

太田川洪水流による砂州の洗掘と樹木倒伏機構 に関する研究

MECHANISM OF BED SCOURING AND VEGETATION DESTRUCTION DUE TO
THE OTA RIVER FLOOD

後藤岳久¹・福岡捷二²

Takahisa GOTOH and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Two types of flood flows are seen in compound meandering channels, which are simple meandering channel flow and compound meandering channel flow. Due to compound meandering channel flow, the sandbar formed inner bank side is scoured. So, vegetations on sandbar formed inner bank side may be destructed by flood flows. In 2005, the largest flood in the past 50 years occurred in the Ota River. The vegetations on sandbar formed inner bank side were destructed by the flood flow. The objective of this study is to make clear the mechanism of bed scouring and vegetation destruction in this river by large flood. We have conducted investigation of vegetations and observed temporal change in water surface profiles during the flood. The field data demonstrate that bed scouring occurs at the front of the sandbar formed inner bank side. Bed variation analysis using the observed temporal change in water surface profiles proved the applicability of our physical consideration against vegetation destruction by the flood.

Key Words : vegetation destruction, bed scouring, sandbars, temporal change in water surface profiles, compound meandering river

1. 序論

河道内の樹木は多くの生物に生息・繁殖の場を提供し、良好な河川環境を形成する。また堤防際の流速を逶減させる等、治水上有効な働きをする場合もある。しかし、河道内樹木は流下能力の減少・水位の堰上げ・流れの偏流を引き起こす等の治水上の問題を引き起こすため、適切な樹木管理が求められている。

これまで洪水流の水位に及ぼす樹木群の影響について調査研究が行われてきた。福岡・藤田らは樹木群境界の流速差に起因して生じるせん断力を考慮して断面内の流速を求め、これを取り込んだ準二次元不等流解析法を示し、実際の河道計画に用いられている¹⁾。国外では、Darbyが植生の繁茂と横断流速分布を考慮した二次元不等流解析法を用い、実河川での適用を試みている²⁾。蛇行部や分合流部など洪水流の二次元性を考慮しなければならない場合は、非定常平面二次元解析を行う必要がある。福岡・渡邊らは、洪水流の本質は水面形の時間変化であること

に着目し、これを解とした非定常平面二次元解析を用いて河道内樹木を管理する際の有効な情報を提供している³⁾。前野らは旭川で行った植生調査の結果を用い、メッシュ毎に植生の繁茂状況を反映させた非定常二次元解析法を提案し、砂州スケールの樹木管理について検討している⁴⁾。

大洪水時には、河道線形、河床勾配や樹木繁茂位置との関係から樹木の倒伏が生じることがある。樹木の倒伏が生じると河道の流下能力が増加し、水位の低下が生じる。大洪水時、樹木が倒伏するか倒伏しないかについて樹木の挙動を把握することは河川管理上重要である。洪水流による河道内樹木の破壊や倒伏については、北川・島谷らがゴミの付着と樹木の倒伏の関係、倒伏の形態について検討し⁵⁾、その後樹木の引き倒し試験結果を用いて樹木の倒伏モーメントについて議論されるようになった⁶⁾。渡邊・市川らは洪水による土中水分の増加と根の支持力低下の関係を示し⁷⁾、服部・瀬崎らは千曲川で生じたハリエンジュの倒伏・流失について、河岸侵食と河床低下

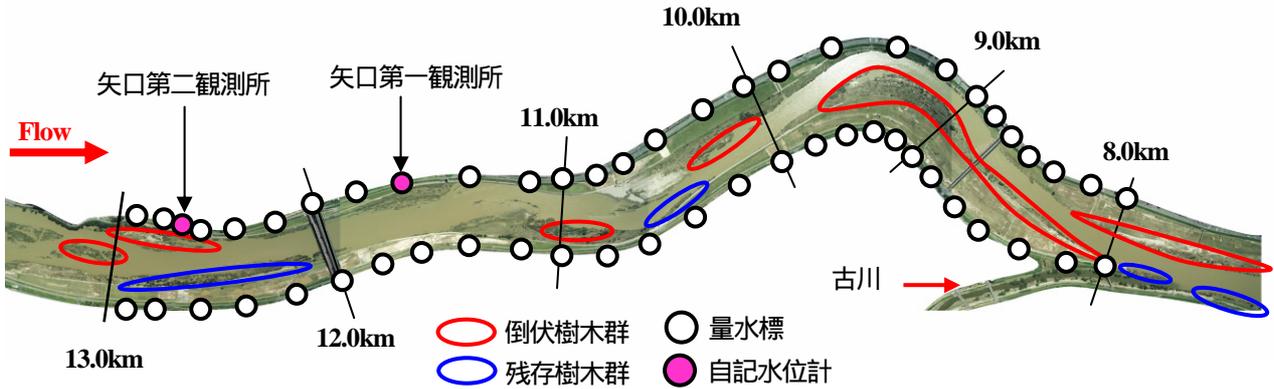


図-1 水位・観測地点および樹木倒伏状況(平成17年9月洪水直後撮影)

から樹木の倒伏機構について検討している⁸⁾。清水らは移動限界礫径と倒伏限界モーメントを用いて樹木倒伏の要因が河床の攪乱であるとしている⁹⁾。八木澤・田中らは樹木倒伏と樹木の生育基盤との関係を樹木の倒伏モーメントを用いて示し、樹木の倒伏が河床の洗掘であることに着目し、樹木が倒伏する底面せん断力について検討している¹⁰⁾。我が国の多くの河川は複断面蛇行河川であり、このような河川では単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れが生じる。大規模な洪水の場合、洪水ピーク付近における洪水流は主流が内岸寄りをする複断面的蛇行流れとなるため、内岸側に形成された砂州は洗掘を受ける¹¹⁾。内岸砂州上には樹木が群として繁茂していることが多く、洪水流により砂州が洗掘を受けると樹木群は倒伏・流失する懸念がある。洪水流下能力の観点から考えると、洪水時は群としての樹木の挙動が重要であり、群体で繁茂する樹木の倒伏機構について検討する必要がある。このような視点での検討は著者らの知る限り存在しない。

太田川では平成17年9月既往最大洪水(6800(m³/s))を更新する大規模な洪水が発生した。その結果、洪水ピーク付近において洪水流の主流が内岸寄りをするることにより、内岸砂州上の樹木が大規模に倒伏した。

本研究では、複断面蛇行河川における河床変動が樹木倒伏に及ぼす影響を把握するため、流れと河床変動解析により、太田川における砂州河床の洗掘と樹木群倒伏の関係について検討を行う。

2. 平成17年9月太田川洪水の概要

(1) 洪水流と河道内樹木の観測状況

図-1に水位・流量観測地点および樹木の倒伏状況を示す。対象とした区間は、太田川の8.0~13.0kmである。近年砂州の樹林化が顕著なため、洪水流下能力が低下している。そこで、洪水時の樹木群の挙動を明らかにするため量水板を200m間隔河岸沿いで設置し、1時間間隔の詳細な水面形時系列データを得た。自記水位計は矢口第一観測所、矢口第二観測所に設置されており、10分間隔の水位データが得られている。洪水時の流量は矢口第一観

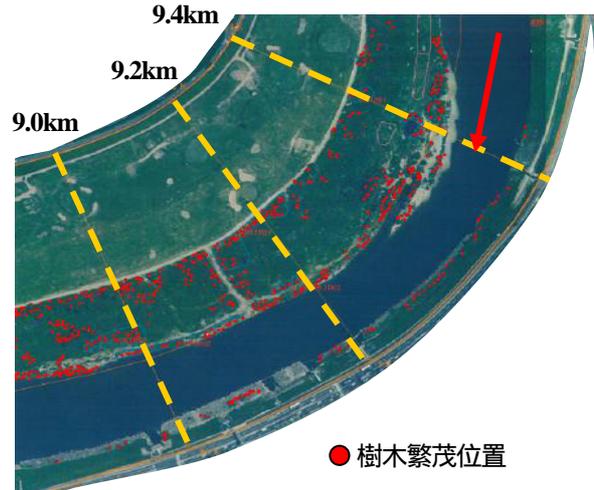


図-2 樹木繁茂状況(平成15年調査時)

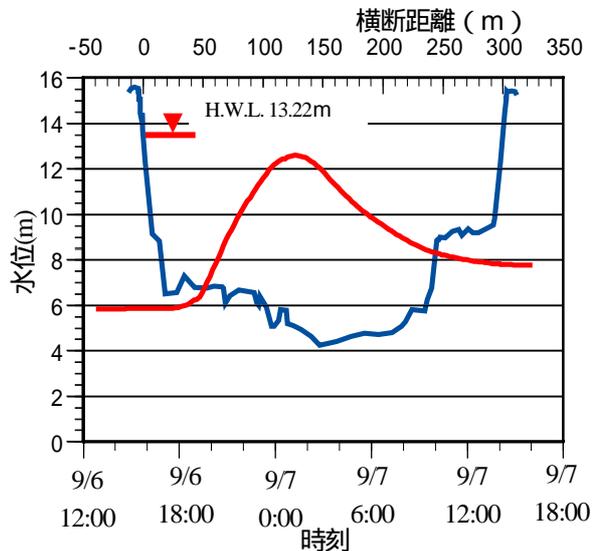


図-3 平成17年洪水水位ハイドログラフ

測所にて浮子による流量観測が行われた。河道横断測量は平成17年5月と平成17年9月に行われており、平成17年9月洪水による河道形状の変化が分かる。

太田川では、国土交通省太田川河川事務所と広島大学福岡研究室(当時)により、詳細な樹木調査が行われていた。調査は平成15年に行われ、全ての樹木の平面座標、樹高、樹種、胸高直径、枝下高を観測している。図-2に樹木の繁茂状況を示す。対象区間では、平成2年頃から砂

州上の樹林化が始まり、主にアカメヤナギ・オオタチヤナギが比高差の低い砂州の前縁線付近、マグワが比高差の高い高水敷寄りの砂州上に繁茂している。

(2) 平成17年9月洪水による樹木倒伏

複断面蛇行河川では、相対水深の大きさによって、外岸寄りを主流が走る単断面的蛇行流れと内岸寄りを主流が走る複断面的蛇行流れが存在し、大洪水時のピーク付近では内岸寄りを主流が走る複断面的蛇行流れとなる¹¹⁾。図-3に平成17年9月洪水における水位ハイドログラフを示す。平成17年9月洪水は最大流量7200(m³/s)と既往最大洪水(6800(m³/s))を更新し、最高水位が計画高水位に達する大規模な洪水であった。そのため、洪水のピーク付近では洪水流の主流が内岸寄りを走る複断面的蛇行流れとなったため、洪水ピーク時には主流の影響を強く受け内岸砂州上に繁茂していた樹木群は倒伏した(図-1)。写真-1に内岸砂州上の樹木倒伏の様子を示す。倒伏していた樹木の多くは写真の様に洗掘を受けており、砂州の前縁に繁茂する樹木群は、根こそぎ倒伏している。複断面蛇行河川では、洪水のピーク時に主流が内岸寄りを走るため、内岸砂州が洗掘を受ける¹¹⁾。このことから、太田川では内岸砂州が洪水ピーク付近で洗掘を受けることにより、内岸砂州上の樹木が倒伏したものと考えられる。そこで、洪水前後に観測された横断測量結果と倒伏樹木の位置から砂州河床の洗掘と樹木倒伏の関係について検討し、非定常二次元河床変動解析法を用いることにより、これらと流れ場の関係を明らかにする。

3. 河床の洗掘と樹木倒伏

図-4は9.4km地点における洪水前後の横断図を示しており、図-5は9.6km-9.0km付近における洪水前後に観測された河道横断測量結果より描いた河床変動コンターと倒伏樹木の位置を示す。最大洗掘は内岸砂州の前縁付近で生じており、9.4km地点では約2mもの洗掘を受けている。この砂州の前縁の洗掘は縦断的に生じており、これは洪水ピーク時に洪水流の主流が内岸寄りを走る複断面的蛇行流れをしていたためであると考えられる。この砂州の前縁には洪水前に樹木群A(オオタチヤナギの群落)が存在しており、これらの樹木は内岸砂州の前縁で生じた洗掘によって倒伏したものと考えられる。また、高水敷寄りに位置し、比高差が高い内岸砂州上に繁茂している樹木群B(マグワの群落)の周辺も30(cm)程度の洗掘を受けている。これは以下の理由によると思われる。樹木群Aと樹木群Bの間には樹木が疎に生えている場所が存在する。複断面的蛇行流れのため、このような場所が水みちとなり、洪水のピーク時は内岸砂州に乗り上げた主流が水みちを走ることにより、内岸砂州の前縁付近の樹木群Aだけでなく樹木群Bの付近の河床で洗掘が生じ、樹木群

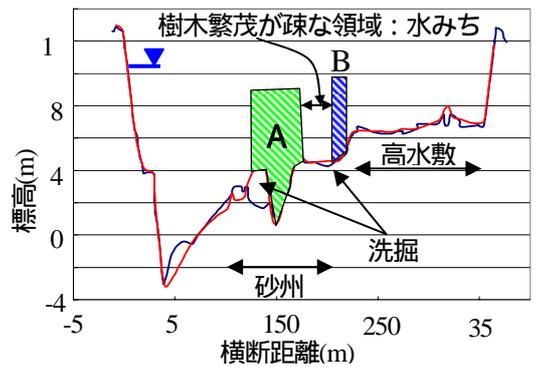


図-4 9.4km横断図と水みちの位置
 オオタチヤナギ(倒伏) マグワ(倒伏)

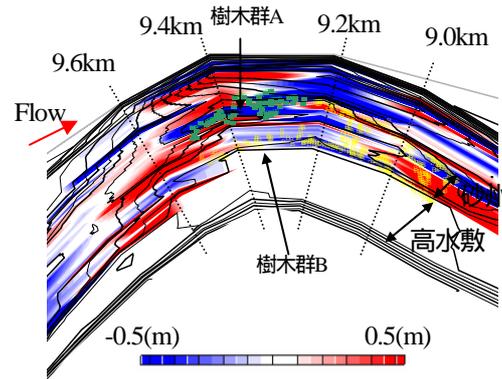


図-5 9.4km付近河床変動コンター図

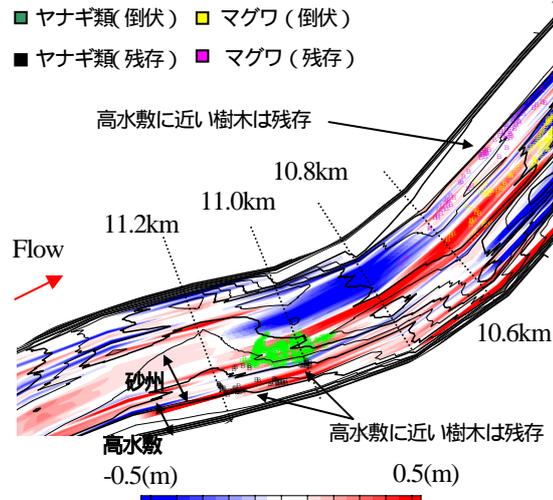


図-6 11.0km付近河床変動コンター図

A, Bが倒伏したものと考えられる。

図-6は11.0km付近における洪水前後の河床変動コンターを示す。この地点は洪水前にアカメヤナギが密生していた地点である。比高差のある砂州上には樹高約11(m)程度(平成15年調査時)の比較的高木のアカメヤナギが繁茂し、比高差の小さい砂州の前縁付近には比較的低木のアカメヤナギが繁茂していた。図-6より砂州の前縁で洗掘を受ける傾向にあり、ここでは樹木の倒伏が顕著であった。一方、比高差のある高水敷寄りの砂州上では顕著な洗掘が生じておらず、樹木は残存する傾向にあった。従って、洪水前後に行われた横断測量結果と樹木倒伏位



砂洲の洗掘

写真-1 河床洗掘による樹木倒伏(8.8km付近の右岸側)

置との関係から、内岸砂洲の前縁付近の洗掘によって樹木倒伏が生じたものと考えられる。これら観測データから得られた知見に基づき非定常二次元河床変動解析を用い、洪水流と砂洲の洗掘や樹木倒伏の関係について検討を行う。

4. 非定常二次元河床変動解析による検討

(1) 解析方針

洪水前後に観測された横断測量の結果から、内岸砂洲で生じていた洗掘が樹木倒伏の主な要因であることが分かった。著者らは観測された水面形の時間変化から、内岸砂洲上の樹木は水位ピーク付近で倒伏していたことを明らかにしている¹²⁾¹³⁾。そこで、洪水水位ピーク付近での河床の変動が樹木倒伏に及ぼす影響について検討する。

平成17年9月太田川洪水では、200m間隔で測定された横断測量結果に現れるような大規模な河床変動が内岸砂洲上で生じていた。従って、河道形状や樹木の繁茂位置と流れ場との関係から決まる砂洲の洗掘により、樹木の倒伏が生じたと思われる。そのため、樹木周辺における詳細な流れ場と河床変動の解析を行うよりもむしろ、洪水中の全体的な水面形の時間変化を再現するように非定常二次元河床変動解析を行うことにより、実現現象を概ね再現できると考え、検討を行った¹⁴⁾。

(2) 解析方法

洪水流の解析には福岡・渡邊らによる水面形の時間変化を解とする非定常平面二次元解析法を用いる³⁾¹¹⁾。この解析法では、式(1)に示すように樹木群が洪水流に及ぼす影響は樹木群透過係数によって評価し、河床材料・河床形状の影響は粗度係数で評価している。

$$(\tau_{0\xi}, \tau_{0\eta}) = \left(\frac{gn^2}{h^{1/3}} + \frac{gh_{tree}}{K^2} \right) \sqrt{u^2 + v^2} (\tilde{U}, \tilde{V}) \quad (1)$$

ここで、 h_{tree} : 樹高、 K : 樹木群透過係数である。粗度係数は河床材料・河床形状からみて妥当と思われる値を採用した。樹木群透過係数は樹木群の繁茂状況により、特徴的な区間ごとに大きくブロック分けして与え、

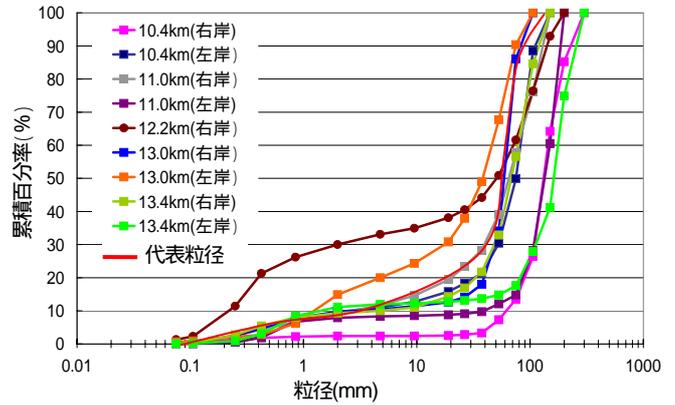


図-7 対象区間の粒度分布

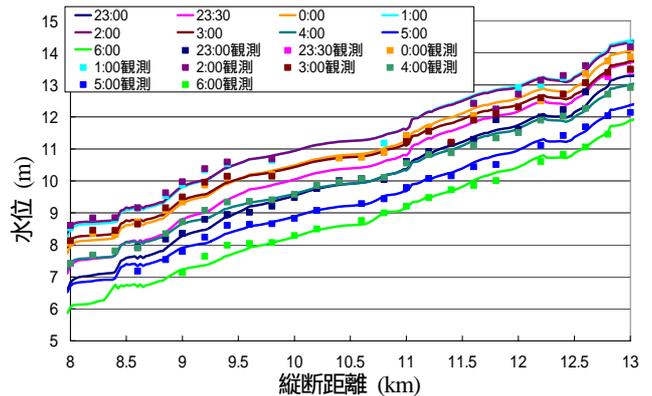


図-8 水面形の解析結果と観測値の比較

表-1 粗度係数・樹木群透過係数

樹木群透過係数 $K(m/s)$		
位置	10:00 ~ 2:00	3:00 ~ 7:00
8.0 ~ 9.6km 右岸	40	60
9.6 ~ 9.2km 右岸(水みち)	30	60
10.4 ~ 10.8km 右岸	50	60
10.8 ~ 11.4km 右岸	40	60
8.0 ~ 8.8km 左岸	50	60
9.6 ~ 10.6km 左岸	50	60
粗度係数 $n(m^{-1/3} \cdot s)$		
低水路(8.0-13.0km)	0.025	
高水敷(8.0-13.0km)	0.035	

観測された水面形の時間変化を再現するように値を決定した¹⁵⁾。これは樹木群のある河道の水面形の形成は、樹木の個々の抵抗よりも樹木群の平均的な抵抗によると考えられるためである。観測された水面形の時間変化には樹木倒伏の影響が見られ、樹木群は洪水のピーク付近で倒伏していると考えられる¹²⁾。洪水のピーク付近で水面形の特徴が変化しているため、水位上昇期と水位下降期で異なる樹木群透過係数を用い観測された水面形の時間変化を再現する¹³⁾。

河床変動解析には一般的に行われている解析法を用いる。基礎方程式は流砂の連続式、粒径別連続式(芦田・江頭・劉¹⁶⁾らによって二次元に拡張された平野¹⁷⁾の式)を用いた。平衡流砂量式として芦田・道上¹⁷⁾による粒径別平衡流砂量式を用い、河道形状の影響は福岡・山坂の式¹¹⁾を用いて評価している。粒径別の限界掃流力は、芦田・道上によって修正されたEgiazaroffの式¹⁷⁾を用い、限界掃流力は岩垣の式¹⁷⁾を用いた。また、交換層の厚さには最大粒径程度(10cm)を用いた。上流端境界条件には

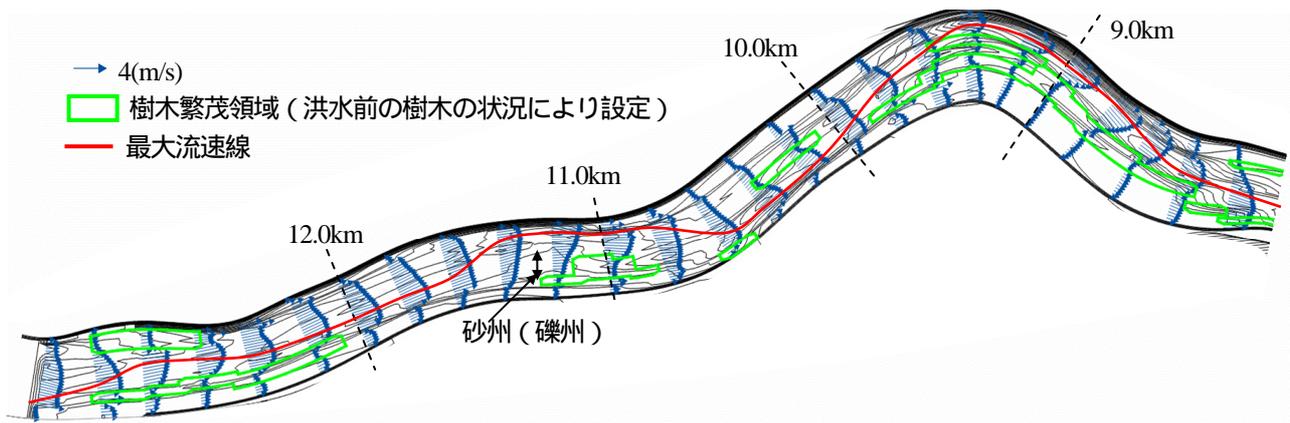


図-9 流速分布と最大流速線(水位ピーク時)

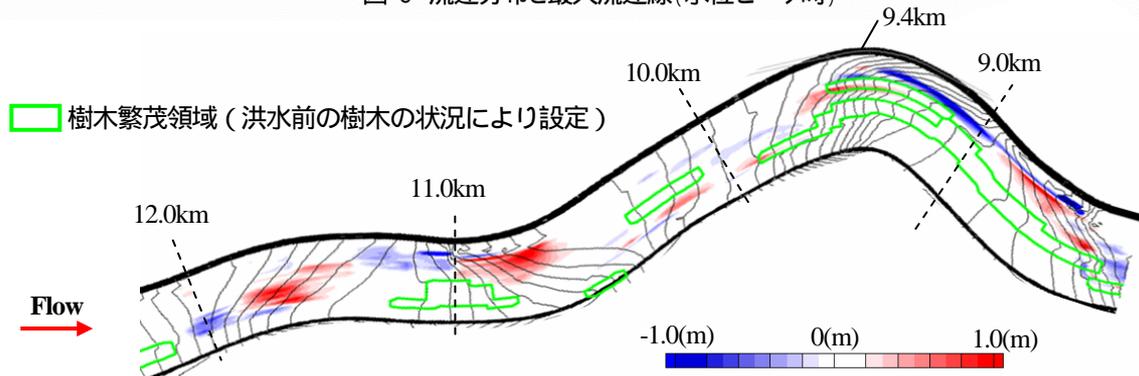


図-10 河床変動コンターと水位コンター(水位ピーク時)

矢口第一水位観測所における水位時系列データを用い、下流端境界条件には8.8km地点における観測水位の時系列データを用いた。解析格子は縦断方向272分割、横断方向30分割とした。対象区間の河床材料粒度分布を図-7に示す。河床材料は主に D_{60} が6(cm)程度の粗礫である。主流が乗り上げる様な場所では D_{60} が15(cm)の粗石となっている。

先に述べた通り9.4km付近の内岸砂州上には水みちとなる場所が存在し、それが内岸砂州の洗掘と樹木倒伏に密接に関係していたと考えられる。著者らの太田川の洪水流の解析¹³⁾では、水みちのある樹木群区間でも区間全体としての平均的な樹木群透過係数を与えていた。しかし、今回の河床変動解析では、9.4km付近における水みちが河床洗掘と樹木倒伏に影響していると考え、これを再現するように横断方向は20m弱、縦断方向は9.6km~9.2km間に樹木群が無い(樹木群透過係数の値が無量大)領域を設けた。水みちの幅・長さは洪水前の樹木繁茂状況と洪水前後の河床変動コンターから決定した。水みちを含む区間の樹木群透過係数は、水みちの流速増大による樹木群内の流れとの混合が大きくなることから付加抵抗を考慮する必要がある。その他の区間はこれまでと同様に平均的な樹木群透過係数を与える¹³⁾。

(3) 解析結果

図-8に各時間の水面形の解析結果と観測値の比較を示す。解析結果は観測結果を概ね再現できている。表-1は

用いた粗度係数・樹木群透過係数を示す。水みちのある区間では、前述のように他の区間より小さな樹木群透過係数($K=30$)を用いており、樹木群の抵抗が大きくなっている。

図-9に洪水ピーク時における流速分布と最大流速線を示す。9.4km付近蛇行部では内岸砂州の樹木群付近で最大流速が生じ、約3(m/s)以上の流速が生じている。水みち内の流速も3(m/s)程度生じており、洪水ピーク時には複断面的蛇行流れをしていたことにより、内岸砂州上の水みちに流れが集中していたことが分かる。11.0km付近では外岸寄りに最大流速が生じているものの、樹木群付近でも約3(m/s)もの流速が生じている。図-10に河床変動コンター(解析結果)と水位コンターを示す。実線が水位のコンターを示している。解析結果は水位ピーク時における河床変動と水面形を示しており、樹木は水位ピーク付近で倒伏していると考えられるため¹³⁾、樹木が倒伏する時の河床変動を示している。そのため、どの位置に繁茂する樹木が河床変動の影響を受ける状態にあるのかを示している。9.4km付近における蛇行部では、樹木によって水位が堰上げられ、その下流で水面形が急勾配になっている所(9.4km-9.0km付近)の砂州の前縁付近から澇筋にかけて洗掘を受ける傾向にあり、これは観測結果と概ね一致する。そのため、9.4km-9.0kmに生えていた樹木群は水位ピーク時において河床変動の影響を受け倒伏したものと考えられる。しかし、9.4km地点の砂州では、観測された様な2mもの洗掘は再現できていない。水みち付近は堆積

傾向にある。これは今回の解析では、樹木が倒伏した後も樹木群透過係数を表-1のように一定値を与えて解析を行っており、そのため9.4km地点では顕著な洗掘が生じなかったものと考えられる。9.4-9.0kmの砂州前縁の洗掘によって樹木群が倒伏し、樹木群透過係数が大きくなった場合に9.4kmの砂州の洗掘をどの程度再現できるか今後検討する必要がある。

11.0km付近の河床変動は、11.0km-10.6kmに見られる内岸砂州の洗掘を適切に再現できていない。11.2km右岸側には粒径15(cm)を超える大規模な砂州が存在し、粗石で構成されている。このような大礫・石からなる河道の河床変動解析の困難さ¹⁸⁾¹⁹⁾が河床変動を表現できていない一つの原因と思われる。

5. 結論

本研究では、実測の横断測量結果・詳細な河道内樹木データを用いた非定常二次元河床変動解析により、複断面蛇行河川における河床変動と樹木倒伏の関係について検討を行った。以下に主な結論を述べる。

- 1) 洪水前後に観測された横断測量結果と洪水観測から、洪水流は複断面的蛇行流れをしていたため、内岸側に形成された砂州は著しい洗掘を受けた。特に砂州前縁での洗掘が顕著となり、内岸砂州の前面の洗掘によって樹木が大量に倒伏した。
- 2) 観測データに基づいた非定常二次元河床変動解析を用い、樹木倒伏が生じた時刻における砂州河床の洗掘を再現し、樹木倒伏がどの場所から生じたのかを明らかにした。しかし、本解析では樹木倒伏後の過程を考慮していないため、洪水後に観測された河床形状を十分に再現できていない場所がある。
- 3) 本解析で用いた河床変動解析モデルは砂河川において適用性が比較的高いモデルである。そのため、砂礫が堆積していた砂州では洗掘の傾向を比較的良く再現できたが、粗石や粗礫が多く存在する砂州では洗掘が十分再現できていない。

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利的影響，土木研究所報告，第180号の3，1990。
- 2) Stephen E. Darby：Effect Riparian Vegetation on Flow Resistance and Flood Potential, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, pp443-454, 1999.
- 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/ -67，pp.45-56，2004。

- 4) 前野詩朗，渡邊 敏，藤塚佳晃：簡易に得られる植物特性値を考慮した水理解析モデルの精度向上の提案，土木学会論文集，No.803/ -73，pp.91-104，2005。
- 5) 北川明，島谷幸宏，小栗幸雄：川辺の樹木に関するフィールドワーク，水理講演会論文集，第33巻，pp.625-630，1989。
- 6) (財)リバーフロント整備センター：河道内樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案），山海堂，1994。
- 7) 渡邊康玄，市川嘉輝，井出康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界，水工学論文集，第40巻，pp.169-174,1996。
- 8) 服部 敦，瀨崎智之，徳田 真，近藤和仁，吉田昌樹，藤田光一：植物群落の変化（出水によるハリエンジュの倒伏・流失とその後の再萌芽），千曲川の総合研究 鼠橋地区を中心として，河川生態学術研究会千曲川グループ，（財）リバーフロント整備センター，pp.587-635，2001。
- 9) 清水義彦，小葉竹重機，吉川武志：出水によるハリエンジュ樹林地の破壊とその規模推定に関する考察，水工学論文集，第46巻，pp.953-958, 2002。
- 10) 八木澤順治，田中規夫，福岡捷二：砂礫州上に繁茂する植生の洪水時流失限界，河川技術論文集，第14巻，pp.139-144, 2008。
- 11) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 12) 兒子真也，福岡捷二，後藤岳久：樹木の倒伏・破壊を伴う太田川の洪水流の挙動，第62回年次学術講演会講演概要集，pp.181-182，2007。
- 13) 後藤岳久，福岡捷二，兒子真也：洪水流による樹木の倒伏・破壊と流量ハイドログラフの推算，第62回年次学術講演会講演概要集，pp.187-188，2007。
- 14) 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，2005。
- 15) 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。
- 16) 芦田和男，江頭進治，劉炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析 水工学論文集 第35巻，pp.383-390，1991。
- 17) 土木学会水理委員会：水理公式集〔平成11年版〕，丸善，1999。
- 18) 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, 2007。
- 19) Osada K. and Fukuoka S.：Development of One-Dimensional Bed Variation Analysis Methods Focused on the Mechanism of Sediment Transport in Stony-Bed River, ICHE, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol.8, pp.1387-1396, 2008。

(2008.9.30受付)