

2次元不定流解析における植生倒伏モデル の改良とフラッシュ放流への適用

REFINEMENT OF VEGETATION TOPPLING MODEL IN A 2-D NUMERICAL MODEL AND ITS APPLICATION TO FLUSHING FLOODS

吉武央気¹・河原能久²・椿涼太³・中土井佑輔⁴

Hiroki YOSHITAKE, Yoshihisa KAWAHARA, Ryota TSUBAKI and Yusuke NAKADOI

¹正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-6018 新宿区西新宿 6-8-1)

²フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工博 広島大学大学院助教 工学研究科(同上)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

The flushing floods from the Haizuka dam in the Jyouge River to remove the algae attached to bed materials are observed in 2009 and 2010. Measurements of water level hydrographs at several points and discharge with ADCP at a weir are carried out during the floods together with the evaluation of toppled vegetation region based on photogrammetry before and after the flood in 2009 and ground truth in 2010. Two-dimensional unsteady numerical simulations are performed for the flushing floods with a flow model taking into account the effect of vegetation toppling and a bed elevation model accounting only bed load transport. It is shown that the calculated discharge hydrograph and water level hydrographs give reasonable agreement with the measured results. It is emphasized through the comparisons of the areas with toppled vegetation that accounting the effects of vegetation toppling can considerably improve the numerical accuracy in reproducing the measured results.

Key Words : *vegetation toppling, 2-D unsteady flow simulation, water level hydrographs, field observation*

1. 序論

近年、砂礫河川においてヨシなどの高茎類の繁茂が顕在化している¹⁾。河道内に植生が存在することは、昆虫や鳥類、あるいは小型哺乳類等の生息場としての機能があり、これを完全に排除すべきというものでもない。一方で植生は、流水抵抗となり水深を上昇させ、植生域における流速や底面剪断応力を低減させる。すなわち、洪水時の植生の变形は流れや土砂輸送に大きな影響を及ぼす。このため、植生が繁茂する河道における洪水流解析を合理的に行うためには、植生の流れに対する影響を適切に評価することが必要であり、実際、植生による抗力や植生の变形に関する多くの研究が行われてきた。

樹木の倒伏に関しては、現地での引張試験から樹木独自の倒伏限界モーメントを推算し、流水モーメントが倒伏限界モーメントを越えるかどうかによって樹木の倒伏が判定されている²⁾。服部³⁾は高茎草本植物を対象として、種類や群落によって異なる形状・強度・抵抗特性を反映できる流れおよび倒伏モデルを提案している。また、

岡本・瀬津ら⁴⁾は室内実験のビデオ撮影により流水中の植生群の挙動を観察している。内田ら⁵⁾は六角川において2次元不定流解析を行い、根元回りのモーメントを用いてヨシの倒伏を再現している。倒伏前後の植生の条件は粗度係数のみの値を変更することにより倒伏を表現している。一方、著者ら⁶⁾の数値解析では、ヨシの倒伏を水深のみで判定したが、数値解析は洪水流量をほぼ再現した。しかし、現地観測によって、水深が浅くても流れが速い領域では植生が倒伏することを確認していることから、植生の倒伏状況の再現性は不十分である。

以上のような研究状況を踏まえて、本研究では、2次元不定流解析で使用していた植生の倒伏モデルを改良することにより数値解析の精度の向上を目指している。具体的には、植生の倒伏を流水モーメントが倒伏限界モーメントを超えるか否かで判定することとした。また、植生の倒伏に応じて植生高・植生の透過係数を変更することとした。そして、改良した植生の倒伏モデルを用いた2次元不定流解析結果と植生が繁茂する河川でのフラッシュ放流時の現地観測結果を比較することにより、植生の倒伏モデルの適用性を向上させ、数値解析手法の有効

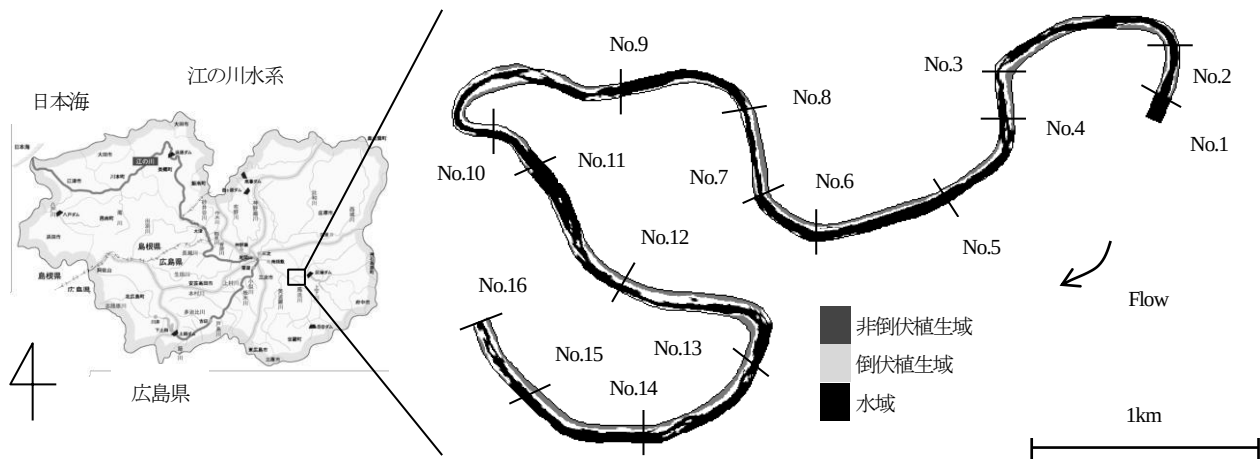


図-1 上下川の位置と調査断面

性を検証することを目的とする。以下では順に、現地観測、解析手法、解析結果を述べ、最後に得られた成果と今後の課題をまとめている。

2. 現地観測

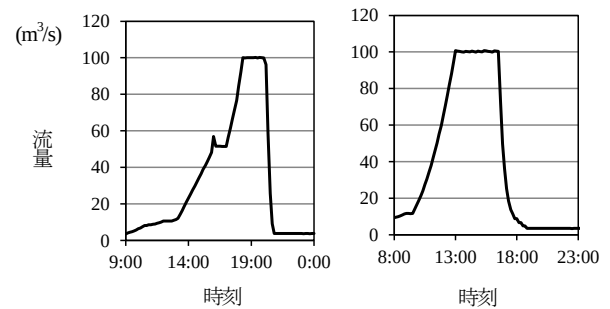
(1) フラッシュ放流の概要

広島県三次市を流れる上下川に位置する灰塚ダムの下流区間を研究対象とした。図-1 に上下川の位置を示す。調査対象区間の長さは約8km であり、平均河床勾配は約1/300 である。上下川では、ダム建設後の洪水の頻度や規模の減少、土砂供給の減少、流量の平滑化により、河床の付着藻類の更新が十分に行われず、アユの漁獲量の減少が懸念されるに至っている。そこで、河床の付着藻類の剥離、更新を促進するためにダムからの人為的な放流が行われている。この人工的な小規模の洪水を利用して、植生の倒伏モデルの適用性を検証することとした。

対象としたフラッシュ放流は平成21 年3 月および平成22 年3 月の放流である。2 回の放流における共通の特徴として、土砂移動は発生したが河床変動量は僅かであること、調査区間には多くの植生が繁茂しており放流中に多くが倒伏したことが挙げられる。一方、図-2 に両年のダムからの放流量を示すが、両放流において放流量の波形が大きく異なっている。平成22 年3 月の放流では、平成21 年3 月の放流よりも流量の上昇率が大きく、ピークの継続時間が長い。

(2) 観測項目と手法

観測項目は水位、流量、植生範囲、植生高、河床形状である。流量観測は平成21 年3 月の放流に対してのみ行ったが、その他の項目の観測は両年ともに行った。計測断面を図-1 に示す。水位計測は16 地点に設置した絶対圧式水位計 (S&DL mini, 応用地質 (株)) の値を、2 地点に設置した大気圧計の結果で補正することにより行った。なお、サンプリング間隔60 秒とした。また、



(a)平成 21 年放流

(b)平成 22 年放流

図-2 ダム地点での放流量ハイドログラフ

流量観測は精度を確保しやすいNo.11 断面の堰の上流において、ADCP (Teledyne RD Instruments社, Workhorse) を用いて30 分毎に実施した。得られた流量データと水位データから水位－流量曲線を作成した。その水位－流量曲線を用いて平成22 年の流量を推定した。この観測した流量データを真値として、解析流量と比較し、本解析により算出した流量の再現性を検証した。植生の調査は、平成21 年3 月の放流において、放流前後の空中写真 (No.11 断面より下流) と天端からの地上撮影の写真 (No.11 断面より上流) から、植生範囲および植生の倒伏・非倒伏の判別を行った。平成22 年3 月においては放流後に河道を踏査することにより、植生範囲および植生の倒伏・非倒伏の判別を行った。河床形状は放流後にRTK-GPS (Nikon-Trimble 5800, 公称精度：水平±10mm, 垂直±20mm), トータルステーション (Nikon-NST-305Cr)を用いて横断測量を行った。横断測量は約100m 間隔で実施し、天端と河道内の3 次元地形データを取得した。

3. 数値解析

(1) 解析手法

本解析手法は、実測流量ハイドログラフを用いること

なく実測水位ハイドログラフのみを用いて2次元不定流と河床変動の連成解析をすることにより、流れ場を再現する手法であり、福岡ら⁷⁾の手法をもとに、改良してきた手法⁹⁾をさらに拡張したものである。具体的には、上下流端の水位ハイドログラフを観測結果と同一とし、初期に設定した河道形状や粗度係数、植生の透過係数を用いて、流れと河床変動の変化を洪水にわたり算出する。そして、多地点での水位データから得られる洪水流の伝播特性（縦断水位分布と洪水流の伝播速度）の実測結果と解析結果を比較する。もし両者の差が大きい場合には植生の透過係数を修正し、差が小さくなるまで試行計算を繰り返す。なお、河床の粗度係数が未知の場合には、河床の粗度係数もキャリブレーションを行う必要がある。過去の洪水によって推定された値がある場合には、その推定値を用いる。本研究では、平成21年3月の放流においては河床の粗度係数を推定したが、平成22年3月の放流に対しては、前年度の放流の規模や河床形状、河床材料の構成にも大きな相違がないと考えられたため、平成21年3月の放流に対して推定された粗度係数の値を用いている。

(2) 基礎方程式

流れの基礎方程式は2次元浅水方程式であり、一般曲線座標系での表現に変換して解析を行った⁹⁾。基礎方程式の離散化手法として有限体積法、変数配置にスターガッド格子を用い、移流項の離散化には3次精度の風上差分、時間積分には2次精度のAdams-Bashforth法を用いた。本研究の対象流れは河床変動が多発しない流れであった。よって、河床変動解析は掃流砂のみを対象とし、単一粒径で行った。限界掃流力は岩垣の式より算定し、流砂量は、芦田・道上の式と2次流の影響を考慮した長谷川の式により計算した。

(3) 植生の倒伏モデル

植生は場所によって種類や大きさが異なるが、全てを解析において考慮することは困難である。また、倒伏後の植生は複雑な挙動を示すことが分かっている。岡本・禰津ら⁴⁾は室内実験のビデオ撮影により、倒伏後の植生群高さは元の高さの0.95-0.6倍の間で推移すると示している。倒伏後の植生の透過係数も変化することが考えられる。

著者ら⁹⁾の数値解析では、ヨシの倒伏を水深のみで判定し、数値解析は洪水流量をほぼ再現したが、植生の倒伏状況の再現性は不十分であった。よって倒伏は、流水モーメントが倒伏限界モーメントを超えるか否かで判定した。本研究の対象河川には草本類のヨシが多く繁茂している。そこで、解析において植生は葉の影響を無視し、茎のみの植生が存在していると考えた。植生高を本解析では倒伏後の植生高は元の植生高の0.7倍とし、植生の透過係数は1.43 (1.0/0.7) 倍とした。これは、倒伏後と倒

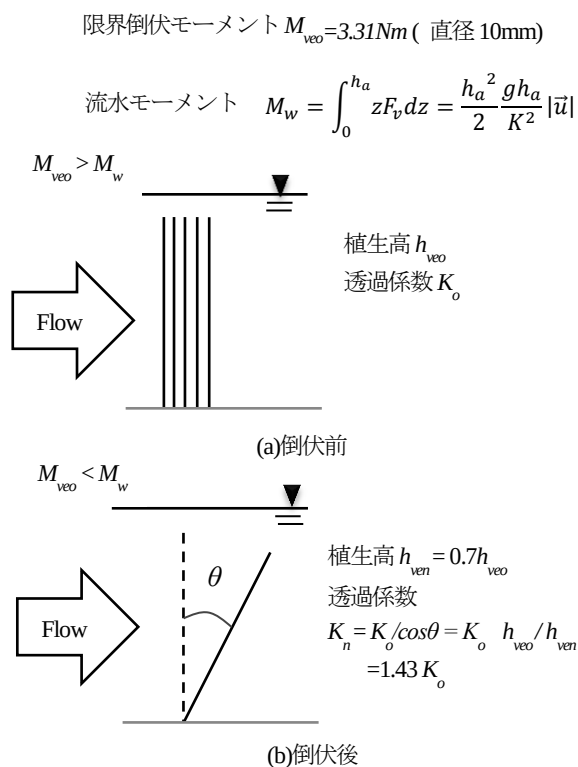


図-3 植生の倒伏モデル

伏前の植生高の比率を0.6, 0.7, 0.8, 0.9と変化させて解析を行い、その結果、観測されたピーク水深と計算したピーク水深の誤差が一番小さくなる比率を選んだ。なお、洪水時に上流から流れてきたゴミなどが植生に付着し、流れが変化することが考えられるが、研究対象区間がダム直下流であり、ダムによって遮蔽された影響により河川内に多くのゴミが存在していないことが考えられる。したがって、ゴミの影響による流れの変化は無視できると考えた。図-3に植生の倒伏モデルの概要を示す。

(4) 解析条件

計算格子点数は、流下方向に、平成21年3月の放流での再現計算では751点とし、平成22年3月の放流での再現計算では729点と分割された。横断方向には両放流とも31点とした。計算時間間隔は0.02秒とした。算定した河床の粗度係数・植生の透過係数を表-1に示す。植生高の空間分布を測定していなかったため、現地の状況を考慮して、ここでは一様に2.0mと仮定した。また、植生の直径を10mmとし、倒伏限界モーメントを3.31Nmとした³⁾。河床材料は直径10cmの単一粒径として扱った。

計算領域の上流端は、平成21年3月の放流での再現計算では図-1中のNo.1断面、平成22年3月の放流での再現計算ではNo.2断面とした。下流端はどちらもNo.14断面とした。いずれも境界において計測された水位ハイドログラフを境界条件として与えた。河床変動解析の境界条件としては、水位を与える断面において河床

表-1 河床の粗度係数と植生の透過係数

区間No.	粗度係数	
	水域	植生域
1~2	0.045	0.047
2~5	0.044	0.048
5~8	0.045	0.048
8~9	0.037	0.042
9~14	0.044	0.048
14~16	0.041	0.046

区間No.	透過係数 (m/s)
1~2	10
2~3	15
3~4	10
4~9	8
9~13	10
13~14	8
14~16	12

区間No.	透過係数 (m/s)
2~4	10
4~9	20
9~11	30
11~13	35
13~16	25

植生の透過係数

右上：平成 21 年放流の条件

右下：平成 22 年放流の条件

高は変化させないものとした。これは上下流端において土砂輸送は局所的に平衡状態であることを意味しているが、この仮定については今後さらに検討することが必要である。

4. 解析結果

(1) 平成21年3月の放流での再現計算

各時刻における数値解析が妥当に行われていることを示すために、はじめに水位の縦断分布の再現性を示すべきであるが、ここでは代表的な地点での水位ハイドログラフを示すことにする。その理由は次のようである。上下川の河床勾配は約1/300であるため、3km下れば河床高は約10m低下する。それと比較すると、水位の実測結果と解析結果に見られる差異は10cm程度と小さく、その差異の縦断変化に判別できるように図示することは難しい。また、対象放流ではピークがある時間継続するために、各地点において変動を含む水位データから水位のピークの発生時刻を正確に算出することが容易ではなかった。そこで図-4に示すように、各地点の水位ハイドログラフの比較を行った。同図より解析結果は実測結果をほぼ再現していることが分かる。低い水深時の誤差の原因としては、横断測量を約100m間隔で行ったために、河床高の精度が十分に高くないことが要因であると考えられる。一方、水位が上昇した際の誤差としては、河床形状の誤差に起因して2次的な流路の影響が捉えられていないこと、植生の繁茂区域内では様な状況で存在していると取り扱っていることが考えられる。

次に、No.11断面での流量ハイドログラフの実測結果と解析結果の比較を図-5に示す。ピーク時の実測流量に対する解析流量の誤差は約0.2%であった。一方、流量が小さい場合は誤差が比較的大きい。これは、低水深

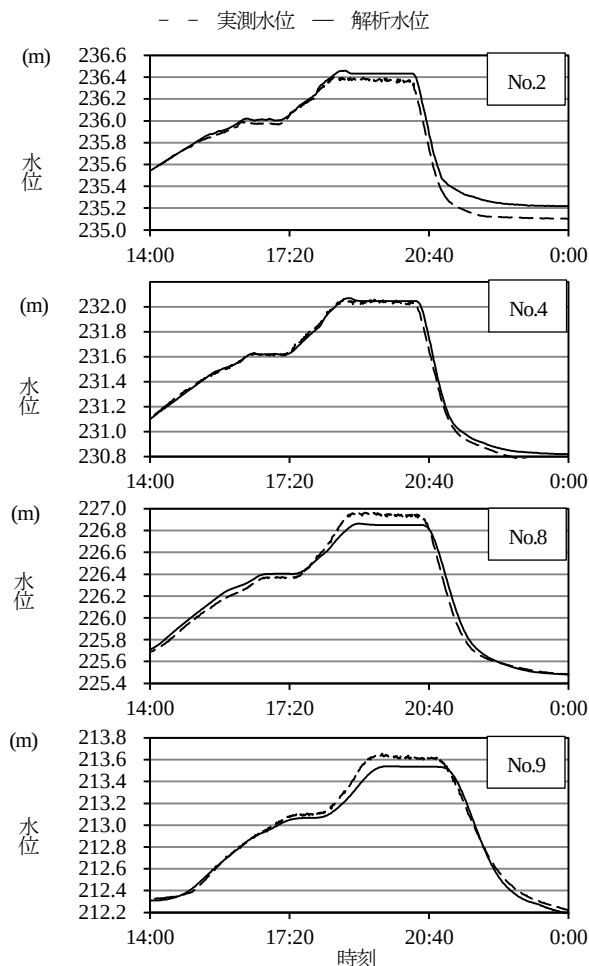


図-4 観測地点における水位ハイドログラフ(平成21年)

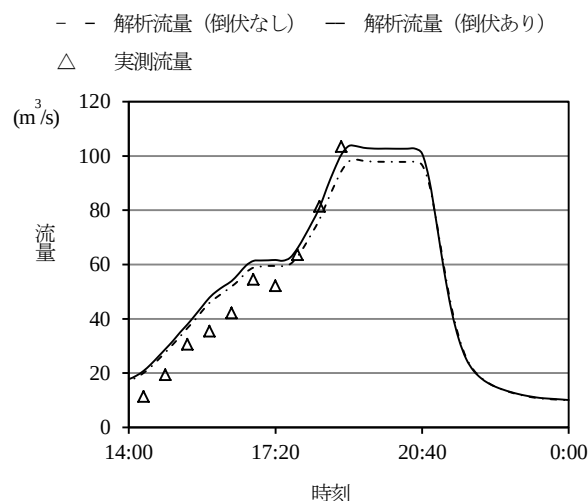


図-5 流量ハイドログラフ (平成21年)

時の流れは河床形状の影響を大きく受けるためであり、横断測量の精度や間隔の限界から河床形状の誤差の影響を受けたものと考えられる。本手法では上流に水位を与えているために、上流から流入した流量が下流に伝播する。山地河川では、河床勾配が局所的に変化するが、とりわけ上流域の河床形状は流入流量に大きな影響を及ぼ

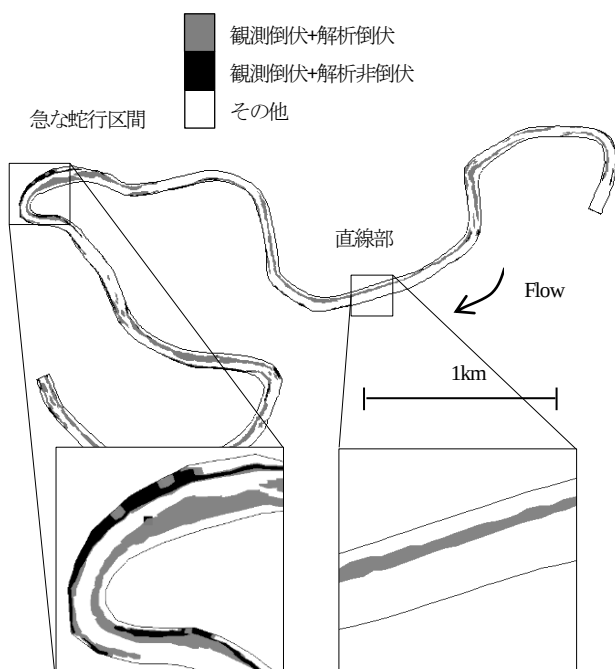


図-6 倒伏植生域の比較

す。このため、本手法を用いて流量ハイドログラフの再現性を向上させるためには、上流端付近での河床形状を精度良く再現することが必要である。なお、植生の倒伏を考慮しない場合では誤差が約4.9%であり、植生の倒伏を考慮することが流量推定の精度向上に繋がることが分かった。また、植生の倒伏を水深のみで判定した場合の再現計算⁶⁾では、ピーク時の実測流量と解析流量の誤差が約2.0%であった。どちらの解析も水位ハイドログラフの再現性は高いが、水深（植生高の9割に水深が達したら倒伏）のみで倒伏を判定した場合では、倒伏域を過小に評価していたこと、一方で植生の抵抗を比較的大きく算出し、水位を再現したと考えられる。モーメントを用いて植生の倒伏判定を行う方が、流量の再現性も向上しており、流れ場全体の再現性が高まったと考えられる。

観測により判別した倒伏植生域と解析により判定した倒伏植生域を比較し、植生倒伏モデルの適用性を確認した。図-6に比較した結果を示す。観測において倒伏したと判定された領域の約78%は数値解析においても再現されている。特に直線区間では良好に再現していることが分かる。一方、急な蛇行区間の植生に対して数値解析では倒伏判定を満たさない領域が多いことが分かった。この理由として、急な蛇行区間では、直線区間と比べて河床形状が複雑であり、約100m間隔の横断測量結果から細かい地形形状を再現するのは困難であったことが考えられる。しかし、直線区間では精度良く倒伏植生域を再現できていることから、植生の倒伏モデルの適用性は実用的なレベルであると判断できる。なお、水深のみで倒伏を判定した場合の倒伏域の再現性は約40%であった。

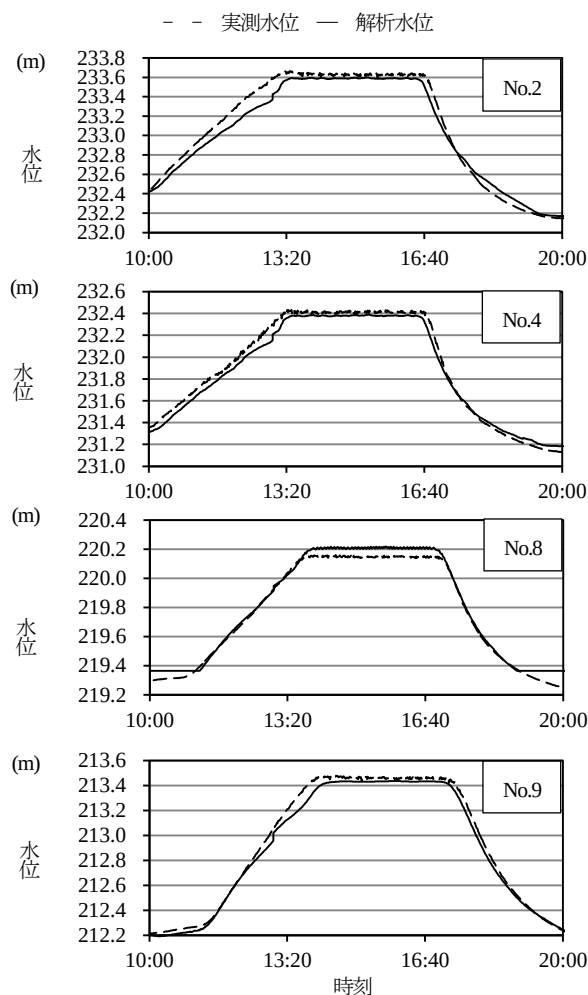


図-7 観測地点における水位ハイドログラフ(平成22年)

(2) 平成22年3月の放流での再現計算

平成21年3月の放流での再現計算では、水位ハイドログラフを良好に再現しているにも関わらず、水深が低い時に流量の解析結果と実測結果に違いが存在していた。上流端における河床形状の影響を検討するために、上流端をNo.1断面から河床形状が流下方向に滑らかに変化しているNo.2断面にずらして解析を行った。

前節で記した理由により、各地点の水位ハイドログラフの比較を行った。図-7に各地点での水位ハイドログラフの比較を示す。同図より、前年の再現計算同様に、水位ハイドログラフが良好に再現できていることが知られる。

次に、流量ハイドログラフの比較を図-8に示す。実測値は、前年の放流時に行ったADCPを用いた流量観測結果と同断面での水位計測結果から作成した水位-流量関係より算出した結果である。解析領域の上流端をNo.2断面に変更することにより、流量が小さい時においても誤差が小さく、良好に流量ハイドログラフを再現していることが分かる。すなわち、河床形状が流下方向に滑らかに変化する断面を上流端に選ぶことが流入流量の解析精度を向上させるために有効であることが分かった。

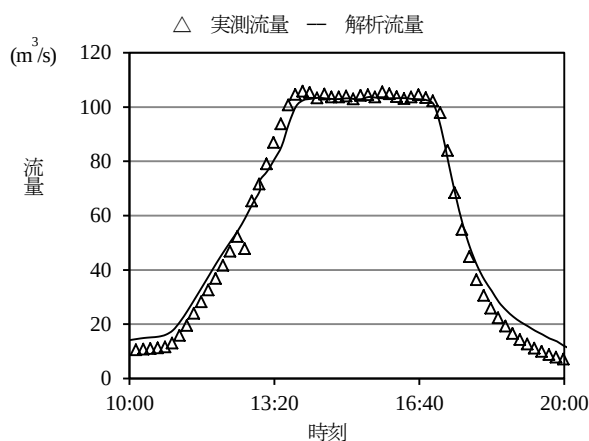


図-8 流量ハイドログラフ（平成22年）

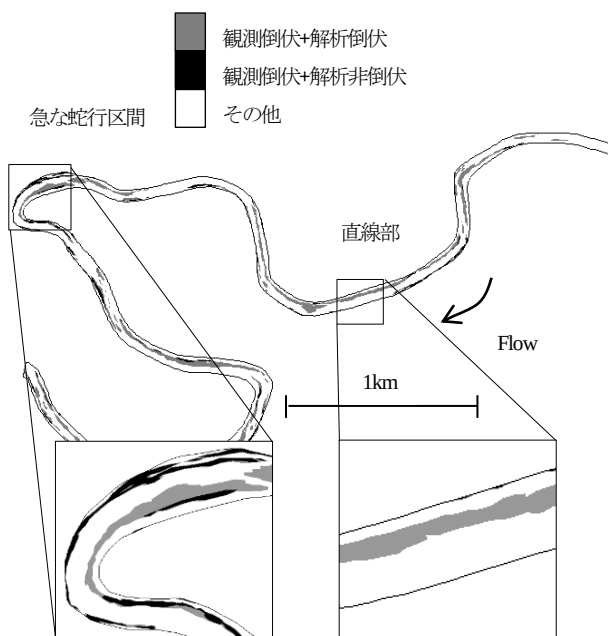


図-9 倒伏植生域の比較

た。また、植生の透過係数の正確な推定にも繋がり、植生による流れへの影響も再現性が高くなったことが考えられる。

倒伏植生域の比較を図-9に示す。前年と同様に、蛇行区間では再現性は低いが見、直線区間における植生の倒伏域については解析結果と実測結果が一致するという結果を得た。

5. 結論

植生の倒伏の物理機構を反映したモデルの適用性を検証するために、植生が繁茂している上下川におけるフラッシュ放流を対象として、現地観測と平面2次元数値解析を行った。多地点で観測された水位ハイドログラフを用いた2次元不定流解析では植生の透過係数を推定するとともに、堰地点で観測された流量ハイドログラフの

再現性を検討した。本研究で得られた主要な知見は以下の通りである。

- 1) 植生の倒伏を水深ではなくモーメントを用いて判定することにより、倒伏植生域の再現性を向上させることができる。
- 2) 植生の倒伏状況の再現性の向上が流量ハイドログラフの再現性の向上に貢献することを確認した。
- 3) 上下流端で観測された水位ハイドログラフを与える本研究の手法では、高い精度を確保するためには、上流端を局所的な変化の少ない断面に設定することが望ましい。

また、今後の課題として次のことが明らかとなった。

- 1) 山地河川を対象とする場合には、河床形状の変化が大きいことに留意し、測量を詳細に行うことが精度の高い数値解析では必要である。
- 2) 植生密度の分布や植生の種類の影響を取り入れた解析手法へと発展させることが必要である。
- 3) 放流前後の倒伏植生域の再現性に関してのみ検証を行ったが、流量の増加に伴う倒伏植生域の拡がり等の時間変化の再現性まで検証することが必要である。

参考文献

- 1) 清水義彦：礫床河川の植生化について—河川地形・河床材料と洪水攪乱の視点から—，第44回水工学に関する夏期研修会資料，2008。
- 2) (財) リバーフロント整備センター：河道植生内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案），山海堂，1994。
- 3) 服部敦：流れによる変形を考慮した高茎草本植物の抵抗則，土木学会論文集，第782号／II-70，pp.65-80，2005。
- 4) 岡本隆明，福津家久：植生密度が柔軟植生流れ場の組織乱流構造に及ぼす影響に関する研究，水工学論文集，第53巻，pp.919-924，2009。
- 5) 内田龍彦，渡邊竜一，福岡捷二：高水敷に繁茂するヨシの倒伏判定法とそれを用いた非定常平面二次元解析，河川技術論文集，第16巻，pp.219-224，2010。
- 6) 吉武央気，河原能久，椿涼太，中土井佑輔：フラッシュ放流を利用した流量ハイドログラフ推定法の精度検証，水工学論文集，第55巻，pp.1237-1242，2011。
- 7) 福岡捷二，渡邊明英，秋山正人：水面計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，第761号／II-67，pp.45-56，2004。
- 8) 森下祐，内田龍彦，河原能久：水位ハイドログラフと二次元不定流解析を用いた高水敷粗度及び流量ハイドログラフの推定，水工学論文集，第52巻，pp.901-906，2008。
- 9) 長田信寿：一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値計算，水工学における計算機利用の講演会講義集，土木学会，pp.45-72，1999。

(2011. 5. 19受付)