

洪水中の樹木破壊・流失と河床変動を考慮した 流れの準三次元解析手法の適用性

APPLICABILITY OF QUASI-THREE DIMENSIONAL FLOW ANALYSIS CONSIDERING RIVER
BED VARIATION AND WASHOUT AND BREAKING CONDITION DURING A FLOOD

森永泰司¹・八木澤順治²・田中規夫³・内田龍彦⁴

Taiji MORINAGA, Junji YAGISAWA, Norio TANAKA and Tatsuhiko UCHIDA

¹学生会員 学士 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

For the management of river channel, it is very important to estimate correctly the change of river bed topography at a flood event. However, the bed variation is quite difficult to predict for the river where forestation occurs because of the change of vegetation resistance during a flood. The new method is proposed in this study to evaluate the bed variation around a forest on a gravel bar at large flood event. River bed variation analysis was conducted for the middle stream region of Arakawa River using quasi-three dimensional flow model combined with the new method that includes the washout and breaking condition of trees. Observed amount of bed variation was reproduced well by the model considering the washout and breaking condition of trees during a flood. On the other hand, the difference is small on the calculated river bed variation between the quasi-three dimensional and two-dimensional method. This result indicates that the improvement of vegetation resistance change during a flood event is important for the accurate evaluation of river bed variation at a large flood event that can washout or break trees.

Key Words : *quasi-three dimensional flow analysis, river bed variation, tree damage*

1. はじめに

河道内樹木群は河川環境の向上に大きな役割を果たす一方で、過剰繁茂による水位上昇など治水面に悪影響を及ぼす場合もある。河道内の樹木群の管理においては、洪水時に水位に及ぼす影響を把握するとともに、洪水外力による樹木の破壊条件を明らかにすることが重要である。樹木群を有する河道における洪水流については、水理模型実験による検討¹⁾や実洪水を対象とした数値解析による検討²⁾など多くの研究がなされている。一方、樹木の破壊条件については、現地での破壊実験³⁾や実洪水による破壊実績に基づく破壊限界値の検討⁴⁾によって、徐々に明らかになりつつある。八木澤・田中⁵⁾は樹木の破壊・流失限界を考慮した砂礫州の長期的な樹木動態モデルを開発しているが、大洪水によって砂礫州そのものが移動するような、大きな地形変化のない期間に限定した検討となっている。河道内の植生管理のため、さらに長期的な視点で植生の繁茂予測を行なうためには、洪水による樹木の破壊・流失のみならず、河床材料の移動による地形

変化も精度良く評価する必要があると考えられる。しかしながら、樹木群を有する場における河床変動計算は、複雑な流れ場となることから河床変動量を精度良く評価することは難しい。

近年、内田・福岡⁶⁾は構造物周辺や河川合流部など三次元性を有する複雑な流れと河床変動を、流速・圧力の鉛直分布を直接用いずに底面流速が評価できる解析法(以後、準三次元解析)を開発し、橋脚周りの流れ⁷⁾、水没水制群⁸⁾などに適用している。この解析法は底面流速を評価することで従来の平面二次元解析よりも精度よく河床変動量が評価可能であると報告されている。しかしながら、洪水中に樹木の破壊・流失が生じるような複雑な状況下における適用可能性は明らかとなっていない。

そこで、本研究では、内田・福岡⁶⁾が提案した準三次元解析法に樹木の鉛直構造を考慮した抗力項を加えるとともに、洪水における樹木の破壊・流失判定を適用することで、洪水中の樹木抵抗の変化が河床変動計算の精度に与える影響を把握することを目的とする。

2. 研究方法

(1) 対象河道および砂礫州

図-1 に示す荒川中流域に位置する砂礫州を含む約 6km の区間を対象とした．本研究では洪水中における樹木の破壊・流失が河床変動に及ぼす影響を把握することを目的としているが，その把握には洪水による樹木の破壊・流失実績，洪水前後の河床高の変化を把握する必要がある．については，図-1 の砂礫州では，対象とする 2007 年 9 月洪水前に多くの樹木(主にタチヤナギ，ハリエンジュ)が繁茂していた．しかし，対象洪水時には熊谷水位観測所(76km)において既往最大水位を記録した非常に大規模な洪水であったことから，砂礫州上において多くの樹木の破壊・流失が確認されている．洪水前後で樹木の破壊・流失状況を調査済みであり，このデータを利用した．一方，については，洪水前後(2006 年，2007 年(洪水後))に数値地形データが取得されている．さらにこれら 2 つの数値地形データが取得された期間中に，砂礫州の地形変化が生じるような洪水もなかったことから，砂礫州上の詳細な河床変動量が把握可能であるとした．また，当該区間の河床の粒度分布は，対象洪水前に砂礫州上の 30 地点で，面積格子法を用いた画像解析から河床表層の粒度分布を把握しており，これらを利用した．

(2) 流れおよび河床変動計算手法

対象とした洪水流の計算は内田・福岡が開発した準三次元解析法⁶⁾を用いた．本研究で対象とした砂礫州上には 2007 年洪水以前に多くの樹木が繁茂していたため，準三次元解析法に植生抵抗項を加えた．植生抵抗は，田中・佐々木⁹⁾と同様の方法で水深方向に微小面積 $dA=d(z)dz$ ($d(z)$: 河床からの鉛直方向高さ z における主幹と枝の幅の和， dz : 鉛直方向の分割幅)を考慮して積分し式(1)~(5)より算出した．樹木に作用した抗力モーメント M ，樹木繁茂地点の底面せん断力 τ はそれぞれ以下の式(6)，式(7)より算出した．

$$f_x = \frac{1}{2} m \rho C_{d-ref} d_{BH} u \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \quad (1)$$

$$f_y = \frac{1}{2} m \rho C_{d-ref} d_{BH} v \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \quad (2)$$

$$F = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (3), \quad \alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \quad (4)$$

$$C_{d-all} = C_{d-ref} \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} (u^2 + v^2) \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (6)$$

$$\tau = \rho C_0^2 U^2 \quad (7)$$

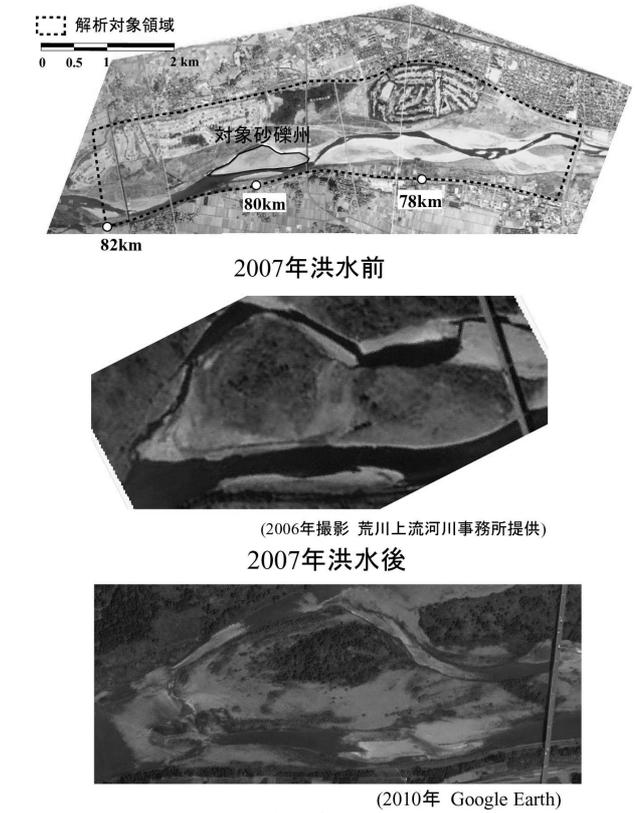


図-1 解析対象河道区間

(a) 対象砂礫州の位置図(図中の数値は距離標を表す)，(b) 2007 年洪水前の対象砂礫州の状況，(c) 2007 年洪水後の対象砂礫州の状況

ここに， u, v : それぞれ x, y 方向の水深平均流速(m/s)， h : 水深(m)， m : 単位面積当りの樹木密度(Number of trees/m²)， $C_d(z)$: 高さ z における抗力係数， C_{d-ref} : 主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数(本研究では 1 とした)， d_{BH} : 河床からの高さ 1.2m の位置における主幹幅 (m)， $\alpha(z)$: 樹形(幹・枝)の相違(高さ z における幹・枝幅の総和を胸高における幅 d_{BH} で基準化した比)を表す付加係数， $\beta(z)$: 葉層による付加抗力を表す付加係数， C_0 はマンシングの粗度係数(m^{-1/3}s)，重力加速度 g (m/s²)を用いて以下の式より算出される．

$$C_0^2 = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (8)$$

また，洪水流による河床高の変化は混合粒径河床変動計算法で検討した．本研究では流砂の連続式および平衡流砂量の算定に芦田・道上式¹⁰⁾，粒度分布の各粒径階の限界掃流力については芦田・道上による修正 Egiazaroff 式¹⁰⁾を用いた．また，粒度分布については河床表層に 0.2m の交換層，その下に 0.2m の貯留層を設けることによって，土砂堆積・河床洗掘による鉛直方向の粒度分布の変化を連続式より算出した．交換層と貯留層の厚さは，対象砂礫州上採取した河床材料のうち最大粒径が 0.19 m であり，最大粒径と同程度の厚さにすることが適切と考え 0.2m と設定した．初期河床は 2006 年に取得された数値地形データを用いて，対象砂礫州を含む河道地形を精度良く表現

した。また、検討区間内の初期粒度分布には対象洪水前に現地調査により得られた砂礫州上の粒度分布を用い、砂州上は上流部、中流部、下流部の3つの領域内で取得されたそれぞれ平均的な粒度分布(図-2(a))を、低水路には砂礫州の低水路際の粒度分布(図-2(b))を与えた。計算グリッドは縦断方向に約40m程度、横断方向に約10m程度に分割することで形成した。境界条件は図-3に示すように、対象領域の上流端(82km)、下流端(76km)で観測された水位を与えた。

(3) 樹木の破壊・流失評価方法

本研究では洪水中における樹木の破壊・流失を考慮するため、田中ら⁴⁾と同様に樹木の破壊指標BOI、流失指標WOIをそれぞれ以下の式より算定した。

$$BOI = \frac{d_{BH-max}}{d_{BH}} \quad (9), \quad WOI = \frac{\tau_{*90}}{\tau_{*c90}} \quad (10)$$

ここに、 d_{BH} はある樹木の胸高直径(cm)、 d_{BH-max} は破断・倒伏限界式⁴⁾あるいは転倒限界式⁴⁾より算定された、ある抗力モーメント M で破断可能な胸高直径 d_{BH-max} である。また、 τ_{*90} 、 τ_{*c90} はそれぞれ植物繁茂地点における河床材料の90%粒径の無次元掃流力、無次元限界掃流力である。 τ_{*90} 、 τ_{*c90} はそれぞれ、以下の式より算出した。

$$\tau_{*90} = \frac{\tau}{\rho g S d_{90}} \quad (11), \quad \frac{\tau_{*c90}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{90}/d_{50})} \right]^2 \quad (12)$$

ここに、 S は土粒子の水中比重である。また、 d_{50} は50%粒径(m)、 τ_{*c50} は50%粒径の無次元限界掃流力であり、本研究では0.06とした。洪水中の破壊・流失の判断については田中ら⁴⁾が提案しているように、流失評価指標WOIが1を越えた場合は流失が、破壊評価指標BOIが1を越えた場合は破壊が生じるとした。流失と判定された樹木については計算グリッドから除外し、流体に対して抗力が作用しないと仮定した。一方、破壊された樹木については、その場にとどまることから抗力として働くが、倒伏や破断によって樹木が傾くことにより抗力が減少すると考えられる。そこで、本研究ではThuyら¹¹⁾を参考に破壊したと判定された樹木については、抗力係数 C_{d-ref} を0.2とすることで抗力の減少をモデル化した。なお、破壊された樹木の繁茂地点において、それ以降に $WOI > 1$ となった場合についても流失が生じると判定した。

(4) 数値解析ケース

本研究では、表-1に示す4ケースの数値計算を実施することで、樹木が多く繁茂した地点における河床変動に対する準三次元解析の有効性、洪水中における樹木の破壊・流失を評価することが河床変動に与える影響を把握する。表中のケース1と2の比較より、ケース2,3,4の比較よりを把握する。については、底面

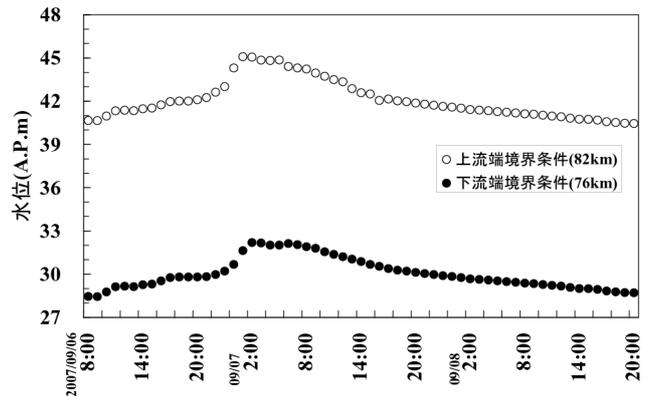
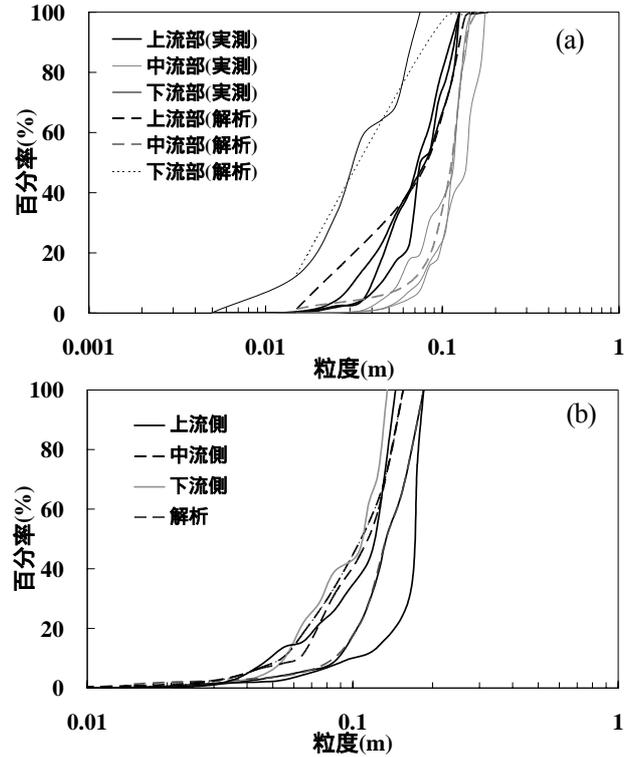


図-3 境界条件に用いた水位ハイドログラフ

表-1 解析ケース一覧

ケース	名称	流れの解析	河床変動計算	樹木の破壊・流失判定
1	2D-WOV	平面二次元	有り	無し
2	Q3D-WOV	準三次元	有り	無し
3	2D-WV	平面二次元	有り	有り
4	Q3D-WV	準三次元	有り	有り

流速を評価できる準3次元解析法を用いた場合、平面二次元解析法と比べて、樹林帯周辺の底面付近での流速増加を正しく表現することで、河床変動量の精度が向上するかについて着目する。また、については、洪水中の樹木破壊・流失の有無・タイミングを評価し、洪水中の抵抗の減少を正しく評価することで河床変動量の精度が向上するかについて着目することとした。

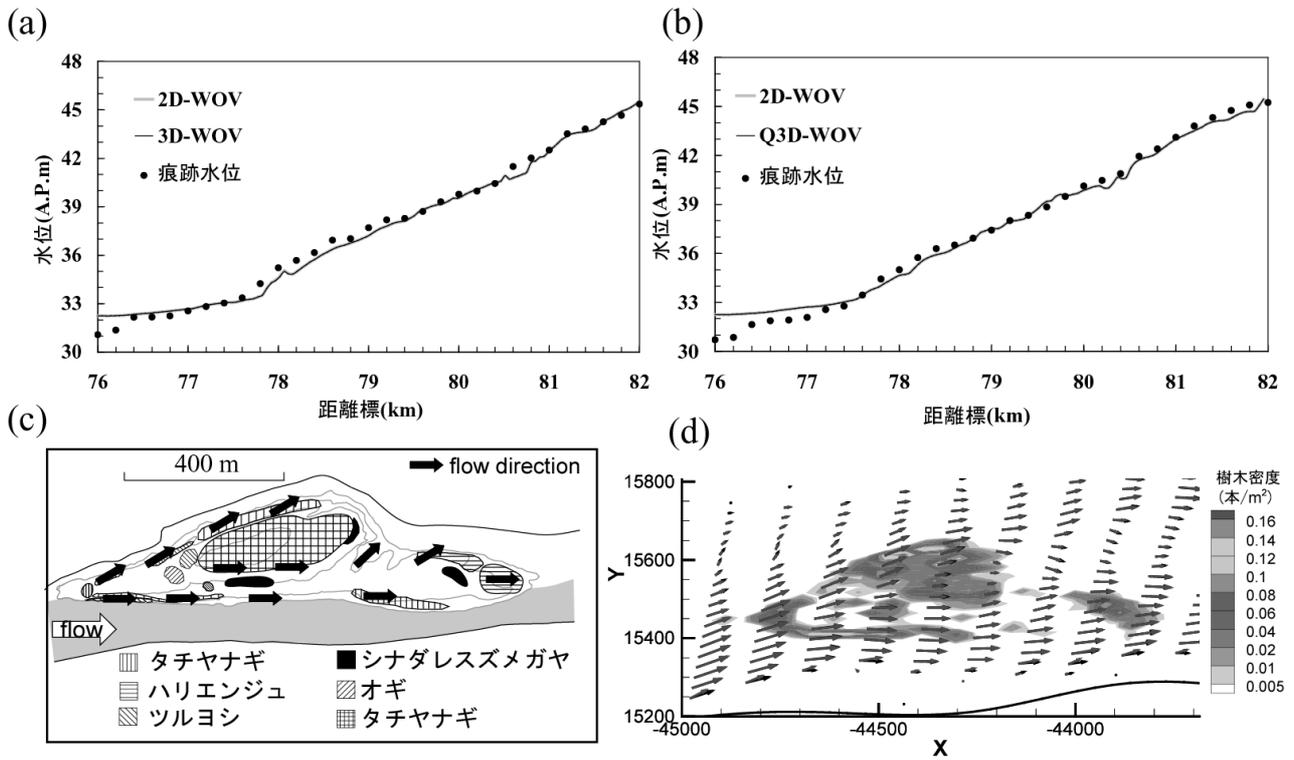


図-4 流れの数値計算結果の検証

(a) 痕跡水位と計算結果との比較(左岸), (b) 痕跡水位と計算水位との比較(右岸), (c) 2007年洪水後に観測した植物の倒伏状況から判断した流れの主流方向, (d) 洪水ピーク時における砂礫州上の流速ベクトル(黒:水深平均流速ベクトル, 赤:底面流速ベクトル)

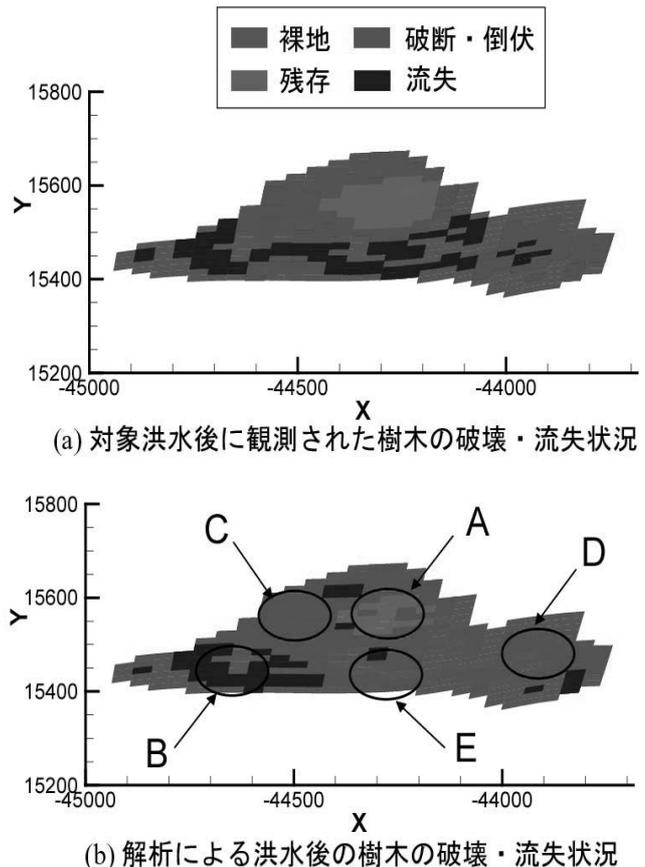
3. 結果および考察

(1) 洪水解析の検証

図-4(a), (b)にそれぞれ左岸側, 右岸側における解析対象洪水時のピーク水位の縦断分布を示す. 図中の実線は解析水位を, プロットは各砂礫州の痕跡水位を示している. これらの図には平面二次元解析法(2D-WOV), 準三次元解析法(Q3D-WOV)による解析結果を示しているが, 今回の洪水のピーク水位に対しては, 解析法による明瞭な差は確認できなかった. これは砂州のスケールに対して水深が小さく, 樹木などの抵抗項が流れを支配しているためと考えられる. 図中において対象砂礫州の範囲を示しているが, その区間も含めた解析範囲において解析水位は痕跡水位を概ね満足していた. また, 図-4(c), (d)はそれぞれ, 2007年洪水後に観測した植物の倒伏状況から判断した流れの主流方向, 洪水ピーク時における砂礫州上の流速ベクトルを示している. 両者の比較より, 解析による流速ベクトルは, 植生の倒伏状況から推測される流れ方向と概ね一致している. このことから, 本解析モデルは流れの状況を十分に再現可能であり, 以降で詳述する植生の破壊・流失状況, 砂礫州上の河床変動量を評価できるものと判断した.

(2) 解析上の樹木破壊・流失状況と実際に観測された破壊・流失状況との比較

図-5は砂礫州上の樹木の破壊・流失状況を区別した図



(a) 対象洪水後に観測された樹木の破壊・流失状況

(b) 解析による洪水後の樹木の破壊・流失状況

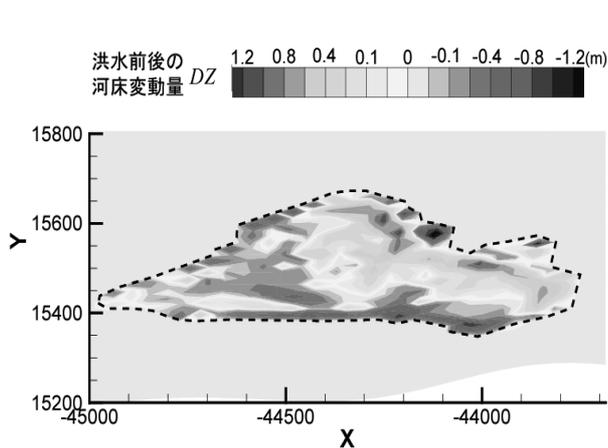


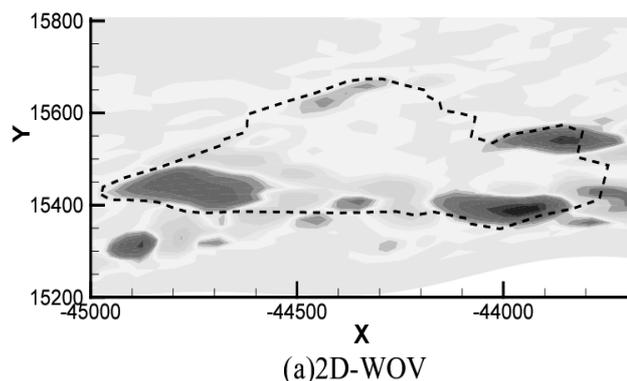
図-6 対象砂礫州において計測された洪水前後の河床変動量コンター図 (図中の点線は砂礫州の外縁を表している)

を示している。なお、図-5 で示す解析結果は、準三次元解析に樹木破壊判定を組み込んだケース4(表-1)を用いたものである。図-5(a)は対象洪水後に観測を実施して判断した樹木の破壊・流失および残存の状況を示している。図に示すように、砂礫州の前面部(B)および中間部の低水路側(E)では主に流失が生じていた一方で、中間部の高水敷側(C)や後面部(D)では破断・倒伏が生じていた。また、この砂礫州で標高が大きなA地点においてはほとんどの樹木が残存していた。一方、前項(3)で説明した樹木の破壊・流失評価方法を用いて解析した結果(図-5(b))をみると、実際にはE地点では樹木の流失が生じているが、解析上は破断・倒伏と判断されていた。今回の検討では樹木の流失を判断するために用いる d_{50} , d_{90} を砂礫州全体で統一して解析を実施した。その結果、E地点付近の粒度を過大評価したため、流失ではなく破断・倒伏破壊と判定されるにとどまったと考えられる。しかしながら、E地点における不整合を除いては、一部破断・倒伏が生じてしまっているものの、A地点での残存が概ね表現されていることに加え、B地点での流失、C、D地点の破断・倒伏の状況など、砂礫州の大部分において実際の洪水による破壊・流失状況を概ね表現できていた。このことから洪水中における樹木の破壊・流失が、砂礫州の河床変動量に及ぼす影響を把握することができると判断した。

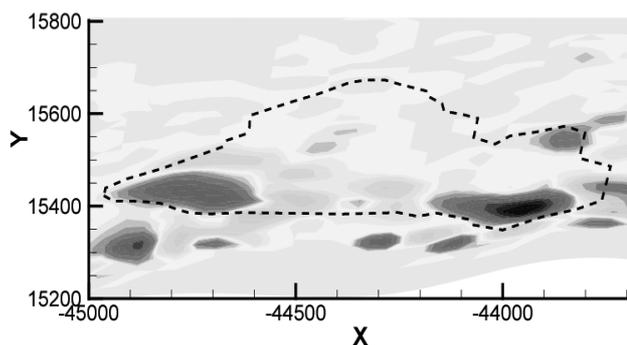
(3) 準三次元解析手法が樹木を有する砂礫州の河床変動計算結果に及ぼす影響

図-6には対象洪水前後(2006年、2007年(洪水後))に取得された数値地形データをもとに、洪水による砂礫州の河床変動量を示している。洪水前の河床標高値を基準としているため、正の値は河床上昇を、負の値は河床低下を意味する。この図より、砂礫州の前面部および低水路際においては河床低下が、砂礫州の後面部およびこの砂礫州で標高の高い中間部の高水敷側において河床上昇する傾向が見られた。以後、この実測値と計算値の比較を行なう。図-7には樹木の破壊・流失判定を考慮せずに平

洪水前後の河床変動量 DZ 1.2 0.8 0.4 0.1 0 -0.1 -0.4 -0.8 -1.2(m)



(a)2D-WOV



(b)Q3D-WOV

図-7 樹木の破壊・流失判定を考慮せずに計算された洪水前後の河床変動量コンター図 (a) 二次元平面計算, (b) 準三次元計算 (図中の点線は砂礫州の外縁を表している)

面二次元解析法(図-7(a))、準三次元解析法(図-7(b))を用いて計算された洪水前後の河床変動量コンター図を示す。両者を比較すると、砂礫州の高水敷側で平面二次元解析法の方が準三次元解析法よりも河床低下傾向にあるなど多少の違いはあるものの、砂礫州全体としては河床低下、上昇は同様の傾向を示す結果となった。本研究では比較的多くの樹木が繁茂した砂礫州を選定した。しかし、図-4(d)で示したように準三次元解析法で算出した底面付近の流速ベクトルと水深平均の流速ベクトルに大きな差が見られなかった。そのため、河床変動に対しても大きな差異が確認できなかったものと考えられる。また、実測値(図-6)と計算値を比較すると、砂礫州の前面部および後面部の低水路際で河床低下が生じている点、前面部低水路側で河床上昇が生じている点など合致する領域が確認された。しかし、砂礫州の後面部および標高の高い中間部の高水敷側における河床上昇傾向については、流れの解析法によらず表現することができなかった。

(4) 樹木の破壊・流失判定の有無が砂礫州の河床変動計算結果に及ぼす影響

図-8は樹木の破壊・流失判定を考慮した平面二次元解析法(図-8(a))、準三次元解析法(図-8(b))を用いて計算された洪水前後の河床変動量コンター図を示す。両者を

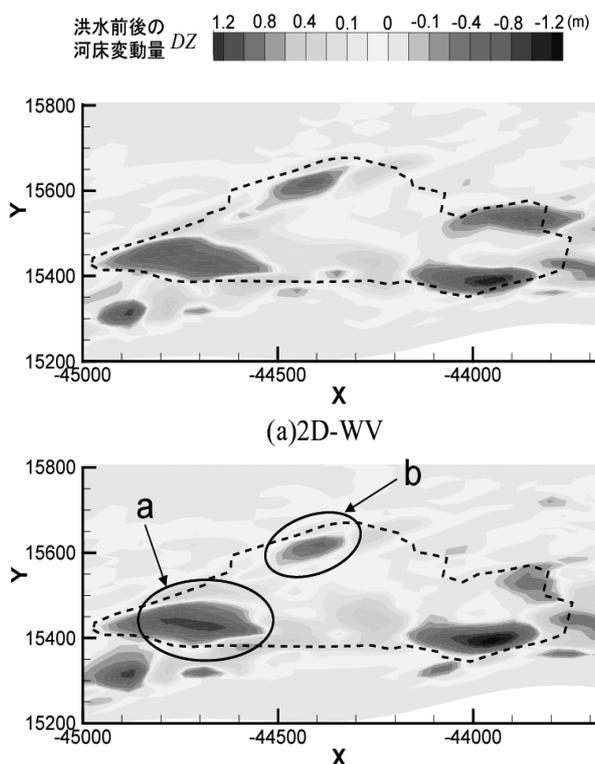


図-8 樹木の破壊・流失判定を考慮して計算された洪水前後の河床変動量コンター図 (a) 二次元平面計算, (b) 準三次元計算(図中の点線は砂礫州の外縁を表している)

比較すると樹木の破壊・流失判定を考慮しない場合と同様に、河床低下・上昇の傾向に多少の違いはあるものの、砂礫州全体としては概ね同様の結果となった。洪水中における樹木の破壊・流失判定の有無が河床変動量に及ぼす影響を把握するために図-7(b)と図-8(b)を比較した。その結果、判定を考慮した方が、考慮しない場合に比べ砂礫州前面部(図中の a 地点)の河床低下した領域が下流側に広がっている点、中間部高水敷側(図中の b 地点)の河床低下が生じている点において、実測に近づいていた。このように若干改善された理由としては、洪水中の樹木の破壊・流失を考慮することで、抵抗が減少あるいはなくなるため、流速の増加に伴って河床低下が生じたためと考えられる。上記で河床変動傾向に改善の見られた a 地点 b 地点では、洪水ピーク付近でそれぞれ樹木が流失、破断・倒伏と判定された後、河床低下が下流側に進行したことが河床変動量の時間変化に関する解析結果より確認された。このことから、洪水中の樹木の破壊・流失の有無やタイミングを把握することが、河床変動量算定の精度向上に寄与することが示唆された。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

平面二次元解析法、準三次元解析法を用いて樹木を有

する砂礫州の河床変動計算を実施したところ、今回対象としたような樹木密度においては、解析法によらずほぼ同様の河床変動量となった。

樹木破壊・流失を考慮して河床変動計算を実施したところ、それらを考慮しない場合に比べて実測の河床変動傾向に近づく箇所が見られた。洪水中の樹木の破壊・流失の有無やタイミングを把握することは、河床変動量算定の精度向上に寄与することが示唆された。

謝辞: 国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所には多数の資料を提供して頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造 利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水, 土木学会論文集, No.509/ -30, pp.79-88, 1995.
- 3) Tanaka, N., Samarakoon, M.B. and Yagisawa, J.: Effects of root architecture, physical tree characteristics, and soil shear strength on maximum resistive bending moment for overturning *Salix babylonica* and *Juglans ailanthifolia*, *Landscape Ecol Eng*, Vol.8, pp.69-79, 2012.
- 4) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案, 土木学会論文集, 第 66 巻, pp.359-370, 2010.
- 5) 八木澤順治, 田中規夫: 河道内植生の洪水による破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1171-1176, 2009.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1081-1086, 2009.
- 7) 内田龍彦, 福岡捷二: 水平方向渦度方程式を用いた底面流速の半直接解法と橋脚周りの局所洗掘解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.841-846.
- 8) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集 B1, Vol. 67, No. 1, pp.16-29, 2011.
- 9) 田中規夫, 佐々木寧: 2006 年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1445-1450, 2007.
- 10) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎実験, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 11) Thuy, N.B., Tanaka, N., Tanimoto, K.: Tsunami mitigation by coastal vegetation considering the effect of tree breaking, *Journal of Coastal Conservation* Published online (DOI 10.1007/s11852-011-0179-7), 2011.

(2012.4.5 受付)