

激甚化する水災害に対する取組

— 寒地土木研究所が進める研究開発 —

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 上席研究員

前 田 俊 一

1. はじめに

平成 27 年の関東・東北豪雨、平成 28 年の北海道・東北豪雨、平成 29 年の九州北部豪雨、平成 30 年の西日本豪雨、そして令和元年の台風第 19 号による豪雨と、近年、気候変動の影響とも考えられる深刻な水災害が頻発している。これに対して土木研究所では、平成 28 年度から令和 3 年度までの第 4 期中長期計画において、「安全・安心な社会の実現への貢献」という目標の下、「近年顕在化・極端化してきた水災害に対する防災施設設計技術の開発」や「国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発」等の研究開発プログラムを推進している。ここでは、上記の研究開発プログラムの中から、寒地土木研究所が実施している河川関係の 3 つの研究課題を紹介する。

2. 破堤被害を最小化するための破堤氾濫流量の軽減技術に関する研究

(1) 研究の背景

1. で述べた水災害の激甚化により、堤防決壊が今後増加することが懸念されるため、本研究では、①堤防決壊後に河川水が堤内地に流入している状況下で決壊口を早期に締め切る技術の開発、②越水から堤防決壊までの進行速度を抑制する技術の開発、を行うこととしている。ここでは、特に、①に関する現時点の成果を紹介する。

(2) 河道特性に応じた決壊口の拡幅現象の分類

堤防決壊後の決壊口は、例えば、上下流のどちらかの方向への拡幅が卓越したり、非常に深掘れしたものが見られる等、様々なタイプがある。想定される決壊箇所での決壊口の拡幅現象がある程度予想できれば、効率的な締切方法を事前に検

討することが可能となるので、水理模型実験と数値計算により、河道特性（川幅、河床勾配）に応じた決壊口の拡幅現象の分類を行った（図－1）。以下に、決壊した瞬間の河道内の水深が同じであった場合の、分類ごとの特徴および特徴を考慮した締切工事の要点等を記載する。

①川幅が狭い場合

決壊による河川水位の低下が生じやすく、決壊口の拡幅は進行しにくい。上流域での決壊の場合には洪水継続時間が短い傾向にあるため、氾濫被害軽減のためには締切工事への迅速な着手が重要である。

②川幅が広い場合

決壊による河川水位の低下が生じにくく、決壊口での堤内外水位差が大きくなるので、決壊口の拡幅が継続して決壊幅は大きくなる。氾濫流量も大きいため締切工事による減災効果が発揮されやすい。

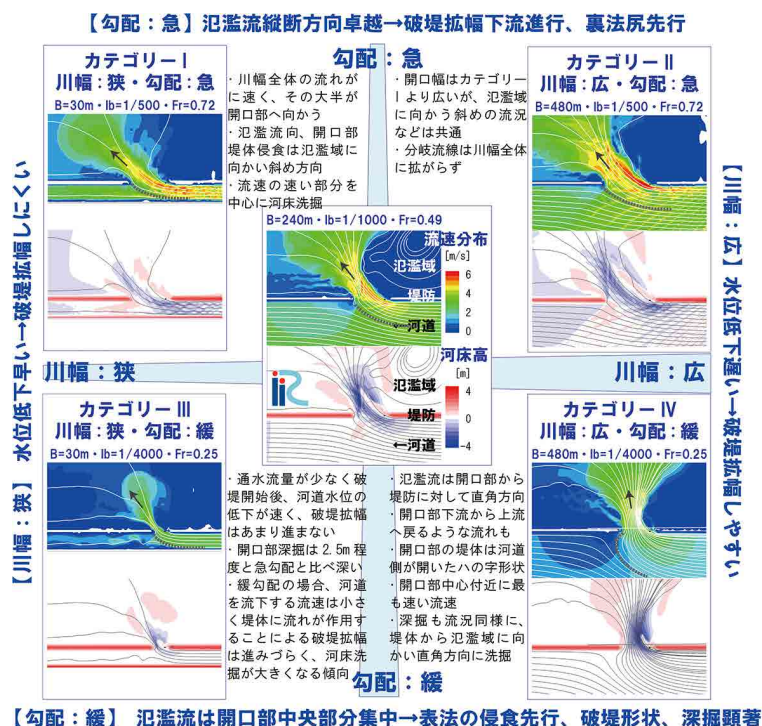
河床勾配が急な場合には決壊口内の流速が大きくなるので、投入資材の流出防止等の工夫が必要である。

③河床勾配が急な場合

決壊口内の流速が大きく、氾濫流の流向は斜め下流方向となり、下流側への決壊口の拡幅が卓越する。決壊口の下流側での欠口止工を最優先で行い、可能であれば漸縮工も引き続き行う。氾濫流が比較的穏やかな決壊口の上流側では施工条件が厳しくないため漸縮工を効率的に進めることができる。

④河床勾配が緩い場合

堤防法線に対して概ね直角方向に氾濫する流況となり、決壊口中央では流速が大きく、深掘れが生じる傾向がある。決壊口の両側からの漸縮工が効果的であるが、深掘れ箇所では多くの投入資材が必要となる。



図－1 河道特性に応じた決壊口の拡幅現象の分類

(3) 締切資材投入の効率化に向けた実験

近年の北海道内での緊急締切工事の事例を調査したところ、全事例で工事の初期段階では締切資材の投入にクレーンではなくバックホウを用いていた。そこで、バックホウを使用して決壊口と想定した箇所に複数の方法でブロックを投入し、各投入方法の作業効率を計測した(図-2)。ブロックの投入は図-3に示す方法を組み合わせた4ケースとした。ケース1・2では一般的なワイヤーロープを用いて玉掛けを行い、玉外しは決壊口付近の堤防天端で人手により行った。投入はバケットでブロックを決壊口方向に押し出して行ったが、ケース1では1個ずつ押し出し、ケース2では運搬重機に積載した全てのブロック(10 t ダンプトラックの場合は3個)を決壊口付近の堤防天端に並べた後に連続して押し出した。ケース3・4ではオートフック(吊り荷が着地すると自動的に玉掛けしたワイヤーが外れるもの)を用いた。玉外しの際に作業員が決壊口に近付く必要がないため、施工の安全性向上が期待できる。ケース3ではケース1と同様にブロックをバケットで決壊口方向に押し出し、

ケース4ではブロックを決壊口斜面部に直接着地させることで決壊口への直接投入を可能にして作業効率の向上を期待した。

図-4にブロック1個当たりの平均投入時間を示す。基本となるケース1は110秒/個、連続投入したケース2は103秒/個で、まとめて投入することで7秒程度の短縮となった。オートフックを用いた場合は、ケース1と比べると、押し出しであるケース3は128秒/個と20秒程度の延長、直接投入であるケース4は99秒/個と10秒程度の短縮となり、想定どおりの大幅な短縮とはならなかった。これは玉掛けに要する時間がワイヤーロープに比べて30秒程度長くなったため、オートフックを用いた玉掛け作業の訓練等による作業効率の向上の余地がある。また、ケース4では、投入済みの積み上がったブロックと投入したばかりブロックの間にワイヤーが絡まるがあった。このような絡まりは復旧作業の遅延のみならず、重機転倒などの危険性もあるため、オートフックによる直接投入では、ブロックの着地位置を意識した作業が必要である。どの投入方法を採用するかは、実際の現場条件次第で

はあるが、バックホウによるブロックの投入には現状で2分/個程度の時間がかかることがわかった。

3. 高流速下の水流・水面波・掃流砂による構造物の安定性評価と維持管理技術の開発

(1) 研究の背景

高流速条件下で発生する三角波(写真-1)にどのような河川管理上のリスクがあるのかは明らかとなっていない。これは、三角波の発生条件が不明であるため、洪水中の三角波の観測が困難であり、三角波の実態解明が進んでいないためと考えられる。これまでに見られた三角波の中には波高が2~3 mと水深スケールまで発達するものもあり²⁾、河川構造物の被災要因の一つである可能性は否定できない。また、気候変動により、高速流の発生する大きな出水が増加すれば、三角波の発生頻度も増加して構造物の被災も増える可能性がある。そこで、本研究では、①三角波の発生する水理条件を明らかにすること、②三角波が構造物に及ぼす影響を評価する技術を開発すること、③三角波発生時の構造物の被災防止技術

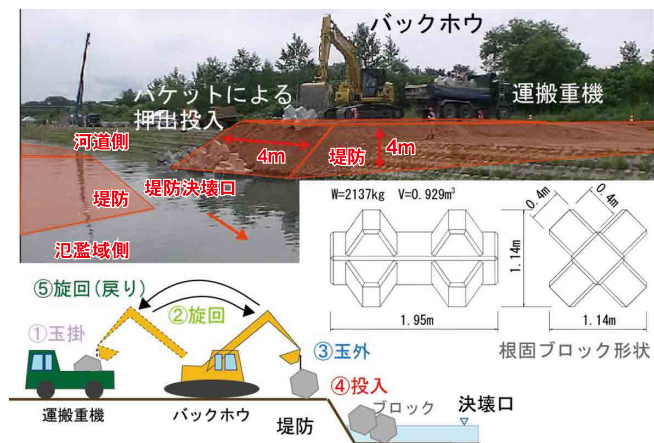


図-2 投入実験の概要と用いたブロック



図-3 投入実験の状況

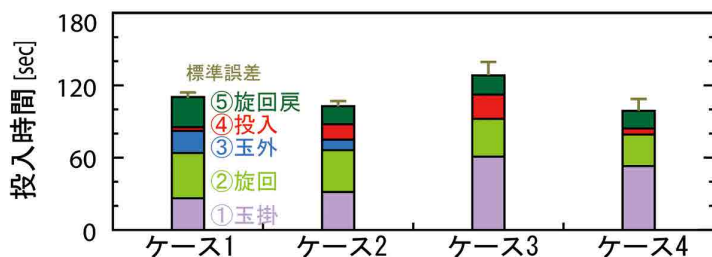


図-4 ブロック投入平均時間(1個当たり)



写真-1 三角波(昭和56年8月洪水 豊平川)¹⁾

を開発すること、④三角波の発生を再現できる数値解析モデルを開発すること、を目的としている。ここでは、特に、①および②に関する現時点の成果を紹介する。

(2) 三角波の発生条件に関する実験

フルード数、無次元掃流力、水路幅・水深比等のパラメータを幅広く網羅するようにして、水路幅、水路勾配、粒径、流量を変化させて、全27ケースの移動床の水理実験を実施した。その内、12ケースで三角波が発生し、この12ケースでは小規模な河床波の発生が確認された。写真-2に観測された三角波の例を示す。水路中央の水面が三角状に発達して縦断方向に列を成して発生する場合(写真-2左)だけでなく、横断方向に複数の列を成して発生するケース(写真-2右)も確認された。従来、三角波は低水路の中央付近で発生すると考えられてきたが、

この結果は三角波が低水護岸の近傍等を含めた河道内のより広い範囲で同時に発生する可能性を示唆している。

次に、三角波の発生条件について検討するために、芦田・道上³⁾が示した小規模河床形態の分類図に本実験で得られたデータをプロットした(図-5)。この図より、三角波が発生した全ケースはUpper regimeに分類されることがわかる。一方、Transition領域に位置するケースでは三角波は非発生であった。水面波と河床波が同位相であったことも考慮すると、観測された河床波は反砂碓であったと考えられ、三角波の発生には反砂碓が重要な役割を担っていることがわかる。また同図より、Upper regimeに分類されたケースでも水深・粒径比が小さい場合には、三角波は非発生になりやすい傾向が見て取れる。次に、フルード数と無次元掃流力を両軸に取り三角波の発生・非発生の関係を見たものを図-6に示す。

この図より、フルード数が概ね1以下のケースでは三角波は発生していないことがわかる。これらの非発生のケースは、図-5のTransition領域に位置するケースである。また、無次元掃流力が小さいケース、もしくはフルード数が比較的大きいケースでは、三角波は非発生となるケースが多いこともわかる。なお、図-6にA川とB川のデータがプロットされているが、これらは北海道内の2つの急流河川における生起確率ごとの高水流量を算出してプロットしたものである。生起確率が10分の1～20分の1程度以上の大きな洪水が発生すると、三角波の発生領域に入ってくることがわかる。このため、気候変動によって豪雨がこれまでも頻りに発生するようになれば、三角波もそれに応じてより頻りに発生することになる。

(3) 三角波の発生が構造物の安定性に及ぼす影響

「護岸の力学設計法」⁴⁾では、根固めブロックの一部が流体力により滑動・転動して移動する場合の限界流速を、ブロックに作用する抗力、揚力、重力、摩擦力の釣り合いやこれらの力のモーメントの釣り合いから導いており、ブロックが移動しないための必要重量は、ブロックに作用する流速の6乗に比例するとしている。実際には、想定する外力(流量)と河道条件から水理計算によって流速を算定してブロックに必要な重量を求めることで、ブロックの力学的安定性を照査する。また、水理計算で考慮できない要素、例えば湾曲や砂州による流れの偏流の影響などは、作用流速に対して割り増し係数などを別途かけることで対応する。しかしながら、この設計法では、三角波の影響は考慮されていない。三角波が発生すれば、水面と河床の変動によって、局所的に強い高流速が生じて、構造物に対して瞬間的に大きな流体力が作用することで、被災の要因となり得ることは容易に想像できる。そこで、三角波が発生する流れ場が護岸等のブロックの安定性に及ぼす影響を把握する実験を行った。また、三角波発生時の流況を詳細に計測し、流況とブロックの安定性との関係を検討した。

① 三角波発生時のブロックの安定性に関する実験

実験で用いるブロックの模型は、形状を単純化した直方体の平型とし、形が相



写真-2 実験で観測された三角波(左：中央に1列の波、右：横断方向に3列の波)

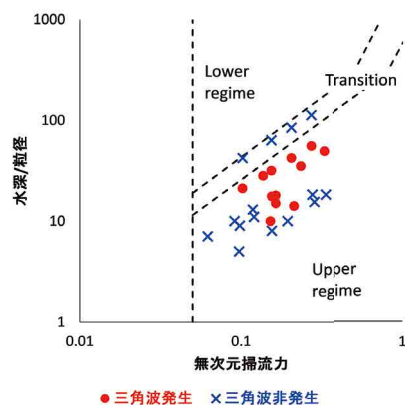


図-5 本実験結果と小規模河床波領域区分図⁴⁾との関係

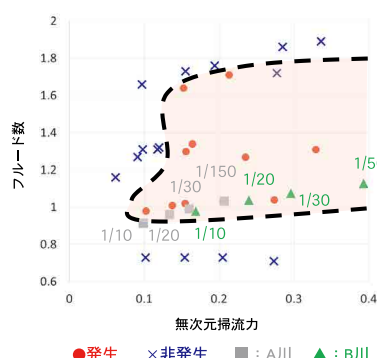
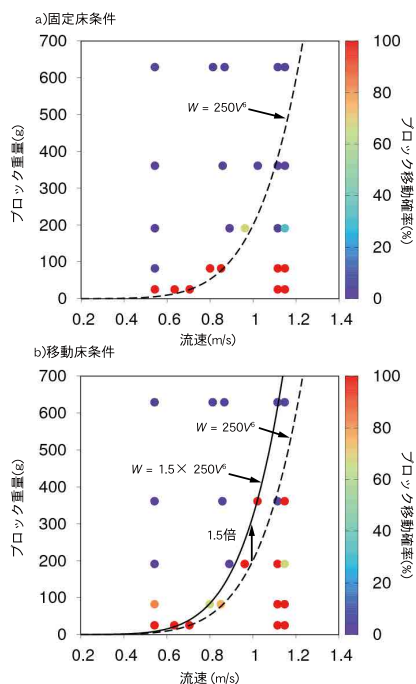


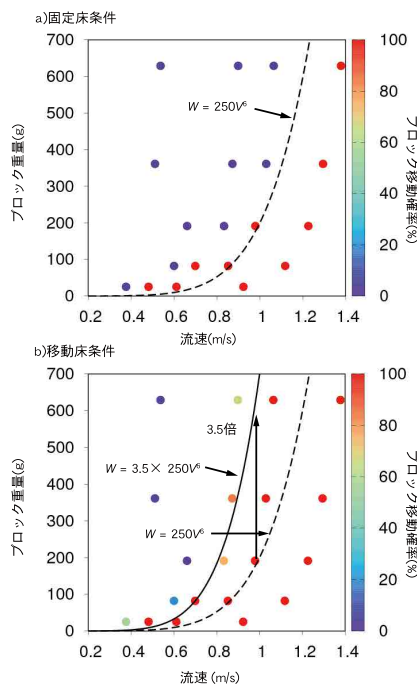
図-6 本実験結果とフルード数、無次元掃流力との関係



図－7 三角波非発生条件におけるブロック移動確率と流速－ブロック重量の関係

似で大きさの異なる5種類の模型を用意した。三角波が発生する水理条件でも平坦固定床では三角波が発生しない性質を利用し、三角波が発生する水理条件での平坦固定床と比べて、三角波が発生する水理条件での移動床ではブロックの安定性が低下するのかどうか、また低下する場合、どの程度ブロックが移動しやすくなるのかに着目した実験を行った。なお、三角波が発生しない水理条件でも実験を行った。

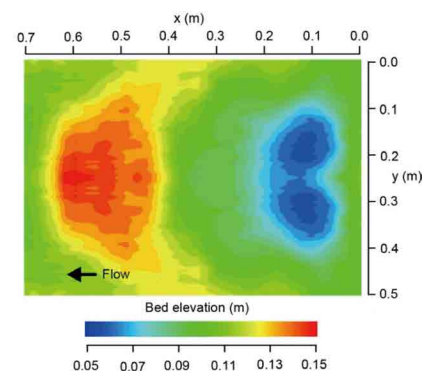
実験結果を図－7、8に示す。固定床では、三角波の発生条件を満たしているかどうかにかかわらず、ブロックの移動と停止の境界は、図中に点線で示した流速の6乗に比例する曲線で概ね表現できることがわかる。一方で、移動床では上記と同じ点線の曲線では移動と停止の境界を十分には表現できず、境界を示す線は実線の曲線で示したものとなる。図－7の三角波が発生しない条件では、点線と実線のずれは比較的小さい。一方で図－8の三角波が発生する条件では、2つの線には大きなずれがあり、移動床でブロックの移動を防ぐには固定床よりも3.5倍のブロック重量が必要ことがわかる。本結果は、三角波が発生する場では、護岸等のブロックの必要重量が顕著に増加することを示唆している。



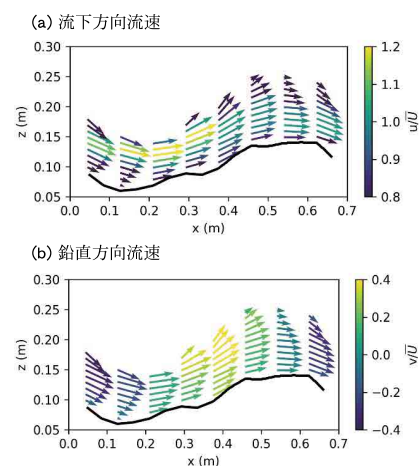
図－8 三角波発生条件におけるブロック移動確率と流速－ブロック重量の関係

②三角波発生時の流況測定（ブロックの不安定化要因の解明）⁵⁾

①の実験により三角波発生時にはブロックが移動しやすくなることが明らかとなったので、その要因解明のために、三角波発生時の流況を詳細に計測した。実験では、まず、移動床で三角波を発生させた上で反砂堆の形状を計測し（図－9）、その計測データをもとに反砂堆形状を模した固定床を作成した。その後、移動床と同じ流量を固定床水路に流して、反砂堆上に発生する三角波の形状と内部流況を詳細に計測した。図－10に反砂堆の中央での流下方向および鉛直方向の局所流速と平均流速（平坦河床での流下方向の平均流速）の比を示す。この平均流速が「護岸の力学設計法」⁴⁾における護岸の必要重量算定で用いられる代表流速に相当するとともに、図－10(a)に示した $u/\bar{u}$ の最大値 (1.2) が割り増し係数であるとするれば、反砂堆形成時のブロックの必要重量は平坦河床に比べて約3倍 ($1.2^6=2.986$) となる。これは、①の実験に対して約15%の過小評価となるが、過小評価の要因としては、流速の時間変動や上昇流の影響（図－10(b)の $v/\bar{u}$ ）が考えられる。今後、これらの要因をブロックの必要重量算定にどう反映させるかが次の課題となる。



図－9 反砂堆の河床形状



図－10 局所流速と平均流速の比

4. 3D 浸水ハザードマップ作成技術に関する研究

(1) 研究の背景

激甚化する水災害に対するソフト対策としてハザードマップ（以降、HMと記載）の活用が推奨されており、全国の自治体でHMの作成が進んでいる。しかし、平成22年に内閣府がまとめた「防災に関する特別世論調査」⁶⁾によると、約7割の市民がHMを確認していないという結果が出ている。国土交通省では、平成27年の関東・東北豪雨の際にHMが避難行動に結びつかない事態が多数発生したことを受けて、「水害ハザードマップ作成の手引き」⁷⁾を改定し、水害時の住民避難にHMが有効活用されるように、単にHMを配布するだけでなく、インターネットで公表したり、説明会・ワークショップを開催する等して、HMの理解促進に努めることが重要である旨を自治体に周知した。しかしながら、岡山県倉敷市の真備町では、HMの全戸配布に加えて出前講座等の開催によりHMの理解・活用の促進に努めていたが、平成30年の



図－11 札幌駅周辺の浸水状況（鳥瞰図）



図－12 札幌市中島公園付近の浸水状況

西日本豪雨では、実際の浸水域がHMとほぼ同じであったにもかかわらず、51名が犠牲となった。

一般的に洪水用のHMは事前に浸水深、避難場所、避難ルートを確認しておくことを前提としているが、例えば、外国人を含めた旅行者に事前の確認を期待することは難しく、仮に旅行者が事前に確認しようとしても土地勘が無い上に凡例などの理解にも時間を要すると思われるため、十分に理解できるのか疑わしい。このため、HMをよりわかりやすく、住民目線のものへと転換するための研究開発が進められている。例えば、国土交通省はWeb地図を用いた「重ねるハザードマップ」⁸⁾の提供を始めている。

（2）3D浸水ハザードマップの概要

本研究は、浸水リスクの情報や避難場所等の情報を、その地域を初めて訪れた方にもわかりやすく伝えることのできるHMを提案することを目的としており、具体的には、Google社のGoogle EarthおよびStreet Viewを活用したHM（以降、3D浸水HMと記載）の提案を行っている。Google EarthおよびStreet Viewを活用する理由は、地形や建物、街並み等の3次元モデルが整備されており、平面的な眺め、鳥瞰的な眺めおよび街角からの眺めを任意の角度で見ることができる上に、

これらの情報を無料で利用できるからである。無料で利用できるため、自治体が安価に3D浸水HMを作成することが可能となる。なお、田中らが開発したStreet View上の仮想現実空間に浸水深を投影する技術⁹⁾を用いて研究を進めている。

大まかな3D浸水HMの作成手順は、①浸水想定区域図を作成するために実施された氾濫計算の結果（浸水深のデータ）を河川管理者から入手し、②Google Earthに投影するために計算結果の座標を緯度経度に変換し、③座標変換された浸水深のデータからKMLファイル（またはKMLファイルを圧縮したKMZファイル）を作成する、という流れになっている。KMLファイルは、電子地図を制御することができ、例えば、Google Earthの地表面を指定の角度で眺めたり、特定の地点に記号や文字、ポリゴン等を表示することができる。3D浸水HMのKMLファイルには、浸水深のデータから作成した3次元ポリゴンのデータが格納されており、このポリゴンのデータにより、Google EarthおよびStreet View上で浸水状況が表示される仕組みとなっている。

実際に3D浸水HMを使用する際には、Google Earthがインストールされたコンピュータ（またはスマートフォン）上でKMLファイルをダブルクリックすると、Google Earthが自動的に起動してKML

ファイルの内容にしたがって上空から見た地表の浸水状況が表示される。また、画面表示をStreet Viewに切り替えれば、地上から見た街角の景色に浸水面を表示することも可能である。さらに、スマートフォンの位置情報をONにすれば、自身の現在地周辺の浸水状況も容易にわかる。

ここでは、札幌市中心部の浸水状況の表示例を示す（図－11、12 ©2018Google、©2018ZENRIN）。リアリティのある画像であるため、子供や外国人でも浸水深を直感的に把握することが可能である。

5. おわりに

紹介した3つの研究は、いずれも現時点で予定している研究期間の6～7割が経過しているに過ぎず、今後も研究成果の最大化および社会実装に向けて研究を精力的に進めていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 北海道開発局札幌開発建設部：石狩川流域誌、2010。
- 2) 山口甲：日本一の急流都市河川 豊平川、（一助）河川環境管理財団北海道事務所、2005。
- 3) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、Vol. 195、1971。
- 4) 国土開発技術研究センター編：改訂護岸の力学設計法、山海堂、2007。
- 5) 井上卓也、岩崎理樹、矢部浩規：三角波形成時の河床・水面形状と内部流況の計測、土木学会論文集B1(水工学)、Vol. 75、No. 2、I_451-I_456、2019。
- 6) 内閣府政府広報室：防災に関する特別世論調査、2010.1
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局：水害ハザードマップ作成の手引き、2016.4
- 8) 国土交通省：重ねるハザードマップ <https://disaportal.gsi.go.jp/maps/>
- 9) 田中甫幸、井上卓也、清水康行：KMLを用いた氾濫計算可視化の高度化、土木学会論文集B1(水工学)、Vol. 73、No. 4、I_331-I_336、2017。