樹林が繁茂した加古川中流部における 出水時流況と樹林損壊に関する調査・解析

ANALYSIS ON RECENT FLOOD EVENTS AND TREE VEGETATION COLLAPSES IN KAKO RIVER

道奥康治¹・宮本仁志²・神田佳一³・大地洋平⁴・阿河一穂⁴・盛岡淳二⁴・
魚谷拓矢⁵・吉田一光⁶・吉村敏⁶

Kohji MICHIOKU, Hitoshi MIYAMOTO, Keiichi KANDA, Yohei OHCHI, Kazuho AGA,
Jyunji MORIOKA, Takuya UOTANI, Kazuaki YOSHIDA, Satoshi YOSHIMURA

¹フェロー会員 工博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 博(工) 神戸大学大学院准教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 博(工) 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科 (〒625-8511 舞鶴市宇白屋234)

⁴学生員 神戸大学大学院学生 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵学生員 明石工業高等専門学校学生 建築都市システム工学専攻 (〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

⁶国土交通省姫路河川国道事務所 (〒670-0947 兵庫県姫路市北条1-250)

Forestation on flood plains is a world-wide engineering issue in middle to downstream reaches in many rivers. This brings not only degradation of flow conveyance capacity but also irreversible changes of ecological system in rivers. In order to obtain information on tree vegetation behavior during flood events, field data of flow fields and tree vegetation collapse were collected in Kako River, where willows are heavily vegetated on the flood plain. After starting a H-ADCP flow measurement in 2009, small to medium size flood events frequently occurred, which enables us not only to verify an analytical model to reproduce flow fields in and out of vegetations but also to examine tree vegetation collapses after flooding. The analytical solutions on velocity profiles as well as flow force acting on trees were in good agreement with the H-ADCP measurements and tree damages, respectively.

Key Words : Willow vegetated river, H-ADCP, flood flow analysis, tree collapse

1. はじめに

治水・利水を目的として人為的に改変された河川の中下流部では、陸地化や植生繁茂の進行が国内外で顕在化している。砂礫で覆われたかつての"White River"から河川敷が緑に覆われた"Green River"への移行として象徴的に取り扱われている。植生繁茂の中でも樹林化は特に、疎通障害や流木生産を助長して河道の治水機能を低下させ、水際遷移帯の喪失など環境システムの不可逆的变化をもたらす。樹林化の要因としては、河川の自然営力に見合わない河道断面や流量の人為制御などによる流況の平準化が疑われており、河川流の自然攪乱によって樹林化が抑制されるように河川の再整備を進め、それに応じた管理を実施することが求められている。しかし、出水時の河川流と樹林動態を同時に連続計測した事例が少なく、河川のダイナミズムを生かせるような河道断面の適正化に関する知見は十分に得られていない。そのため、樹林河道の問題を取り扱ったこれまでの数値解析、水理実験、樹木の消長に関する調査などによる成果^{1),2),3),4)}を出水時の流況や植生動態に基づいて検証することは困難

であり、必ずしも既往の研究で得られた知見が樹林化抑制の施策に反映されているとは言えない現状にある。河道の適正な管理には、樹林化河道の流れを解析する水理学的なアプローチと樹木の消長を考慮した植生生態学的なアプローチ⁵⁾が必要である。

著者らは、水理学的なアプローチとして、横断方向の流速分布の連続計測が可能なH-ADCPシステムを2009年5月から加古川中流部に設置し⁶⁾、2009年8月～2010年5月の4回にわたる中小規模の出水を捉えることに成功した。この期間において、同時にヤナギ・竹などの樹径・樹高・繁茂密度などの樹木特性と出水後の倒伏・損壊状況を集中的に調査した。現地観測で得られた流速と樹木損壊との因果関係を検証するためには、樹林内外の流れと流体力を再現し得る数値解析が必要である。そこで、樹林帯のような透過性領域が河川流の一部に含まれ、しかも水位変動にともない樹林の一部あるいは全域が冠水するような流れを再現するために、透過構造物の流れを対象として開発された二次元二層流モデル⁷⁾を基にして、樹林内外の流れと流体力・林床に作用する河床せん断力(以下、「林床せん断力」と記す)を解析できる数値計算手法を構築した。本論文では、4回の出水現象をこの

数値解析モデルにより再現し、樹林調査や洪水観測から明らかとなった樹林損壊の実績と流れの観測結果との比較からその有効性を検証するとともに、樹林の損壊メカニズムについて考察する。これにより、樹林化が進行した河川の整備・管理方針に関する知見を得ることを研究の目的とする。

2. 平面二次元二層流モデルの特徴⁶⁾

解析に用いたモデルは、図-1に示すような、水位・樹高が時空間的に変化する河川流を想定した二次元二層流モデルである。全解析領域を「樹林-水」で構成される混相流と「水-水」で構成される单相流の領域に区分する。樹冠をつなぐ界面で流れを上下二層に分割し、樹冠境界（内部せん断層）に発生する内部せん断力や質量・運動量交換をモデル化することによって、樹林を透過・越流する流れを再現できる。樹林層内では、流速・水位に加えて樹木に作用する流体抗力と林床せん断力の解が同時に得られる。樹木の流体抗力は次式で与えられる。

$$(F_x, F_y) = \frac{\rho C_D \lambda_{veg} h_V \sqrt{u^2 + v^2}}{2} (u, v) \quad (1)$$

ここで、 (F_x, F_y) :流体抗力のx,y方向成分、 (u, v) :層平均流速のx,y方向成分、 h_V :樹林の浸水高さ、 λ_{veg} :密生度、 C_D :樹木の抗力係数⁸⁾（密生度と樹径の関数）である。また、出水時の水位変動にも適用可能で、倒伏・成長にともない様々な高さの植物が分布する状況を再現し、柔軟かつ合理的に機能する。なお、本研究では、実績洪水を対象としたため、樹林が冠水しない一層流として表現されている。計画規模相当の出水の場合には樹林が完全に冠水するため、二層流として解析した⁹⁾。

3. 対象区間における出水観測

出水観測は、図-2に示す加古川の河口から23.0-24.4kmの中流部に位置する樹林繁茂区間を対象とした。同区間のセグメントは2-1に分類される。ここでは、冠水を促進して植生の新規参入と樹林化を抑制することを目的として、2008年3月に図-2中に示す高水敷の一部が試験的に切り下げられている（写真-1、2参照）。また、砂州上の優先樹種であるヤナギと竹を対象として植生調査を実施した。出水時における横断方向流速分布を連続計測するため、切り下げ区間の横断面に超音波ドップラー式流速計（以下、「H-ADCP」と記す）を設置した（写真-3参照）。2009年8月1-2日、同年8月10日、2010年4月12-13日、同年5月23-25日の計4回、中小規模の洪水が発生した。写真-4のように試験区間の高水敷や樹林の一部が冠水し、H-ADCPによる流速計測に成功した。これら各

図-1 二次元二層流モデル

図-2 解析および調査対象区間

写真-1 切り下げ前

写真-2 切り下げ後

写真-3 H-ADCP

写真-4 出水の様子(H.21年8月2日)

図-3 観測された洪水の流量・水位変化

出水後ならびに季節毎に右岸で樹林帯の現地踏査を行い、樹高・樹径・繁茂密度や倒伏状況等を調査した。また、23.6km測線上の兩岸に水位計を設置することで、水位計測を行っている。

4. 数値モデルによる出水流況の再現と検証

(1) 概要

H-ADCPによって流速が観測された4回の出水におけるハイドログラフと水位の記録を図-3に示す。対象区間(23.0km-24.4km)における流量は、それより3km下流の大島観測所の流量記録と、その間に合流する右支川万願寺川の流量(万願寺観測所)との差から推定した。これを上流端での境界条件として与え、下流端境界では23.6kmの地点の水位実測値から河床勾配1/800を考慮して水位を推定し与える。

(2) 流れの再現と考察

a) H-ADCP

図-4に2009年8月1-2日においてH-ADCPに記録された超音波反射強度を示す。所定の流速精度を得るためには約60dB以上の有効反射強度が必要であるが、これより小さい場合は流速信号が乱れ十分な計測精度が得られない。この出水では、有効な測定範囲がH-ADCP設置位置から横方向に30-60m程度と判断される。ここで、左岸に近いほど乱れが大きい原因として、浮遊する細粒土砂やゴミ・流木等の夾雑物により、超音波が遮断された影響が考えられる。他の3回の出水に関しても、測定された超音波反射強度から十分な信頼性と判断される有効測定範囲の計測値のみを数値解析との比較検証に用いる。

b) 解析値とH-ADCP観測値との比較

数値解析により再現された23.6km測線上における流速とH-ADCP計測値との比較を図-5に示す。ここで、横軸は日時、縦軸は右岸からの横断距離を示している。図中、左岸側の点線で囲まれた領域は、有効反射強度が60dB以下で十分な測定精度が得られていない領域に相当し、それ以外の範囲の計測値と数値解析値とを比較する。2009年8月1-2日、8月10日、2010年4月12-13日の計測値に関しては、有効測定範囲の流速は数値解析値と概ね一致している。しかし、4回の出水の中で最もピーク流量の大きい2010年5月23-25日の観測に関しては、流速分布の特徴が概ね一致してはいるものの、他の出水と比較すると数値解析値が過小評価されている。その原因としては、樹高を一様に与えたことで水位が高い5月出水での低水路内の流れを過小評価したこと、他の出水よりも濁度が高くH-ADCP超音波が阻害され、有効計測範囲が狭くなるとともに左岸側の計測精度が低下したことなどが考えられる。また、この地点でのハイドログラフ推定に用いた流量観測所におけるこの規模の流量のH-Q特性や現地

図-4 超音波反射強度の例

に即した左岸樹林データを与えるなどの検証が必要と考えている。しかし、流量の増減にともなう流速の経時変化や横断分布特性に関しては概ね再現されており、本モデルの流況再現性が認められる。

c) 樹林帯の有無が流況に与える影響

研究対象区間では、ヤナギ・竹林が兩岸に繁茂し、疎通能力に大きく影響していると考えられる。そこで、樹林帯が出水流況に及ぼす影響を確認するために、樹林帯が存在する場合(現況)と樹林帯が存在しないと仮定した場合の23.6km測線上における平均流速分布を河床横断形状とともに図-6に示す(樹林帯の位置は同図中にグレーゾーンで示されている)。現況のように樹林帯の存在する場合には、樹林帯内部での減速や疎通障害のために主流の低水路部分に流れが集中して、樹林帯がない場合よりも「低水路-高水敷」間の流速差が大きい。このような流速分布の傾向は低水路河床を侵食し、高水敷への土砂輸送と堆積をもたらす方向に作用し、陸地化・樹林化を促進する要因と推察される。流速の解析結果は、定量的にもH-ADCPの観測値とも概ね一致しており、本モデルの現況再現性を改めて確認することができる。ただし、左岸側の流速が乱れている範囲では、前述のように計測誤差が大きくなるため一致していない。

4. 平成16年23号台風を対象とした樹木倒伏実績の検証

(1) 現地踏査

樹林繁茂状況を把握するために右岸を中心として、2009年～2010年の各出水後と季節の節目において現地調査を実施した。図-7に調査結果である樹木の生育状況を示す。砂州上のヤナギは主流部に近いほど樹径が小さい。これは、出水毎に流水攪乱を受けて倒伏・伐根を繰り返す、残った根茎から、あるいは新規に発芽・生長を開始するためであると考えられる。すなわち、洪水攪乱を受ける領域においては、陸上部の樹齢が若く樹径の小さな樹木が多く分布するものと考えられる。この領域では、倒伏履歴を有するヤナギが多く分布し、樹径が50cmを

超えるヤナギの倒伏痕跡も確認された。これに対し、堤防側に近く地盤が高い砂州領域では、樹径が比較的大きなヤナギの分布が目立っている。この領域では流れの影響を受けにくいと、ヤナギの損壊は顕著でないと考えられる。しかし、これら今回の現地踏査で倒伏履歴が確認された樹木の大部分は、洗掘部に他の草木がすでに活着していること、付着ゴミが古いこと、幹や枝の倒伏・傾斜後の天空方向への延伸が見られること、幹に植物が絡みついていること等から、2009年よりも以前に倒伏し

ていると推察された。また、主流部近傍では樹齢5年以下の0-10cmの非倒伏樹木が多く確認されたことから、過去5年以内の出水により倒伏した樹木から栄養繁殖により生長したものが多い。よって、倒伏履歴を有する樹木の大部分が過去5年以内で最も大きな出水を記録した平成16年23号台風により倒伏したと仮定し、この出水で樹木に作用した流体力を数値解析により再現する。解析に際しては、この出水の実績流量 $4,400\text{m}^3/\text{s}$ と下流端水位30.4mを境界条件として用いた。

図-5 23.6km測線における流速分布の解析値（一層流）とH-ADCP観測値との比較（経時変化）

図-6 23.6km測線における解析値（一層流）とH-ADCPによる観測値の比較（流速の横断方向分布）

(2) 流体力・底面せん断力分布と樹木倒伏実態との比較

図-8に、右岸の樹木に作用したと考えられる流体力の推定値（数値解析）を示す。樹林帯の上流端と樹林帯の主流側に大きな流体力が出現している。樹林上流端であるエリア1は水衝部に相当する。またエリア2は、樹林帯の東側の低水路主流部に発生する強い流れの影響が原因で発生したものと考えられる。図-8中の点は実績の倒伏樹木を示し、赤点が平成16年23号台風により倒伏したと推定される樹木、黒点は2009年8月の出水により倒伏したと推定される樹木をそれぞれ示している。実績の倒伏箇所と数値解析から推定される大きな流体力の箇所は概ね一致している。主な樹木倒伏箇所は、上流端でのエリア1と下流端でのエリア3の大きく二カ所に分類される。エリア1は、大きな流体力の発生箇所に相当する。前述のように現在の樹林帯の上流側は高水敷上での流れの直進性が増大し、小規模な出水でも樹木が倒伏したと考えられる。これに対し、エリア3の樹林帯下流部で樹木が倒伏している領域では、地盤高が低く樹木を支える支持層が薄く根が浅いために小さな流体力でも倒伏したと考えられる。

図-9には、河床せん断力の分布を示す。樹林帯中央の領域では流速が小さく水位が高いため、河床せん断力は主流部よりも小さい。しかし、樹木の倒伏に対しては、流体抗力がもたらす倒伏モーメントに加えて河床せん断

力がもたらす局所洗掘も貢献する可能性があり、樹木倒伏の判定に際しては流体力と河床せん断力との双方から判断する必要がある。

(3) 倒伏モーメントの検討

倒伏モーメント M_V とその限界値 M_C との比をあらわす M_V/M_C の分布を図-10に示す。ここで、限界倒伏モーメント M_C は、樹木を直径20cmの円柱体とみなし、樹木引き倒し試験の結果⁹⁾に基づいて単位をNmに換算して求めた。 $M_V/M_C > 1$ となるとき樹木が倒伏すると考える。図-10より、樹林帯の上流側から中央部にかけて $M_V/M_C > 1$ となり限界値を超える倒伏モーメントが作用しており、この部分の樹木は倒伏すると判定される。上流側では、倒伏実績と M_V/M_C の対応が概ね良好であることから、倒伏の主要因は河床せん断力よりもむしろ流体力による倒伏モーメントであると考えられる。これに対し、エリア3の下流端に見られる倒伏は、根が浅く限界モーメント M_C が小さいことに起因した倒伏の可能性が高い。

5. おわりに

本研究では、H-ADCP設置後に発生した中小規模の出水を対象として、樹林化した河道の流れを再現するため

図-7 樹木の繁茂状況 (2010年1月調査時点)

図-8 樹木に作用する流体力と倒伏樹木位置

図-9 河床せん断力と倒伏樹木位置

図-10 M_v/M_c と倒伏樹木位置

の数値解析モデルを検証するとともに、樹木損壊の実態を調査・考察した。その結果、近年の出水で倒伏したと考えられる樹木を多数確認することができた。数値解析とH-ADCPの観測値は良好に一致していること、出水後の現地調査から確認された樹木の倒伏実績と数値解析結果とが良好に対応することから、本モデルは出水時の河川流を概ね再現していると判断される。本モデルを用いることにより、樹木へ作用する流体力や樹林帯内の流速分布など、現地観測だけでは得ることができない情報の分析が可能となる。今後、本モデルによって、樹林化抑制に必要な情報分析と調査を進め、河川整備に有用な知見を得ることを目指す。

参考文献

- 1) 前野詩朗・宮内洋介・森 卓也：植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討，水工学論文集，第48巻，pp.757-762，2004。
- 2) 福岡捷二・八木澤順治・佐々木寧・田中規夫：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違，水工学論文集，第52巻，pp.649-654，2008。
- 3) 辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥：出水による破壊機会の減少

による河道内樹林化，水工学論文集，第45巻，pp.117-122，2001。

- 4) 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.53-58，1996。
- 5) 宮本仁志・道奥康治・神田佳一 他：流量変動を考慮した確率過程モデルによる河道内樹林の消長解析，第65回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM)，2010。
- 6) 道奥康治・宮本仁志・神田佳一 他：樹林化した河道の流況観測と樹林内外の流況・樹木抗力の解析，河川技術論文集，第16巻，pp.437-442，2010。
- 7) 道奥康治・南条雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路路の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.31-50，2005。
- 8) Nepf, H.M. 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, Water Resources Research, Vol.35-2, pp.479-489, 1999.
- 9) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp.157，1999。

(2010.9.30受付)