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と利根川水系洪水流への適用 THE UNSTEADY QUASI-2D FLOW ANALYSIS IN CHANNELS WITH VEGETATION AND APPLICATION TO THE TONE RIVER FLOODS

土木工学専攻 出口 桂輔

DEGUCHI Keisuke

1. <u>はじめに</u>

近年,河道内の樹林化が進行し,洪水流の流下を阻 害する問題が生じ、流下能力を向上させるための河道 整備や維持管理が検討されている. このための精度の 高い方法に,河道の複断面形状や樹木群の繁茂状況と いった河道特性を考慮できる非定常二次元解析法が ある¹⁾.一方,実用的かつ比較的精度が高い洪水解析 手法として、非定常一次元解析法、準二次元解析法が 広く用いられてきた¹⁾.しかし、非定常一次元解析法 では,非定常性に伴う貯留現象を考慮できるものの, 複雑な線形を有する複断面河道の形状変化や樹木群 の繁茂状況を取り込むには精度が十分でない場合が 多い. また, 準二次元解析法では複断面河道の断面変 化や河道内樹木群を考慮できるものの, 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 現象を考慮できず、粗度係数、境界混合係数が洪水ご とに異なるという課題を残してきた.

本研究では、非定常一次元解析法¹⁾、準二次元解析 法¹⁾²⁾を拡張し、洪水伝播速度解析を含む非定常準 二次元解析法を構築した.江戸川における非定常準二 次元解析法と非定常二次元解析法との比較から、樹木 群のある河道の洪水流に対する非定常準二次元解析 法の適用性を検討している.次に、河道内の樹林化の 進行や河道改修、樹木管理等の河道特性の変化が洪水 伝播特性に及ぼす影響について検討を行いその影響 を評価している.

2. 非定常準二次元解析法

解析における水位,流量は,以下の連続式(1)及び 運動方程式(2)で求められる.運動方程式中の抵抗項に は,式(3)~(6)の準二次元解析²⁾により求まる横断流速 分布を用いて算出した壁面及び樹木群が洪水流に与 える抵抗を求め,その総和を河道全体の抵抗として評 価している.その際,式(1)と式(2)から求められた流量 を保存量とし,式(3)~(6)を用いてエネルギー勾配*I*_eを 変化させ,繰り返し計算を行うことにより,各時間に 式(6)の連続式を満たす横断流速分布を求めている.算 出された水深,合成径深,横断流速分布を式(10)に代 入することで,図-1,式(1),(10)に示す樹木群のある任意 の複断面河道における最大水深の洪水伝播速度が求 められる.

ここに、A:断面積、Q:流量、I_e:エネルギー勾配、u: 各分割断面における断面平均流速、S_b:壁面せん断力が 働く潤辺、f:境界混合係数、τ':分割面に働くせん断力、 τ:樹木群境界に働くせん断力、S':τ'が働く潤辺、S:τ



記号の説明(B:全幅, b:低水路幅, H:水深, R:径深, n:粗度係数, h:高水敷高さ, u:断面平均流速, 添字mcは低水路, fpl は左岸高 水敷, fpr は右岸高水敷を表わす.)

図-1 任意の複断面河道の横断面形状

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x}$$
$$= -g \sum \frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} - \sum fu_i^2 \qquad (2)$$

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} + \frac{\sum (\tau_j S_{wj})}{\rho g} + \frac{\sum (\tau_j S_{wj})}{\rho g} = A_i I_e$$
(3)

$$\tau' = \rho f(\delta u)^2 \qquad (4) \qquad \tau = \rho f u_i^2 \qquad (5)$$

$$Q = \sum (A_i u_i)$$
 (6) $V = \frac{1}{N_c} \cdot R_c^{2/3} \cdot I_e^{3/2}$ (7)

$$N_{c} = \frac{\sum(A_{i})}{Q} \cdot R_{c}^{2/3} \cdot I_{e}^{1/2} \quad (8) \qquad R_{c} = \left\{ \frac{\sum[A_{i}(A_{i}/S_{bi})^{2/3}]}{\sum(A_{i})} \right\}^{3/2} (9)$$

$$dQ \quad \left[5h \quad 2(h_{c} + h_{c}) \right] R \quad n = ---$$

$$C = \frac{dQ}{dA} = \left\{ \frac{5}{3} \frac{b_{mc}}{B} - \frac{2}{3} \left(\frac{n_{fpr} + n_{fpl}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{mc}}{B} \right\} \frac{n_{mc}}{N_c} \cdot \overline{u_{mc}} + \left\{ \frac{5}{3} \frac{b_{fpl}}{B} \left(1 - \frac{h_{fpl}}{H_{mc}} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fpl}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{fpl}}{B} \right\} \frac{n_{fpl}}{N_c} \cdot \overline{u_{fpl}} + \left\{ \frac{5}{3} \frac{b_{fpr}}{B} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H_{mc}} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{fpr}}{B} \right\} \frac{n_{fpr}}{N_c} \cdot \overline{u_{fpr}} + \left\{ \frac{5}{3} \frac{b_{fpr}}{B} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H_{mc}} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fpr}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{fpr}}{B} \right\} \frac{n_{fpr}}{N_c} \cdot \overline{u_{fpr}}$$
(10)

が働く潤辺, ρ:水の密度, g:重力加速度, δu:隣り合う断面間の流速差, V:断面平均流速, N_e:合成粗度係数, R_e:合成径深, C:伝播速度, 添字iは各分割断面, j は各分割断面の境界面を表す(図-1).

全体の解析手順をフローチャートにして図-2 に示 す.断面分割については、図-1に示すように、樹木群 が存在する場合には樹木群を包括するように樹木群 領域を定め、樹木群領域を死水域として河積から除い た後、横断面を河道形状や樹木群の繁茂状況によって 断面分割する.境界条件は、河道の上下流端設定位置



において観測水位を与え解析を行う.想定される粗度 係数や境界混合係数の分布を与えて水面形の解析を 行い,得られた水面形の時間変化が観測水面形の時間 変化と必要な精度で一致するように粗度係数,境界混 合係数分布を決定し,流速分布,流量等の水理量を算 出する.

江戸川における非定常準二次元解析法と非定常 二次元解析法の比較,検討

樹木群のある複断面蛇行河道である江戸川を対象 に、非定常準二次元解析法の適用性の検討を行う.本 研究が対象とした区間、対象洪水において、福岡らは 観測された水面形の時間変化を用い、非定常二次元解 析法を行うことで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³⁾.本章では、福岡らの 非定常二次元解析結果と非定常準二次元解析結果と の比較を行い、非定常準二次元解析法の適用性につい て検討を行う.

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.この区間の高水敷は主に草原等であり、疎に 樹木が生えている範囲が広い. 42.5km~44.0km 付近に おいて特に樹木群が密生している.対象洪水は平成13 年9月洪水である.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.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, 下流側境界条件に野田 (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 左右岸の水位差が大きく, 誤差が大きいと判断したた 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.解析断面は縦断間隔 500m とし, 横断分割は樹木群領域を航空写真や地被状況図から 判断し,図-4のように洪水後の測量断面を用いて分割 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²⁾³⁾を参考に解析で求められる 水面形の時間変化が観測値と全体的に一致するよう に最終的に全洪水時間にわたって一定値を決定した



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		
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	0.10				

(表-1).図-5 に観測水面形と非定常準二次元解析, 非定常二次元解析の水面形の時間変化を示す.非定常 準二次元解析結果は観測結果を精度良く再現できて おり,また,非定常二次元解析との差はほとんど無い. 図-6 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を持たない.非定常準二次元 解析と非定常二次元解析を比較すると,横断流速分布 は概ね一致しており,精度良く流速分布を表現できて いる.図-7 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 フは観測流量を精度良く説明できている.流量につい

表-2 伝播速度C,断面平均流速V,C/Vの解析值(平成13年洪水)

距離(km)	伝播速度C(m/s)	断面平均流速V(m/s)	C/V
39.0 ~ 41.5	1.11	1.23	0.90
42.0~44.0	0.93	1.22	0.76
44.5 ~ 46.0	1.06	1.17	0.90
全区間	0.90~1.16(1.04)	1.11~1.30(1.21)	0.71~0.96(0.86)

※括弧内は全区間平均値





表-3 頁	東金野井~	野田区間の	平成 10,13,14	4 年洪水の	り実測伝播速度
-------	-------	-------	-------------	--------	---------

対毎沖水 (野田ピーク法导)	東金野井~野田(7.0km)		
対象供示 (野田ヒーク派重)	所要伝播時間	伝播速度(m/s)	
平成10年(2400m3/s)	1時間	1.94	
平成13年(2000m3/s)	2時間	0.97	
平成14年(1600m3/s)	1時間30分	1.27	

法で使用したデータをそのまま使用できるため,検討 に要する労力や時間が少なく非定常準二次元解析法 の実用性は極めて高い.また,非定常準二次元解析法 は,低水路の拡幅や高水敷の盤下げ等の河道改修や樹 木管理を想定した際の洪水流の挙動を検討する上で 有用な解析方法である.

次に、樹木群のある河道の洪水伝播特性について考 察する.表-2に算出した対象区間の洪水伝播速度Cの 理論値,断面平均流速V,その比である無次元量C/V を区間平均値を示す. 河道が蛇行し、樹木群が密に繁 茂している 42km~44km の区間は,他に比べて相対的 に C/V が小さくなっている. C/V は断面平均流速に 対する洪水波形の伝播し易さを表す指標となること から,数値が大きいと伝播し易く,逆に小さいと伝播 しにくい河道特性を有していることを意味する.縦断 的に洪水波形が伝播し易い区間、伝播しにくい区間が 存在することで洪水波形の変形が生じていることが 考えられる.図-8 に解析対象洪水である平成 13 年と 洪水発生時期の近い平成 10,14 年の各洪水時のピーク 水位が東金野井から野田の対象区間を流下する際に 要した時間と波形を示す.図-8は各洪水のピーク発生 時刻を上流側の東金野井で一致させて描いたもので ある.表-3に各洪水の実測伝播速度を示す.実測伝播 速度は、区間距離を所要伝播時間で除して求めている. 表-2,3の平成13年洪水の洪水伝播速度の実測値と解



13

ても同様に非定常二次元解析との差は僅かであり,流 量ハイドログラフが高精度に推定できている.非定常 性を考慮した非定常準二次元解析法では,樹木群領域 を適切に評価することにより,粗度係数は河道断面形 等に応じた数値を,境界混合係数は既往の標準的な値 を一定値で与えることで,安定的に流量等の水理量を 算出することが可能である.樹木群領域の評価や粗度 係数,境界混合係数については,従来の準二次元解析 析値を比較すると実測値は解析値の幅の中に入って おり,洪水伝播速度についても精度良く評価できてい る.図-8,表-3に示した平成10,13,14年洪水のピーク 水位,洪水伝播速度を比較すると,流量規模が異なる にも関わらず,ピーク水位の差は小さく,洪水伝播速 度は近年ほど小さい傾向を示している.河道内樹木群 の繁茂範囲の拡大等の経年的な河道特性の変質によ り,水位の上昇や河道貯留量の増大がもたらされ,そ の結果として洪水伝播速度に遅れが生じ,高い水位が 長時間継続する傾向にある可能性が考えられる.

<u>河道横断面形状を変化させた場合の洪水伝播速</u> 度/断面平均流速の変化

河道内の樹林化の進行等の経年的な河道特性の変 質や河道改修,樹木管理を想定した場合の洪水伝播特 性の変化について,式(10)の洪水伝播速度を式(7)の断 面平均流速で除した,式(11)に示す洪水伝播速度と断 面平均流速の比を用いて検討を行う.

$$\frac{C}{V} = \left\{ \frac{5}{3} \frac{b_{mc}}{B} - \frac{2}{3} \left(\frac{2h_{fp}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{mc}}{B} \right\} \left(\frac{R_{mc}}{R_c} \right)^{73} + 2 \left\{ \frac{5}{3} \frac{\left(1 - \frac{b_{mc}}{B} \right) \left(1 - \frac{h_{fp}}{H_{mc}} \right)}{2} - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_{fp}}{H_{mc}} \right) \frac{R_{fp}}{B} \right\} \left(\frac{R_{fp}}{R_c} \right)^{2/3} (11)$$

図-9に、左右対称な複断面河道を想定し、堤間幅Bと 水面高さ,河床高を固定(Hme:低水路水深一定)し て低水路幅/堤間幅: bmc/Bと相対水深: (1-hm)/Hmc を変 化させた時の無次元量C/Vの計算結果を示す. C/Vを 算出する際には、 b_{mc}/B , $(1-h_{fr})/H_{mc}$ で表される断面 パラメータのみで計算することができる.樹木群や流 れの混合の影響は考慮していない.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、水深に 相当する流量となっている. 横軸にbmc/B, 縦軸に相 対水深を取り、C/Vの値は色のコンターで示している. 図中には b_{mc}/B , $(1-h_m)/H_{mc}$ 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、 $b_{mc}/B \geq (1-h_{fp})/H_{mc}$ 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, Seddonら⁴⁾が示した単断面広幅水路での波速 と流速の関係C/V=5/3に近づく.逆に左下のような低 水路が狭く深い河道ほどC/Vが小さくなる.

図中の緑色の矢印は,経年的な河道特性の変化とし て,低水路砂州上に繁茂する樹木群や高水敷に繁茂す る樹木群により,低水路幅が狭くなることや相対水深 が小さくなる場合のC/Vの変化をイメージしている. 河道内に樹木群が繁茂すると,C/Vが小さくなり洪水 が伝播しにくい河道となる.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 を増大させると伝播し易い河道となる.つまり,河道 の横断面形状の作り方や樹木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十分考慮しなければなら



ない.このように河道特性の経年的,人為的変化が洪 水流に及ぼす影響を解析的に検討することは,その影 響を物理的視点に基づいて考察する上で重要であり, 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.

5. まとめ

従来の準二次元解析法を非定常解析に拡張し, 観測 水面形の時間変化を再現するように行う非定常準二 次元解析法を構築し, その適用性について検討した. 本研究で得られた主な知見を以下に示す.

- 洪水流の非定常性を考慮した非定常準二次元解 析法では、樹木群領域を適切に評価しておくこと により、粗度係数には河道横断面形状や河床材料 等から判断される河道本来の持つ数値を用い、境 界混合係数は準二次元解析法で標準的に与えら れている表-1の一定値を用いればよい。
- 2) 非定常準二次元解析法を江戸川に適用し、実用上 十分な精度で流量ハイドログラフを推定できる ことを示した.江戸川における非定常準二次元解 析法と非定常二次元解析法との比較から、江戸川 対象区間においては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実用上 十分な精度で水理量を評価可能である.
- 3) 洪水伝播速度の理論式に基づき、低水路が狭く深い河道ほど洪水伝播速度C/断面平均流速Vが小さく洪水流が伝播しにくい特性を持つこと、逆に単断面に近い河道ほどC/Vが大きく洪水流が伝播しやすい特性を持つことを示した。

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, 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. 3) 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, pp45-56, 2004. 4) 水理公式集(平成 11 年度版), 土木学会, 1999.