上昇期の水面形の時間変化を示している。これらの図には平成13年洪水の検討と同様に、非定常平面二次元解析の水面形、洪水痕跡水位、水位観測値を合わせて示している。これより、113km~118km付近において、非定常準二次元解析の水面形が、非定常平面二次元解析の水面形より若干高い傾向にあるが、その差は小さくなく、実用性を重んじる非定常準二次元解析の役割を考慮すると、非定常準二次元解析は、樹木のある河道の洪水流を十分説明できていると言える。このときの流量ハイドログラフについて、平成10年洪水を図-11 に、平成14年洪水を図-12 に示している。栗橋では、平成10年と平成14年ともに、非定常準二次元解析と非定常時平面二次元解析による流量ハイドログラフと流量観測値は同様と考えてよい。江戸川分派より下流の芽吹橋、西関宿、野田では、先に述べた西関宿の水位を境界条件として採用しているか、採用していないかの理由より、非定常準二次元解析と非定常平面二次元解析の流量ハイドログラフはやや異なるが、非定常準二次元解析により求めた流量ハイドログラフは、観測された流量ハイドログラフの波形をほぼ説明している。

7. 結論

本研究は、利根川から江戸川への分派を含む本川・派川の洪水流への非定常準二次元解析法の適用性を検討した。以下に、主な結論を示す。

- 1) 非定常一次元解析の枠組みに入る非定常準二次元解析法を分派点を含む区間に適用する場合、まず実測水面形の時間変化が測られている区間で非定常準二次元解析を用いて流量ハイドログラフを求める。次に、これを用いて分派区間を含む全ての区間の洪水流の非定常準二次元解析を行えばよい

ことを示した。利根川では分派後の派川の実測水面形の時間変化から分派流量を見積もり、これを本川流量から差し引くことによって、本川・派川の洪水流の解析が可能であることを示した。

- 2) 樹木群のある河道における洪水流の非定常準二次元解析では、樹木群の繁茂形態を考慮した樹木群領域を死水域として与え、河道の横断面形の摩擦等によって決まる一定の粗度係数と、標準的な境界混合係数を与えることによって、複雑な流れ場の洪水流を実用上必要な精度で解析が可能であることを示した。

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, 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
- 3) 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.
- 4) 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, pp.607-612, 2007.
- 5) 福岡捷二, 佐藤宏明, 出口桂輔: 洪水流の非定常準二次元解析法の研究, 土木学会論文集 (登載決定) .
- 6) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第180号, 1990.
- 7) 財団法人リバーフロント整備センター編集: 河川における樹木管理の手引, 山海堂, 1999.
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, No.761/II-67, pp.45-56, 2004.
- 9) 福岡捷二, 永井慎也, 佐藤宏明: 河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ, 貯留量の評価—利根川・渡良瀬川の平成13年9月洪水を例として—, 水工学論文集, 第49巻(1), pp.625-630, 2005.
- 10) 福岡捷二, 山崎憲人, 黒田勇一, 井内拓馬, 渡邊明英: 急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究, 河川技術論文集, 第12巻, pp.55-60, 2006.
- 11) 福岡捷二, 昆敏之, 岡村誠司: 鶴見川多目的遊水地の洪水調節効果の評価—河道の水面形の時間変化を考慮した非定常準二次元解析法の適用—, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp.238-248, 2007.
- 12) 利根川上流河川環境基図: 国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所, 2001.
- 13) 江戸川河川環境情報図: 国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所, 2001.

(2009. 4. 9受付)