

洪水流の非定常準二次元解析法の研究

福岡捷二¹・佐藤宏明²・出口桂輔³

¹フェロー 中央大学理工学部特任教授, 研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

²正会員 (財)河川情報センター情報基盤整備部長 (〒102-8474 東京都千代田区麴町1-3)

E-mail:hi-satos@river.or.jp

³正会員 国土交通省近畿地方整備局和歌山河川国道事務所 (〒640-8227 和歌山県和歌山市西汀丁16)

洪水流は降水と河道の状況に応じた流下形態を示し、その特性は洪水時に観測される水理データ、特に水面形の時間変化に現れる。河川の計画・管理においては、河道における洪水流の水位と流量の伝播機構を定量的に評価することが特に重要である。本文では最初に、これまでの洪水流の解析的研究の流れを概観することにより、河川の適正な管理を行うには洪水流の非定常性に着目し、これに起因する河道貯留を考慮することが不可欠であることを示している。次に、従来用いられている準二次元解析法を水面形の時間変化を解とする非定常準二次元解析法に拡張している。最後に、江戸川の洪水流を対象に構築した非定常準二次元解析法を非定常平面二次元解析法と比較検討し、非定常準二次元解析法の適用性と、その工学的意義を強調している。

Key Words : *unsteady quasi-2D flow analysis, storage volume, temporal water surface profiles, flood propagation mechanism, compound channels, vegetation*

1. 序論

近代以降、我が国では、治水計画で定められた堤防法線やその位置、計画高水位高等に基づき河川整備が行われてきた。河川沿いには多くの人々が住み、社会資本整備が進められた結果、計画高水位を現状よりも高くすること、堤防法線を変更することは実質的には難しく、計画高水位、堤防法線を基本的には変更しないことを前提に河川整備を行っていくことになる。

このような中で近年、河道の変化、特に、河床の低下と著しいみお筋の形成、河道内の樹林化の進行によって、河道の流下能力や安全性に問題が生じており、流下能力を向上させるための河道改修、樹木管理が検討されている。特に河道内に繁茂する樹木群は、河道貯留量の増大による水位の上昇や洪水波形の変形（洪水伝播の遅れ）を引き起こしている¹⁾。洪水流の伝わり方は河川の整備や維持管理を行って行く上で特に重要であり、河道の変化が洪水の水位、伝わり方にどのような影響を及ぼすかを正しく評価することが重要な課題となっている²⁾。

2. 洪水流理論の展開

(1) 洪水流の準定常性を仮定した理論

洪水流に関するこれまでの研究、特に本研究が対象と

する非定常準二次元解析法との関係において、洪水流解析法の発展過程を概観する。

洪水流は、水位、流速などの水理量が下流にゆっくり伝わる現象であり、水理量の時間的な変化が小さい準定常流と考えるとよいと考えられてきた³⁾。このような準定常流を仮定して導かれた代表的な式として、広い単断面河道で運動方程式として等流の抵抗式を用いて導かれた Kleitz and Seddon⁴⁾の波速と平均流速の関係式がある。我が国では、1950年代から60年代半ばにかけて、速水³⁾、矢野⁵⁾らは、加速度項を省略した運動方程式と連続式を用いて、洪水流を拡散波として扱い、波形の変形・減衰を解析的に扱っている。林は⁶⁾、洪水流を開水路の等流水深 h_0 に乗った微小振幅 h' の長波であると仮定し、微小擾乱の伝播は、洪水の波長と河床勾配の積に対する洪水水深の比によって、dynamic wave型とkinematic wave型に分類されるとした。すなわち、 $h_0 \gg L \cdot i$ の場合は、上・下流に洪水が伝わるdynamic waveとなり、 $h_0 \ll L \cdot i$ の場合は下流のみに洪水が伝わるkinematic wave、 $h_0 \sim L \cdot i$ の場合は、両者の波の特性を併せ持つというものであった。これら1950年代～1960年代の理論は、当然のことながら河川の洪水流の観測データはほとんど無く、また計算機の利用も十分行えなかったことから、洪水流の解析が十分行えず、また我が国の河川の特徴である複断面河道における洪水流の挙動を表現できるものではなかった。そ

の後、日本の河川の洪水流の水位伝播や波速に関して、橋本・藤田⁷⁾は、洪水流の $h/L \cdot i$ の大きさについて調べ、河床勾配 i が1/2000以上であれば $h' \ll L \cdot i$ の関係が成立すること、山田・豊田⁸⁾は、流域面積4000km²以下の河道地点までの洪水流はkinematic wave法で説明できることを示している。

今日では、多くの洪水データが収集され、また計算機の利用により洪水の水理現象はかなりの程度明らかになってきている。実用的な洪水解析手法として、ピーク流量を対象として洪水流を定常流とみなす一次元解析法及び準二次元解析法が広く用いられている¹²⁾。大きな流域では、ピーク流量付近では、洪水流は、定常状態になっていることが多く、定常流解析は実用上は妥当な方法である。一次元解析手法は、特に単断面的な河道では有効である。準二次元解析法は、基本的には一次元解析法の枠組みに入るが、横断的な断面変化や樹木群の影響による横断方向への質量や運動量の輸送・混合を考慮に入れた流速の横断分布や樹木の配置を考慮して解いており、複断面河道や樹木のある河道の洪水流解析に有効な方法である⁹⁾¹⁰⁾。準二次元解析はピーク流量を与え、解析縦断ピーク水位分布が洪水のピーク時についたと思われる痕跡水位に一致するように粗度係数と境界混合係数を決めて流れを解いている。このことから、洪水流解析の主流は、不等流解析から複断面河道の断面変化や河道内樹木群を考慮できる準二次元解析に移行した¹¹⁾¹²⁾。しかし、対象とする洪水流の問題によっては準二次元解析といえども不十分であることが次第に明らかになってきた。すなわち、準二次元解析は洪水流の非定常性を取り込んでいないために、洪水流に固有の貯留現象による洪水流量や水位の縦断的な低減を十分説明できないこと等のために、洪水ごとに異なる貯留現象の差が粗度係数や境界混合係数にしわ寄せされることになる。このため、同一の河道であっても痕跡水位縦断形を説明する粗度係数や境界混合係数の値は、洪水流ごとに異なり、一義的に決めることが難しいこと等の課題が残されている¹⁾。

重枝ら¹³⁾は、境界混合係数等がうまく決められない問題に対する一つの試みとして、解析法の適用性が高い平面二次元解析と準二次元解析結果を比較し、樹木の繁茂状況と境界混合係数値を関係付け、これにより樹木繁茂状況を考慮した水位予測が可能となるような準二次元解析法の拡張を試みている。しかし、この方法も定常流解析のために準二次元解析の有する上述の問題の本質的な解決策になり得ていない。

(2) 洪水流の非定常性を考慮した理論

洪水流は時間的には緩やかに伝播するものの、河道で起こっている洪水現象には、洪水の非定常性から起こる

時間的な水理量の変化と場所的な河道特性の変化が相互に影響しあって河道貯留という重要な機能を発揮している。最大水位の変化で表現する洪水の伝播速度（波速）については、kinematic wave法で算定可能であるが、河道貯留現象は上述の定常流解析や長波近似では説明ができず、少なくとも時間的、場所的加速度を十分考慮に入れた解析が必要である。近年、樹木群の繁茂など河道の状況が変化することによって、河道貯留による洪水流の変形が無視できないものとなり¹⁴⁾、河道管理の上からこの水理現象を考慮せざるを得なくなってきている。しかし、非定常一次元解析法は、複雑な平面形を有する複断面河道や樹木群の繁茂と非定常性に起因して起こる貯留現象を取り扱うには算定精度が十分でない場合が多い。

それではなぜ、洪水流解析の主流であった準二次元解析法の拡張である非定常準二次元解析法に進まず、非定常平面二次元解析法に一足飛びに進んだのであろうか。貯留現象には、洪水流の非定常性と河道の縦横断形状との相互作用が重要な役割を果たしている。すなわち、非定常性だけでなく河道の形状変化を適切に考慮できなければ貯留現象を算定したことになる。このことが非定常一次元解析ではなく、河道貯留を正しく反映している水面形の時間変化を考慮に入れた非定常平面二次元解析に進ませることとなった¹⁴⁾。貯留現象とは、河道のある区間を見たときに上流から入ってくる流量と下流から出て行く流量の差によって起こるもので、それは洪水流の水面高が時系列的に高まっていき、そして低くなっていく現象に対応する。これは洪水流そのものであり、定常流では決して起こりえないことである。このことは、洪水流解析において水面形の時間変化を十分捉え切れなければ、洪水流を適切に解析したことにならないことを意味している。河道で起こっている洪水流の水理現象は、時々刻々の水面に反映しており、その広がりとしての水面形の時間変化が洪水流の本質であり、これを説明できることが洪水現象の解明に不可欠であることが明らかになった。水位は、流量、流速等、他の水理量に比較して観測精度は高い。水位計が縦断的にある間隔で設置されていさえすれば水面形の時間変化を知ることが出来る。水位データが時・空間的に集められるようになると、水面形の時間変化を非定常解析に取り込むことは容易である。

著者らは、観測された水面形の時間変化が正しいものとして、実測水面形の時間変化を解とするように非定常平面二次元方程式を用いての流量ハイドログラフ、貯留量ハイドログラフ、流速分布等の水理量を求め、実測値と比較し解析法の有効性を確認している¹⁴⁾¹⁵⁾。この解析法は、空間的に広い範囲の水面形の時間変化を説明出来ることから、洪水流を縦横断的に広く見て時間的、空間

的に最適な解を得ることになる。したがって、水面形の時間変化となって現れる洪水流の多くの水理現象、例えば、洪水流の分流¹⁶⁾、合流¹⁷⁾、河道の変化と洪水流の伝播機構との関係¹⁸⁾、遊水地への流入量¹⁹⁾、堤防決壊に伴う氾濫水の流出ハイドログラフ²⁰⁾、潮位変化の大きい河口域の洪水流とその河道計画²¹⁾、洪水期間中の河床変動²²⁾等が容易に取り扱われるようになり、河川の計画、設計、管理に使われるようになっていく。

不等流解析、準二次元解析では、洪水流の非定常性と河道の断面変化に起因して起こる貯留現象を取り込めない。また解析に用いられる観測流量と痕跡水位の誤差が大きく、これらの問題点が、粗度係数や、境界混合係数の値にしわ寄せされる。そのため、二つの係数値が洪水ごとに異なり、解析法の信頼性を損ねてきた。非定常平面二次元解析では、洪水流の非定常性、断面変化特性を取りこめ、さらに流量ではなく水位を境界条件として、痕跡水位ではなく水面形の時間変化を用いることにより、物理的あいまいさを排除した精度の高い計算が可能になった。特に、樹木のある河道、例えば利根川河道で樹木群が繁茂している区間では、樹木群の流れに及ぼす抵抗力が摩擦抵抗力の2倍～4倍の大きさを有し、樹木群の抵抗評価が洪水流の解析精度を決めることが明らかとなった。このため摩擦抵抗に関するマンギングの粗度係数には、樹木の抵抗を除いた（樹木の抵抗は樹木群透過係数で評価）河道の断面形と底面の摩擦による一定の粗度係数を与え、その値は、同一河道であれば洪水ごとには変化しない値をもつこと、樹木群透過係数には洪水流水面形の時間変化を説明する値を用いれば精度の高い洪水流解析が可能となる²³⁾。

非定常平面二次元解析法が洪水流の観測結果を適切に説明できる最大の理由は、洪水流の非定常性を考慮したこと、さらに観測水面形の時間変化を解析に取り入れたことである。洪水流の非定常性の程度は海の波に比べて十分に小さいが、非定常性がなくては洪水流の基本的な特性を表現できない。この意味からすると、従来の準二次元解析法に非定常性を考慮し、解析に観測水面形の時間変化を取り込めば、非定常準二次元解析法は非定常平面二次元解析とほぼ同様の説明力が期待できると考えられる。

洪水時の水面形の時間変化については、現時点では、どの河川でも観測できる体制が整っているわけではない。我が国の一級河川では、既設の自記水位計は、平均的に約10km間隔で設置されており、水面形の検討には十分な設置数ではなく、二級河川に至っては、水位計がない河川がほとんどである。豪雨災害対策の推進についての提言²⁴⁾でもなされたように、水位計を縦断的に設置して住民が洪水現象の変化や災害の拡がりを実感できる情報

提供を行えるようにすることが緊急の課題となっている。現在、一級河川において、河道計画・管理上課題のある30区間についてそれぞれ数km以上の区間で洪水流の水面形観測が行なわれている（平成20年4月現在）。洪水時に河道で起こっている水理現象は、時空間的に積分された平均的な形で水面形に表れており、水面形の時間変化は、洪水と河道についての重要な情報を与えている。流下能力や河床変動等、河道管理上問題のある区間、あるいは、調査が必要な区間に、約1～2km間隔にロガー式の簡易な圧力式水位計を設置し、洪水後に水位データを回収し、分析することが行われている。しかし、洪水時の水面形の時間変化を測定できる河川が少なく、現時点では、水面形を用いる解析法の一般性が欠けることは否めない。しかし、流量ハイドログラフや、貯留量、流れ場等洪水流の基本的な諸量が水面形の測定されている区間で同時に算定できること、また河床変動に対する情報を得ることが可能であること等を考慮すると、まずは、検討が必要な区間から水位計を設置していけばよいと考える。当面は、自記水位計による水位ハイドログラフと洪水痕跡を用いて非定常解析を行えば、解析精度は低下するものの非定常性という洪水流の基本的な特性を考慮できることになり、その成果は、河川技術の進展に寄与するところは大いと考えている。

本研究は、はじめに従来の準二次元解析法を拡張した非定常準二次元解析法を構築し、この非定常準二次元解析法と非定常平面二次元解析法、現地データの比較から、樹木群のある複断面蛇行河道の洪水流に対する本解析法の適用性を明らかにする。次に、複断面河道における洪水流のピーク水位の伝播速度を理論的に導出し、河川改修等による河道断面形の変更が洪水流の伝播速度に及ぼす影響を明らかにする。

3. 樹木群のある複断面蛇行河道における洪水流の非定常準二次元解析法

構築する解析法は従来の準二次元解析法^{9,10)}を非定常流に拡張するものである。したがって、図-1に示す断面形状は従来^{9,10)}と同じである。縦断方向に河積が大きく変化しない河道にあっては、断面積分した連続式と運動方程式はそれぞれ式(1)、(2)で表わされる。

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

$$\frac{\partial VA}{\partial t} + \frac{\partial \beta V^2 A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = - \int_{s_b} \frac{\tau_b}{\rho} dS - \int_{s_w} \frac{\tau}{\rho} dS \quad (2)$$

ここに、 x : 流下方向距離、 t : 時間、 V : 断面平均流速、 A : 断面積、 H : 水位、 β : 運動量補正係数、 g : 重力加

速度, ρ : 水の密度, τ_b : 底面せん断応力, S : 潤辺長, S_b : τ_b が作用する潤辺長, τ : 樹木境界に作用するせん断応力, S_w : τ が作用する潤辺長である. 図-1に示すように横断面形状を分割し, $A = \sum A_i$ とすれば, 式(1), (2)の各量は以下のように計算できる.

$$Q = VA = \sum_i u_i A_i, \quad \beta V^2 A = \sum_i \beta_i u_i^2 A_i \quad (3)$$

$$\int_{S_b} \tau_b dS = \sum_i \tau_{bi} S_{bi}, \quad \int_{S_w} \tau dS = \sum_i \tau_i S_{wi} \quad (4)$$

ここに, A_i : i における断面積, u_i : i における断面平均流速, β_i : i における運動量補正係数(本研究では $\beta_i = 1$), τ_{bi} : i における底面せん断応力, S_{bi} : τ_{bi} が作用する潤辺, τ_i : i における樹木群境界に作用するせん断応力, S_{wi} : τ_i が作用する潤辺である.

洪水流の水利現象は, 時間的に緩やかであることから, 分割境界での質量や運動量交換に起因する各時間の平均流速場は, 式(5)に示される定常等流で用いた流下方向の単位長さあたりの釣り合い式と同じ式形を用いて求めるものとする.

$$\rho g A_i I_f = \tau_{bi} S_{bi} + \tau_i S_{wi} - (\tau'_{i+1} S'_{wi+1} - \tau'_i S'_{wi}) \quad (5)$$

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

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

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

ここに, τ'_i : i と $i-1$ の境界において $i-1$ に作用する流下方向のせん断応力, S'_{wi} : τ'_i が作用する潤辺, I_f : 勾配である. 式(6)~(8)に示すように, 底面せん断応力 τ_b はマンニングの粗度係数 n_b , 樹木群境界及び各断面間の境界に作用するせん断応力 τ , τ'_i は境界混合係数 f ^{11),12)}を用いて表している.

式(5)が, 時間的に変化する河川の洪水流に対してどの程度の適合性があるかについては, 洪水流の横断流速分布の時間変化を実測することにより検証していくことが今後の課題である.

図-2に解析フローチャートを示す. 式(5)の断面内のつりあい式から求まる各時間の流量 Q が, 連続式(1)と運動方程式(2)より求められた同じ時間の流量 Q と等しくなるように式(5)の勾配 I_f を変化させ繰り返し計算により各断面の各時間の流速 u_i を求める. 収束条件は $\delta I_f < 1/10000$ とした.

断面分割は, 既往の研究^{9),10)}と同様に, 図-1に示すように高水敷, 低水路, 樹木群を有する領域に分割する. 樹木群内では死水域として取り扱い, 樹木群の抵抗は樹

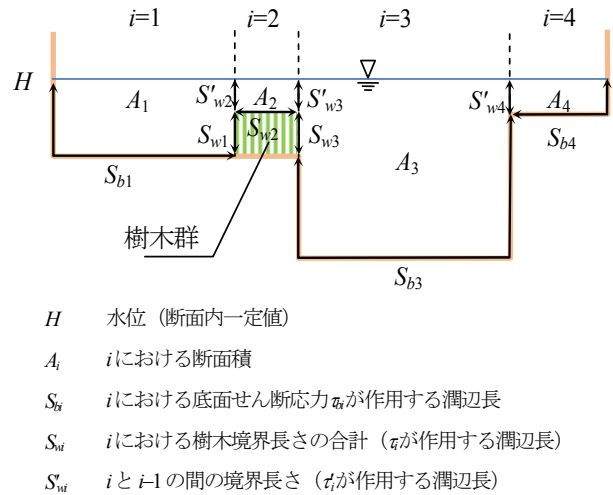


図-1 樹木群を有する一般的な河道横断面と準二次元解析法における断面分割法

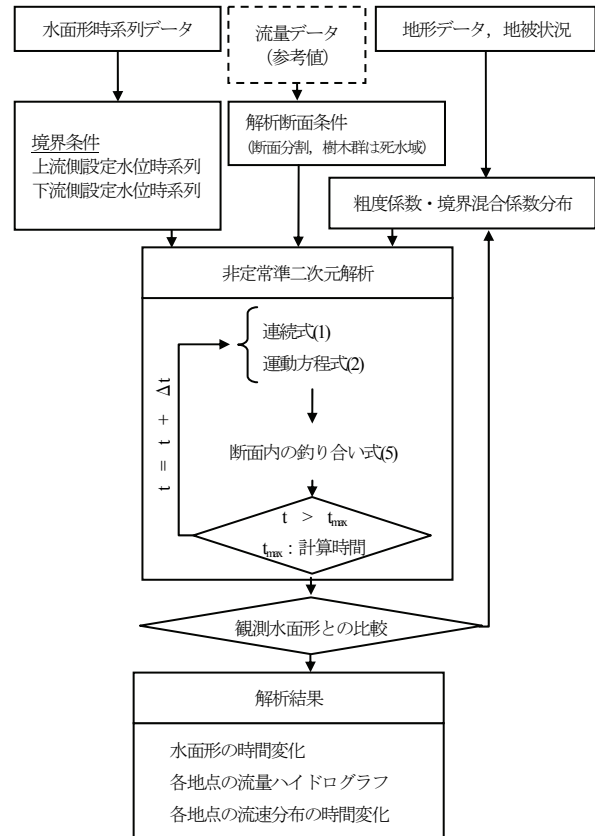


図-2 解析フローチャート

木群境界に作用するせん断応力 τ で評価される. 解析の基本的考え方は, 著者らによる洪水流の非定常平面二次元解析法¹⁴⁾と同様に, 境界条件には河道の上下流端での水位の時間変化を与え, 計算区間内の観測水面形の時間変化と計算水面形の差を全体的に小さくなるように, 粗度係数 n_i 及び境界混合係数 f を決定するものである.

本来, 数値解析的には流れの水面形は求めるものであって与えるものではない. しかし, 洪水流という複雑な

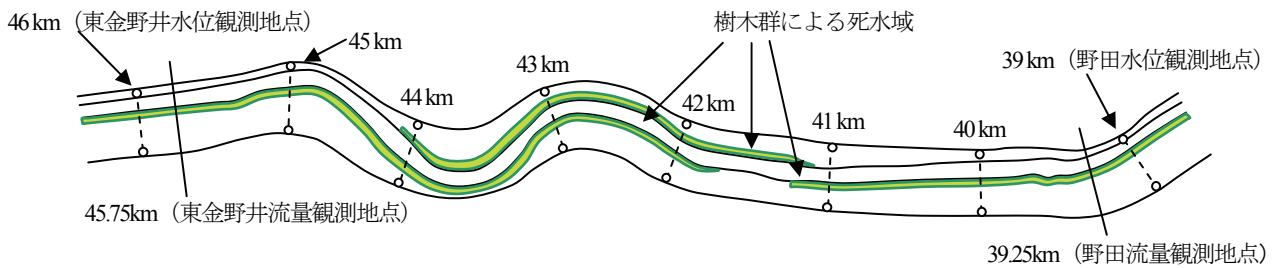


図-3 江戸川対象区間平面形状(46km~39km)

水理現象では、洪水流の水面形には、河道と流れの間の相互関係で決まる水理現象がすべて反映されており¹⁵⁾、これを用いて流れの解を求めること、すなわち、測定された水面形が解となるように基本式を解き、流れを解くことは、一種の逆解析と位置づけられ、本解析法は、洪水流の水理量の変化を評価する上での実用的な手法と言える。

河川では異なる規模の洪水流が発生する。計画規模の洪水流もそのひとつである。洪水流の発生は、河岸侵食、構造物の破壊等の河道災害を引き起こす。どのような洪水外力に対して、どのような原因によって災害が起こったのかを水工学視点で解析し検証することが河川の管理上特に重要となる。実際に起こった災害に対しては、適切にその原因と機構を説明できることが、河川管理者に求められる基本要件である。このためには、河川の洪水の実態をよく説明できる比較的簡単な解析法が求められている。自然においては、どのような条件で災害が発生するかわからないのが普通で、ピーク流量、洪水痕跡を既知とする準二次元不等流解析では、河川の維持管理に十分応えることが出来ないことが多い。洪水中の水面形の時間変化を考慮に入れた非定常準二次元解析法は、今後重要度が増大する河川の維持管理を適切に進める上での有効な手段を提供することになる。一方、洪水防御計画では、上流側の境界条件として水位ではなく河川高水流量が与えられ、これに基づきピーク水位の縦断形を求めることになる。上流、下流の境界条件を水位ハイドログラフで与える非定常準二次元解析法を洪水防御計画に適用する場合には、これまでの治水計画手法と同様に上流の境界条件に計画の流量ハイドログラフを用い、下流の境界条件に水位ハイドログラフを用いて計画高水位の検討をすれば良い。

4. 非定常準二次元解析法の有効性の検討

福岡らは樹木群を有する複断面蛇行河道である江戸川を対象に、観測された洪水流の水面形の時間変化を用い、非定常平面二次元解析を行い、これにより精度の高い流量ハイドログラフが推算できることを示している¹⁴⁾。本章では、江戸川の洪水データを用いて構築した非定常準

二次元解析結果と非定常平面二次元解析結果を比較検討し、非定常準二次元解析法の適用性を検討する。

図-3 に江戸川解析対象区間の平面形及び地被状況を示す。解析断面の樹木群領域は、洪水後の測量断面に対して、平成13年江戸川河川環境情報図²⁵⁾と航空写真から樹木群を設定し、死水域としている。解析対象区間の高水敷には、広い範囲に人工草地やオギ群落があり、低水路河岸沿いにヤナギ高木林等の樹木群が存在している。このため、樹木群による死水域は低水路河岸で連続するように設定されている。このとき、相対的に樹木が疎に生育している区間では、他の区間に比べ樹木群領域の幅を小さく設定している。樹木群の死水域や、それらの粗密についての定量的な基準は、本手法を各河川に適用して見出していくのが良いと考える。2.(1), (2)で述べたように非定常準二次元解析を樹木のある河道に用いる理由は、樹木群による死水域範囲や、樹木群の粗密の決め方が計算結果に著しい影響を与えないようにするためでもある。それぞれの河川で発生した洪水にこの解析法を適用することによって、洪水水位縦断形を説明できる樹木群の定量的な基準が定まってくると考える。これには、従来から用いられている準二次元解析法での樹木群の扱い方が役立つ。

対象洪水は平成13年9月洪水である。洪水のピーク流量は、主要点野田で約 $2000\text{m}^3/\text{s}$ で、流量確率は概ね1/5である。洪水観測は9月11日0時~12日21時の45時間に集中的な観測が行われており、水位は46km~41km区間で250m毎、41km~39km区間で500m毎に左右岸で1時間毎に観測されている。46km地点(東金野井)、39km(野田)地点において、自記水位計による水位観測が行われている。流量は1時間毎に45.75km地点(東金野井)と39.25km地点(野田)で観測されている。解析は9月10日0時(-24h)~9月14日24時(96h)までの計120時間を対象とした。ここでは観測開始時刻である9月11日0時を解析における基準にとっている。解析条件は上流側境界条件に44.5kmの観測水位データ、下流境界条件に野田(39.0km)の観測水位データを用いた。上流側境界条件を44.5kmとしたのは、上流側(45km~46km)において左右岸で大きな水位の差が観測され、これは測定誤差であると判断したためである。44.5km地点の水位は集中観測が行われた0h~44h

のみのデータであるため、集中観測期外(-24h~0h, 44h~96h)では上流の東金野井自記水位計から境界条件を定めている。解析断面は測量データの存在する縦断間隔500mとし、横断分割は航空写真や地被状況図から樹木群領域を判断し、洪水後の測量断面を用いて図-4のように分割した。低水路及び高水敷粗度係数、境界混合係数は、それぞれ既往の研究^{11),12),14)}を参考に解析水面形の時間変化が観測値と全体的に一致するように全洪水時間にわたって一定値を用いた。これを表-1, 表-2に示す。

本解析では、実測水面形の時間変化と解析水面形が一致するように流れの場を解いており、これは非定常準二次元解析も非定常平面二次元解析も同じである。一般に、洪水時の水面形には、河道断面形の変化や樹木の存在に加えて河床変動も影響すると考えられる。図-5(a), (b)は、対象とする平成13年洪水の前(平成11年)と後(平成15年)に測量された直線部(41km)と蛇行部(43km)の河床横断形状を示す。これより洪水前後の河床高の変化は小さいことがわかる。これは、河床材料がほぼ均一な砂で、低水路幅、堤間幅の縦断変化が小さい江戸川のような河道では、洪水時の土砂移動は動的に平衡し、河床変動が小さいとみなし得ることを示している。

非定常平面二次元解析は、洪水流の実測値を十分説明できることが既報で明らかにされているので、ここでは非定常準二次元解析結果を非定常平面二次元解析結果と比較して、解析法の妥当性を論ずることとする。

図-6に観測水面形と非定常準二次元解析、及び非定常平面二次元解析の水面形の時間変化を観測データとともに示す。蛇行が大きく不規則な縦横断面を有する河道にあっては、非定常平面二次元解析は河道の平面構造を適切に取り込むことが出来るため、非定常準二次元解析よりも解析精度が高くなるのが一般的である。しかし、非定常平面二次元解析を扱った2004年の論文¹⁴⁾では、洪水流の観測水面形の時間変化を対象区間全体で見て満足する解析を行えば、流量ハイドログラフ等の水理量が高い精度で求まることを示すのが主要な目的であった。したがって、蛇行部の水面形のみを意識して解析しまとめたわけではない。このため蛇行の著しい42km~45kmで、非定常準二次元解析のほうがやや実測に近い水面形計算結果を与えている。両者の解析水面形の差は、主に粗度係数と境界混合係数の与え方に関する。この場合、非定常平面二次元解析でも蛇行部の樹木群透過係数を修正すれば、非定常準二次元解析と同程度かそれ以上の実測水面形に近い計算結果を得ることが可能である。

図-7にピーク水位時の横断流速分布を示す。非定常準二次元解析法では樹木群を死水域としているため、非水没樹木群領域では流速値を持たない。非定常準二次元解析と非定常平面二次元解析のピーク水位時の横断流速

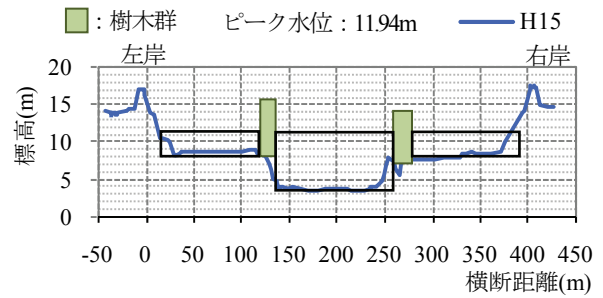


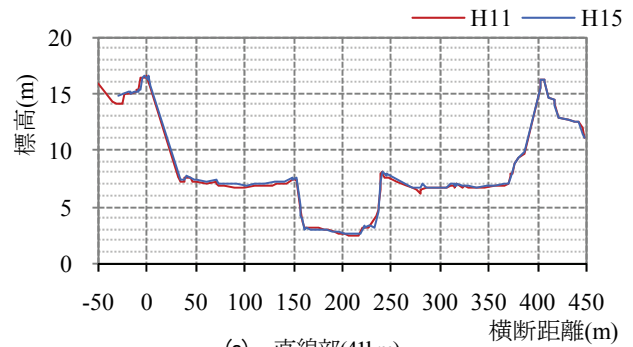
図-4 河道横断面形状と断面分割(44km)

表-1 境界混合係数 f の値^{7),8)}

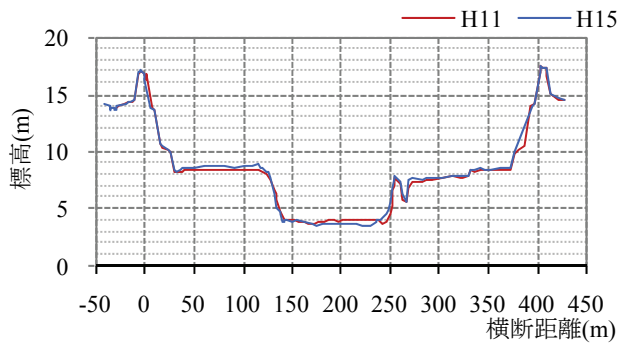
混合現象の区別	境界混合係数
低水路流れと高水敷流れとの混合	0.17
河岸に接している樹木群と主流部との混合	0.03
二つの流れにはさまれた樹木群と主流部との混合	0.10

表-2 江戸川粗度係数

場所	低水路	左岸高水敷	右岸高水敷
粗度係数	0.030	0.040	0.040



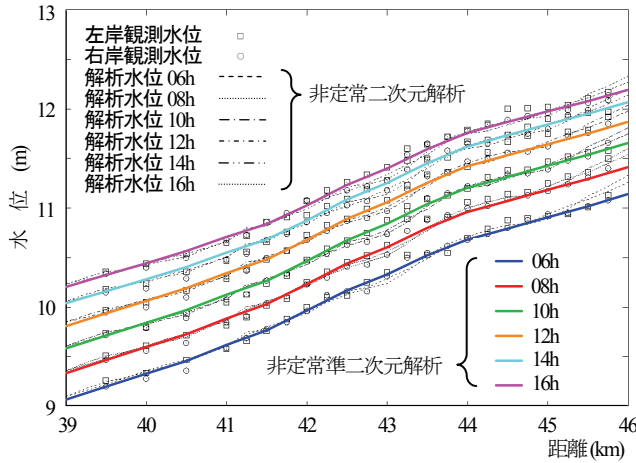
(a) 直線部(41km)



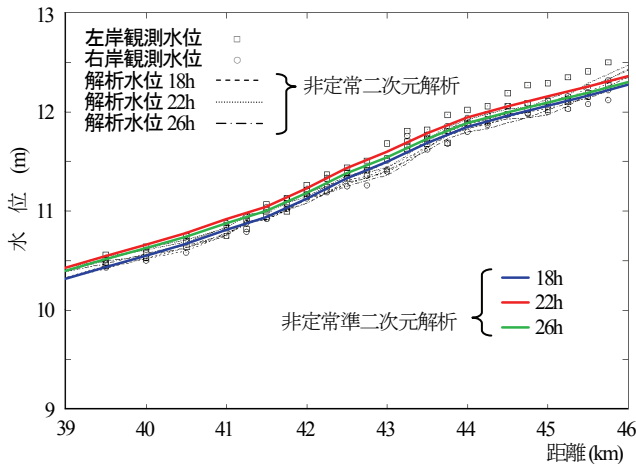
(b) 蛇行部(44km)

図-5 河床横断形状

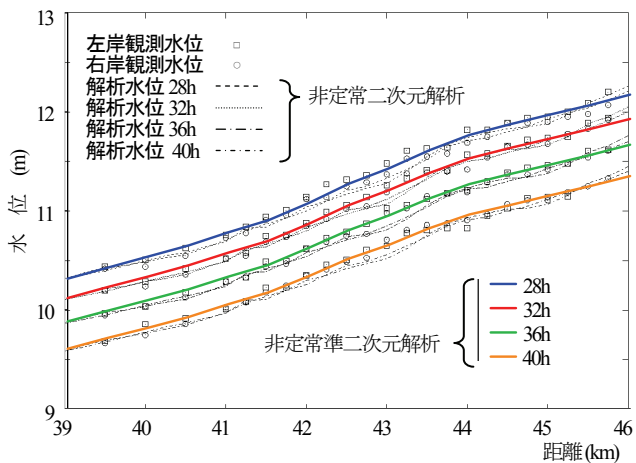
分布は概ね一致しており、非定常準二次元解析法は流速分布をほぼ表現できていると考えてよい。図-8に観測流量と解析流量ハイドログラフを示す。非定常準二次元解析による解析流量ハイドログラフは観測流量をおおむね説明できている。流量についても非定常平面二次元解析との差は僅かである。図-8に貯留率の時間変化を示す。貯留率は東金野井地点流量と野田地点流量の差での



(a) 水位上昇期



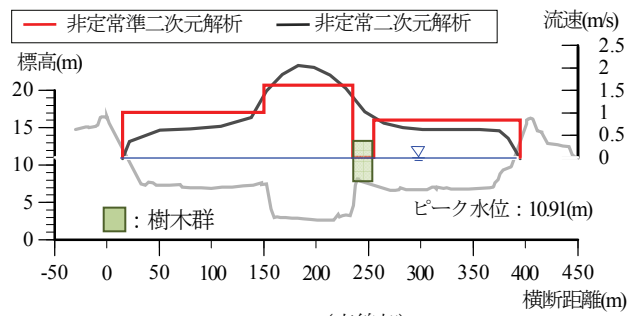
(b) 水位ピーク付近



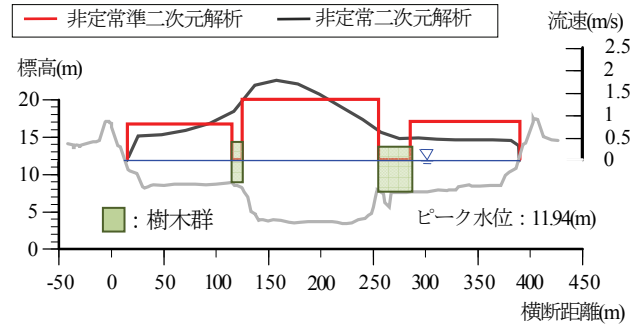
(c) 水位下降期

図-6 水面形の時間変化

み評価している。貯留率は、水位変化量に区間内の水面積をかけて得られる貯留量 S を時間微分して得られる単位時間当たりの貯留量 (貯留率: dS/dt) によっても評価する。図-9 には、貯留量から 2 時間毎の時間変化量を、その 2 時間における平均貯留率として求め、観測値及び非常準二次元解析における東金野井地点流量と野田地点流量の差の値と共に示している。



(a) 41km(直線部)



(b) 44km(蛇行部)

図-7 横断流速分布比較(水位ピーク付近)

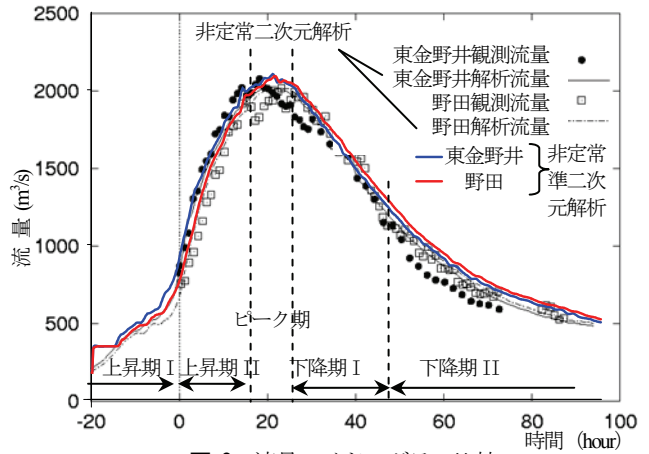


図-8 流量ハイドログラフ比較

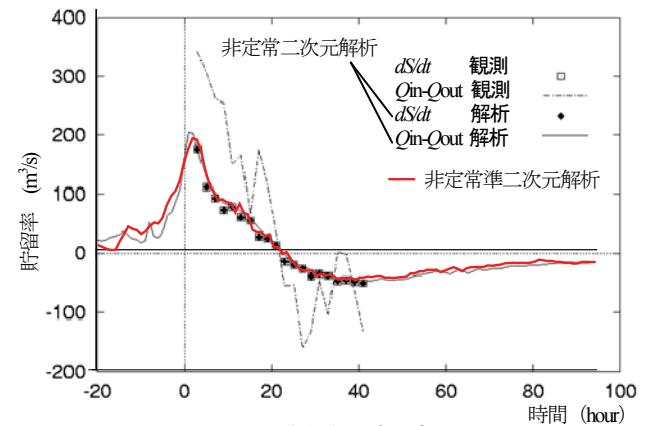


図-9 貯留率の時間変化

2. (1), (2) で述べたように準二次元解析法は、ピーク流量に対し、各断面の横断流速分布を求めこの流速分布

を不等流の運動方程式に代入し求めた水面形が観測された洪水痕跡水位縦断形を最もよく説明するように粗度係数と境界混合係数を決めている。このため同一河川の同一区間であっても、洪水ごとに異なる粗度係数と境界混合係数の組み合わせ値を持つことになり、この点に実管理上のあいまいさを有していた。非定常準二次元解析法では、洪水流の非定常性と水面形の時間変化を解析に取り込み、樹木群領域を適切に評価することにより、粗度係数には河道断面形摩擦に起因する一定の値を用いている。このような粗度係数に対して、境界混合係数は表-1 に示す標準的な値を与えることで、非定常準二次元解析法が水面形や流量ハイドログラフ等の洪水流の水理量を適切に算出することを可能にしている。非定常準二次元解析法は、江戸川洪水流の他に、利根川、渡良瀬川における洪水流にも適用されている²⁰。解析法の基本は、観測水面形の時間変化を所与の条件とすることであるので、得られた流速場、流量ハイドログラフ、貯留量ハイドログラフは、江戸川の解析結果と同様の特性を有することになる。粗度係数と境界混合係数は特性の異なる他の河川についても江戸川等と同様に決めることができるかについては更に検討する必要はあるが、非定常準二次元解析では、樹木群領域の評価や粗度係数、境界混合係数の値について従来の準二次元解析法で使用したデータを参考として使用できるため、検討に要する労力や時間が少ないこと、また非定常平面二次元解析法に比して時間や労力が少なく済むこと等、非定常準二次元解析法の実用性は高い。さらに、非定常準二次元解析法は、低水路の拡幅や高水敷の地盤下げ等の河道改修や樹木管理を想定しての洪水流の挙動を解析することが非定常平面二次元解析と同様に可能であり、河川計画を検討する上でも有用な方法である。

5. 異なる断面形状を有する河道における洪水伝播速度の理論

(1) 洪水伝播速度の理論式

洪水流の伝播速度は、洪水流をkinematic waveとみなして算定可能であることを2章で述べた。広矩形の単断面水路に適用できるKleitz and Seddon⁴の波速と平均流速の関係式と同様に、複断面直線河道のピーク水位の伝播速度を解析的に算出する。任意の複断面河道を考え、連続式を式(9)のように変形すると、最大水深の洪水伝播速度 dQ/dA の値は、任意の複断面河道断面に対し定義された断面諸元について低水路、高水敷の平均流速を Manning式(10)~(12)を用いて表現すると、式(13)を導くことができる。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{dQ}{dA} \frac{\partial}{\partial x}\right) \cdot A = 0 \quad (9)$$

$$u_{mc} = \frac{1}{n_{mc}} \cdot R_{mc}^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (10)$$

$$u_{fpl} = \frac{1}{n_{fpl}} \cdot R_{fpl}^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (11)$$

$$u_{fpr} = \frac{1}{n_{fpr}} \cdot R_{fpr}^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{dQ}{dA} = \frac{d}{dA} (A_{mc} \cdot u_{mc} + A_{fpl} \cdot u_{fpl} + A_{fpr} \cdot u_{fpr}) \\ &= \frac{1}{B} \frac{d}{dH} \left(A_{mc} \cdot \frac{1}{n_{mc}} R_{mc}^{2/3} I_e^{1/2} + A_{fpl} \cdot \frac{1}{n_{fpl}} R_{fpl}^{2/3} I_e^{1/2} + A_{fpr} \cdot \frac{1}{n_{fpr}} R_{fpr}^{2/3} I_e^{1/2} \right) \\ &= \frac{1}{B} \left\{ \frac{5}{3} b_{mc} \cdot \frac{1}{n_{mc}} R_{mc}^{2/3} I_e^{1/2} + \left(\frac{5}{3} b_{fpl} R_{fpl}^{2/3} - \frac{2}{3} R_{fpl}^{5/3} \right) \cdot \frac{1}{n_{fpl}} I_e^{1/2} + \left(\frac{5}{3} b_{fpr} R_{fpr}^{2/3} - \frac{2}{3} R_{fpr}^{5/3} \right) \cdot \frac{1}{n_{fpr}} I_e^{1/2} \right\} \\ &= \frac{5}{3} \frac{b_{mc}}{B} \cdot u_{mc} + \left(\frac{5}{3} \frac{b_{fpl}}{B} - \frac{2}{3} \frac{R_{fpl}}{B} \right) \cdot u_{fpl} + \left(\frac{5}{3} \frac{b_{fpr}}{B} - \frac{2}{3} \frac{R_{fpr}}{B} \right) \cdot u_{fpr} \quad (13) \end{aligned}$$

ここに、 C ：洪水伝播速度、 R ：径深、 I_e ：エネルギー勾配、 B ：全幅、 b ：水路幅、 h ：高水敷高さ、添え字 mc , fpl , fpr はそれぞれ低水路、左岸、右岸側高水敷を表す。分割断面の径深は $R_{mc} = (b_{mc} \cdot H)/(h_{fpl} + h_{fpr} + b_{mc})$, $R_{fpl} = (H - h_{fpl})/(H - h_{fpl} + b_{fpl})$, $R_{fpr} = (H - h_{fpr})/(H - h_{fpr} + b_{fpr})$ で定義される。

式(3)の平均流速 V を用いて CV を求めると式(14)を得る。

$$\frac{C}{V} = \frac{\frac{5}{3} \frac{b_{mc}}{B} \cdot u_{mc} + \left(\frac{5}{3} \frac{b_{fpl}}{B} - \frac{2}{3} \frac{R_{fpl}}{B} \right) \cdot u_{fpl} + \left(\frac{5}{3} \frac{b_{fpr}}{B} - \frac{2}{3} \frac{R_{fpr}}{B} \right) \cdot u_{fpr}}{\frac{A_{mc} \cdot u_{mc} + A_{fpl} \cdot u_{fpl} + A_{fpr} \cdot u_{fpr}}{A_{mc} + A_{fpl} + A_{fpr}}} \quad (14)$$

次に、異なる断面形状を有する河道の洪水伝播速度と断面平均流速の関係を検討する。議論を単純化するために図-10 に示す左右対称な複断面河道を想定する。また、ここでは樹木群や流れの混合の影響は考慮しない。

無次元量 CV と断面形を $n_{fp}/n_{mc}=1.0$, $n_{fp}/n_{mc}=2.5$ の場合について調べる。川幅、低水路水深、河床高を固定し、低水路幅/川幅： b_{mc}/B と相対水深 $(H - h_{fp})/H$ を変化させた時の CV の変化を図-10(a)： $n_{fp}/n_{mc}=1.0$, (b)： $n_{fp}/n_{mc}=2.5$ に示す。このとき、各断面形を流下する流量は、与えた断面形、水深に相当する流量となっている。横軸に b_{mc}/B 、縦軸に相対水深 $(H - h_{fp})/H$ を取り、 CV の値は色の濃淡コンターで示している。図中には、 b_{mc}/B , $(H - h_{fp})/H$ の関係から想定される横断形状のイメージを 9

等分して表現した. この図から, b_{mc}/B と $(H-h_p)/H$ がともに大きい図中の右上の単断面に近い断面形をとるほど, C/V は大きくなり, Kleitz and Seddon⁴⁾の式 $C/V=5/3$ に近づく. 逆に左下のように低水路が狭く, 相対水深が小さい洪水ほど C/V が小さくなり, その傾向は高水敷粗度が高くなるほど大きい.

広い高水敷の粗度係数を一定値とした場合, 相対水深が小さくなると, 高水敷の抵抗が著しく大きくなり, 流速場が式(10), (11), (12)で表現出来なくなることが大きな要因と考えられる. このことから, C/V が 1.0 以下となる領域は, 河道では起こり得ない現象と解釈すべきであろう.

図-10 中の緑色の矢印は, 河道断面の変化による C/V の変化をイメージしている. 河道内の土砂堆積や樹木群の繁茂により, 低水路幅が狭くなることや相対水深が小さくなる場合, 洪水が伝播しにくい C/V が小さい河道となることが分かる. 逆に, 低水路幅の拡幅や高水敷地盤高の切り下げ等の河道改修によって河積を増大させる場合には, 洪水が伝播しやすい河道となる. つまり, 河道の横断面形状の作り方や樹木群管理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考慮しなければならない. このように洪水流に対する河道状況の変化の影響を系統的に検討することは, 洪水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, 河道改修や樹木管理などの重要な判断材料を与えることになる.

(2) 洪水流伝播速度式の樹木群のある河道への適用性の検討

樹木群のある河道の洪水流の力学的挙動については, 4章の非定常準二次元解析を用いて解くことができることを示した. ここでは, kinematic wave法の考えに基づき, 樹木のない複断面河道について導かれた式(13)を樹木群のある河道の洪水流の伝播速度の算出に近似的に適用することを考える. すなわち, 従来の準二次元解析法より式(5)を用いたピーク水位時の各断面の力のつり合い式を解くことによって, ピーク水深での横断流速分布 u_{mc} , u_p を求め, これらを, 水深, 断面諸元と共に式(13)に代入することで伝播速度が求まる.

江戸川河道において, このようにして求めた洪水伝播速度と実測洪水伝播速度の比較を行う. 表-3に実測洪水伝播速度を示す. 実測の洪水伝播速度は東金野井, 野田地点のピーク水位発生時刻を調べ, 区間距離を所要伝播時間で除して求めている. 表-4は1時間毎に観測された東金野井, 野田水位観測所における洪水ピーク付近の観測水位である. 野田水位観測所のピーク水位は東金野井のピーク水位発生時刻から3時間続いて観測されている.

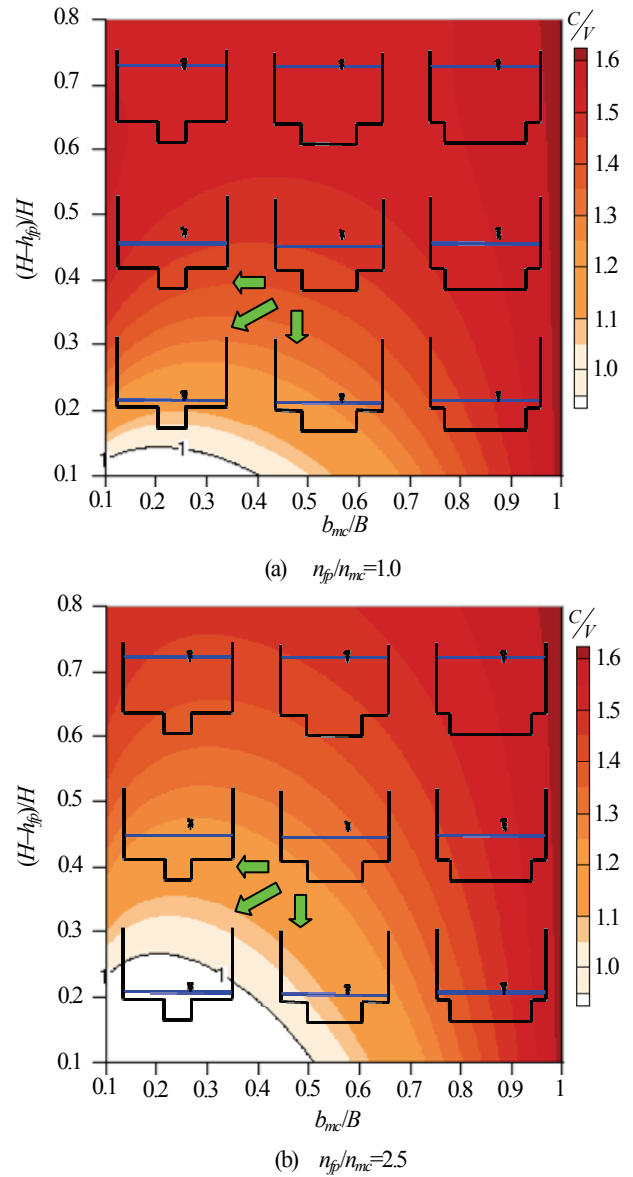


図-10 横断面形状を変化させた場合の伝播速度-断面平均流速比の変化

そのため, 洪水の所要伝播時間を1時間~2時間の幅で実測伝播速度を求めている. 表-5は同一の特性を有する河道区間に分けて, 洪水伝播速度 C , 断面平均流速 V の解析値, その比である無次元量 C/V をそれぞれ区間平均値で示す. 42km~44kmの区間は, 河道が蛇行し, 樹木群が密に繁茂している区間であり, 他の区間に比して C/V が若干大きくなっている.

洪水伝播速度の解析値は, 洪水伝播速度の実測値の幅の中に入っている. 1時間毎に記録された観測水位を用いているために明確には言えないが, 式(13)は, 樹木群のある河道においても洪水伝播速度を近似的に評価できるように思える. 今後, 実河道において, 10分毎に測られている観測水位データを用い, 洪水伝播速度式の適用性の検討を進める予定である.

近年の河道内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している。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高まることになる¹⁸⁾。一方において、このことは、下流へのピーク流量を減衰させることになり、下流河道の安全性を高めることにもなっている。樹木群の洪水流に対する影響の程度は、洪水規模や樹木群の繁茂する位置、繁茂密度、高さ、樹種等によって異なる²⁾。樹木群等の河道特性の変化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れば、その結果は河道の維持管理の際の重要な情報となる¹⁴⁾。そのためには、対象となる区間において洪水時の水面形の時間変化（多点での水位ハイドログラフ）を観測し、また、河道横断面形状や樹木群の繁茂状況を継続的に点検し、その状態を把握しておくことも重要となる。

6. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

1. 準二次元解析を非定常解析に拡張し、洪水流の水面形の時間変化を考慮に入れた非定常準二次元解析法を構築した。非定常準二次元解析法では、水面形の時間変化と樹木群領域を適切に評価することにより、河道横断面形状や河床材料等から判断される粗度係数値を用い、境界混合係数は準二次元解析法で標準的に与えられている一定値を用いればよいことを示した。なお、本解析法は、河床での土砂移動がほぼ動的平衡である状態を想定している。河道縦断面形の変化が著しい河床変動の大きい区間では、その適用に注意を要する。
2. 江戸川洪水を対象に、非定常準二次元解析法を適用し、この結果と非定常平面二次元解析法との比較から、両解析法の差はほとんど無く、非定常準二次元解析法を用いることで樹木群のある河道の洪水流を実用上十分な精度で評価可能であることを示した。
3. 複断面河道における洪水流の伝播速度の式を kinematic wave 法で導出した。河道横断面形状を変化させた場合の洪水伝播速度/断面平均流速の変化を図示し、河道断面変化が洪水流の伝播速度に与える影響を示した。

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：今後の豪雨災害対策の技術的課題，季刊河川レビュー，Summer, No.130, pp.26-31, 新公論社，2005。
- 3) 速水頌一郎：洪水流の理論について，土木学会水工学論文

表-3 東金野井～野田区間の平成 13 年洪水の実測伝播速度

対象洪水 (野田ピーク流量)	東金野井～野田(7.0km)	
	所要伝播時間	伝播速度(m/s)
平成 13 年(2000m ³ /s)	1～2 時間	0.97～1.94

表-4 東金野井, 野田水位観測所における洪水ピーク付近の観測水位(m)

	東金野井	野田
2001/9/11 17:00	12.01	10.29
2001/9/11 18:00	12.04	10.33
2001/9/11 19:00	12.07	10.37
2001/9/11 20:00	12.1	10.4
2001/9/11 21:00	12.11	10.42
2001/9/11 22:00	12.12	10.44
2001/9/11 23:00	12.1	10.44
2001/9/12 0:00	12.09	10.44
2001/9/12 1:00	12.06	10.41
2001/9/12 2:00	12.02	10.39
2001/9/12 3:00	11.96	10.35

表-5 東金野井～野田区間の平成 13 年洪水の解析

伝播速度 C , 断面平均流速 V , CV の区間平均値

距離 (km)	伝播速度 C (m/s)	断面平均流速 V (m/s)	CV
39.0～41.5	1.82	1.23	1.48
42.0～44.0	1.84	1.22	1.50
44.5～46.0	1.69	1.17	1.45
全区間	1.60～1.98 (1.79)	1.10～1.30 (1.21)	1.43～1.53 (1.48)

※括弧内は全区間平均値

集, 水工学の最近の進歩, 土木学会, pp.25-48, 1953.

- 4) 水理公式集(平成 11 年度版), 土木学会, 1999.
- 5) 矢野勝正: 洪水特論, 理工図書, 1958.
- 6) 林泰造: 河川の不定流について, 水工学に関する夏期研究会講義集(A), ダム・河川コース, 土木学会水理委員会, pp.01-02, 1966.
- 7) 橋本宏, 藤田光一: 洪水追跡法(その 1) —河道及び洪水流の特性と追跡モデル—, 土木技術資料, 第 28 巻, 第 6 号, pp.50-56, 1986.
- 8) 山田正, 豊田康嗣: 洪水におけるハイドログラフの特性とその形成過程に関する研究, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.143-148, 1991.
- 9) 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/II-19, pp.17-24, 1992.
- 10) 河道計画検討の手引き, 国土技術研究センター編, 山海堂, 2002.
- 11) 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/II-12, pp.63-72, 1989.
- 12) 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, pp.1-64, 1990.
- 13) 重枝未玲, 朝位孝二, 坂本洋, 徳永智宏, 西尾崇, 秋山壽一郎, 中江邦昭: 拡張二次元解析を用いた大野川・乙津川の河道内樹木の管理に関する研究, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.655-660, 2008.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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, pp.625-630, 2005.
- 18) 佐藤宏明, 福岡捷二, 出口桂輔: 洪水流の伝播機構に及ぼす河道状況の変質とその解析, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.327-332, 2007.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 鈴木重隆, 中村修也, 川口広司, 福岡捷二: 大きな潮位変動を受ける洪水流れと河床変動—利根川下流部を例として—, 第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, II-088, CD-ROM, 2008.
- 22) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の土砂移動機構に着目した 1 次元河床変動解析法の開発, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.625-630, 2008.
- 23) 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.
- 24) 総合的な豪雨災害対策の推進について, 社会資本整備審議会河川分科会, 豪雨対策総合政策委員会, 2005.
- 25) 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.
- 26) 大沼史佳: 河道内樹木群管理の基礎的研究—治水と環境の調和を目指して, 中央大学大学院修士論文, 2009.

(2008. 6. 10 受付)

UNSTEADY QUASI-2D FLOOD FLOW ANALYSIS IN RIVERS

Shoji FUKUOKA, Hiroaki SATO and Keisuke DEGUCHI

It is very important to grasp the hydraulic characteristics of flood flows for the river improvement works and management. This study aims to clarify the propagation mechanism of flood flow in rivers with vegetations. We constructed the model of unsteady quasi-2D flow available for flood flows. By using this method incorporating observed water surface profiles, discharge hydrograph, water storage and propagation speed of flood flow are accurately estimated in compound channels with vegetation. We also derived a theoretical expression for propagation speed of floods and showed that the theory provided a good agreement with observed propagation speed of floods in the Tone river.