16.富山県河川を対象としたグリーンインフラ関連適応策による洪水被害軽減効果の定量評価

藤下　龍澄[1]・呉　修一[2]*

[1]学生会員 富山県立大学大学院工学研究科環境・社会基盤工学専攻（〒939-0398 富山県射水市黒河 5380）

[2]正会員　富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科（〒939-0398 富山県射水市黒河 5380）

＊ E-mail: kure@pu-toyama.co.jp

本研究では，河道内植生伐採や田んぼダムの実施，GIの活用，森林保全管理の4つの適応策を洪水氾濫解析および被害額の算定を通じて評価し，対象流域において有効な適応策を検討した．結果として小矢部川では河道内植生伐採，田んぼダムの施工によって顕著な浸水深の低減が見られ，それに伴いそれぞれ平均10.2%，15.3%の被害額軽減率が得られた.神通川では河道内植生伐採，田んぼダムの施工，森林保全管理においてそれぞれ平均4.6%，4.1%，3.8%の被害額軽減率が得られ，多少の氾濫リスクの低減に寄与することが分かった.庄川に関しては考慮した適応策においては平均0.2%～1.3%程度の僅かな軽減効果しか得られなかったため，グレーインフラの利用などの新たな適応策評価を行っていく必要がある．

Key Words : *global warming, forest conservation management, green infrastructure, vegetation cutting, paddy field dam*

1. はじめに

地球温暖化による豪雨は，侵食や氾濫による洪水リスクを増加させる要因の一つであり，地球温暖化に対する適応・緩和策が必要となる．

しかしながら有効な対策は地域の地形や気候，土壌等の特性によって異なるため，その流域に適した適応策を考慮する必要がある．阪本・押川[1)]らは令和元年8月豪雨と将来降雨を対象に，佐賀県にある嘉瀬川流域の浸水被害特性と既存のインフラ設備を有効利用する適応策を評価している．小河原・田浦ら[2)]は東京都杉並区を流れる一級河川，荒川水系善福治川を対象にGI(グリーンインフラ)を導入した場合のマンホール越水量およびCSOの抑制効果を検証している．この研究では流域における建物や前庭などの流出パラメータを変更し，流出抑制効果の算定を行うことで，建物や前庭，道路へのGIの導入によって30%を超える流出抑制効果が得られている．これらの既往研究のように適応策は地域の特色や土地利用によって様々な方法で考えられている．しかしながら流域内で様々な適応策を考慮し，適応策効果を比較している研究は少なく，富山県を対象とした適応策評価は菊地ら[3)]の研究のみで行われている．

そこで本研究では，富山県の一級河川である小矢部川，庄川，神通川を対象に適応策実施前後の洪水氾濫解析および洪水被害額の算定を行った．本研究で考慮した適応策は河道内植生伐採や田んぼダムの実施，GIの活用，森林保全管理の4つとなる．これらの適応策は富山県の特徴である平野部に水田が多く分布している点や立山連峰と呼ばれる3000m級の山々に囲まれている点，河道内に植生が繁茂している点と相性がよく，洪水被害の軽減に効果的であると考えられる．

2. 対象流域

本研究では，富山，岐阜にまたがる一級河川の小矢部川・庄川・神通川の3河川を対象とする（図-1）．流域面積は小矢部川が667 km2，庄川が1,189 km2，神通川が2,720 km2である．対象河川は急勾配であり，富山の河川の特徴として日本屈指の急流河川であることが挙げられる．急流のため河川水が集中し，砂州の固定化，植生繁茂が見られる箇所が多く存在する．図-1に示す土地利用を見ると，平野部では水田の広がりが確認され，水田割合が小矢部川流域で33%，神通川流域で10%と，この2流

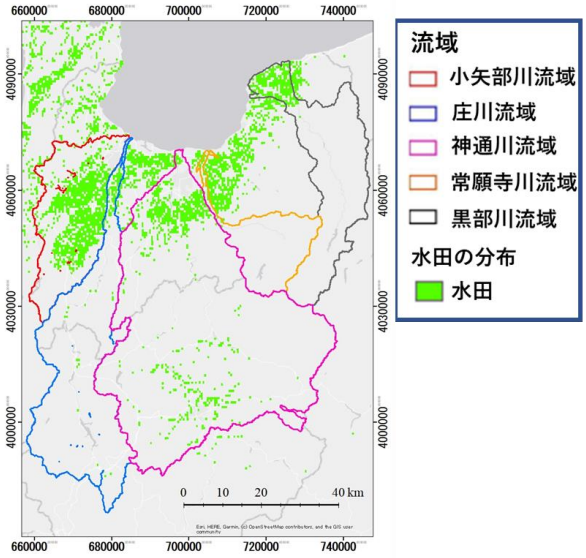


図-1　対象流域および水田の土地利用分布

域では田んぼダムによる貯留効果が期待される．

3. 研究手法

本研究では，d4PDF [注1)](地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース)からバイアス補正を施した将来の流量データを使用し，洪水氾濫解析を行い将来の洪水規模の変化を評価する．以下に洪水氾濫解析の概要と各種適応策の評価方法，洪水氾濫解析を通じた直接被害額の算定手法について述べる．

(1) 洪水氾濫解析の概要

a) 降雨流出計算の概要

本研究では，降雨流出モデルに土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を適用した [4]．また，河道部の洪水追跡計算には，一次元不定流計算を用いた．降雨流出計算では，式(1)の表面流，式(2)の中間流を考慮して計算を行っている．

$$\frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s}(r(t) - q_0 - q_s) \qquad (1)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^{\beta}(q_0 - q_*) \qquad (2)$$

ここに，q_0：鉛直浸透流 [mm/h]，q_s：表面流に関する流出高 [mm/h]，q_*：中間流に関する流出高 [mm/h]，a_0, a_s, β_s, β：流出パラメータである．河道部における 1 次元不定流計算には，以下の式(3), (4)を用いている．

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \qquad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\,(uQ)}{\partial x} = gA\frac{\partial\,(h+z)}{\partial x} - \frac{gn^2|Q|Q}{R^{\frac{4}{3}}A} \qquad (4)$$

ここに，A：流積 [m²]，R：径深 [m]，Q：流量 [m³/s]，q_l：側方流入量 [m²/s]，u：流速 [m/s]，h：水深[m]，z：標高[m]，n：マニングの粗度係数である．また河川横断面データは，国土交通省北陸地方整備局のデータを大臣管理区間で使用している．それより上流の横断面データのない区間では降雨流出計算で算定された洪水流量を十分に流下できる河川幅・堤防高を仮想的に設定している．高水敷の粗度係数には国交省より提供していただいた粗度係数を利用した．また将来の土地利用はYoshikawa [5)]らの「環境研究総合推進費2-1805成果（日本版SSP別土地利用シナリオ）」を使用した． このデータは将来の土地利用割合を人口動態から推定したものである． 本研究ではRCP8.5でSSP5シナリオの2050年データを使用した．

b) 対象河川流量の選定

本研究では，4℃上昇実験から，超過確率 0.1（1000 年確率）に相当する低頻度のイベントを抽出し，解析対象とした．このような低頻度の外力を対象とする理由として，想定される最大規模の流量では、水平避難が必要な範囲が大幅に広がる可能性が示されているため，流量を少しでも抑えることで避難に必要な時間などを確保することが極めて重要と考えるからである．

c) 洪水氾濫解析の概要

著者らのグループが従来から使用している 2 次元不定流計算を行う [6)]．堤内地の標高データは，水文補正標高データ [7)]の 30 m メッシュ標高データを使用する．家屋の影響を考慮するために堤内地の粗度係数は今井ら [8)]の式を用い，家屋格子に粗度係数を与える．堤防破堤地点は，被害額が最大となるような箇所を選定した．堤防破堤幅は急流河川の洪水想定区域図作成マニュアル[注2)]に従い，堤防破堤箇所の河川幅とした． また，破堤開始水位はピーク水位に達した際に，破堤するものとする．

(2) 各種適応策の評価手法

地球温暖化適応策として，河道内植生伐採および田んぼダム，GI の活用，森林保全管理の 4 つを評価する．

a) 河道内植生伐採の影響評価概要

河道内植生伐採の評価の流れとして植生が繁茂している状態は国交省より提供していただいた粗度係数を使用し，植生伐採が行われた状態は高水敷の粗度係数を一律 0.03 に低下させることで伐採を表現した．これは現実の河川管理では，河川全体の高水敷の樹木・草本類を伐採することを意味し，0.03 という値は高さを 20～40 cm 程度[注2)]まで伐採した状況を想定している．またさらに植生を伐採したケースとして高水敷の粗度係数を 0.02 に設定した解析を行った．

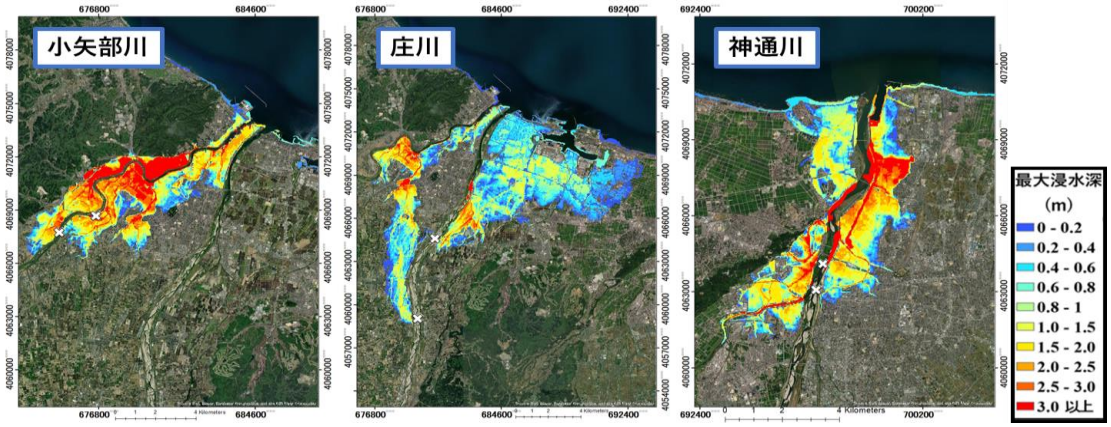


図-2　適応策実施前の最大浸水深

b) 田んぼダムの影響評価概要

本研究では Chai ら[9]の一次元田んぼモデルを使用した．本モデルの詳細については当該研究[59]を参照されたい．Chai ら[9]の設定で重要な点として，田んぼの畦畔高は本研究では考慮しておらず，田んぼ内水位が畦畔高を超えて越水する現象は考慮できない．よって，畦畔高を 0.5 m と高く設定して越流が生じないよう計算している．また田んぼ内の初期水位は 0 として計算した．また田んぼダムの実施率を 50%ととし，流域内にある水田の半分が田んぼダムの施工に協力した場合を想定した．また後述する洪水氾濫解析の結果より，小矢部川において大きな有効性が見られたため，小矢部川のみ実施率を 30%，10%と低下させた場合の影響も評価した．

c) GI の活用による影響評価概要

本研究では，流出モデルの各サブ流域における土地利用割合の変更によって GI の活用を表現した．具体的には，各サブ流域の土地利用における都市の面積割合の 10 %を山地と分類し，GI の活用として表現した．また都市の面積割合が 10 %未満の箇所も山地として扱うことで表現し，都市を含まないサブ流域は，土地利用割合を変更しないで計算を行った．また土地利用を都市から畑地に変更するケースも解析を行った．

d) 森林保全管理の影響評価概要

森林は環境や景観の保全，浸透性・保水性の向上，そして CO_2の吸収といった緩和効果を有している．しかし，人口減少や少子高齢化のため，流域や森林の保全管理者が不足しているという現状がある．そこで本研究では、GI の活用と同様に、流出モデルの土地利用割合の変更や流出パラメータの変更を通じて，山地の荒廃による洪水の変化を表現した．これにより，森林保全管理の有効性を評価することができると考える．具体的には各サブ流域における山地の面積割合の 10 %を，都市に分類することで森林の衰退を表現し森林保全管理の有効性を示す．山地の面積割合が 10 %未満の個所も，都市として扱うことで表現し，山地を含まないサブ流域は，土地利用割合を変更しないで計算を行った．また土地利用を山地から畑地に変更するケースも解析を行った．

(3) 洪水氾濫被害額の算定手法

洪水氾濫解析の結果を用いて，直接被害額に該当する洪水氾濫被害額を算定することで各種適応策の定量評価を行う．資産額・被害額の算定は治水経済調査マニュアル（案）[注3]及び治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター[注4]を参考に資産額・被害額を算定する．氾濫計算より得た解像度30 mの浸水深を，解像度250 mにアップスケーリングした平均値を用いて被害率を決定し，対象地域の直接被害を算定する．

4. 結果

(1) 適応策実施前の洪水氾濫解析結果

洪水氾濫解析によって得られた適応策実施前の最大浸水深の空間分布を図-2に示す．地球温暖化に伴う流量の増加により小矢部川の蛇行部や神通川右岸など，特に標高の低い地域において大きな浸水が確認され，氾濫リスクが高まることが明らかとなった．また庄川においても両岸において浸水域の広がりが見られ，将来的にはより広域での被害が発生する可能性が考えられる．これらの解析結果より，将来における洪水リスクの増大は明らかであり，それに対する適切な適応策の検討の必要性が改めて分かった．

(2) 各種適応策実施後の洪水氾濫解析結果

適応策実施後の洪水氾濫解析結果を適応策ごとに示す．なお，浸水深低減効果が見られやすい河川を選定して示す．

a) 河道内植生伐採による影響

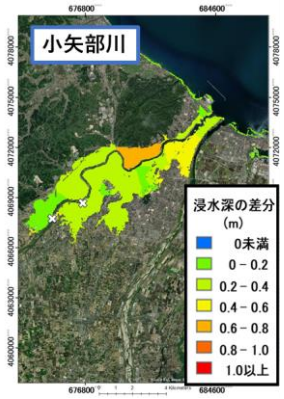


図-3　河道内植生伐採後の最大浸水深の差分

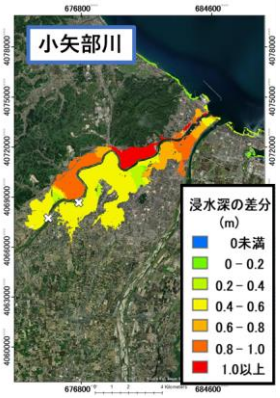


図-4　田んぼダム実施後の最大浸水深の差分

河道内植生伐採実施後の最大浸水深の差分を図-3 に示す．浸水深の差分は適応策なしの最大浸水深から適用後の最大浸水深を各グリッドで差し引いたものになる．最も効果が表れたのは河道部の植生繁茂量が多い小矢部川であり，次いで神通川，庄川において効果が確認できた．高水敷粗度係数を 0.02 に低下させた場合では，さらに浸水深の減少が確認でき，対象河川においては流下能力の向上が洪水氾濫に対して有効だと分かった．

b)　田んぼダムによる影響

田んぼダム実施後の最大浸水深の差分を図-4 に示す．結果として水田の土地利用割合が高い小矢部川において最も浸水深の減少が見られた．神通川，庄川に関しては，どちらも多少の浸水深の減少は確認でき，植生伐採と同程度の効果になることが分かった．小矢部川において実施率を下げて検討した場合では，貯水できる雨水量が低下することによってピーク流量の増加が起こり，浸水域や浸水深もそれに伴い増加することが確認できた．

c)　GI の活用による影響

GI の活用による最大浸水深の差分は変化が見られにくかったため要旨では省略する．どの河川においても浸水深の減少幅は 0.0 - 0.2 m程度となっており多少の軽減効果が確認できた．しかしながら植生伐採や田んぼダムと比較すると減少幅がほとんど確認できなかった．この要因として、堤防破堤地点が都市の土地利用が集中しているサブ流域よりも上流で起きていることが挙げられる．

d)　森林保全管理による影響

森林衰退による最大浸水深の差分は変化が見られにくかったため要旨では省略する．これらの浸水深の差分は森林衰退後の最大浸水深から適応策なしの最大浸水深を各グリッドで差し引いたものである．特に神通川の左岸において 0.2 - 0.4 m の浸水深の増加が見られた．他の河川においても 0.0 - 0.2 m の浸水深の増加が見られた．これらの結果，山地の衰退に伴い，将来の洪水規模では浸水被害が拡大する可能性があることが分かった．

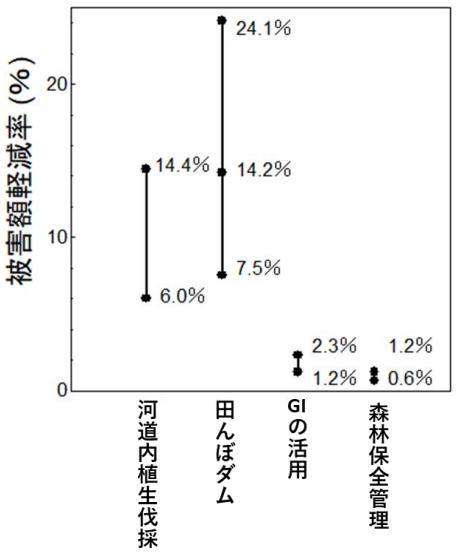


図-5　小矢部川における被害額軽減率

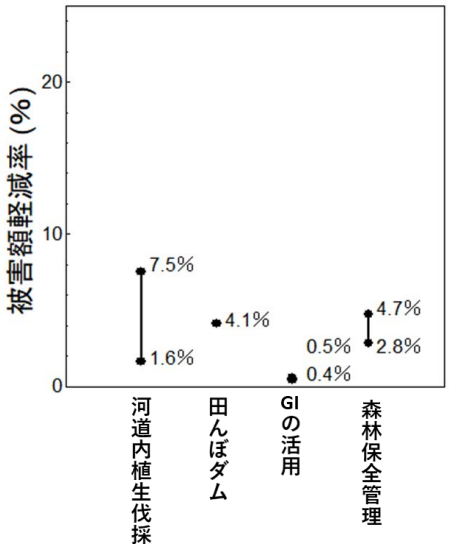


図-6　神通川における被害額軽減率

(3)　洪水氾濫被害額を用いた定量的な適応策評価

適応策実施前の 4℃上昇実験での浸水範囲で算定した資産額と洪水被害額および適応策実施後の洪水被害額を基に被害額軽減率を算定した．(図-5，図-6，図-7)．また森林保全管理については森林衰退による被害増加率を示している．適応策実施後の被害額軽減率について，田んぼダム，植生伐採の軽減効果を平均するとそれぞれ 15.3%，10.2%と小矢部川で顕著であった．先に示した浸水深の減少効果が大きいことからも小矢部川ではこれら 2 つの適応策は有効である可能性が考えられる．また神通川においては植生伐採，田んぼダム，森林保全管理においてそれぞれ 4.6%，4.1%，3.8%と多少の被害軽減効果が見受けられたが小矢部川と比較すると被害軽減率は低い．さらに庄川ではどの適応策においても軽減率が 0.2%～2.2%とほとんど効果が得られなかった．

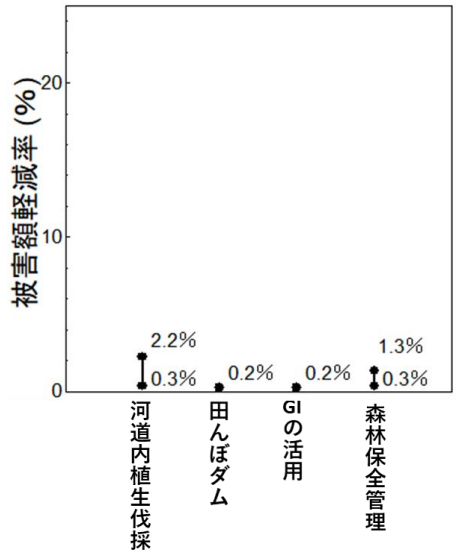


図-7　庄川における被害額軽減率

5. まとめと考察

本研究では富山県の 3 つの河川を対象に，洪水被害の軽減策として河道内植生伐採，田んぼダム，GI の活用，森林保全管理の効果を最大浸水深および洪水被害額で評価した．洪水氾濫解析では地球温暖化に伴う流量の増加により，特に標高の低い地域である小矢部川の蛇行部や神通川右岸などで大きな浸水が発生し、氾濫リスクが高まることが分かった．よって将来においては洪水リスクの増加が明確となり，各河川において有効な適応策の検討が必要となることが改めて認識できる．

次に適応策実施後の洪水氾濫解析では洪水氾濫域、浸水深の減少が確認された．特に，田んぼの土地利用が多い小矢部川では，田んぼダムの効果が他の河川流域に比べて大きく，さらに植生繁茂量も多いため植生伐採の効果も確認された．また被害額軽減率についても特に田んぼダムにおいて平均 15.3%の軽減効果が確認できた．また田んぼダム実施率を低下させると，それに伴い被害軽減率や浸水域の減少が確認できた．神通川においては植生伐採や田んぼダム，森林保全管理が浸水深の減少に寄与することが分かった．小矢部川と比較すると被害額の軽減効果は小さいが，植生伐採で平均 4.6%，田んぼダムで 4.1%の軽減効果が見られ，森林衰退による被害増加率は平均 3.8%となり森林保全管理の必要性が示された．庄川ではどの適応策においても浸水深の減少幅はあまり変わらず，効果が僅かにしか得られなかった．そのため被害額の軽減もほとんど見られなかった． 今後は有効な可能性のある適応策について，実現可能性の面での考慮や，各確率規模での氾濫解析・被害額の推定を行い，年期待被害額の算定を通じた費用便益分析へと発展させることで適応策の費用対効果を明らかにし，優先順位の検討を行う必要がある．

謝辞：本研究の一部は，環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11813）により実施した．また，R5 年度国土交通省河川砂防技術研究開発公募「富山県急流河川における降雨特性変化を考慮した流路変動・被災リスクの検討」の支援を受けた．河川横断面データや整備計画検討資料における高水敷粗度係数は北陸地方整備局富山河川国道事務所よりご提供頂いた．ここに記して，感謝の意を示す．

NOTES

注1) 気候変動リスク情報創生プログラム：地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース，https://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/

注2) 国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，p.114, 2002.

注3) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル(案)，p 40-p54，2020

注4) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター, p.1-p.12, 2020.

REFERENCES

1) 押川英夫，阪本こなん，馬場隆成，田井明，橋本彰博，小松利光：嘉瀬川におけるダムによる今後の治水適応策の検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.75， No.2， pp.I_79-I_84，2019. [Oshikawa, H., Sakamoto, K., Baba, R., Tai, A., Hashimoto, A. and Komatsu, T.: Study on the future flood control adaptation by dams in the kase river, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol.75, No.2, pp.I_79-I_84, 2019.]

2) 小河原洋平，田浦扶充子，島谷幸宏：善福寺川上流域を対象にしたグリーンインフラによる流出抑制及び CSO 抑制効果，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74， No.5， pp.I_355-I_360，2018. [Ogahara, Y., Taura, F. amd Shimatani, Y: Flood and cso suspression by green infrastructure targeting upstream zenpukuji-river, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*,Vol. 74, No.5, pp.I_355-I_360, 2018.]

3) 菊地大智，呉修一：富山県河川における洪水氾濫解析を通じた各種適応策の洪水被害低減額の評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.78，No.2 ， pp. I_787-I_792 ， 2022. [Kikuchi, D. and Kure, S.: Evaluation of counter measuresofflood damage cost reduction based on flood inundation simulation in rivers of toyama prefecture, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol.78, No.2, pp. I_787-I_792, 2022.]

4) 石川彰真，呉修一，菊地大智，武田尚樹，青木明日香：富山県河川における地球温暖化の影響評価と各種適応策の定量評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.78，No.5，I_51-I_61， 2022. [Ishikawa, S., Kure, S., Kikuchi, D., Takeda, N. and Aoki, A.: Assessment of changes in

streamflow due to global warming and evaluation of several adaptation measures in rivers in Toyama Prefecture, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Ser. G (Environmental Research)*, Vol. 78, No. 5, pp. I_51-I_61, 2022.]

5) Yoshikawa, S., Takahashi, K., Wu, W., Matsuhashi, K., and Mimura, N.: Development of common socio-economic scenarios for climate change impact assessments in Japan, model experiment description paper. 26 sep. 2022.
6) 尾島由利香，呉修一，石川彰真，B. A. Priyambodoho, 丸谷靖幸：庄川における降雨流出・洪水氾濫解析と可能最大洪水時の利賀ダムの影響評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.75，No.5，pp.I_281-I_287，2019. [Ojima, Y., Kure, S. and Ishikawa, S: Rainfall runoff and flood inundation analysis in shogawa river and evaluation of flood control by toga dam, pp.I_281-I_287, 2019.]
7) 山崎大，冨樫冴佳，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.74，No.4，pp.I_163-I_168，2018.[Yamazaki, D., Togashi, S., Takeshima, A. and Sayama, T: High-resolution flow direction map of japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 74, No.4, pp.I_163-I_168, 2018.]
8) 今井健太郎，今村文彦，岩間俊二：市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I_311-I_315，2013. [Imai, K., Imamura, F. and Iwama, S.:Advanced tsunami computation for urban regions, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Ser. B2 (Coast engineering*), Vol. 69, No.2, pp.I_311-I_315, 2013.]
9) Chai, Y., Touge, Y., Shi, K., Kazma S.: Evaluating Potential Flood Mitigation Effect of Paddy Field Dam for Typhoon No.19 Using Rainfall Runoff Inundation Model in the Naruse River Basin, Journal of Japan Society of Civil Engineers(B1), Vol.76(1), pp.295-303, 2020.