

激甚化する洪水氾濫災害から学ぶ 水工学の課題

群馬大学 教授

清水 義彦

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

激甚化する洪水氾濫災害から学ぶ水工学の課題

Issues on Hydraulic Engineering by lessons from Recent Flood Disasters

清水 義彦

Yoshihiko Shimizu

1. はじめに

毎年のようにわが国では豪雨による水災害が生じ、災害規模の激甚化したものが目立ってきている。そして毎年の河川災害ごとに災害調査、検討が行われ、土木学会等の関連学会、国交省による検討会・審議会から、災害からの教訓、提言、施策が行われている。本稿では最近の河川災害事例を振り返り、それに基づいて出てきた提言、政策の背景とそれらの位置づけを想像しながら、今後の治水対策の進展に果たす水工学の役割や課題について、筆者が思う水工学の研究興味も交えながら述べてみたい。

2. 最近の河川災害から思うこと

表1に、ごく最近の主な豪雨災害から河川災害の特徴となる事項を選んで整理した。なかでも令和元年東日本豪雨（台風19号）では広域に河川氾濫が多発し、国管理の大河川で14か所、県管理の中小河川で128か所もの堤防決壊が生じており¹⁾、河川の行政、技術、研究の者にとってはかなりショッキングな災害である。図1は「気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会」で提示されたもので²⁾、直轄河川における台風19号での降雨規模（対象降雨の継続時間の基準点上流域での平均値）および流量外力を計画規模と比較したものである。ここに、今回洪水流量は基準点でのダムなし・氾濫戻し、基本方針は基本高水のピーク流量、整備計画は整備計画目標流量である。これより、利根川、荒川以外の今回洪水はすべて整備計画規模を越えている。基本方針まで出来ていれば、被害を防げたあるいは相当な軽減ができたと言えそうだが、この図にもう1つ並べたいものがあって、それは現況の流下能力規模流量（現況体力）である。今回洪水と計画（基本方針と整備計画）、そして現況体力の関係が気になる。

(1) 小田川と鬼怒川の破堤について

令和元年東日本豪雨は後述することにして、まず、平成30年7月豪雨災害での高梁川水系小田川の堤防決壊を上記の観点から見てみる。小田川は合流する高梁川本川に比べ河床勾配が緩く、本川水位による合流点からの堰上げ効果（バックウォーター）により流下能力が低い。小田川では2か所(3.4k, 6.4k)、その支川で6か所が破堤し、倉敷市真備町では51人の人命が奪われた。氾濫被害の様子は報道でも盛んに伝えられ、小田川左岸3.4kの破堤口周辺の状況はテレビ報道から見る限り、堤防天端での流下物残存が延長をもって確認することができず、天端満杯程度の越水が局所的に生じたのではないかと想像した。実際、駆け足で行った現地調査(2018/7/18)からも堤防裏法面に越水痕跡を見つけることはできなかった。発災直後に今次洪水の規模について推測したことを以下に示す。図2は高梁川水系河川整備計画に掲載されているもので³⁾、計画洪水流量(2300m³/s)を流した場合の現況河道、合流点付け替え及び基本方針相当の河道の水位縦断が示されている。破堤地点3.4k付近に注目して、そこでの左岸天端高は約16mで、現況河道で計画高水(2300m³/s)を流せば水位は18mとなり今次出水は計画高水流量に比べて十分小さいことは確かである。一方、図3は整備計画流量(1500m³/s, S47.7洪水規模)を流した場合の現況河道と、合流点付け替えたときの水位をそれぞれ示しており、これより破堤地点3.4kの現況河道での水位を読みとれば約16m、そこでは天端満杯程度の越水とすれば、今回洪水は整備計画相当であることになる。図3は平成26年3月開催の社会資本整備審議会河川事業評価

表 1 最近の豪雨災害の事例

最近の主な豪雨災害	災害の特徴（筆者から見たもの）
令和 2 年 7 月九州豪雨 (2020)	・筑後川、球磨川流域等に発生した集中豪雨により外水や内水氾濫による甚大な被害発生し、とくに球磨川で甚大な被害。 ・人吉水位観測所の推定流量は約 7400m³/s で、観測最大の 5700m³/s（昭和 40 年 7 月）を大きく上回る。川辺川ダム中止で河川整備計画未策定の中での豪雨災害。
令和元年東日本豪雨 (10 月台風 19 号) (2019)	・静岡、新潟県、関東甲信地方、東北地方を中心に広域で短時間の豪雨が発生。当初 1958 年狩野川台風 に匹敵（気象庁）。 ・千曲川、阿武隈川など河川氾濫の多発、国管理 6 水系 7 河川 14 カ所、県管理 20 水系 67 河川 128 か所で堤防決壊。 ・阿武隈川（福島）では基本方針流量 7000m³/s を越える約 7400m³/s となる。 ・信濃川水系千曲川での破堤による長野盆地の被害、新幹線基地の水没。 ・利根川ではハッ場ダム試験湛水中での大規模出水、利根川中流部でも HWL を越え、広域避難を実施。
平成 30 年 7 月豪雨 (西日本豪雨) (2018)	・平成最悪の水害と言われ西日本を中心に河川の氾濫や洪水土砂災害などの被害が広域かつ同時多発的。長時間の継続降雨が特徴的。 ・岡山県倉敷市真備町での高梁川水系小田川とその支川で氾濫。河道の樹林化、合流部のバックウォーターがマスコミによって拡がる。 ・愛媛県西予市野村町での肱川が氾濫。野村ダムで緊急放流、全国 8 ダムで異常洪水時防災操作を実施。
平成 29 年 7 月 九州北部豪雨 (2017)	・とくに筑後川右岸支川で甚大な氾濫、大量の土砂・流木の流出、河道埋没。 ・中山間地域での大量の土砂・流木を伴う洪水氾濫が注目された。
平成 28 年 8 月 北海道・東北豪雨 (2016)	・迷走台風と呼ばれ、東北地方の太平洋側から台風上陸、北海道でも 1 週間で 3 つの台風上陸、石狩川水系空知川、十勝川水系、東北でも道県管理河川の多数で浸水被害。 ・岩手県小本川等の氾濫で土砂・流木を伴い岩泉町の高齢者施設での被害。
平成 27 年 9 月 関東・東北豪雨 (2015)	・鬼怒川の決壊による広域浸水被害が発生。避難の遅れ等により多くの住民が孤立し約 4,300 人を救助。長時間浸水。 ・宮城県では洪井川（鳴瀬川水系）、二迫川（北上川水系）など 11 河川 23 箇所決壊した。

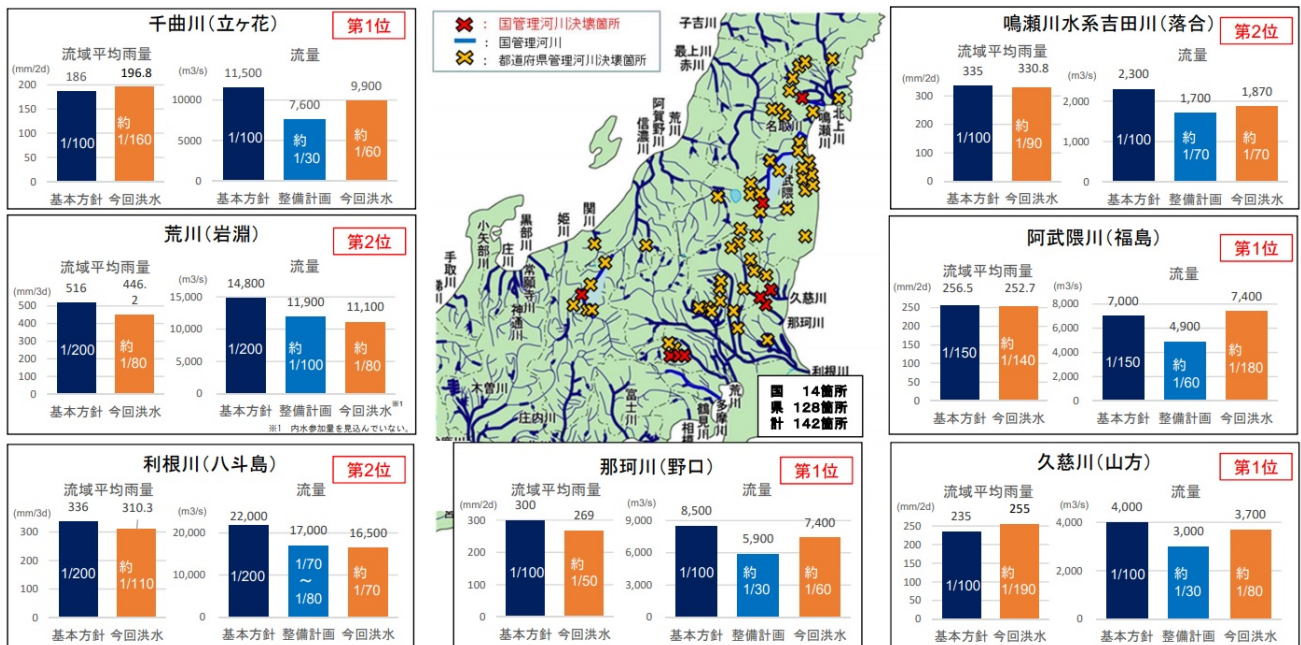


図 1 台風第19号による国管理河川の状況（降雨，流量）²⁾

小委員会（新規採択時評価）で説明された資料⁴⁾である。筆者もその委員であり、柳井原貯水池を活用し高梁川との合流位置を下流で付替えることで、約4.2mの水位低下が期待できることがとても印象に残っていた。

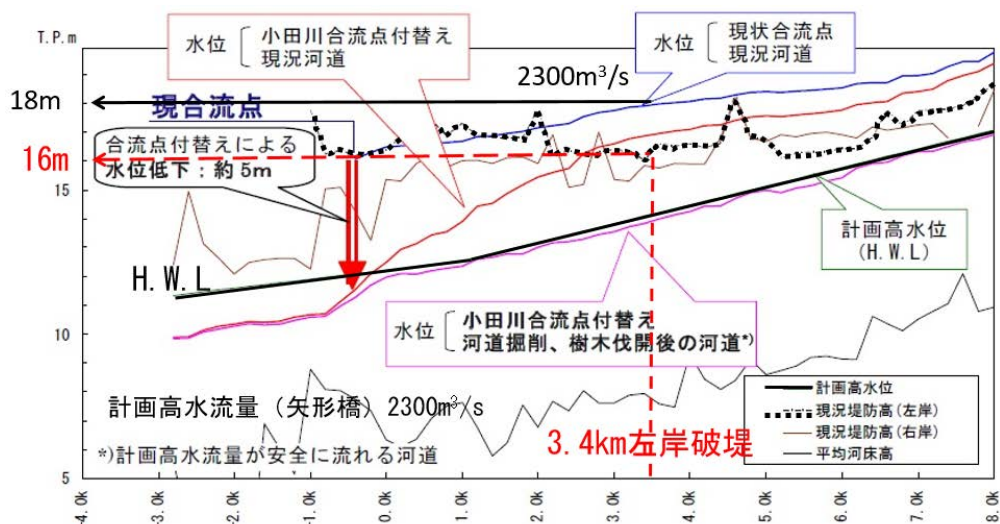


図 2 小田川の水位縦断（計画高水流量）（文献 3 に加筆）

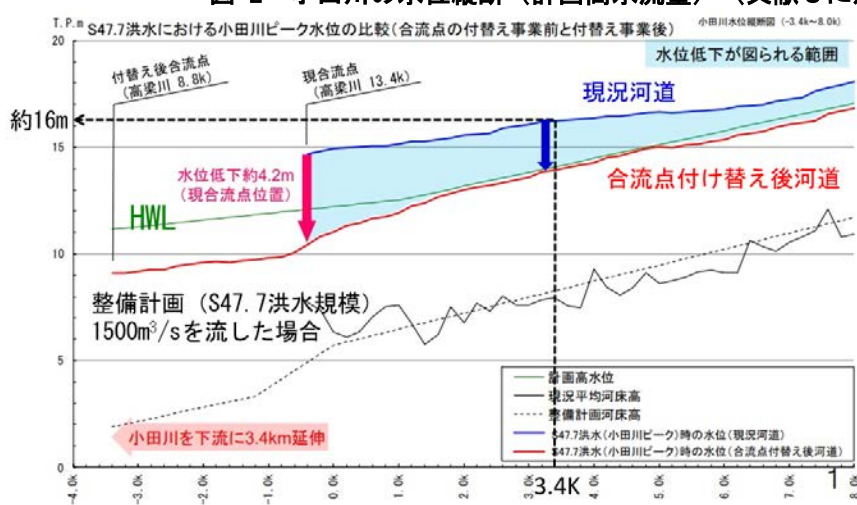


図 3 小田川の水位縦断（整備計画流量）（文献 4 に加筆）

整備計画が完了していれば平成30年7月豪雨の被害は防げたと言えるかもしれないが、新規事業採択時で示された事業期間は平成26年から平成40年で事業費（河川改修事業）は約280億円である（事業内容は付け替えのための放水路）。しかし、被災後は災害復旧事業や河川激甚災害対策特設緊急事業（激特）等が加わり、真備緊急治水対策プロジェクトとして急ピッチで事業が進んでいる（事業期間は令和5年度までで事業費は約500億円）。平成27年9月の関東・東北豪雨では鬼怒川の破堤が一番に思い出される。利根川本川の整備計画策定が遅れたこともあって、この豪雨を受けた時点、鬼怒川は整備計画が未着手であった。しかし、この災害が契機と言うか、平成28年2月には整備計画は策定され、その河道目標流量（石井）は $4600\text{m}^3/\text{s}$ でこれは平成27年9月洪水と同規模である⁵⁾。そして、災害復旧、激特など鬼怒川緊急対策プロジェクトによるハード、ソフト対策が加速化する中、その段階的な効果は令和元年東日本豪雨でも発揮し、令和3年6月にはプロジェクトのハード整備（堤防整備、河道掘削）がほぼ概成した。筆者は整備計画の妥当性に感心しながらも、その逸早い達成が河川のもつ治水基礎体力として必要なことを痛感した。しかし、前述したように、令和元年東日本豪雨では整備計画規模を越える状況で破堤災害が多発した。そこで、この中から信濃川水系千曲川の破堤について取り上げてみる。

(2) 千曲川の破堤について

令和元年台風19号では、千曲川57.5k左岸（長野市穂保地先）で越水による堤防決壊が生じ（図4）、市中心部から北東にある長野市長沼地区等で大きな氾濫被害となった。破堤地点付近の家屋破壊・流失の被害の



図 4 堤防決壊箇所に設置されたCCTVカメラによる堤防決壊前後の時系列変化（文献6）

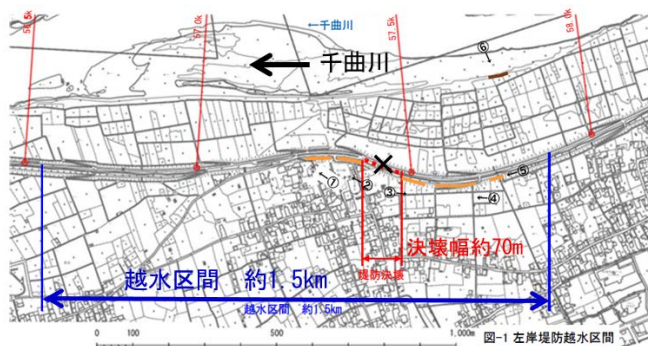


図 5 堤防決壊付近の越水区間と決壊地点（×地点）（文献6に加筆）

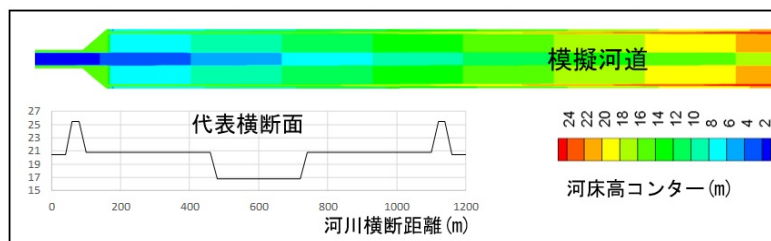


図 6 計算に用いた狭窄部模擬河道

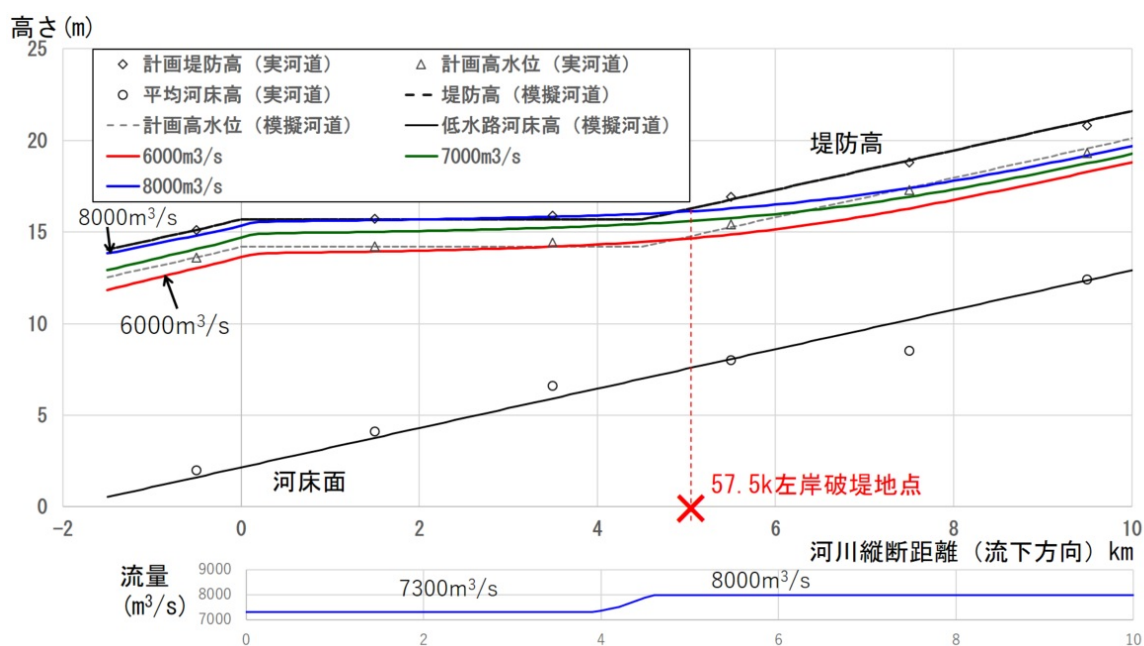


図 7 狭窄部模擬河道を用いた流量規模別の水位縦断（計算値）

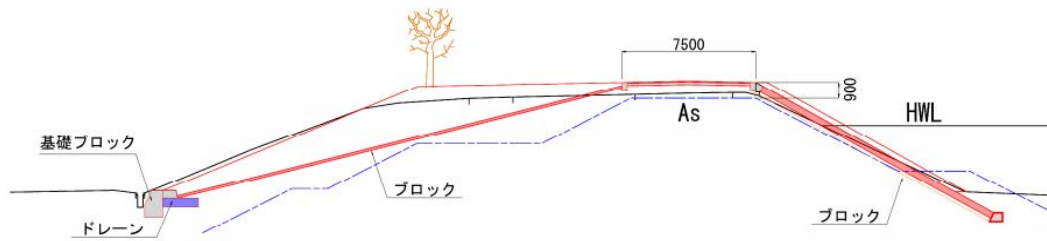


図8 堤防断面（案）（川裏を緩勾配一枚法面としたブロックを設置）¹⁰⁾

凄まじさや、また、北陸新幹線車両基地の水没などが大きく報道され、記憶に残る人も多いであろう。越水区間は破堤地点57.5kを含みその下流の約1.5kmにも亘る延長であり（図5），57.4k地点にある危機管理水位計からは堤防天端高を最大80cm超える越流水深が記録されている⁶⁾。この流下能力の低さを生む要因は、破堤点57.5kより下流の、52.0kにある立ヶ花の狭窄部の影響で、そこでは千曲川の川幅1km程度が260m程度に絞られている。そこで、この狭窄部の影響を水理的に考察するため、図6に示すように狭窄部で260m、その上流側は1km程度の川幅とし、58km測量横断面を参考に図6に示すよう、かなり大胆に単純化した複断面の模擬直線河道を用いて平面2次元流解析（越水を考慮）を行った。

図7に水位の縦断方向分布を示す。河川縦断距離0kmが立ヶ花狭窄部に相当し、堤防高（黒線）は狭窄部から破堤点（図7中の×）手前までほぼ水平となっているが、これは狭窄部から堰上げ背水（バックウォーター）による水位上昇分を見込んだ堤防高が設定されていることを示す。堤防高は、計画高水位（点線）に余裕高を加えた堤防高として設計されるが、この余裕高は計画高水位算定の不確定要素、風浪、跳水などの水位上昇の可能性等を見込んで設定されるもので（高さとしての安全を担保するものではないとする判断）、したがって計画高水位相当の洪水規模が安全に流下し得る流量とされる。

河川整備基本方針で目標流量として計画高水流量が定められ、これが立ヶ花地点では11500m³/s（河道配分流量9000m³/s）となるが、これに向けて当面の整備期間（20年～30年）での達成目標流量（河川整備計画の目標流量）7600m³/sが設定される（貯留施設なしでは7300m³/s）⁷⁾。それでは、この区間の現況での流下能力はどれくらいだろうか。平成18年7月洪水により立ヶ花狭窄上流の区間（54km～56km程度）で計画高水位に相当する洪水を経験し、国土交通省の流量観測によれば立ヶ花で約6000m³/sであることが報告されている⁸⁾。そこで、6000m³/sが現況の流下能力相当であると仮定して、この流量を与えた洪水水位が計画高水位になるように、河道の粗度（抵抗）を平面2次元流解析にセットした（文献8より図7に示す点線の計画高水位と6000m³/sの水位が0km～4kmで対応するようセットした）。この条件で同区間で堤防高（天端）満杯の水位となる流量を試算すると8000m³/sとなった。すなわち現況では8000m³/sを越えると堤防から洪水が溢れることになる。図7の8000m³/sの水位を見れば、破堤地点57.5kを含む下流の長い区間に亘ってその水位は堤防高を越えており、これは、図5に示す越水区間が約1.5kmも生じた現地状況にも対応している。では、令和元年台風19号での洪水流量はどのくらいであったのだろうか。前述したように、越流水深は80cmのかなり大きな洪水規模であったが、これについて国土交通省が9900m³/s（上流部でダムなし、氾濫戻しの流量）と推測し公表している⁹⁾。大規模な洪水流量であったことに間違いはないが、これは手に負えない程の大規模洪水であったのだろうか。ここから著者の勝手な見解を述べたい。先の計算結果から余裕高分で約2000m³/sが流れる試算であり、もし整備計画相当の流下能力（7600m³/s）が達成されていれば天端満杯流量は9600m³/s、これは9900m³/sにかなり近く、越水したかどうかのぎりぎりかもしれない。問題の本質は現況流下能力6000m³/sの低さにあって、北陸地方整備局千曲川河川事務所では、当該区間の堤防整備を完成し、整備計画相当の流下能力（7600m³/s）に向けて河道掘削、狭窄部是正などの整備メニューを進める中での被災であった。ただし、この整備の達成はかなりの難題で、立ヶ花狭窄部で約1/4に川幅が縮小するという地形特性とともに、信濃川水系上流区間の流下能力を上げると、下流にとっては大きな洪水流量としての負荷が高まるという治水の上下流バランスを

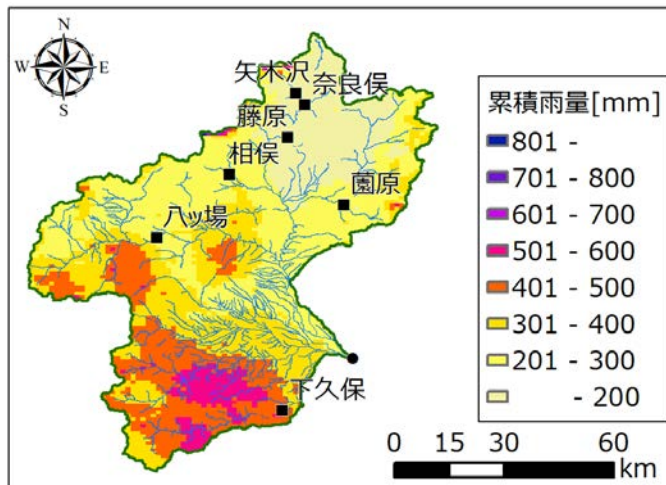


図9 八斗島上流域における3日間の累積降雨分布図

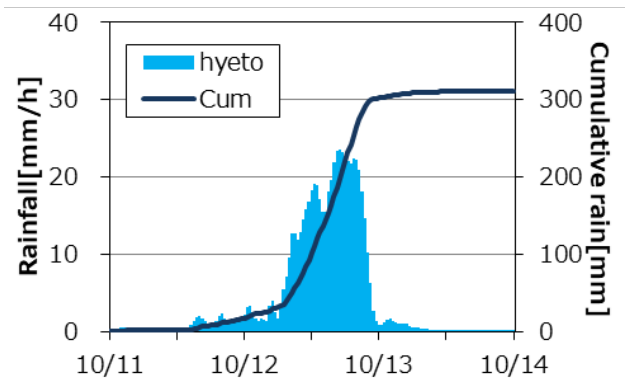


図10 八斗島上流域平均降雨ハイエトグラフ

如何に保つかの課題となる。だから長野市を貫流する千曲川の整備計画目標安全度は1/30と全国的に見ても高くないもので設置されていた（図1参照）。そして、今次出水の災害対応として、信濃川水系（千曲川）緊急治水対策プロジェクトが令和9年度を目標として進められている。しかし、この整備によっても令和元年洪水位を計画高水位以下にはできず、立ヶ花狭窄部上流区間の水位は計画堤防高以下に収めることを目標としている。図8は破堤区間を含む一連での堤防断面案（国交省より提示）で、川裏を緩勾配一枚法面としたブロックが設置され、越水破堤に対する強化対策が備えられている¹⁰⁾。台風19号被災を踏まえて堤防強化が本省の検討会で審議され¹¹⁾、その位置づけを次のようにまとめた。「洪水時の河川水位を下げる対策を治水対策の大原則としつつ、氾濫リスクが高いにも関わらず、その事象が当面解消困難な区間であって、河川堤防が決壊した場合に甚大な被害が発生するおそれがある区間において、計画的な治水対策に加え、避難のための時間を確保する、浸水面積を減少させるなどにより被害をできるだけ軽減することを目的に、河川堤防を越水した場合であっても、決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果を発揮する粘り強い構造の河川堤防の整備を、危機管理対応として実施すべきである。」¹¹⁾。平成27年関東・東北豪雨での鬼怒川破堤後の対応では、本復旧の堤防断面は川表法面被覆工+天端舗装+川裏法尻部のドレーン工である（川裏法面は張芝）¹²⁾。天端舗装や川裏法尻部のドレーン工は越水した場合の堤体保護機能を期待する（危機管理型ハード対策¹³⁾）ものではなく、堤体内の浸透対策としての位置付けである。それは、鬼怒川ではH. W. L以下で収まり、千曲川では収まらないことによる。従って、千曲川では堤防強化（越水対策）が必要で、整備の整合性はあるように思えるが、河川計画としての整合性はこれからの大きな課題である。ひょっとすると、この辺りは今後の「流域治水」¹⁴⁾に絡んでくるものかもしれない。

前述したように、台風19号では国管理河川の12箇所・県管理河川の128箇所 で堤防決壊が発生したが、決壊原因は「越水」が86%で、被災要因の多くを占めている。しかし、国管理河川で越水が確認された箇所は70箇所 で、このうち12ヵ所が決壊し、県管理河川では越水が生じた箇所は236箇所 で、このうち108箇所が決壊したとの調査結果も挙がっている¹⁵⁾。越水破堤した箇所は跡形もないが、越水しながらも破堤を免れた箇所はあとからその状況を調べることができる。堤防研究につながる貴重な知見が得られるチャンスかもしれないし、水工学の災害調査では、ぜひこう言う課題の発掘と、その後の研究へと挑戦してほしい。

(3) 利根川について¹⁶⁾

さて、令和元年台風19号での図1の利根川（八斗島, 181.5km）を見ると、その洪水規模は整備計画流量に匹敵する。今次出水で破堤のような大きな被害に至らなかった利根川、多摩川、荒川本川についても計画高水位を超過する区間が一部で生じるなどの洪水外力規模であった。図9は利根川上流域（八斗島流量観測点上流, 約5150km²）での3日間累積雨量、図10は同上流域での平均降雨のハイエトグラフである。利根川上

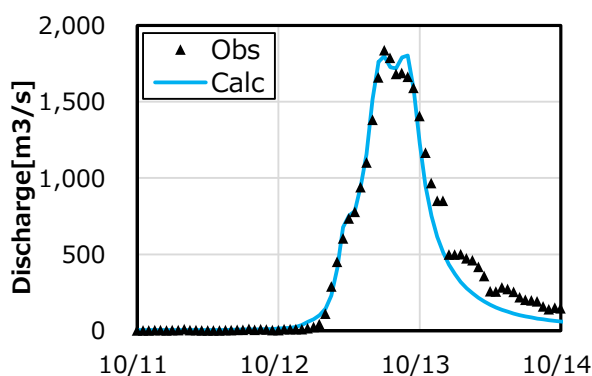


図11 下久保ダム流入量ハイドログラフ

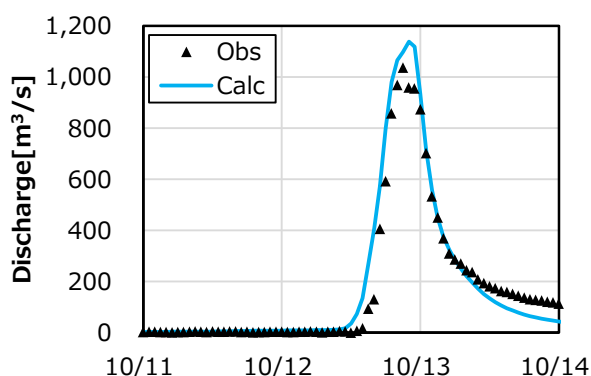


図12 菌原ダム流入量ハイドログラフ

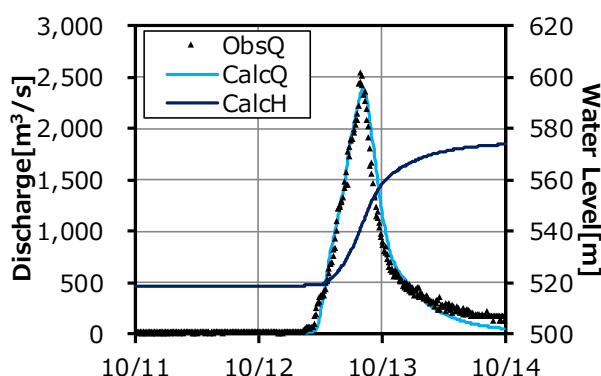


図13 台風19号再現計算のハッ場ダム流入量と貯水位

表2 令和元年台風19号再現計算のNash係数

観測地点	Nash係数
矢木沢ダム	0.84
奈良俣ダム	0.46
藤原ダム	0.67
相俣ダム	0.80
菌原ダム	0.83
草木ダム	0.91
下久保ダム	0.91

流域の総雨量は約310mmであり、これは利根川中流部（北埼玉郡東村，新川通地先（現加須市））で破堤をもたらした昭和22年カスリーン台風時の降雨量に匹敵する（ただし，台風19号では主要な降雨波形は24時間以内）。そこで，整備計画の妥当性，重要性を示す事例の締めくくりとして，台風19号がもたらした利根川（八斗島）での洪水流量の検討について以下に述べる。

解析では，降雨流出から洪水氾濫までを一体的に解析することのできる分布型モデルである RRIモデル¹⁷⁾を用い（洪水追跡は平面2次元の拡散波近似），これにダムモジュールも組み込んでいる¹⁸⁾。流域のグリッドセル分割では空間解像度が28秒（約700m×850m）メッシュで，地形情報のモデル化には山崎ら¹⁹⁾の日本域表面流向マップを用い，土地利用データは国土数値情報土地利用細分メッシュを使用して28秒メッシュ内を水田・畑地・山地・都市・水域の5分類に設定した。RRIモデルパラメータは，平成27年関東・東北豪雨（2015年9月9日～9月11日）の河道流量の再現解析から同定し，これを用いて台風19号を検討した（助走計算期間を含めた2019年9月1日～11月1日とし，入力する降雨データには気象庁解析雨量を用いた）。

図11，図12に，下久保ダム及び菌原ダムにおける流量ハイドログラフについて観測値と計算値を比較した。また，表2には各地点におけるNash係数（Nash-Sutcliffe係数）を算出した。Nash係数は一般的に0.7以上でモデルの妥当性が高いとされており，比較的流入量の大きかった下久保，菌原，草木ダムにおいてNash係数が0.7以上となり，流域全体として高水に対するおおよその再現性があるとしてパラメータを決定した。その結果，試験湛水期間中に流入したハッ場ダムの流量ハイドログラフを見事に再現できている（図13中の観測値（▲）およびハッ場ダムの水位-貯留量の関係は公表の国交省資料から読み取りで作成²⁰⁾）。

そこで本解析から八斗島地点における河道流量の算定を実施した（なお，八斗島水位観測所における本出水期間の観測流量は文献16の執筆時時点では公表されていない）。計算流量のハイドログラフを図14に示す。これより八斗島地点の推定ピーク流量は13,925m³/sとなり，その発生時刻は10月12日22時50分，実績による

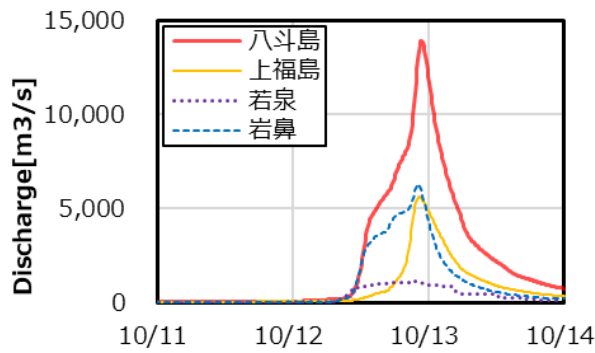


図14 八斗島および上流地点の計算流量

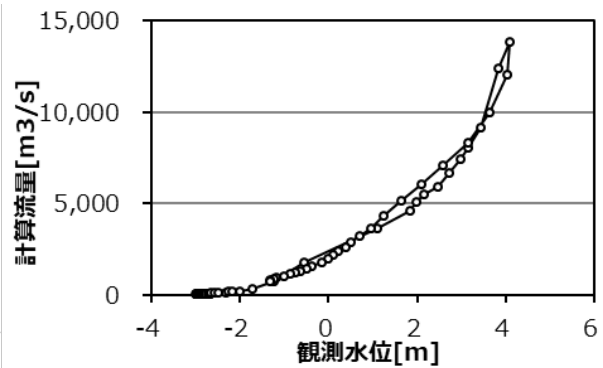


図15 八斗島の観測水位－計算流量の関係

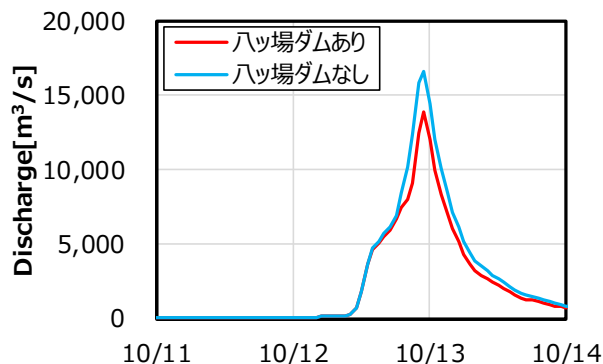


図16 八斗島計算流量（ハッ場ダム有無で比較）

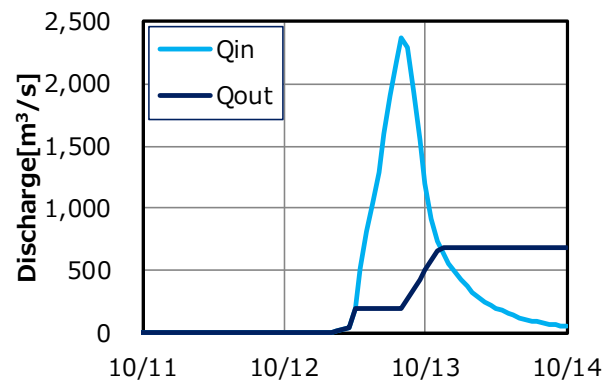


図17 ハッ場ダムにおける推定流入量・

放流量ハイドログラフ

ピーク水位の発生時刻が同日23時²¹⁾であり、その差異は小さい。同図には八斗島上流の利根川本川にある観測所の上福島と烏川水系にある観測所の岩鼻、若泉の計算値も示した。図15に計算流量と実績水位から求めた八斗島地点における水位－流量曲線を示す。これよりそのループ特性は小さいことが分かる。利根川水系利根川・江戸川河川整備計画²²⁾に示された八斗島地点における目標流量は17,000m³/s(年超過確率1/70程度)であり、そのうちの14,000m³/sを河道で安全に流下させることを目標としている。

したがって、まさに台風19号は八斗島地点での整備流量規模であり、後述するように利根川の整備計画を試す洪水であったと言える。

ハッ場ダムの効果を見るために、ハッ場ダムがなかった場合を仮定して八斗島地点における流量ハイドログラフを推定した(図16)。先述べた八斗島の推定ピーク流量は13,925m³/sで、ハッ場ダムがないと仮定した場合の推定ピーク流量は16,638m³/sとなり、八斗島地点において2,713m³/sの洪水調節効果があったことが試算できた。これは、八斗島地点においてハッ場ダムは約16%の洪水調節を行ったことになる。台風19号出水直後、ハッ場ダムの効果について様々な報道、意見が流れた。ダムを賞賛するものもあるが、反面、「台風19号でハッ場ダムは利根川の洪水をすくったのか?」、「試験湛水期間でダムは空っぽであったから貯めれた」という意見も聞かれた。ダム効果の有無を即答する必要は全くないが、試験湛水時と運用時での差異についての興味もあるのでその効果も試算した。ハッ場ダムは貯留量の推定を行うために簡易的にモデル化し、期

図18 ハッ場ダム操作規則を仮定したときの
八斗島の計算流量

間内の放流量を $0\text{m}^3/\text{s}$ として設定した（実際の放流量は約 $4\text{m}^3/\text{s}^{20)}$ 。初期水位を518.8mと設定し²⁰⁾，ハッ場ダム以外のダムは国土交通省水文水質データベースより収集した実績放流量を境界条件として入力した。そして，台風19号において，ハッ場ダムが洪水調節計画に基づく調節操作²³⁾を行ったと仮定して計算した。ここで，ハッ場ダムの洪水調節操作は以下のようになる²³⁾。①流入量が $200\text{m}^3/\text{s}$ に達したときから洪水調節を開始し，ピーク流量発生時刻まで $200\text{m}^3/\text{s}$ を放流する。②ピーク流量発生後は，放流開始時刻からピーク流入量発生時刻までの時間をかけてダム最大放流量まで増加させる（ダム最大放流量 $= (\text{最大流入量}-200) \times 0.28 + 200$ に基づく）。③放流量が流入量と等しくなった時点からその流量を一定放流する。このときの本モデルで推定された流入量と放流量のハイドログラフを図17に示す。このハイドログラフから，今次出水におけるハッ場ダムの最大放流量は約 $680\text{m}^3/\text{s}$ と推定される。そして，八斗島地点における流量ハイドログラフを実績推定のハイドログラフと比較した(図18)。八斗島のピーク流量は $14,085\text{m}^3/\text{s}$ と推定され，実績の推定流量よりも $160\text{m}^3/\text{s}$ 増加するものの，ハッ場ダムがなかったと仮定した場合の流量に対して約15%の流量低減に寄与したと試算された。この推測結果を受け入れるならば，今次出水においてハッ場ダムが本運用されていたとしても，下流の洪水調節に大きく貢献できたと言える。台風19号直後のハッ場ダム効果についての騒々しい話が飛び交う中，国交省は即座には言及しなかった。「ハッ場ダムが運用開始された中での洪水調節ではないから」とする関東地方整備局の対応は冷静で，行政技術者としての謙虚さが筆者の印象に残っている。

さて，八斗島地点でほぼ整備計画流量が流れたとする利根川本川の状態はどうであったのか。利根川水系利根川・江戸川 河川整備計画²²⁾では，八斗島地点（181.5km）から江戸川分派点（122km付近）までの区間において，年超過確率 $1/70 \sim 1/80$ に相当する $14,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度の洪水を安全に流下させると計画している。そして利根川の主要地点栗橋（130.4km）においても $14,000\text{m}^3/\text{s}$ を確保するには，その上流で合流する渡良瀬川（132km付近）からの合流量をゼロとなるように渡良瀬遊水地で洪水調節することとなっている。図19に，利根川本川の川俣地点（150.2km）および栗橋地点（130.4km）での観測水位ハイドログラフを示す。これより，川俣地点では計画高水位(HWL)を越え，栗橋地点ではHWLぎりぎりの状況であった。図20は整備計画に示されている現況流下能力図²²⁾に，台風19号による実績ピーク水位とHWLとの差を加筆したものである。図19において，川俣に比べ栗橋での水位変化では，ピーク付近のつぶれや長く緩やかな減水期は渡良瀬川合流部での影響であり，渡良瀬遊水地の洪水調節も合わさった本川から渡良瀬川への逆流，停滞，順流と河道貯留等の効果が生じているものと推測される。なお，渡良瀬遊水地では過去最高の洪水貯留量の約1億6000万 m^3 を行い，これは洪水調節容量の93%に当たる²⁴⁾。

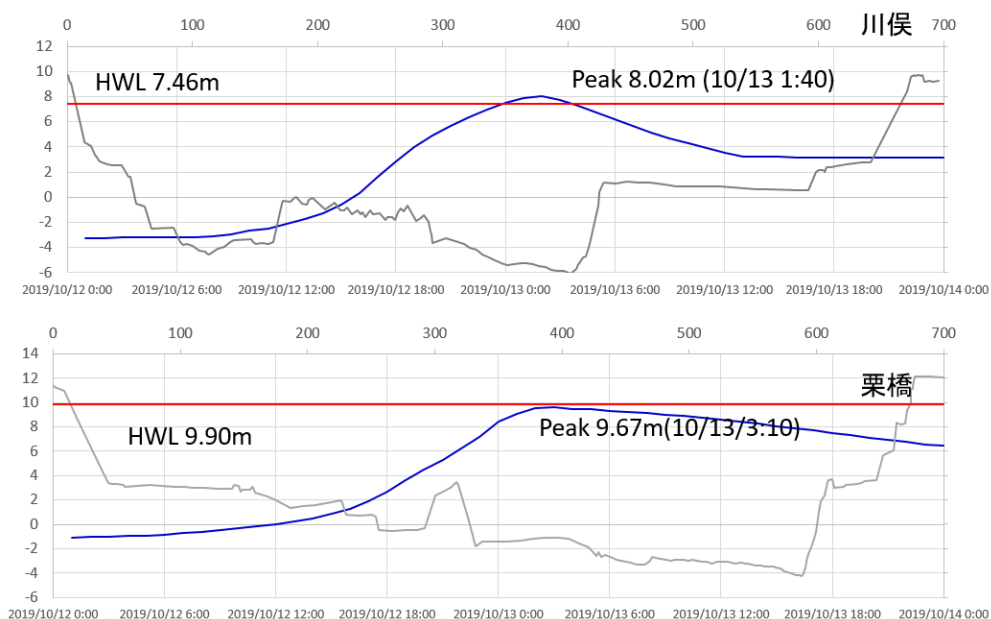


図19 台風19号における利根川本川の川俣，栗橋地点における観測水位

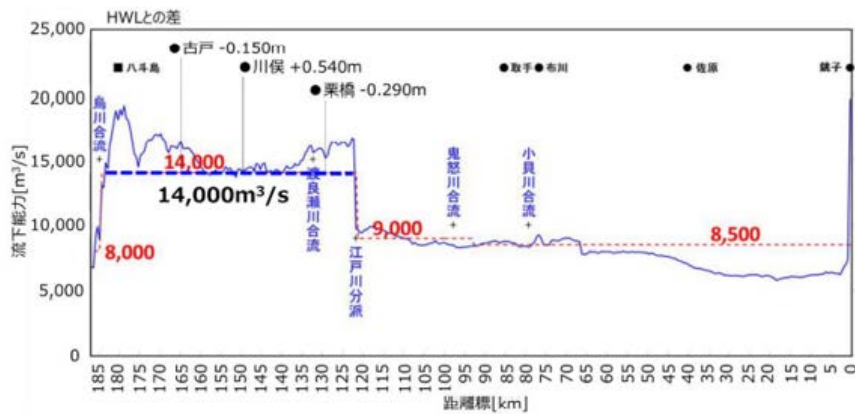


図20 台風19号による実績ピーク水位とHWLとの差及び現況流下能力（文献22に加筆）



図21 台風19号による秋山川破堤による
氾濫被害（赤坂町右岸破堤）



図22 秋山川破堤地点上流側の右岸堤防に残
存する流下物（越水氾濫の様子が分かる）

利根川は、八斗島下流区間からの右岸堤防が決壊すると首都圏氾濫の危機が高まり、また左岸堤防の決壊では閉鎖型氾濫貯留による湛水深増大から大きな被害をもたらす。前述のRRIモデルの解析からは八斗島で、すでにこの区間の整備計画の河道目標流量にほぼ等しい13,925m³/sが推定され、その下流の川俣までに支川合流の影響もあって、危機的な状況であったことが推測される。このように考えると、ハッ場ダムを含む上流ダム群の役割および中流部における調整池効果、そして河道の流下能力を着実に上げてきた中での台風19号出水であったが、整備計画達成に向けての課題をあらためて認識させたとと言える。それがハッ場ダム完成の前年であったことは、単なる偶然ではないように思えてならない。

(4) 中小河川の状況について

先述したように令和元年台風19号では河川堤防の決壊が多く、とくに中小河川（県管理河川）で128か所の堤防決壊が生じた。そこで、はじめに栃木県佐野市を流下する秋山川、次に栃木県栃木市を流下する永野川の氾濫事例を通じて、氾濫流の挙動を踏まえた水害リスクについて考える²⁵⁾。

(a) 秋山川の氾濫事例

台風19号による豪雨によって栃木県佐野市内を貫流する秋山川は令和元年10月12日21時過ぎに決壊し（氾濫危険水位は2.8mで12日19時40分頃に3.43mを記録）、氾濫水が市街地や農地を襲った（図21, 22）。これより佐野市を横断する国道50号線やJR両毛線等の主要交通網も浸水被害を受けている。市内の主な破堤箇所は2箇所、佐野市大橋町（大橋上流）及び佐野市赤坂町（海陸橋上流）の右岸側である。図23は衛星画像（SPOT7, 10月13日10時28分観測, PASC0提供）であり、赤坂町右岸破堤点は×で示された位置になる。同図から見る広域に湛水した氾濫水がどのような挙動で流下してきたか、その氾濫過程から今後の防災・減災対策を学ぶことは重要で、これを氾濫解析から検討した。氾濫解析に用いた地形データは国土地理院・基盤地図データ（5m



図23 衛星画像による氾濫流の湛水（SPOT7，10月13日10時28分観測，PASCO提供）

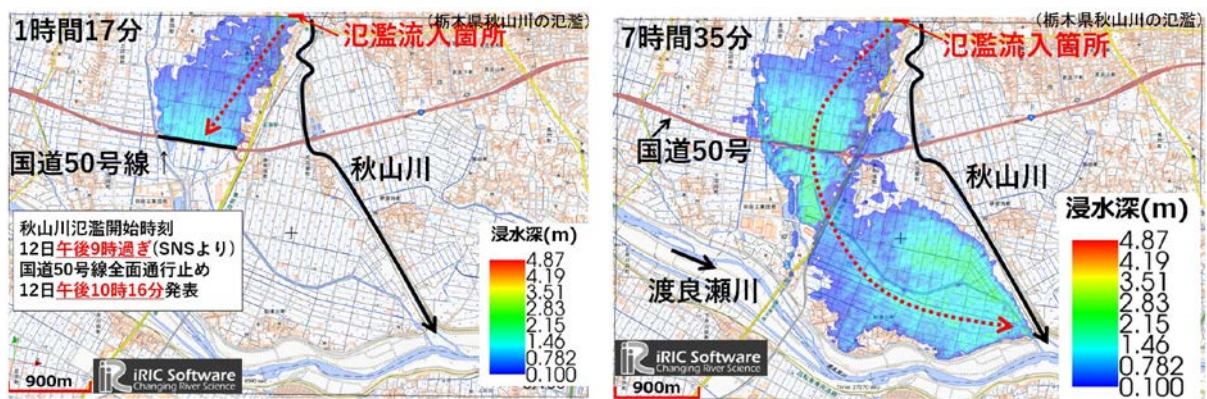


図24 氾濫流解析（iRIC）による浸水深の分布

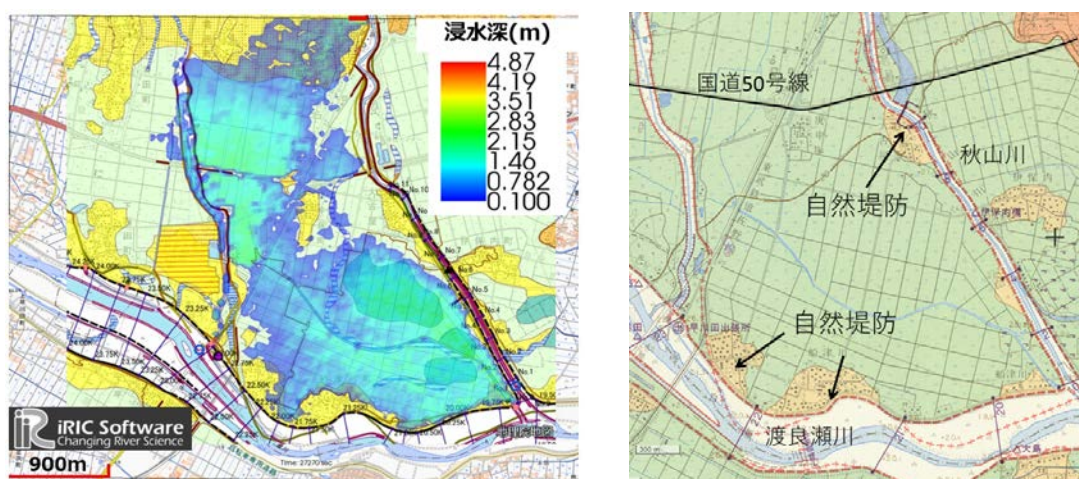


図25 最大浸水深（背景は治水地形分類図）と治水地形分類図との比較

メッシュ)を用いた。執筆時点では破堤流量の情報はなく，ここでは氾濫流量が図23の氾濫原全体を再現できるように試行的に与えた。その結果，氾濫流量 $150\text{m}^3/\text{s}$ としてこれを一定時間与えた（赤坂町右岸破堤のみを考慮した）。なお，栃木県による秋山川の整備計画によれば計画流量は $430\text{m}^3/\text{s}$ （計画規模1/30）である²⁶⁾。



図26 栃木市大平町川連地点右岸の堤防決壊口（右）およびJR橋梁を下流側から上流に向かって見た状況（決壊口は左図JR橋梁の右岸にある。JR橋梁上部に残存する多くの流下物が見られる）

氾濫解析はiRIC Nays2D floodを用い、マニング粗度係数は0.035とした。その結果、図23の湛水域を再現するには計算時間を6時間以上にする必要があり、佐野市公式SNSアカウントの情報によれば少なくとも10時間以上は破堤箇所からの越水が続いていたことも考慮して計算時間を検討した。図23の氾濫状況を再現した解析結果（氾濫後7時間35分経過）を図24（右図）に示す。氾濫流は国道50号線を越えて、図中の点線方向に流下して渡良瀬川・秋山川合流点に向かう。氾濫水が国道50号線の周囲より高い地形（盛土）によって一時湛水するが、氾濫開始後約1時間で国道50号線を越えて流下し始めた（図24左図）。国土省宇都宮国道事務所によると12日22時16分頃から冠水による国道50号線の全面通行止めが実施されている。これより越水開始を21時過ぎとすれば（NHKによるSNS情報あり）通行止めまでの所要時間は約1時間となり、解析結果と概ね一致する。氾濫域と治水地形分類図との比較を行ったものが図25である。氾濫域では住居や学校等の公共施設が微高地（自然堤防、図25右図でその箇所は図23における家屋の水没を免れた箇所と一致している）の地形上に集中しており被害の軽減に繋がっている。一方、氾濫水の湛水域は水田等の農地が占めており、一時貯留することで下流河川への洪水流量低減効果も期待される。氾濫流の流下過程を踏まえ、湛水する水田等の低平地を特定し、微高地の集落と言う住まい方の工夫が被害軽減のための流域（氾濫原）管理として重要である。

(b) 永野川の氾濫事例

宇都宮地方気象台から10月13日午前2時に河川はん濫発生情報が発表され、栃木市によれば永野川の決壊は6か所となった。ここでは大平町川連地点（JR両毛線・鉄道橋梁付近）での決壊による氾濫過程を考察する。この大平地域では、栃木市によれば住家被害で、全壊2、大規模半壊44、半壊487、一部破損1124であり、非住家被害では、大規模半壊3、半壊54、一部半壊142、床上浸水117が発生した²⁷⁾。図26右図はJR両毛線鉄道橋梁直上流側右岸の決壊地点での緊急復旧の状況である。湾曲部外岸にあたり、被災前から護岸の設置がなされていることから水衝部であることが分かる。図26左図はJR橋梁を下流側から上流に向かって見た状況で、橋梁上流側で決壊した流れの一部が橋梁下流右岸から河道に戻った状況が推測された。また、橋梁上部には大量の流下物の残存が見られ、橋梁による流れの抵抗、水位上昇の可能性が認められる。

図27には現地調査、報道等から求めた氾濫流の流れを示したものである。興味深いことは、氾濫流は永野川からの川筋を離れて流下していくことで県道11号をしばらく流れた後（図27）、県道から離れ、水田地帯に流れていく。この間、多くの住居、商業施設を浸水させた（JR大平下駅付近の県道での調査から浸水深さは1.0mから1.5m程度が目立った）。

そこで、このような氾濫流の挙動を把握するため、iRIC Nays2D floodを用いて氾濫流解析を行った。後述する氾濫原全体（図29）を再現できるよう試行的に決めた結果、氾濫流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ としてこれを10時間与えた。参考までに永野川の河川整備計画によれば計画流量は $620\text{m}^3/\text{s}$ である²⁸⁾。氾濫解析では10m格子の地形デ



図27 永野川の破堤点からの氾濫流の流下（氾濫流は永野川の川筋から離れ、県道を流下する）

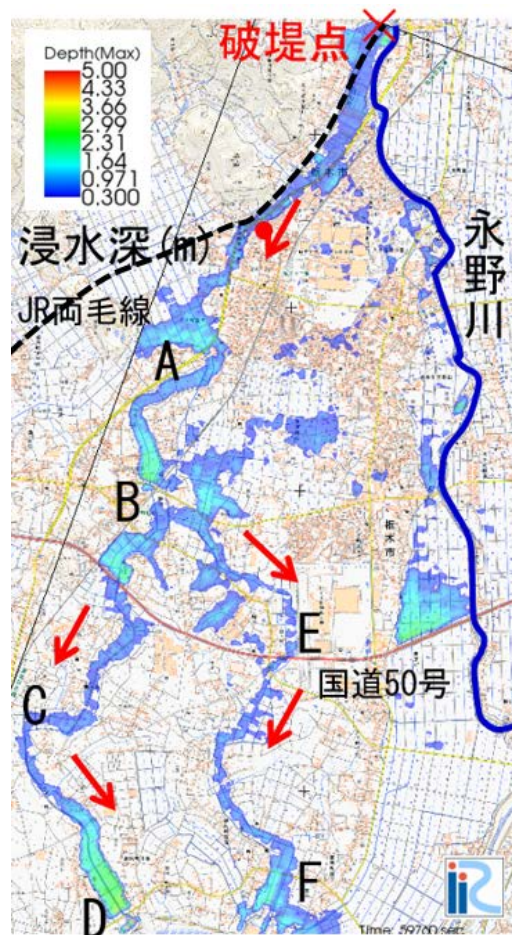


図28 永野川の破堤点からの氾濫流シミュレーション(iRIC, Nays2Floodによる)

ータ（国土地理院）を用い、マニング粗度係数は0.04とした。図28に最大浸水深コンター図を示す。氾濫流は破堤点から永野川から離れ、B地点で2手に分かれた後、国道50号線を横断し、約10km流下して最終的に渡良瀬川遊水地第3調節池に到達した。図29は、衛星画像（SPOT7，10月13日10時28分観測，PASC0提供）および該当するエリアの治水地形分類図を示した。これより、台地に拘束された氾濫平野と旧河道および他川の現河道（静和川，江川）がつながった形で氾濫流が流下して行くことが読み取れる。実は浸水想定区域図（計画

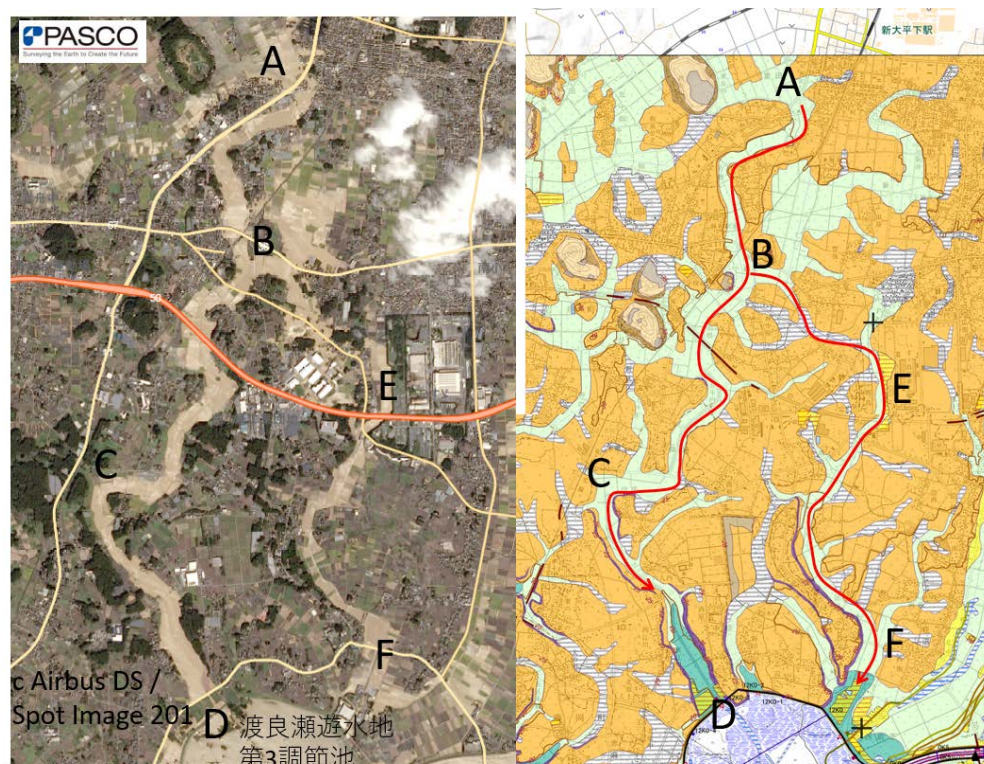


図29 衛星画像（SPOT7，10月13日10時28分観測，PASCO提供）および該当するエリアの治水地形分類図

規模）に，したがって，ハザードマップも同様に浸水域の一部が記載されている²⁹⁾．しかし，これらの図を見ても浸水域を生む氾濫流の正体がまず分からない．さらには流域を越えて氾濫流が到達することは気づけない．ここに，リスクをどう認識するかという問題が出てくる．氾濫流の現象，すなわち氾濫流がどのように流下して到達するのかを知っておくことの大切さをこの事例は示しており，そのためにはハザードマップの結果だけではなく，その途中にある過程の理解が重要である．

中小河川の氾濫が目立った本災害は，気候変動による豪雨災害が懸念される中，河道だけでは耐えられない洪水外力に対し，氾濫は生じるものとした減災対策の必要性を改めて提示したと言える．そして氾濫流の挙動を踏まえた流域での氾濫原管理の必要性が令和元年東日本台風（台風19号）災害から学ぶ教訓である．

(c) 中小河川が受けた洪水外力の推定

前述したように，台風19号では中小河川の越水破堤が多発したことから，今次出水について洪水流量の推測を行い，計画規模との比較，乖離を見ておくことが重要である．そこで，降雨流出氾濫モデルとしてRRIモデルを用いた検討を行った．

図30は秋山川の下流地点からの距離(m)を横軸として，縦軸にピーク流量と標高を示したものである．計算からの見積もりでは下流地点で計画流量430m³/sを大きく越え，700m³/sに迫る規模に及んだ（計算では堤防決壊は考慮していない）．計算結果は今後精査が必要であるが，この程度の規模となれば，河道だけで処理するのはかなり厳しいと思える．図31は，佐山によるRRIモデル解析から得た，台風19号による洪水外力（ピーク流出高＝ピーク流量／集水面積，単位：mm/h）と集水面積（単位：km²）との関係を示している．ここでは佐山による解説を以下に引用する³⁰⁾．

赤点で示した地点（図中で直線上に乗るプロット）は，山地からの流出河川に分類されるもので，栃木県の堤防決壊箇所に着目した結果である．また荒川上流の越辺川で破堤した箇所における推定流量と集水面積との関係を参考にプロットしている．青点で示した地点（直線上以外のプロット）は，同じく栃木県の中小河川における堤防決壊箇所を示しているが，平野から流出する河川の結果を青点でプロットしている．ここでのピーク流量は，実際よりもやや過大評価傾向となる可能性があるが，そのことを踏まえたうえで集水面

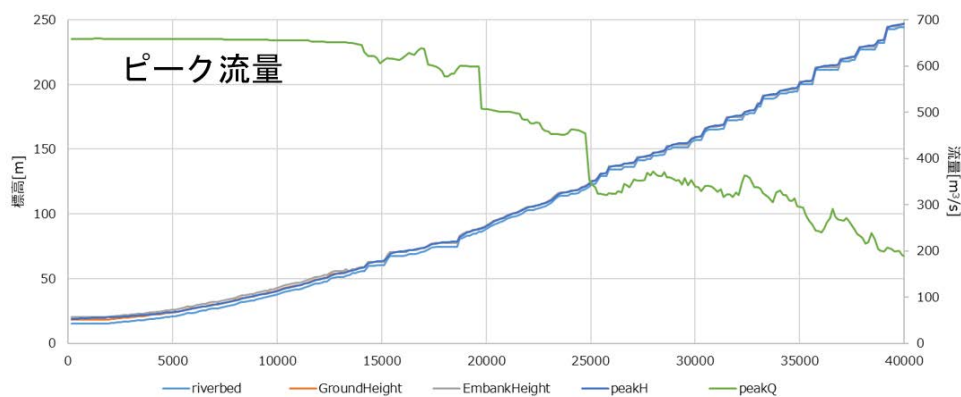


図30 RRIモデルによる秋山川流域の洪水外力の推定（横軸，秋山川下流からの縦断距離，縦軸：河床位，地盤高，堤防高，ピーク水位，ピーク流量）

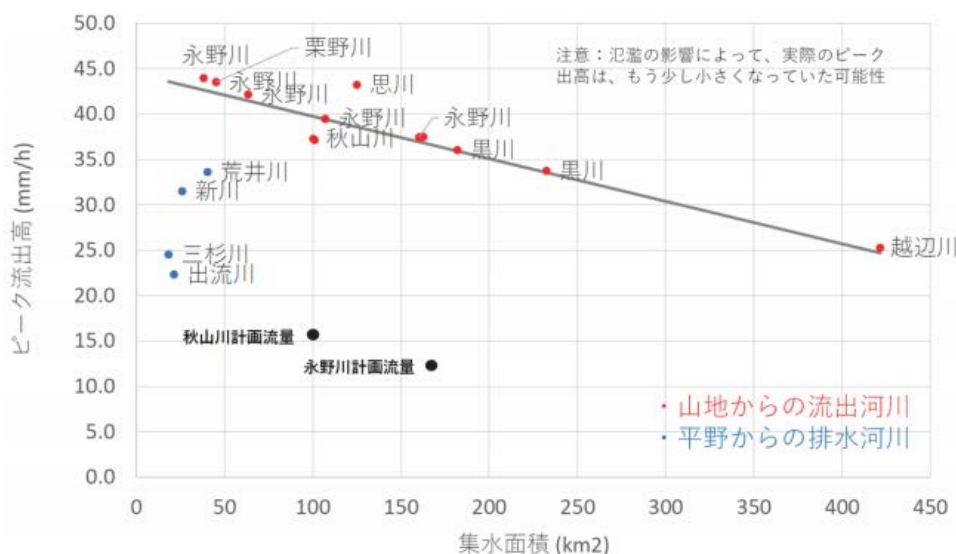


図31 栃木県管理河川の堤防決壊地点における集水面積と推定ピーク流出高の関係（赤印は山地からの流出河川を，青印は上流部に山地流域が無い河川を表す．参考として秋山川および永野川の計画流量を流出高に換算した結果を黒印で示す）³⁰⁾

積が 200 km² 以下程度の中小河川に着目をするると，ピーク流出高がおおよそ 35 mm/h を超えるあたりで被害が出ていること，支川の上流部では局所的にさらにピーク流出高が高くなって40 mm/hを上回る地点があることが分かる．同図に併記した秋山川と永野川の河川整備計画による計画流量（流出高に換算した結果）と比較すると，今回の洪水ではそれらの値をはるかに上回っていたことが分かる．

国管理河川においては今次出水の外力規模である雨量と流量について主な被災河川を対象に評価されている（図1），こうした評価が県管理河川においてもとても重要である．さらには県管理河川でも直轄河川でも，今次洪水規模と河川の現況治水体力を相対評価しておくことが重要である．今次洪水規模，河川整備計画規模，現況体力（計画規模達成率）を比較，明示にすることは，今後の整備方針を考える上，また，流域の住民にとって水害リスクを認識する上でとても大切であり，そういうことの認識を与える台風19号の経験であったと言える．

本節では，地形と土地利用に特徴づけられた氾濫流の挙動から氾濫域を特定して，水害リスクを認識することの大切さを提示したが，そのための解析ツールとして，RRIモデルやiRICの有効性も提示した．図32は，RRIモデルによる台風19号による渡良瀬川の浸水分布であるが，実際の中小河川の浸水状況とかなり対応している．こうした情報の活用，住民への提示から，浸水に備えた住まい方の工夫が被害軽減のための流域管理（氾

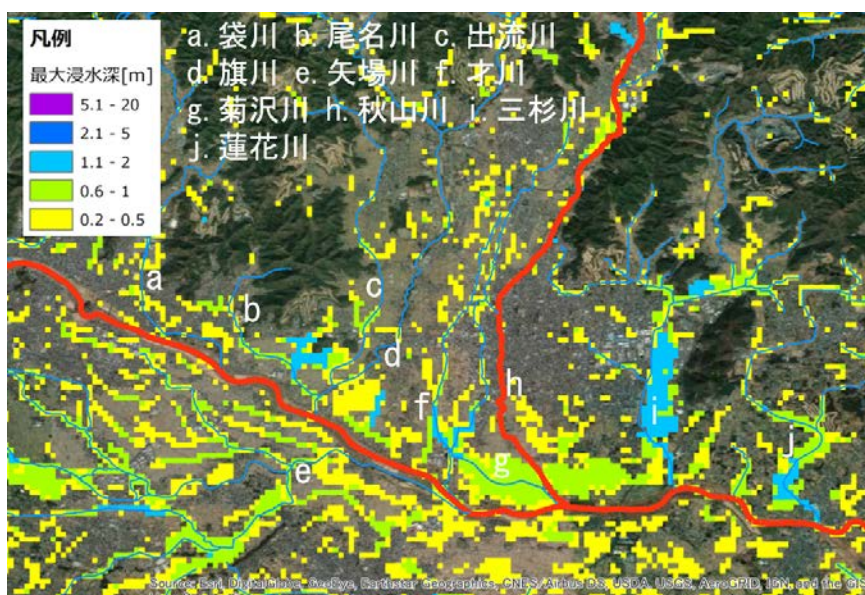


図32 RRIモデルによる渡良瀬川流域の浸水深分布（破堤氾濫は考慮していない）

氾濫管理）として重要なことを，台風19号から学ぶべきレッスンとして再度付け加えたい。

3. 複合災害過程を生む流木

前節までは洪水氾濫としての水流の挙動のみの話題であったが，中山間地域の洪水氾濫災害として，水，土砂，流木による複合的な災害に注目する。

気候変動の影響からも最近の豪雨傾向による洪水流量の増大と相まって，大量の土砂・流木を含む山地洪水としての様相を呈した災害が多発している．なかでも平成29年7月九州北部豪雨では赤谷川，北川などの筑後川右岸流域の多発した斜面崩壊により，洪水が大量の土砂・流木とともに流下，氾濫したことで，土砂による河道埋没，橋梁，家屋の流木集積による流失・破壊が生じ，多くの人的被害をもたらした．この災害を受けて国土交通省では，土砂・流木による被害の危険性が高い全国約700溪流を対象に，土砂・流木捕捉効果の高い透過型砂防堰堤等の整備により土砂・流木の流出を防止するための「緊急点検を踏まえた中小河川緊急治水対策プロジェクト」³¹⁾を実施している．このように流木対策の多くは溪流砂防としてなされているが，今後，豪雨外力の増大化が見込まれる中，洪水流量の増加に伴って土砂・流木の流下，到達範囲も下流河道に拡大するため，土砂・流木の流動堆積を考慮した河川計画の確立が必要と言える．まずは緊急性



図33 H23台風29号による那智川・井関地区の氾濫（文献32に加筆）

を有する被災後の対応としての現場検討も大切であるが，水工学としては，この複合的な災害のプロセス，すなわち，水，土砂，流木の素過程とそれらの相互作用を捉える研究が必要とを感じる．一例を挙げて説明しよう．平成23年台風12号による那智川井関地区の災害調査では，橋梁の流木集積による河道閉塞から上流側河道の河床上昇が生じ，越水氾濫を引き起こしたことが推測されている³²⁾．河道への土砂と流木の供給，これを受けての河道での流下する過程と，橋梁による抵抗増（水，土砂，流木による）がもたらす河床変動，

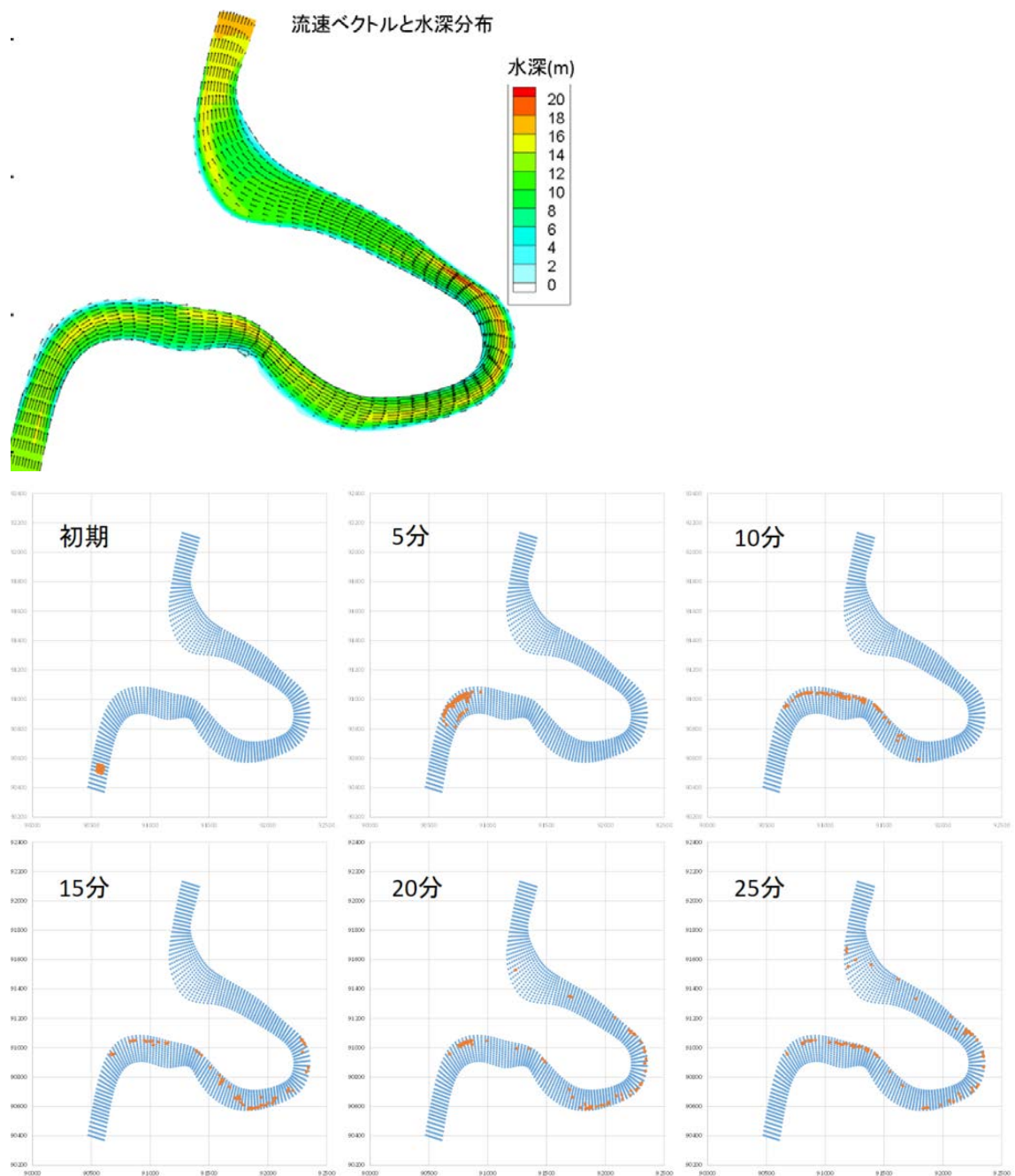


図34 湾曲河道における流木流動の平面2次元解析

それが引き金となって生じる氾濫過程など、頭の中ではイメージしやすいこの現象を水理学的にどれだけきちんと捉えられるであろうか。筆者らは、流木はN個の個別要素（円形）を1列でつなげて構成した棒状体の剛体とし、個別要素についての運動はCundallらの個別要素法を用いて平面2次元的に追跡した^{33), 34)}。流木を構成する各要素が流体からの駆動力および周囲の流木からの接触による作用力を受けて、流木の棒状形状からのずれ（変形による相対位置変化）が生じる。そこで、各要素のずれをKoshizukaに倣い座標修正して棒状に保つ（要素間の相対位置を変化させない）ことで、流木としての運動を追跡する。流れの基礎式は、一般化座標系で記述された平面2次元流解析とし、その運動量輸送式において流木と流体との相対速度によって生じる形状抵抗を導入する。これにより流木の輸送に費やす流体の運動量消費が取り込まれる。図34は湾曲蛇行区間における流木の流動過程を平面2次元流の枠組みで捉えたものである。湾曲部の流況に応じて流木が河岸水際にトラップされる様子が捉えられているが、砂州や河岸形状を流木（個別要素）運動の壁境界とする場合は結構、面倒な処理が必要である。河道での流木流動は水面付近の平面2次元場として扱っても、橋梁

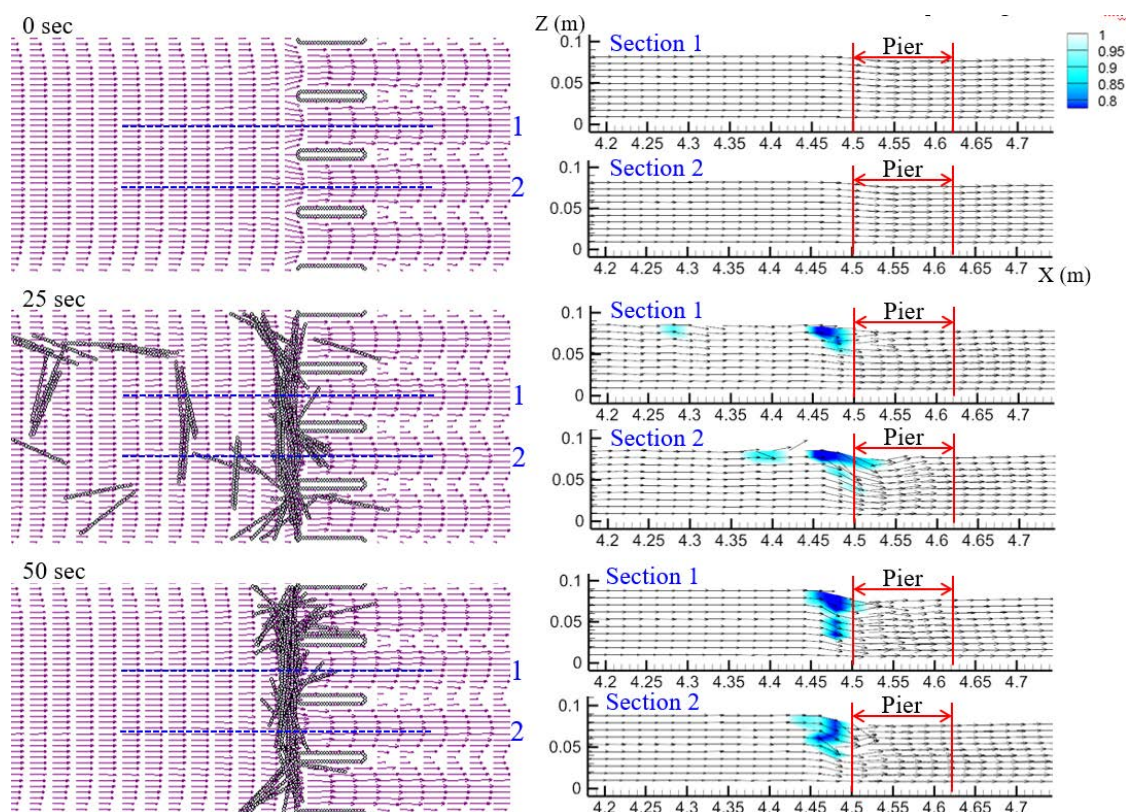


図35 橋脚での流木集積の3次元解析³⁵⁾ (左図は平面図, 右図は鉛直断面図でコンターマップは流体の体積濃度を示す)

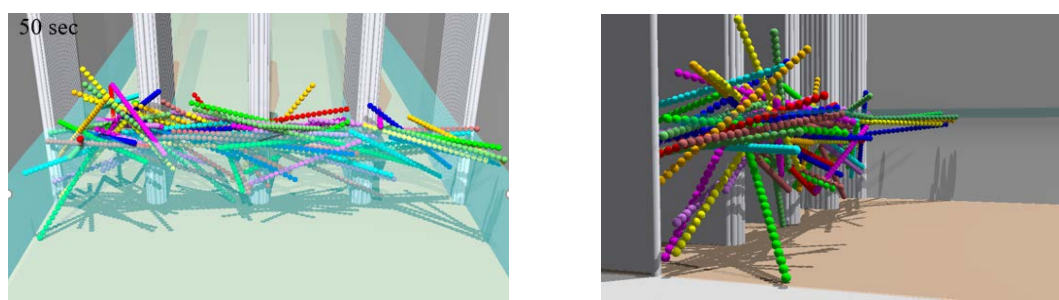


図36 橋脚による流木集積の3次元性 (解析結果)³⁵⁾

での流木集積が進むと流木の潜り込みから、流れも流木も3次元的な挙動となる。言い換えるとやみ雲に3次元解析に走るのではなく、平面2次元と3次元解析の適切な使い分けを検討することが肝要である。図35, 36は、3次元個別要素法による解析（流れは静水圧近似の3次元解析）であり、水理実験（精緻な計測が求められる）との突合せも検討し始めている³⁵⁾。流木の3次元集積は橋脚前面での鉛直下降流を強めて洗堀現象を高める可能性がある。図37は河川構造物周辺の流木集積と洗堀現象を調べた水理実験³⁶⁾で、先に述べた水・土砂・流木の相互作用系の水理現象捉える上で興味深いものである。上流側の堰上げ背水による掃流力低下は下流への供給流砂量の減少をもたらすため、洗堀を助長するかもしれない。災害調査から指摘される典型的な被災現象を、古くから研究されてきた直線水路の橋脚洗堀問題に置き換えても、まだまだ興味深い研究課題はいっぱいありそうで、最近の解析ツールの向上と力学現象としてのモデル化が有機的につながりそうに思う。

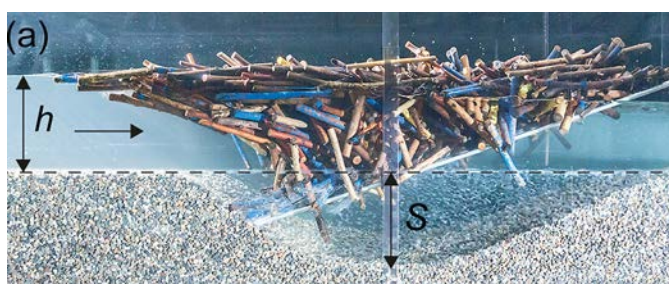


図37 流木集積による洗堀現象 (水理実験)³⁶⁾

での流木集積が進むと流木の潜り込みから、流れも流木も3次元的な挙動となる。言い換えるとやみ雲に3次元解析に走るのではなく、平面2次元と3次元解析の適切な使い分けを検討することが肝要である。図35, 36は、3次元個別要素法による解析（流れは静水圧近似の3次元解析）であり、水理実験（精緻な計測が求められる）との突合せも検討し始めている³⁵⁾。流木の3次元集積は橋脚前面での鉛直下降流を強めて洗堀現象を高める可能性がある。図37は河川構造物周辺の流木集積と洗堀現象を調べた水理実験³⁶⁾で、先に述べた水・土砂・流木の相互作用系の水理現象捉える上で興味深いものである。上流側の堰上げ背水による掃流力低下は下流への供給流砂量の減少をもたらすため、洗堀を助長するかもしれない。災害調査から指摘される典型的な被災現象を、古くから研究されてきた直線水路の橋脚洗堀問題に置き換えても、まだまだ興味深い研究課題はいっぱいありそうで、最近の解析ツールの向上と力学現象としてのモデル化が有機的につながりそうに思う。

4. おわりに

毎年そうであるかは確認していないが、この「水工学に関する夏期研修会」ではその時の水工学委員長が1コマを担当するようで（今回はコロナ禍で1年遅れ）、Aコース総合テーマが「激甚化する豪雨災害に備える河川技術」であることから、それなら「水工学は災害から何を学び、課題を見つけ出し、それにどう向かうか」という思いで書き始めた。しかし、やはり力量不足で巧く行かない。本稿では最近の河川災害から思うこと（2章）に重点を置いた。災害の調査や研究は今後ますます多くなると思うが、多くなる分、筆者ははたから見たいと思っている。しっかり研究するのは大変で、しかも災害直後から続く多忙な対応の中、普段からの付き合いがない地整や事務所にデータを依頼するのは気が引けるし、先方にとっては面倒な話であるかもしれない。他方、付き合いのある場合は、暫定と言いながらも意見を求めることもあって早い段階からデータを見せてくれることもある。しかし、見せてもらうと逆に使えない（公表の難しさ）。だから、誰もがみれる公開資料をベースに、自分で想像するのが良く、これも災害を理解する大切な思考作業だと思っている。そんな気持ちを持って本稿を書いた。

本稿で紹介した検討のうち、RRIモデルによる解析では阿部紫織氏（土木学会水工学委員会台風19号調査団団員、三井共同建設コンサルタント（株））による検討とご指導を頂いた。氾濫流解析では北海道大学教授・清水康行先生が開発されたiRICを活用させて頂き、京都大学防災研究所准教授・佐山敬洋先生が開発されたRRIモデルとともに、災害研究にとって強力な解析ツールであることは言うまでもない。そして、流木の研究は阿南工業高等専門学校の高田健吾准教授が牽引している研究テーマである。高田先生は、さぼっている筆者に対し、時折、研究の刺激と興味を湧き起こしてくれる。そのことにも改めて感謝したい。

参考・引用文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会，気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会：第1回配付資料，資料6，令和元年11月22日。
- 2) 社会資本整備審議会河川分科会，気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会：第2回配付資料，資料1-2，令和2年1月17日。
- 3) 国交省中部地方整備局：高梁川水系河川整備計画（国管理区間），平成22年10月。
- 4) 社会資本整備審議会河川分科会事業評価小委員会：高梁川直轄河川改修事業（小田川合流点付替え），平成26年度予算に係る河川事業の新規事業採択時評価，資料2-2（平成26年3月12日）
- 5) 国交省関東地方整備局：利根川水系鬼怒川河川整備計画（大臣管理区間），平成28年2月。
- 6) 国交省北陸地方整備局：第2回千曲川堤防調査委員会資料，令和元年11月13日。
- 7) 国交省北陸地方整備局：信濃川水系河川整備計画，平成27年1月。
- 8) 国交省北陸地方整備局：信濃川水系河川整備計画，第1回学識者会議，上流部会，資料－7，千曲川・犀川の現状と課題，平成20年9月30日。
- 9) 社会資本整備審議会河川分科会小委員会：第2回気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会配布資料，資料1-2，令和2年2月13日）。
- 10) 国交省北陸地方整備局：信濃川水系（千曲川）緊急治水対策プロジェクト，長沼地区住民説明会配布資料，令和3年4月24日。
- 11) 国交省・令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会，同報告書，令和2年8月。
- 12) 国交省・関東地方整備局：第4回鬼怒川堤防調査委員会，委員会報告書，平成28年3月7日。
- 13) 国交省・大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会：「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について」答申，平成27年12月。
- 14) 社会資本整備審議会河川分科会：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換，答申，令和2年7月

- 15) 国交省・大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会：県管理河川を含めた決壊要因や特徴の分析，第1回技術検討，資料2-3，令和2年2月14日。
- 16) 阿部紫織，清水義彦，浅沼順，佐山敬洋：令和元年台風19号による利根川上流域の洪水外力の推定と治水課題の考察，河川技術論文集，第26巻，71-76，2020.6。
- 17) Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka, Kazuhiko Fukami: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), pp. 298-312, 2012.2.
- 18) 近者敦彦，中村要介，阿部紫織，佐山敬洋，若月泰孝：平成27年9月関東・東北豪雨における鬼怒川上流ダムによる洪水調節効果の分析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74, No.4, pp. I_1507-I_1512, 2018.
- 19) 山崎大，富樫冨佳，竹島滉，佐山敬洋：日本全域高解像度の表面流向データ整備，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75, No.5, pp. I_163-I_168, 2018.
- 20) 国交省関東地方整備局：記者発表資料 令和元年台風19号におけるハッ場ダムの試験湛水状況について（令和元年10月13日発表），https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000757984.pdf
- 21) 国交省関東地方整備局利根川上流河川事務所：令和元年東日本台風による出水速報(第2報)，令和2年3月16日，https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000770371.pdf
- 22) 国交省関東地方整備局：利根川水系利根川・江戸川河川整備計画(令和2年3月)。
- 23) 国交省関東地方整備局：H23利根川上流部治水検討業務（ダム検証編）報告書，平成24年3月。
- 24) 国交省関東地方整備局：令和元年10月台風19号出水速報（第3報），令和元年11月6日。
- 25) 中島享也・藤井裕己・清水義彦：中小河川の氾濫流挙動を踏まえた流域管理に関する一考察，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，講演概要集DVD，II-136，2020.9。
- 26) 栃木県：利根川水系渡良瀬川上流圏域，河川整備計画（第3回変更），令和2年10月。
- 27) 栃木市：台風19号による市内の被害情報，2020年3月13日更新，<https://www.city.tochigi.lg.jp/soshiki/12/20496.html>
- 28) 栃木県：利根川水系巴波川圏域，河川整備計画（変更），平成29年8月。
- 29) 栃木市：栃木市防災ハザードマップ，2019年7月2日更新，<https://www.city.tochigi.lg.jp/soshiki/12/15881.html>
- 30) 佐山敬洋：栃木県の中小河川と阿武隈川上流域の堤防および氾濫調査，令和元年台風19号豪雨災害調査団報告書，p.510，土木学会水工学委員会，2020年9月。
- 31) 国土交通省：緊急点検を踏まえた中小河川緊急治水対策プロジェクト，https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000933.html
- 32) 木下篤彦他：流木の挙動と巨礫による河床上昇に着目した、平成23年台風第12号による那智川流域井関地区の氾濫メカニズムの検討，2018年度河川技術に関するシンポジウムOPS2 https://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/system/files/2018_OPS2_01.pdf
- 33) 清水義彦，長田健吾，高梨智子：個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析，水工学論文集，第50巻，787-792，2006年2月，<https://doi.org/10.2208/prohe.50.787>
- 34) 清水義彦，長田健吾：流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験，水工学論文集，第51巻，829-834，2007年2月，<https://doi.org/10.2208/prohe.51.829>
- 35) K.Osada, Y.Shimizu, R.Ettema, E.Enkhtur: A numerical method for simulating 3-D accumulation of woody debris at bridge piers, Proceedings of 10th Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2020, 1666-1675, 2020.
- 36) Isabella Schalko :Wood retention at inclined racks: Effects on flow and local bedload processes, Earth Surf. Process. Landforms 45, 2036- 2047 (2020).