

# d4PDF を用いた気候変動に伴う豊平川の侵食危険度の推定

Research of erosion risk for the Tyohira River due to climate change using d4PDF.

室蘭工業大学  
室蘭工業大学  
室蘭工業大学

○学生員 稲垣慶吾 (Keigo Inagaki)  
学生員 川井翼 (Tsubasa Kawai)  
正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

## 1. はじめに

近年、日本各地で過去に経験したことのないような豪雨が発生している。北海道では、2016年8月に記録的な降雨の影響で札内川、音更川、石狩川上流部などの急勾配部において大規模な流路変動に起因する侵食被害が生じた<sup>1)</sup>。上記のような河川は急流河川と呼ばれており、洪水時や氾濫時に生ずる高速流の破壊力が大きく、護岸や構造物の倒壊や堤防の侵食などが懸念される。その結果起こる堤防の決壊や氾濫によって、周辺地域に大きな被害が出る可能性が高い。

上記の被害を含め、全国では極端降雨による被害が増大していることから、極端降雨の評価や予測への活用目的に、気候実験の大量アンサンブル出力値が「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(d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change)」<sup>2)</sup>として公開された。これにより、気候システムにおける不確実性に起因する潜在的な極端気象の分析が可能となった。

上記に関連して、北海道では2016年の災害を踏まえ、気候変動への適応策を念頭に、北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会(以下、技術検討委員会)が発足した<sup>3)</sup>。技術検討委員会では、山田ら<sup>4)</sup>が作成したd4PDFの力学的ダウンスケーリング(以下、DS)データを用いて、十勝川流域、常呂川流域のリスク推定を行った。また、急流河川における侵食の研究として岡部ら<sup>5)</sup>が2016年8月に起きた音更川急流部の流路変動に伴う侵食破堤プロセスを分析した。全国的にみると、大本ら<sup>6)</sup>が2020年7月豪雨で大きな被害が生じた急流河川の球磨川を対象に災害の要因などを分析した例がある。

以上を背景に、将来気候では現在気候に比べ、予想もできないような豪雨被害が起きる可能性が高い。そのため、本研究では急流河川の豊平川を対象に、川井ら<sup>7)</sup>がd4PDFデータの現在気候3,000ケースについて試算した侵食危険度の推定を、将来気候を対象に発展させた。

## 2. 研究方法

### 2.1 対象流域

本研究で対象とした豊平川は石狩川的一次支川であり、流域面積902km<sup>2</sup>、幹川流路延長72.5kmの一級河川である。流域は図-1に示すとおり、上流部に多目的ダムの豊平峡ダム、定山溪ダムが整備されており、札幌市の治水と水資源供給を担っている。一方、中下流部では大都市札幌を貫流する急流河川となっているため、治水に加

え市民の利用を念頭とした河川整備が重要な課題である。

過去の洪水としては1981年8月下旬に雁来(かりき)観測所(石狩川合流地点より11.10km地点)において、流量1,417m<sup>3</sup>/sを記録した。この際の高速流により、市街地に近接する中流部で河岸侵食、高水敷洗堀が発生、推定波高3mになる波状跳水(三角波)が確認され、破堤までは至らなかったが急流河川洪水ならではの現象が発現した。このように、豊平川は洪水時の水理現象により想定以上の被害が発生する可能性がある。

### 2.2 解析方法

本研究では a) d4PDF データの降雨情報の抽出 b) 流出計算モデル(IFAS)を使用した流出量の計算 c) 非定常平面2次元流計算(iRIC Nays2DH)による侵食危険度の評価を行った。以下に具体的な解析方法を示す。

#### (1) d4PDF・DS(ダウンスケーリング)データ

d4PDFとは、全世界および日本周辺でそれぞれ60km、20kmメッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力のことである。本研究では極端降雨を扱うため、山田ら<sup>4)</sup>が力学的手法で5kmメッシュにダウンスケーリングしたデータ(以下5kmDSデータ)を用いる。5kmDSデータは現在気候3,000年(60年×50メンバー)、将来気候5,400年(60年×90メンバー)分が利用できる。本研究では、豊平川河川整備計画<sup>8)</sup>より計画降雨量に72時間降雨量が使用されているため、年最大72時間降雨量で豊平川流域を対象に抽出した。

#### (2) IFASによる流出計算

IFAS(Integrated Flood Analysis System)<sup>9)</sup>は国立研究



Google Earth に加筆

図-1 豊平川流域の概要図

開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)で開発された総合洪水解析システムである。図-2 に IFAS の計算モデル模式図を示すが、単位メッシュの再現、河道の流れを Kinematic wave 法で再現し、流出計算を行う。

なお先行研究で川井ら<sup>7)</sup>は最適パラメータを求めるために過去の洪水事例を使用し、豊平川基準点の雁来観測所地点において再現計算を行った。再現対象とした過去の顕著な洪水 2 事例の情報を表-1 に示す。1981 年の観測雨量は欠測がない地上観測所(気象庁 6 地点、国土交通省 6 地点)の値を使用している。ダムは対象事例ごとの存否考慮し、一定率一定放流方式の調整方式で考慮している。表-2 に最終的に得られた最適化パラメータを示す。

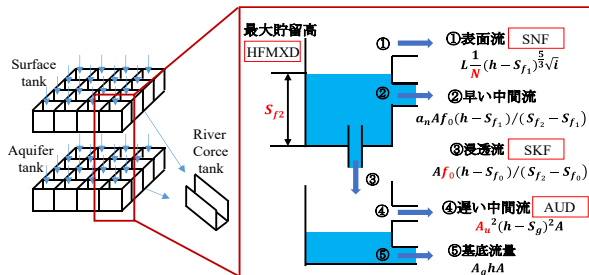
本研究では、このパラメータを使用し、d4PDF5kmDS データの現在気候 3,000 ケース、将来気候 5,400 ケースの流出計算を行った。

### (3) iRIC Nays2DH による河道水理計算

iRIC (International River Interface Cooperative)<sup>10)</sup> は、主に河川水理の解析を目的として開発されたフリーソフトである。本研究では、植生や障害物を考慮して非定常平面 2 次元流解析が可能な iRIC Nays2DH ソルバーを用いて水理計算を行った。

河道計算条件を表-3 に示す。なお、将来気候下の河道断面及び樹木条件は整備計画河道(川井ら<sup>7)</sup>の現在気候では現況(2015 年)河道条件で設定した。また、上記の整備計画河道は気候変動を考慮しない現行外力を想定としている河道である。計算範囲は図-1(黄色部)に示すとおり、上流端を真駒内川との合流点下流(石狩川合流点から 20.8km の地点)、下流端を環状北大橋付近(石狩川合流点から 10.6km)とした。流量は計算範囲低水路満杯となる流量 400m<sup>3</sup>/s 以上の現在気候 346 ケース、将来気候 1,174 ケースを上流端に与え、下流端水位は等流条件、支川合流は考慮せず計算を行った。低水路のマニングの粗度係数は河床波を考慮せず、計画粗度より与えた。

なお、現段階ではアンサンブルすべてを対象とした河床変動計算は計算負荷が莫大となるため、行っていない。



$L$ : メッシュの長さ (m),  $N$ : 地表面の粗度係数 (SNF) ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ ),  $h$ : 水位 (m),  $S_{f2}$ : 表層の最大貯留高 (HFMXD) (m),  $a_n$ : 早い中間流の流出量を規定する定数 (-),  $S_{f0}$ : 地下浸透が発生する高さ (m),  $S_{f1}$ : 早い流出が発生する高さ (m),  $f_0$ : 最終浸透能 (SKF) (mm/s),  $A$ : メッシュの面積 ( $\text{m}^2$ ),  $S_g$ : 不圧地下水が流出する貯留高 (m),  $A_u$ : 不圧地下水の流出係数 (AUD) ( $1/\text{mm}/\text{day}$ ),  $A_g$ : 被圧地下水の流出係数 ( $1/\text{day}$ )

図-2 IFAS の模式図

表-1 流出再現計算の対象事例

|                                                                   | 1981年<br>8/20~8/27            | 2011年<br>9/2~9/9              |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 流域平均3日雨量                                                          | 238mm/3日 (観測2位)               | 174mm/3日 (観測6位)               |
| ピーク流量<br>(雁来観測所)                                                  | 1,417m <sup>3</sup> /s (観測3位) | 1,050m <sup>3</sup> /s (観測9位) |
| 使用雨量データ                                                           | ※気象庁 (6地点)<br>国土交通省 (6地点)     | レーダー雨量<br>(1kmメッシュ)           |
| ダム設定                                                              | 豊平峡ダム                         | 豊平峡ダム<br>定山溪ダム                |
| ※気象庁 (小樽、札幌、西野幌、小金湯、島松山、手稲山)<br>国土交通省 (札幌河川、石山、豊平峡ダム、狭薄、中山峠、奥大二股) |                               |                               |

表-2 IFAS のパラメータの標準値と最適値

| 土地利用  | 地表面粗度係数<br>SNF ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ ) |     | 最終浸透能<br>SKF (mm/s) |        | 最大貯留高<br>HFMXD (m) |       | 遅い中間流出規定係数<br>AUD ( $1/\text{mm}/\text{day}$ ) <sup>1/2</sup> |     |
|-------|---------------------------------------------------|-----|---------------------|--------|--------------------|-------|---------------------------------------------------------------|-----|
|       | 標準値                                               | 最適値 | 標準値                 | 最適値    | 標準値                | 最適値   | 標準値                                                           | 最適値 |
| 1 山地  | 0.7                                               | 0.4 | 0.05                | 0.005  | 0.1                | 0.08  | 0.1                                                           | 0.2 |
| 2 裸地  | 2.0                                               | 0.5 | 0.002               | 0.002  | 0.05               | 0.05  | 0.1                                                           | 0.2 |
| 3 畑地  | 2.0                                               | 0.3 | 0.001               | 0.001  | 0.05               | 0.05  | 0.1                                                           | 0.2 |
| 4 市街地 | 0.1                                               | 0.1 | 0.0001              | 0.0001 | 0.001              | 0.001 | 0.1                                                           | 0.2 |

表-3 iRICNays2DH の計算条件

| 項目   | 設定値                                                                                                              |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算区間 | 豊平川 KP10.6~KP20.8<br>(KP20.8~KP20.6は助走区間とする)                                                                     |
| 河道形状 | KP10.6~KP20.8 整備計画河道データ<br>(200m間隔)                                                                              |
| 平面形状 | 流下方向:1020測線(約10.0m間隔)<br>横断方向:41測線(約5.0m間隔)                                                                      |
| 粗度係数 | 低水路:計画粗度<br>~KP10.60:n=0.022<br>~KP13.48:n=0.034<br>~KP15.92:n=0.035<br>~KP20.80:n=0.037<br>高水路:~KP20.80:n=0.040 |
| 樹木   | 密度 粗 0.05 中 0.07 密 0.1<br>(豊平川樹木データ_整備計画)<br>抗力係数=1.2                                                            |
| 差分法  | CIP法                                                                                                             |

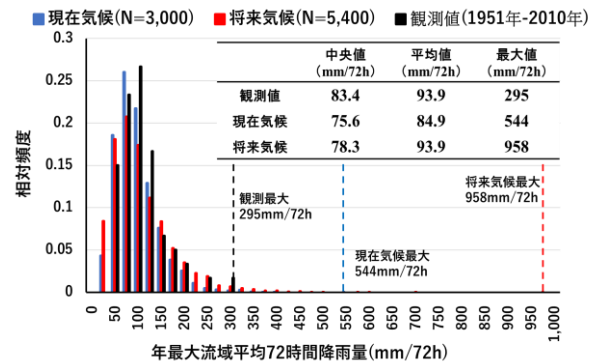


図-3 年最大流域平均 72 時間降雨量ヒストグラム

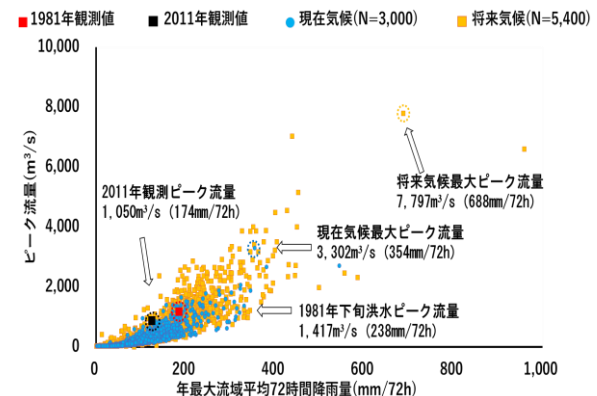


図-4 d4PDF 年最大 72 時間降雨量と IFAS によるピーク流量の関係



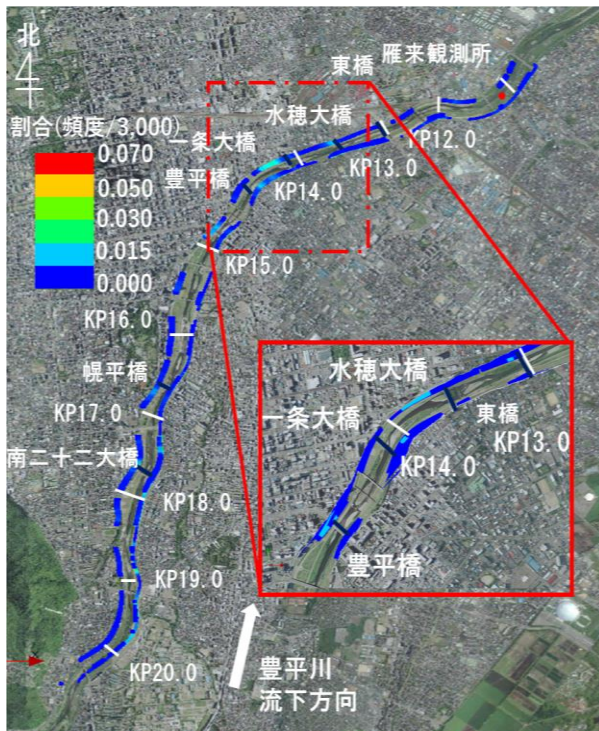


図-5 現在気候における左右岸堤防法尻部の $u_* > 0.3 \text{ m/s}$ 以上の出現頻度コンター図

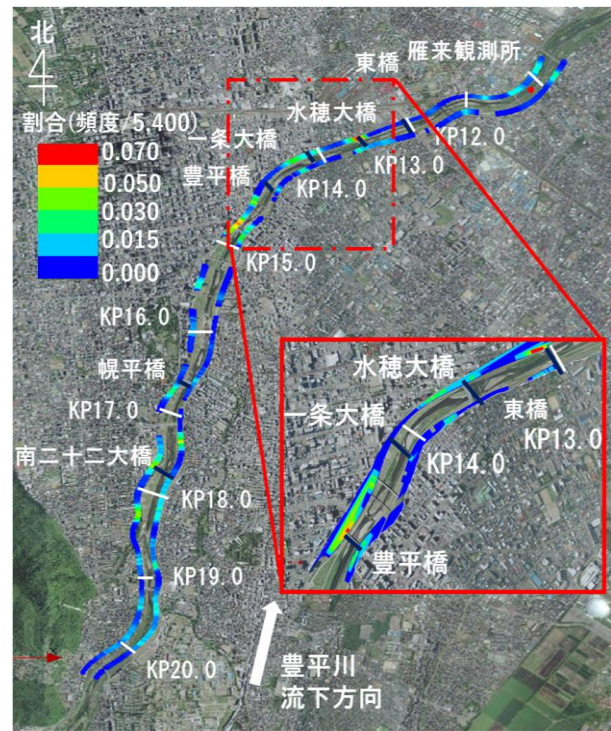


図-6 将来気候における左右岸堤防法尻部の $u_* > 0.3 \text{ m/s}$ 以上の出現頻度コンター図

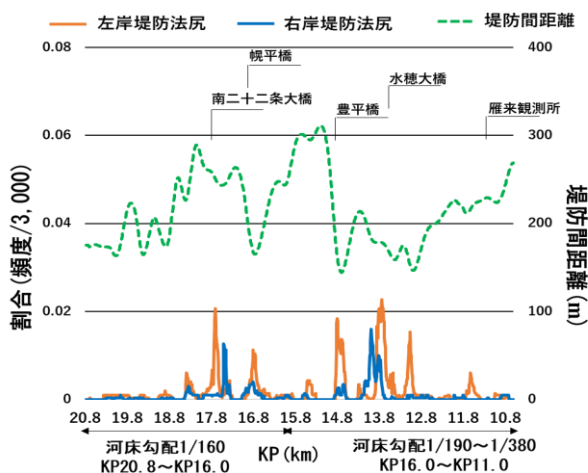


図-7 現在気候における左右岸堤防法尻部の $u_* > 0.3 \text{ m/s}$ 以上の出現頻度縦断面図

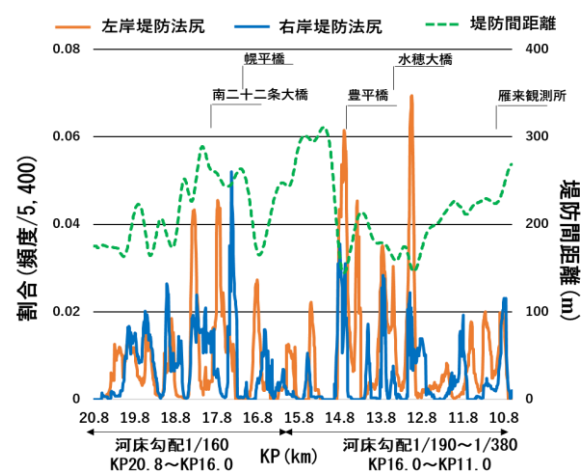


図-8 将来気候における左右岸堤防法尻部の $u_* > 0.3 \text{ m/s}$ 以上の出現頻度縦断面図

そのため、本研究ではピーク流量時の摩擦速度で侵食危険度の評価を簡便に行うことにした。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 d4PDF 降雨データの抽出

図-3 に豊平川（雁来観測所上流）の年最大 72 時間流域平均降雨量（mm/72h）の観測データ（1951 年～2010 年、60 年）と d4PDF データ（現在気候 3,000 年，将来気候 5,400 年）のヒストグラムを示す。図-3 より，d4PDF 現在気候の最大値が観測最大値を超過しているため，現在の豊平川において過去に観測されたことのないような大雨が発生する可能性が推測される。また，将来気候の最大値も，観測最大値，現在気候最大値を大幅に超過していることより，将来気候では想像もつかない現象が起きる可能性が高いと考えられる。

#### 3.2 d4PDF の流出計算結果

現在気候 3,000 ケース，将来気候 5,400 ケース，合計 8,400 ケースの結果を集約し，図-4 に流域平均 72 時間降雨量とピーク流量の散布図を示す。流出計算より，豊平川で戦後最大流量となった 1981 年の観測流量ピーク値と比較すると，現在気候では  $3,302 \text{ m}^3/\text{s}$ （1981 年洪水の 2.3 倍）と観測最大値を大きく上回る洪水が確認でき，将来気候では  $7,794 \text{ m}^3/\text{s}$ （1981 年洪水の 5.5 倍）と想像を超える洪水が起きる可能性が推測された。また，頻度に着目すると，戦後最大流量である  $1,417 \text{ m}^3/\text{s}$  以上となったのは現在気候で 21 回/3,000 年（1/143），将来気候で 216 回/5,400 年（1/25）であった。

以上より，現在においても気候の不確実性による既往最大規模以上の洪水が起きることが推定され，将来気候

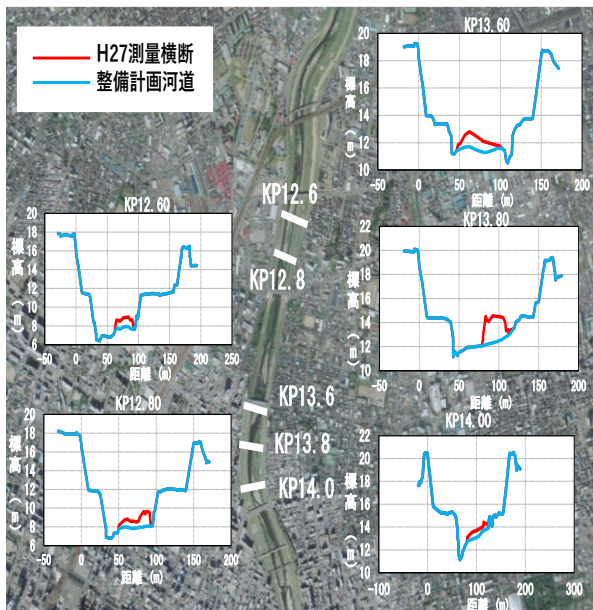


図-9 樹木除去・下枝払い対象地点の横断面図

においては甚大な洪水の規模と頻度の増大が想定される。さらに、将来気候は現在気候と同程度の雨量においてもピーク流量が高い事例が存在するため、短時間に降雨が集中することが推察される。

### 3.3 流況計算による現況河道、将来河道の侵食の評価

本研究では先行研究の川井ら<sup>7)</sup>の見解を基に摩擦速度  $u_*$  が  $0.3\text{m/s}$  以上を侵食の危険がある条件とする。これを閾値として d4PDF 現在気候 346 ケース、将来気候 1,174 ケースに対して侵食の評価を行った。

各地点の堤防法尻部に発生した  $u_*$  の最大値が  $0.3\text{m/s}$  以上となる現在気候、将来気候の割合(頻度/3,000, 頻度/5,400 を示す)を図-5、図-6 のコンター図(堤防法尻部に近接する高水敷の一部を抽出)、図-7、図-8 に棒グラフで示す。対象区間で閾値を超えたのは現在で 68 ケース、将来で 375 ケースであった。すなわち、現在気候において 68 ケース/3,000 年(約 1/44)、将来気候において 375 ケース/5,400 年(約 1/14)の割合で侵食の危険性があると評価できる。また、下流域では侵食危険箇所は狭窄部(水穂大橋 KP13.8 付近、豊平橋 KP14.8 付近など)、上流域では湾曲部(南二十二条大橋 KP17.8 付近)であった。また、氾濫した場合に最も被害が大きくなることが予測される幌平橋付近で閾値の超過回数は現在気候で 34 ケース、将来気候で 141 ケースであった。

特に超過回数が最大となった箇所は現在気候では KP13.9-KP14.0 区間の左岸であるが、将来気候では KP13.0-KP13.1 区間の左岸であった。また、現在と将来を比較してみると超過回数最大箇所が変化していることがわかる。これは図-9 に示すように整備計画河道において樹木除去・下枝払いが行われており、流下能力の向上が図られているためと考えられる。このことから、流下能力の確保と維持が有効な対策と考えられる。一方、図-1 の計算領域の上流部では湾曲部の割合が高くなっているため、湾曲部に対する堤防や護岸の強化をすることも侵食の軽減につながると考える。また、上流域で貯留施設の機能強化を行うことも有効な対策と考える。

以上より、気候変動に伴う外力の増加が予測される札幌都市部の減災を念頭に、先に述べたハード対策に加え、危機管理の強化も必要と考えられる。また、本研究では大量アンサンブルデータを用いることで洪水の継続時間、ハイドログラフ形状などの洪水条件の不確実性が評価できた。今後の課題として、これらを取り入れた河床変動計算を行い、実態に近い現象の評価が必要である。

## 4. 結論

本研究で得られた結果を下記に記す。

- 1) d4PDF 降雨データの流出計算を行うことで、現在気候と将来気候で予測される外力推定が可能となった。
- 2) d4PDF の現在気候データ、将来気候データの流出計算結果を使用し、iRIC によって計算した摩擦速度を用いることで、急流河川豊平川に潜在する侵食危険度の高い箇所を比較することができた。

**謝辞：**本研究は、JSPS 科研費(課題番号 20H02404, FY2020～2023)の助成を受けたものである。北海道大学の山田朋人氏、寒地土木研究所の星野剛氏ならびに北海道開発局札幌開発建設部には、有益な情報を頂いた。開発工営社の濱木道弘氏には貴重な助言、データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団：2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団報告書。https://committees.jsce.or.jp/hydraulic05/system/files/.pdf, (閲覧日：2021/09/10)
- 2) Mizuta, R. et al. : M.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol.98, pp.1383-1393, 2017.
- 3) 国土交通省北海道開発局：北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会, https://hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\_kei/splaat000000vdyw.html (2021 年 12 月 1 日 閲覧)
- 4) 山田朋人ら：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 土木学会河川技術論文集, 第 24 巻, pp.391-396, 2018. pp.391-396, 2018.
- 5) 岡部和憲ら：急流河川における将来洪水流量を考慮した河岸侵食特性と河道計画に関する考察, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.75, No.2, I\_1423-I\_1428, 2019.
- 6) 大本照憲ら：令和 2 年 7 月九州豪雨災害の総合調査・研究報告書, https://cwmd.kumamoto-u.ac.jp/gensai/data/R2\_houkoku\_omoto.pdf(閲覧日：2021/12/1).
- 7) 川井翼ら：大量アンサンブルデータを用いた急流河川の侵食危険度の評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.2, I\_199-I\_204, 2021
- 8) 国土交通省北海道開発局：石狩川水系豊平川河川整備計画(2006), (閲覧日：2021/09/10).
- 9) IFAS : ver.2.0 technical manual.
- 10) iRIC : http://i-ric.org(閲覧日：2021/09/10)