

平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の 流下能力, 河道貯留及び河道安定性の検討

ANALYSIS OF DISCHARGE CAPACITY, RIVER STORAGE AND RIVERBED STABILITY IN THE KINU RIVER DURING 2015 FLOOD

福岡 捷二¹・田端 幸輔²・出口 桂輔³
Shoji FUKUOKA, Kosuke TABATA and Keisuke DEGUCHI

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

²正会員 工博 中央大学研究開発機構助教 (同上)

³正会員 工修 国土交通省関東地方整備局河川計画課長 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2-1)

It is important to enhance a safety level of flood control in the Kinu River which suffered from huge damage due to overtopping and levee breach in 2015 large flood. However it is not clear how both of the considerably longitudinal change in river width and densely growing bamboos in the flood plain affect discharge capacity, river storage and riverbed stability. In this paper, we develop the numerical model applying the BVC method and 2D bed variation using observed water surface profiles during 2015 flood in the Kinu River taking account of the considerably longitudinal change in cross section and resistance of densely growing bamboos in the flood plain. The developed model revealed the discharge capacity, flood storage volume and riverbed stability and effects of longitudinal change in river width and riverine bamboos. Finally, issues of the future improvement and maintenance of the Kinu River are discussed.

Key Words: Kinu River, 2015 large flood, longitudinal change in river width, densely growing bamboo, flood flow and bed variation analysis, BVC method, overtopping and levee breach

1. 序論

鬼怒川下流区間(本論文では、46kより下流区間を指す)では、平成27年9月洪水の被害を受け、同年12月に「鬼怒川緊急対策プロジェクト¹⁾」が立ち上げられ、ハード・ソフトが一体となった緊急的な治水対策が実施されることとなった。ハード対策としては、平成32年まで堤防嵩上げ、河道掘削を主とした整備が鋭意実施される予定とされている。しかし、鬼怒川下流区間は、縦断的な河幅変化が極めて大きく、また高水敷には竹林が群生しており、これらが洪水流下機構、特に流下能力、河道貯留、河道安定性に及ぼす影響は大きいと考えられる。

これまで河野²⁾は、水海道(11k)から石井(75.2k)までの区間で次元不定流解析を実施し、計画流量規模洪水に対する現況河道の流量低減効果を分析している。関根³⁾は、河岸侵食モデルにより中流域の礫河原(55k付近)を対象に流路変動を解析し、洪水時の河道安定性を考察している。また、茂木⁴⁾は上下流部(92k, 30k付近)における河道内の高木群落の実態を調べ、群落の形成過程と河道特性、水理条件との関係を分析している。

このように、これまで鬼怒川を対象とした研究は実施されてきたが、特殊な河道特性を有する鬼怒川下流区間に着目し、河道特性が流下能力や河道貯留、河床変動に及ぼす影響を定量的に検討した研究は見られない。

本研究では、まず鬼怒川下流部のこれまでの河道変遷を整理し、現況河道の河道特性を実データに基づいて分析するとともに、溢水及び堤防決壊が生じた平成27年9月洪水の実態把握を行う。そして、平成27年9月洪水において観測された水面形時間変化に基づき、河道縦横断形の変化や竹林密生領域の抵抗を考慮した一般座標系非定常準三次元洪水流・河床変動解析モデルを構築する。このモデルに基づき流下能力、河道貯留機能、河道安定性を検討し、更には溢水及び堤防決壊による氾濫量を解析し、今後の河道整備、維持管理に向けた課題を示す。

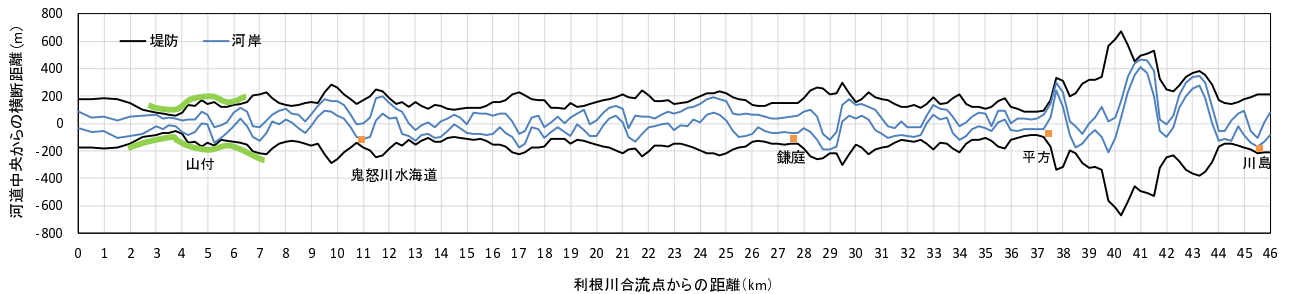
2. 鬼怒川下流部の河道変遷と河道特性、平成27年9月洪水の実態把握

(1) 鬼怒川の河道変遷の概要

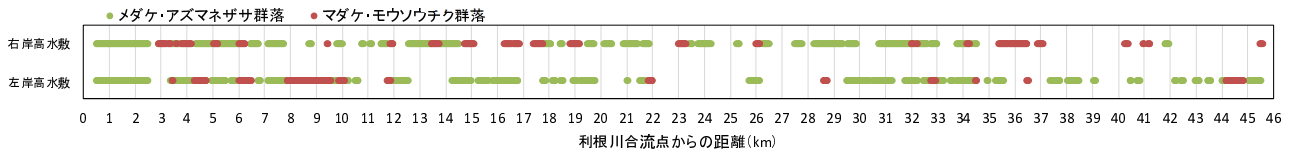
図-1に鬼怒川の河道変遷⁵⁾⁶⁾と平面図を示す。元来、鬼



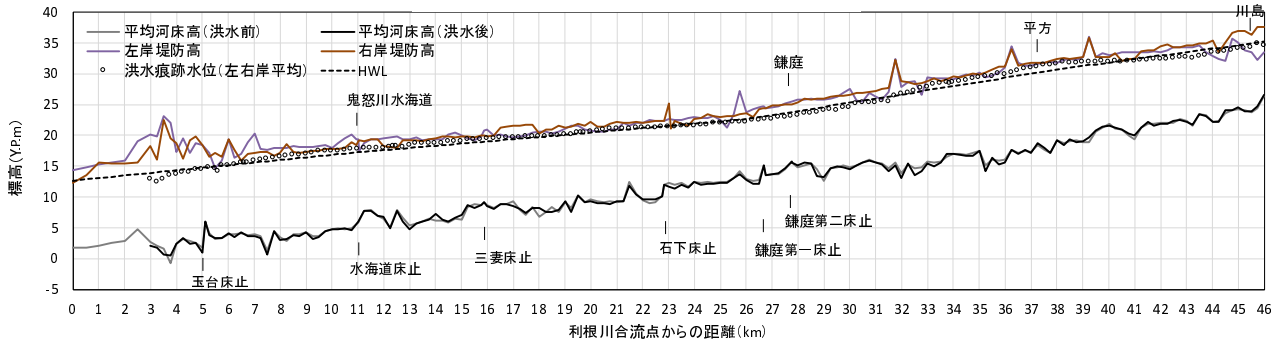
図-1 鬼怒川下流区間の変遷^{5),6)}と河道の平面図



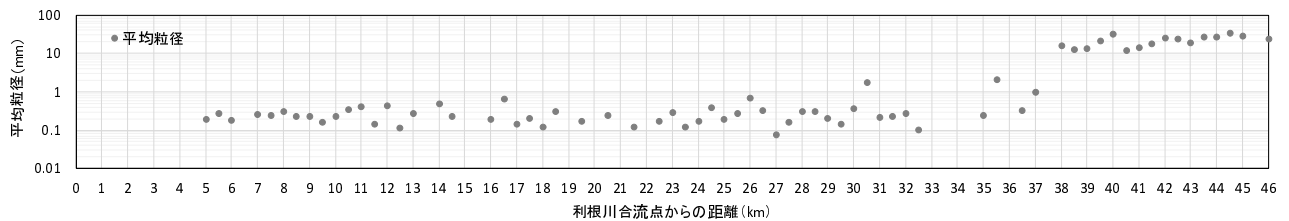
(a) 河幅・低水路幅の縦断分布



(b) 高水敷の樹木群繁茂域



(c) 堤防高, 低水路平均河床高, 平成27年9月洪水の痕跡水位の縦断分布



(d) 平均粒径の縦断分布

図-2 鬼怒川下流区間の河道特性

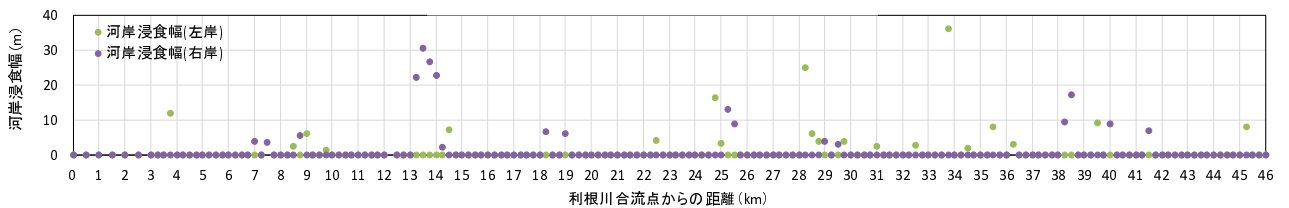


図-3 平成27年9月洪水による河岸浸食幅の縦断分布



写真-1 高水敷の竹林密生域 (左岸8.5k付近)

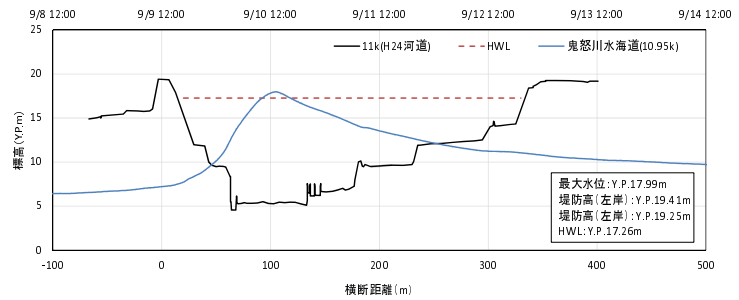


図-4 平成27年9月洪水時の鬼怒川水海道の河道断面と水位ハイドログラフ

怒川は旧流路1を通して隣の小貝川と合流していたが、承平年間(10世紀半ば)に旧流路1から現在の鎌庭の流路に移った。その後、鬼怒川は旧流路2を通して小貝川と合流していたが、寛永6年(1629年)に現在の0～7k区間の流路が開削され(大木開削)、小貝川と分離された。その後、寛永年間に大きく曲がった旧流路3を廃止し、直線的な旧流路4への付け替えがなされた。昭和年代に入ってから鎌庭捷水路の整備や蛇行部の流路是正が実施され、概ね現在の河道となった。今日の河道線形が維持されてきた理由を記述した文献は見られなかったが、上流側の広大な河道での流量低減効果を利用するためのものであった可能性が高い。実際、現行計画のベースである大正15年鬼怒川改修計画⁹⁾において、ダム、遊水地に加えて、河道低減効果を治水効果として明確に位置付け、計画流量配分が設定されていた。この考え方は、現行計画においても踏襲されている。

(2) 鬼怒川下流部の河道特性

図-2に、河幅及び低水路幅、左右岸高水敷の樹木繁茂位置、堤防高、平均・最深河床高、平均粒径の縦断分布を示す。最上段の河幅・低水路幅の縦断図は、河道横断図から左右岸の堤防、河岸位置を抽出し、河道中央からの距離で表したものである。3～4kは左右岸が山付で狭窄部になっており河幅は100mほどである。これより上流の5～37kでは河幅は200～400m程度となるが、河幅が縦断的に細かく変化し低水路は蛇行している。37.5kより上流側では河幅が急に広くなり、40k付近では河幅が1,300mにも及んでいる。なお、鬼怒川下流区間では高水敷幅が狭い箇所以外に低水護岸はほとんど設置されておらず、自然河岸となっている。また、高水敷には多くの樹木が繁茂しているが、このほとんどが樹高3～4m程度のメダケ・アズマネザサ等のシノダケ群落と樹高10m程度のマダケ・モウソウチク群落である(写真-1参照)。46k下流区間の河床勾配は1/2,000程度で、低水路には河床安定のための床止工が連続して6基設置されている。平均粒径は37.5k付近の狭窄部上流で10～30mmと大きく、34k付近より下流側では0.1～1mmの砂分が主体である。

(3) 平成27年9月洪水の実態把握

図-3に平成27年9月洪水による河岸浸食幅の縦断分布を、図-4に鬼怒川の基準点である鬼怒川水海道の河道断

面と観測水位ハイドログラフを示す。洪水は2日間続き、鬼怒川水海道地点では水位が6時間以上HWLを超過した。また、図-2(c)にプロットで示した洪水痕跡水位は鬼怒川下流区間のほぼ全川でHWLを超過しており、無堤区間等で溢水を生じながら洪水が流下した。9月10日12:50頃に左岸21.0k付近で堤防決壊が生じ、茨城県常総市の1/3に相当する約40km²の範囲に甚大な氾濫被害をもたらした。河床変動は、上流側に比べて河幅の小さい37kより下流側区間で顕著で、13kや32.5k等で大きな河床低下が生じている。また、河岸侵食は、13～14k、28.25k、33.75kのように河幅が小さく低水路が大きく蛇行している箇所でも多く発生している。

以上より、古くから河幅の縦断変化を活かした洪水流の河道貯留効果が見込まれてきた鬼怒川下流区間において、堤防満杯で流下した平成27年9月洪水に対し、現況河道の洪水流下・河床変動機構を理解することは、今後の鬼怒川の改修を検討する上で重要である。以降では、平成27年9月洪水時に観測された実データに基づき洪水流・河床変動モデルを構築し、現況河道が有する流下能力、河道貯留、河道安定性を検討する。

3. 鬼怒川下流区間の洪水流・河床変動解析モデルの構築

(1) 解析手法及び解析条件

鬼怒川平成27年9月洪水では、水位観測所に加えて排水機場、樋門・樋管、水門において水位時系列データが観測されており、これらに圧力式水位計によるデータを加えることで、精度の高い水面形の把握が可能であった。これらの観測された水面形の時間変化に基づき、多くの河川で用いられ有効性が確認されている福岡らの洪水流・河床変動解析手法⁷⁾を適用する。すなわち、水面形の時間変化を既知量とし、流速分布及び河床形状の時空間変化を未知量として洪水流・河床変動解析を実施し、流速分布を積分することで得られる流量と洪水後の河床高の縦横断分布を観測値と比較することで、モデルの妥当性を検証する。洪水流解析には、水深積分モデルの枠組みで流れの三次元性を考慮した準三次元解析法である内田・福岡の底面流速解析法⁸⁾⁹⁾を適用した。本解析には静水圧分布を仮定した底面流速解析法(SBVC⁹⁾)を用いた。解析法の詳細は既往の文献⁸⁾⁹⁾を参照にされたい。河床変

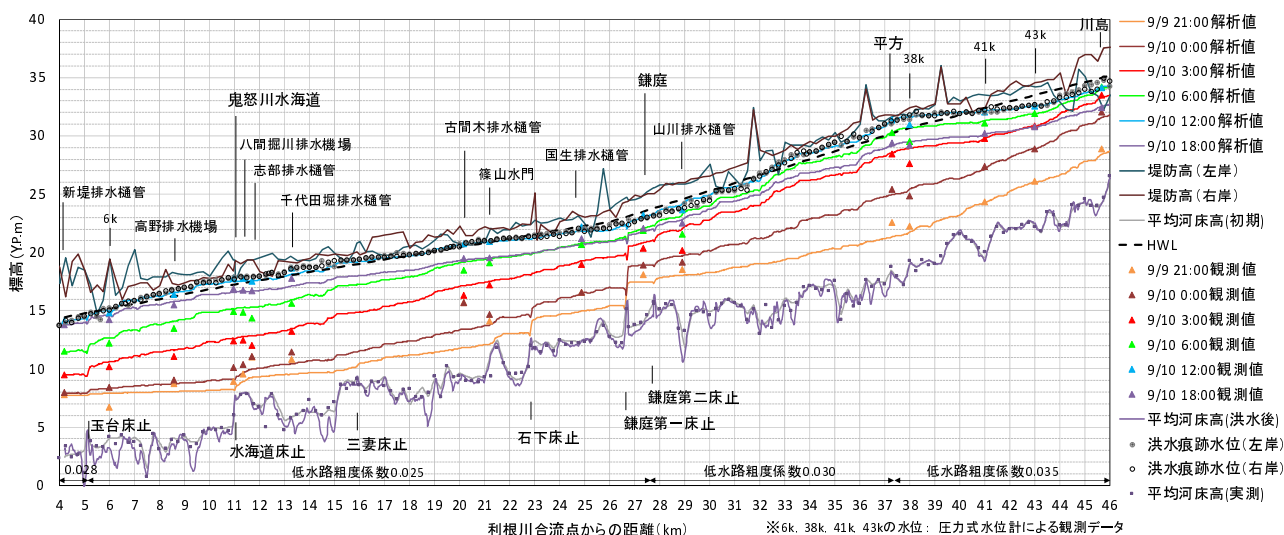


図-5 鬼怒川下流区間の水面形の時間変化の解析値と観測値の比較

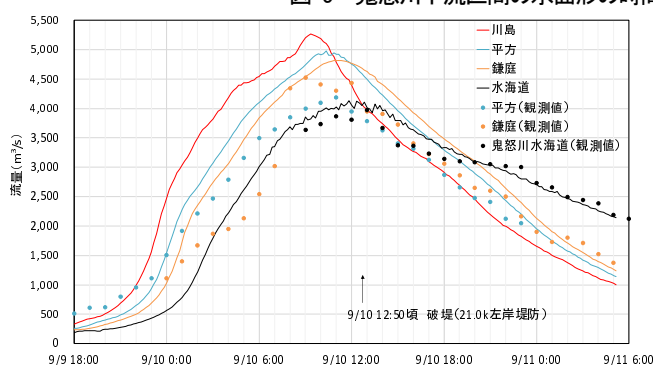


図-6 流量ハイドログラフの解析値と観測値の比較

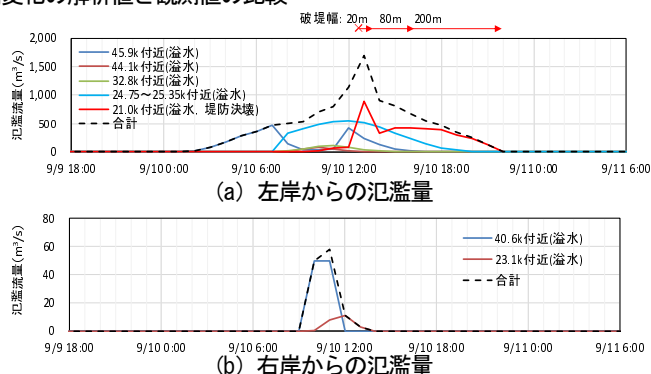


図-7 溢水及び堤防決壊による氾濫流量ハイドログラフ

動解析には混合粒径の掃流砂と浮遊砂を考慮した一般的な二次元河床変動解析手法を用いた。限界掃流力及び掃流力は、河床面の地形勾配の影響を考慮した福岡・山坂の式¹⁰⁾により評価した。床止、低水護岸が設置されている箇所は、洗掘を受けない固定床条件とした。鬼怒川では低水護岸の無い箇所は洗掘性の自然河岸となっていることから、河岸も縦横断方向に勾配のある河床として扱うことで河岸の洗掘を表現した。計算対象範囲は4.25k~46kとし、上流端には川島、下流端には新堤排水機場の観測水位ハイドログラフを与えた。平成27年9月洪水では無堤区間等から溢水が生じたため、これらの箇所では堤防断面形状及び堤内地形の実測値を用いてモデル化し、河道水位が堤防高を超えると堤内地側へ溢水するよう解析を行った。低水路粗度係数は代表粒径の縦断分布に基づいて0.025~0.035を与えた。高水敷粗度係数は地被状況に基づいて0.025~0.080の範囲で設定し、樹木繁茂箇所では代表的な群落毎に樹高を3~15m、樹木群透過係数を10~70m/sの範囲で設定した。堤防決壊箇所である左岸21.0kでは、洪水時に対岸側の篠山水門から撮影された映像や洪水後の調査から得られた堤防決壊幅の時間変化の推測値¹¹⁾(図-7(a)参照)と、洪水後に実施された堤防決壊箇所の縦横断測量から得られた破堤敷高¹¹⁾を与え、決壊地点周辺の水面形時間変化の解析値が観測値を再現するように氾濫量ハイドログラフを算出した¹²⁾。

(2) 平成27年9月洪水の再現計算

図-5に、鬼怒川の水面形の時間変化と河床高の縦断分布の解析値と観測値の比較を示す。水面形の時間変化の解析値は観測結果をよく説明できており、最大水位の縦断分布は、洪水痕跡水位ともほぼ一致している。また、平均河床高の解析値と実績値を比較すると、22k付近での堆積箇所等表現できていない箇所もあるものの、全体的にみて解析値は実績値を説明できている。

図-6に流量ハイドログラフの解析値と観測値の比較を示す。解析値と観測値は、溢水及び堤防決壊による氾濫量が含まれた値である。流量観測は、上流から平方、鎌庭、鬼怒川水海道の3箇所で行われた。これらの区間には横流入支川は存在しないが、平方の観測流量は、高水敷に冠水し始める10日8:00頃からピーク付近にかけて、下流側に位置する鎌庭観測所の流量よりも小さく観測されている。鎌庭及び鬼怒川水海道流量観測所は、ピーク付近における解析流量ハイドログラフは若干大きめではあるが観測値を概ね説明できている。平方流量観測所での解析値と観測値の差が生じている要因について、今後更に詳しく調査・検討していく必要がある。

図-7に解析で求めた左右岸の無堤区間等からの溢水と左岸21.0kの堤防決壊による氾濫量ハイドログラフを示す。左右岸とも概ね10日12:00頃にかけて氾濫量が増加するが、堤防決壊が生じる12:50以降は、堤防決壊によ

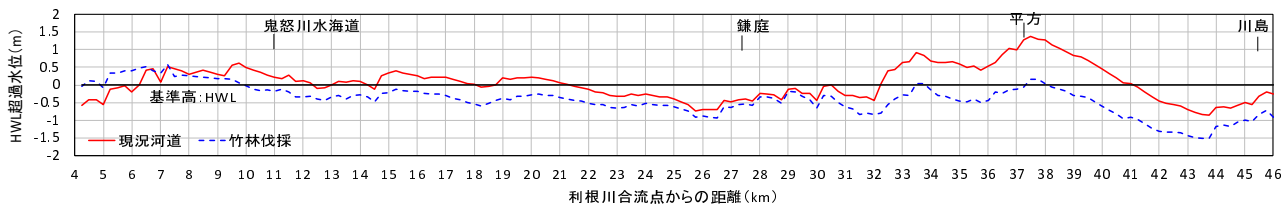


図-8 HWL超過水位の縦断分布（竹林伐採の有無による比較）

る河道水位の低下に伴い、溢水量が低減している。一方、堤防決壊による氾濫量は増大し、決壊幅が最大となる10日18:00頃に堤防決壊による氾濫量が最大となっている。また、本解析により、平成27年9月洪水における無堤部等からの溢水による氾濫ボリュームは左岸側で合計2,642万 m^3 、右岸側で合計44万 m^3 、左岸21.0kの堤防決壊による氾濫ボリュームは1,277万 m^3 に達することが分かった。今後は、本検討結果を踏まえ、堤内地の氾濫流の挙動についても分析を行っていく予定である。

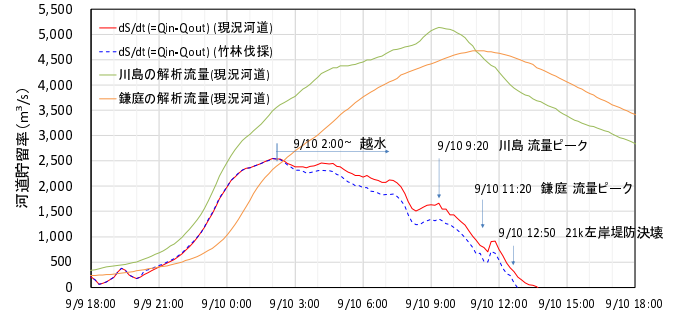


図-9 河道貯留率（竹林伐採の有無による比較）

4. 鬼怒川下流区間の流下能力、河道貯留及び河床変動

現況河道の流下能力、河道貯留、河床変動を定量的に評価し、河道線形や高水敷の竹林が及ぼす影響を見積もることは、今後の河道線形、改修断面を検討していく上で重要な情報となる。ここでは、平成27年9月洪水外力を対象とし、現況河道、更に竹林伐採を想定した河道の流下能力、河道貯留、河床変動を評価する。現況河道については、3章で構築したモデルを用いて評価した。竹林の伐採範囲は、現況河道のHWL超過区間とし、46k地点の流量ハイドログラフを上流端に与え、下流端には検証計算で得られた水位と流量の関係から作成したHQ式を用い、計算流量から下流端水位を逐次与えた。

(1) 現況河道の評価

図-8にHWL超過水位の縦断分布を、図-9に解析区間の上下流端である4.6k～4.25k間の河道貯留率と川島、鎌庭の解析流量ハイドログラフを示す。図-9の河道貯留率 dS/dt は、46kと4.25kの解析流量ハイドログラフをそれぞれ $Q_{in}(t)$ 、 $Q_{out}(t)$ とし、これらの差により求めた。

図-8の赤線で示した現況河道のHWLを超過する水位は、狭窄部の水位堰上げによる影響を受ける5～10k、37～41k区間で大きくなる。大局的に見ると、鬼怒川水海道付近、平方付近においてHWLを超過しており、鎌庭付近では余裕があることが分かる。

また、鬼怒川下流区間全体の河道貯留率は、10日午前2時頃に最大となりその後低減していくが、川島の流量がピークとなる10日9:20には貯留率は約1,670 m^3/s 、鎌庭の流量がピークとなる10日11:20には貯留率は約790 m^3/s となっている。これは、川島、鎌庭のそれぞれのピーク流量の32%、17%に相当している。以上より、河道幅が縦断的に大きく変化する鬼怒川下流区間では、かなりの河

道貯留能力があることが分かる。

次に河道安定性を分析する。図-10に代表区間の解析に基づく水深コンターと底面流速ベクトルと洪水前後の河道断面形状を示す。32.75～34.5kは河道が大きく湾曲している区間であり、33.75kでは、ほぼ直角に曲がる湾曲部の内岸側（左岸側）で流速が増大する。ただし、左岸高水敷上には竹林が密生していることからこの領域では流速は低減し、低水路左岸寄りから左岸河岸付近において流速が増大する。この結果、解析では実績ほど浸食幅が大きいものの、左岸河岸が浸食されることが示されている。以上より、河岸浸食箇所は河道の曲がり等の平面形状に加えて、高水敷上の竹林密生域と密接な関係があることが分かる。一方、33kでは実データに比べて河床低下が過大に評価された。鬼怒川の河床や河岸の一部には粘土層の存在が確認されており⁹⁾、33k付近の河床にも粘土層が露出していた可能性がある。河床及び河岸の粘性土の存在が河床変動に及ぼす影響については、今後更に詳しく調査・検討していく必要がある。

(2) 竹林伐採による効果の分析

竹林の伐採により河道流下能力が現況河道に比べて増大することを図-8は示している。ただし、水位が低減する一方で、河道貯留量は減少することになる。以上より、鬼怒川下流区間では、竹林の繁茂形態が洪水流況に影響を与えていることから、どの位置の竹林を伐採するかによって貯留率や河道安定性が変化することになる。これは言い換えると、鬼怒川下流区間では河道の線形、断面形に加えて竹林の管理のあり方によって平面流況や下流への流量増加をある程度制御できる可能性を示している。

5. 今後の河道整備、維持管理に向けた課題

本検討の結果、平成27年9月洪水規模の外力をHWL以

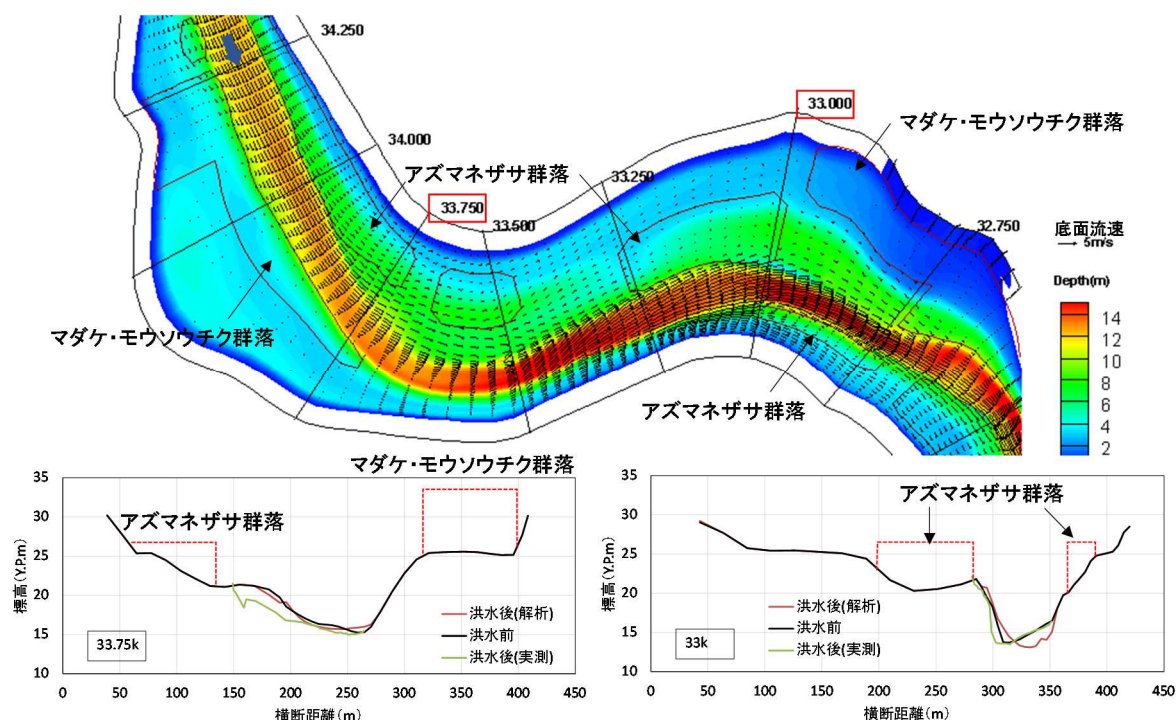


図-10 現況河道の水深コンター及び底面流速ベクトルと洪水前後の河道断面形状の比較

下で安全に流下させるには、鬼怒川水海道、平方付近で流下能力を増大させる必要があることが分かった。このための対策として、堤防嵩上げや河道掘削を主体として考えられているが、これに加えて、本検討で明らかとなったように、河道全体を見た河道貯留効果や高水敷上の竹林密生地の伐採または存置も視野に入れた河道整備も今後検討していく必要がある。また、鬼怒川整備に伴う洪水・土砂流出形態の変化が利根川本川、特に下流三調節池の洪水調節効果や、流下能力が不足している利根下流区間の水位上昇、土砂堆積に及ぼす影響についても一体的に評価し、鬼怒川と利根川本川の治水安全度に悪影響を及ぼさないような整備を行っていくことが重要である。

6. 結論

本研究では、平成27年9月洪水において観測された水面形状時間変化に基づき、河道縦横断面の変化や竹林密生領域、堤防決壊及び溢水氾濫の影響を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析モデルを構築した。これにより、洪水時における堤防決壊及び溢水による氾濫ボリュームを分析した。また、鬼怒川下流区間全体で大きな河道貯留があること、河岸浸食箇所は河道の曲がり等の平面形状に加えて、高水敷上の竹林密生域と密接な関係があることを明らかにした。最後に、河道線形や高水敷に密生する竹林が流下能力、河道貯留機能、河床変動に影響を与えることを示し、今後の竹林密生地の管理のあり方や河道改修による利根川下流域への影響を視野に入れた河道整備の必要性を示した。

参考文献

- 1) 関東地方整備局HP, 鬼怒川緊急対策プロジェクト記者発表資料, 2015.
- 2) 河野次朗, 佐多直武, 精松義弘, 嵯峨弘喜, 青木佑久, 須賀堯三, 鬼怒川における洪水ピーク流量の低減, 河道内遊水地及び河道計画について, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 1998.
- 3) 関根正人, 片桐康博, 小笠原基: 鬼怒川における洪水時の流路変動とその数値予測に関する研究, 水工学論文集第49巻, 2005.
- 4) 茂木信祥, 須賀堯三, 池田裕一: 河道内高木群落の形成過程, 水工学論文集第44巻, 2000.
- 5) 建設省関東地方建設局: 利根川百年史, 1987.
- 6) (財)河川環境管理財団, 河川環境総合研究所: 鬼怒川の河道特性と河道管理の課題—沖積層の底が見える河川—, 河川環境総合研究所資料第25号, 2009.
- 7) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第20巻, pp.253-258, 2014.6.
- 8) Fukuoka, S. and Uchida, T.: Toward integrated multi-scale simulations of flow and sediment transport in rivers, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1(Hydraulic Engineering), Vol. 69, No. 4, pp. II_1-II_10, 2013.
- 9) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.2, 43-62, 2015.5.
- 10) 福岡捷二, 山坂昌成, 竹内聡, 古屋晃, 永納栄一: 湾曲流路の側岸浸食, 第27回水理講演会論文集, pp.721-726, 1983.
- 11) 国土交通省関東地方整備局: 第2回鬼怒川堤防調査委員会資料, 2016.
- 12) 安部友則, 福岡捷二, 塚本洋祐: 破堤による氾濫流量ハイドログラフ計算法の構築と河川への適用方法の研究, 土木学会論文集B, Vol. 65, No. 3, pp.166-178, 2009.7.

(2016. 4. 4受付)