

気候の不確実性を考慮した豊平川中下流部の水文水理現象の分析

Analysis of hydrologic and hydraulic phenomena in middle and downstream parts of the Toyohira River considering climate uncertainty

室蘭工業大学
室蘭工業大学
室蘭工業大学

○学生員
学生員
正 員

川井翼 (Tsubasa Kawai)
関洵哉 (Junya Seki)
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。北海道では平成28年(2016)8月に4つの台風が2週間に集中して通過、接近し、甚大な被害が発生した。このような洪水事例が全国で発生していることを受け、令和2年(2020)7月に気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会¹⁾が、気候変動を考慮した全国的な河川整備計画の見直しなどを提言した。北海道では2016年洪水を踏まえ、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²⁾。

上記に関連して、極端豪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)」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。技術検討委員会では、山田ら³⁾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、岡部ら⁴⁾は平成28年8月に起きた音更川急流部の河岸浸食による破堤を分析し、急流河川の河道計画について想定外流量においても、侵食被害を抑制できるように堤防強化を行う必要があるとの見解を示している。

このような背景を考えると、札幌市の都市部を貫流し、かつ急流河川のため、高速流や河岸浸食に対する脆弱性

を有する豊平川は、今後の豪雨の頻発といったハザードの増大によって洪水氾濫リスクを重点的に考えるべき河川といえる。そこで本研究では、気候の不確実性を考慮した豊平川の中下流部を対象とした水文水理現象の推定を行い、リスク評価や対策検討の足がかりとしたい。

2. 研究方法

2.1 対象流域の概要

豊平川は流域面積902km²、河川長72.5kmの一級河川である。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、豊平川の治水と札幌市の水資源供給の役割を担っている。豊平川流域の標高を図-1に示す。特徴として流域面積の8割を山林が占めており、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。流域の洪水被害として昭和56年(1981)8月下旬に雁来(かりき)観測所において、流量1,417m³/sを記録した。この洪水で高速流により、都市部で河岸浸食、高水敷洗堀が発生、推定波高3mになる三角波が観測されるなど急流河川洪水ならではの現象が発現した。このように、豊平川は洪水時に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。そのため、大都市部を流れる急流河川という特徴を踏まえたリスク推定が必要である。

2.2 解析方法

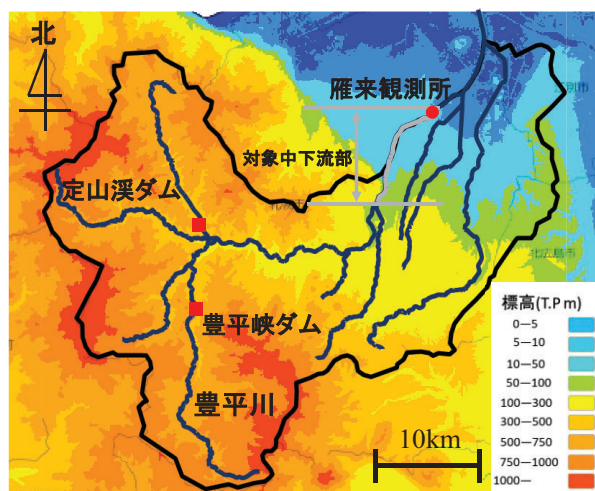
本研究は、1) d4PDF・DSデータによる現在気候予測結果の降雨量の設定、2) 流出計算による豊平川の流出量算出、3) 非定常平面2次元流計算の手順で行う。具体的な解析方法を以下に整理した。

(1) d4PDF・DS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。本研究では極端集中豪雨を扱うため山田³⁾らが力学的DSを行い、5kmメッシュにDSしたデータを用いる。5kmメッシュDS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)分が存在する。本研究では、現在も起こりうる、気候の不確実性に潜む極端豪雨事例より水文水理現象を推定するため、現在気候の予測降雨量を使用した。また、豊平川整備計画⁵⁾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時間降雨量を豊平川流域で抽出した。

(2) 流出計算(IFAS)

IFASは総合洪水解析システム(Integrated Flood Analysis System)の略称であり、単位メッシュの流出を



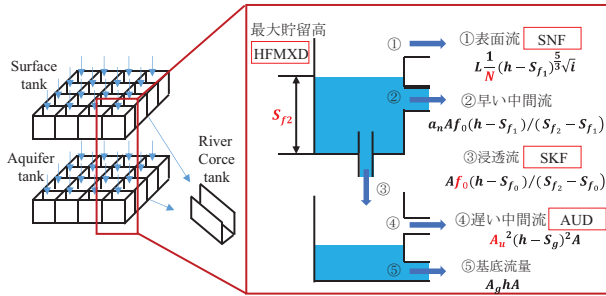
国土地理院標高地図に加筆

図-1 豊平川流域標高図

2 段タンクモデルで再現，河道の流れを Kinematic wave 法で再現し，流出計算を行う．図 - 2 に計算モデル模式図⁹⁾を示す．なお，IFAS では初期値として標準パラメータが与えられているが，必ずしも最適値ではない．パラメータを変更することで各流域の特性を考慮した流出計算が可能となっている．最適化パラメータを求めるため対象とした2つの事例を表 - 1 に示す．また，1981 年の流量データが存在する豊平川基準地点の雁来観測所において再現計算を行った．なお，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の有無を考慮し，一定率一定放流方式で設定した．流出計算の定量評価は次式に示す Nash-Sutcliffe 係数とピーク流量相対誤差を使用した．

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_M - Q_C)^2}{\sum(Q_{AVG} - Q_C)^2} \quad E_p = \frac{Q_{MP} - Q_{CP}}{Q_{MP}} \quad (1)$$

ここで， Q_M :観測流量 (m^3/s)， Q_C :計算流量 (m^3/s)， Q_{AVG} :観測流量の平均値 (m^3/s)， Q_{MP} :観測流量の最大値 (m^3/s)， Q_{CP} :計算流量の最大値 (m^3/s) とし，計算結果が $NS > 0.7$ かつ $|E_p| < 0.3$ の場合再現性があるとした．



L : メッシュの長さ (m)， N : 地表面の粗度係数 (SNF) ($m^{-1/3} \cdot s$)， 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) (cm / s)， A : メッシュの面積 (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) ($1/mm/day$)^{1/2}， A_g : 被圧地下水の流出係数 (1 / day) 以上の単位は計算時に MKS 単位系に変換される．

図 - 2 IFAS による流出計算の模式図

表 - 1 流出計算対象事例の概要

	1981年 8/20 ~ 8/27	2011年 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 (雁来観測所)	1,417m ³ /s(観測3位)	1,050m ³ /s(観測9位)
使用雨量データ	※気象庁(6地点) 国土交通省(6地点)	レーダ雨量 (1kmメッシュ)
ダム設定	豊平峡ダム	豊平峡ダム 定山溪ダム
※気象庁(小樽、札幌、西野幌、小金湯、島松山、手稲山) 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 初期パラメータと最適化パラメータ

土地利用		地表粗度係数 SNF			最終浸透能 SKF			最大貯留高 HFMXD			遅い中間流出規定係数 AUD		
		初期		最適化	初期		最適化	初期		最適化	初期		最適化
1	山地	1	0.7	0.4	1	0.005	0.0005	1	0.1	0.08	1	0.1	0.2
2	裸地	2	2.0	0.5	2	0.0002	0.0002	2	0.05	0.05	2	0.1	0.2
3	畑地	3	2.0	0.3	3	0.0001	0.0001	3	0.05	0.05	3	0.1	0.2
4	市街地	4	0.1	0.1	4	0.00001	0.00001	4	0.001	0.001	4	0.1	0.2

パラメータは松本⁷⁾の研究事例を参考に，山林のパラメータを中心に試行錯誤的に設定した．最終的に得られた最適化パラメータを表 - 2 に示す．本研究では，豊平川における計画規模 (1/150) の水文現象を推定するため，現在気候の豊平川流域平均雨量上位 20 件について流出計算を行った．20 件というのは 3000 年分の内 20，すなわち 150 年のうち 1 の頻度を意味する．

(3) 非定常平面 2 次元流計算 (iRIC Nays2DH)

iRIC (International River Interface Cooperative)⁸⁾ は，河川の解析を行うことができるフリーソフトである．多数のソルバーがあり，河川流計算，氾濫計算，津波，土石流など，目的に応じた解析が可能である．

本研究では，豊平川中下流部における水理現象を推定するため，iRIC Nays2DH ソルバーを用い計算を行った．iRIC Nays2DH は，植生や障害物を考慮して非定常平面 2 次元流解析が可能である．計算の設定値を表 - 3 に示す．なお，粗度係数と樹木の設定は，内田ら⁹⁾の研究事例を参考に設定した．下流端水位は等流条件とし，河床変動，支川合流は考慮せず，水位，流速の計算を行った．

3. 結果と考察

3.1 IFAS での流量再現性の検証結果

IFAS による流出計算結果を図 - 3 に示す．最適化したパラメータを使用することで，1981 年，2011 年ともに良好な再現結果が得られた．1981 年は短期集中降雨による洪水，2011 年は 4 日にわたる長期降雨による洪水と降雨特性が異なるが，ピーク流量，洪水波形いずれもよく再現できているため，本研究の流出解析モデルの有効性を確認することができた．

3.2 豊平川流域の降水量と雁来地点流量の推定

表 - 4 に豊平川流域平均降水量上位 10 位の流出計算結果を示す．なお，データ名の年号はシミュレーションのためのものであり実際の年とは異なるため，Present

表 - 3 非定常平面 2 次元流計算設定条件

項目	設定値
河道形状	平成27年測量成果
計算範囲	KP11.0~KP20.8(下流端:雁来観測所)
平面形状	流下方向:736側線 横断方向:35側線 (低水路16分割、高水路9分割×2)
粗度係数	低水路 0.038 高水路 0.04 床止め部 0.08
樹木	密度 粗 0.05 中 0.07 密 0.1 (平成27年簡易航空写真より分類) 抗力係数=1.2
移動床	低水路
固定床	高水路、床止め
差分法	CIP法

Climate の PC を付して区別する。豊平川の計画流域降雨量は 310 mm/72h, 計画高水流量は 2,000 m³/s に設定⁴⁾されているが、それを超える雨量が 8 例あり、その中で計画高水流量を大きく超える流量を表中に太字で示す。また、雨量と流量の関係に着目すると PC2006 の雨量、流量は PC1955 が最も大きくなった。

以上より、降雨量以外で流量が増大した理由を考察するため、ピーク流量上位 3 位 (PC2006, PC1955, PC1980) のハイドログラフ、d4PDF 5 km メッシュ毎の 72 時間降雨分布、12 時間最大降雨分布を分析した。結果を図 - 4、図 - 5 に示す。まず、ハイドログラフより 3 事例とも立ち上がり部はいずれも短期集中型の降雨により急激に増大していることがわかる。また、72 時間降雨分布より PC2006 と PC1980 は流域南部を中心に降雨が分布していることがわかる。これは再現事例に使用した図 - 6 の既往洪水と類似した分布となっている。この場合、下流側に豊平峡ダムがあり、洪水調節が可能なため、ピーク流量の増加を低減できる。

しかし、12 時間最大降雨分布に着目すると、PC1955 ではダムのない流域西部に短期集中的に降雨が発生しているため、洪水調整が行えず、流量が一気に増大したと考えられる。これより豊平川流域は大雨が流域西部に集中した場合ピーク流量が特に高くなる傾向があると推定できる。このように、降雨の空間分布により流出に大きな違いが表れることが分かった。

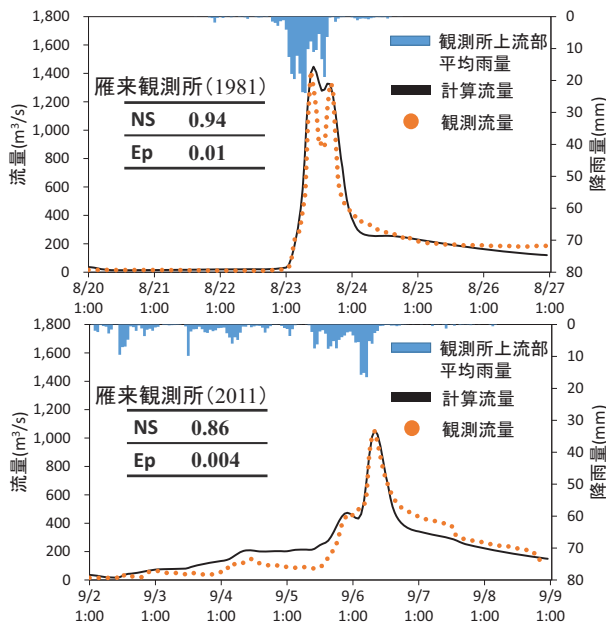


図 - 3 再現計算結果 (上 1981 年, 下 2011 年)

表 - 4 流出計算結果

	d4PDF番号	流域平均雨量 (mm/72h)	最大流量 (m ³ /s)
1	HPB_m043_2006	545	2,720
2	HPB_m084_1955	346	3,302
3	HPB_m063_1967	343	1,375
4	HPB_m004_1957	341	1,151
5	HPB_m050_1980	340	2,681
6	HPB_m007_1969	326	2,066
7	HPB_m089_1977	314	1,951
8	HPB_m086_1987	311	1,887
9	HPB_m043_1951	292	839
10	HPB_m046_1980	289	1,507

3.3 豊平川中下流部の水理現象の推定

1981 年下旬洪水では三角波や高速流などの水理現象により被害が拡大した。そのため、iRICNays2DH にて、予測ピーク流量 1 位事例である PC1955 の非定常平面 2 次元流解析を行った。水位の縦断面図を図 - 7 に示す。なお、ここで示している計算水位は最深河床高の水位である。図 - 7 より現況河道では、KP15.5 - KP20.8 は計画高水位程度の水位、KP11.0 - KP15.5 の間で最大 1.5 m 堤防高を超える水位となった。下流部で水位が高くなるのは、KP16.0 から河床勾配が緩やかになるため高速で流

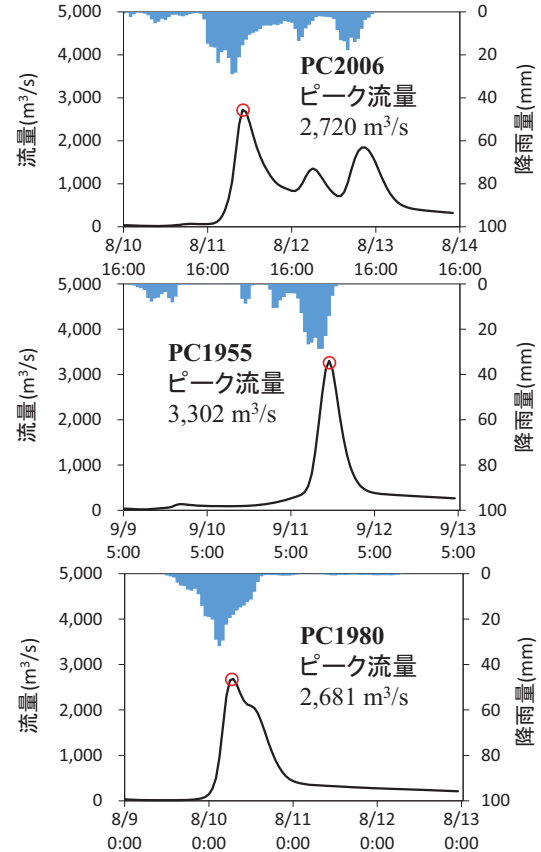


図 - 4 計算流量上位 3 位ハイドログラフ

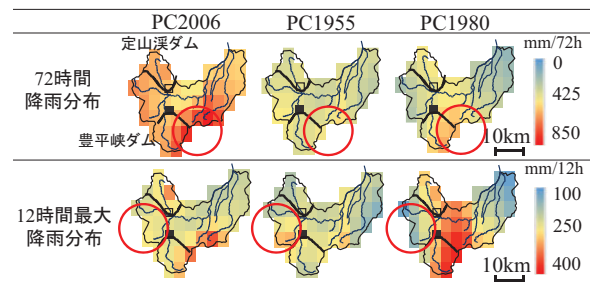


図 - 5 現在気候における豊平川流域降雨

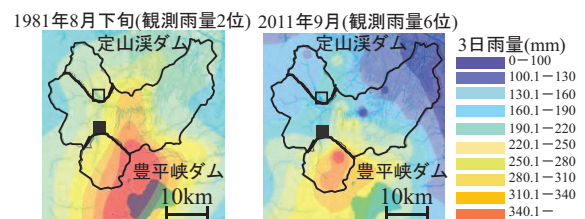


図 - 6 既往洪水における豊平川流域降雨分布
国土交通省北海道開発局
石狩川流域委員会資料に加筆

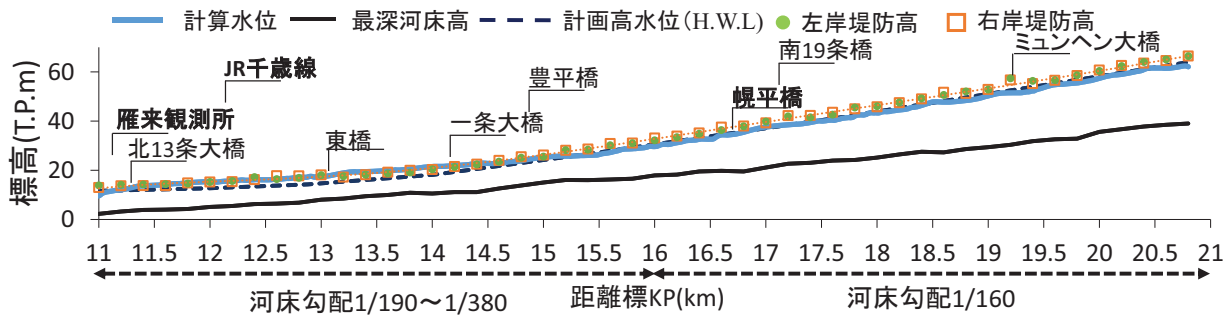


図 - 7 ピーク時水位縦断面図

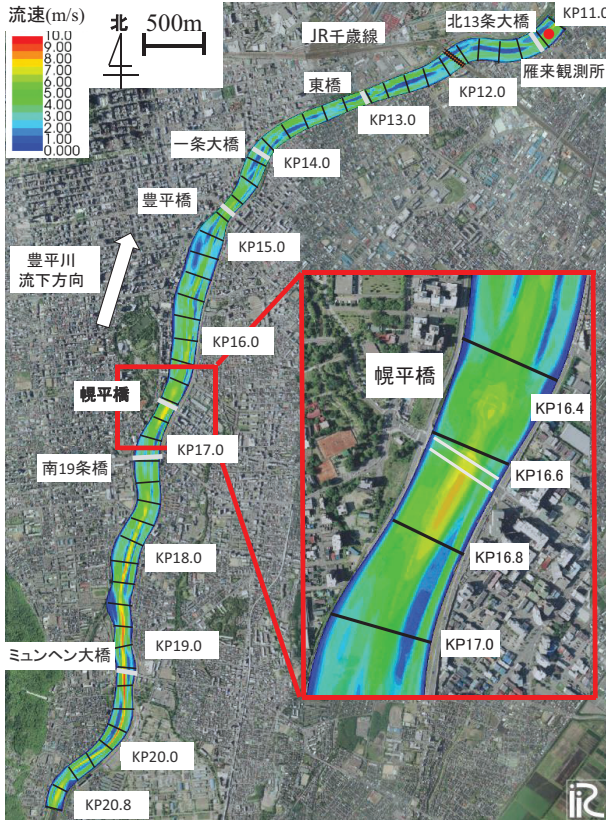


図 - 8 豊平川中下流部流速コンター図

れていた洪水の流速が低下し、水位が増加したと考えられる。

図 - 8 に豊平川中下流部の最大流速のコンター図を示す。図中で拡大した幌平橋付近では、左岸高水敷に 5 m/s~6 m/s の高速流が乗り上げている。これは幌平橋上流部の川幅がやや狭くなっているため高速流が発生すると推察される。以上より、中流部では高速流による侵食、下流部では越水が現在気候条件下でも起こりうる可能性が示された。将来気候を考えると、さらなるリスク増加が予測される。札幌都市部の洪水被害を低減するため、上流で貯留施設の整備や機能強化などによる流量軽減、越流や河岸侵食など破堤要因となる水理現象に強いより頑強な堤防や護岸の整備が必要といえる。

また、岡部ら³⁾は音更川を対象に、急流部は洪水波形により、侵食危険度が変化することを示した。豊平川急流部においても同様の現象が起きると考えられる。さらなるリスク推定を行うためには、洪水による河床変動、土砂移動、支川合流を考慮し、洪水波形ごとの危険個所の推定を行う必要がある。

4. 結論

本研究で得られた結果を下記に記す。

- 1) d4PDF の現在気候降雨量を使用し、現況の豊平川流域に起こりうる超過規模洪水の流量を推定した。
- 2) 降雨の空間分布より、豊平川流域のピーク流量が増大する傾向を示唆することができた。
- 3) iRICNays2DH により、現況河川に超過規模洪水が発生した場合の水理現象を推定した。これより、急流河川の危険箇所や対策の検討が早急に必要である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏ならびに北海道開発局札幌開発建設部からは、各種データを提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会，mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou_suigai/index.html (2020 年 12 月 11 日 閲覧)
- 2) 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，hkd.mlitt.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html (2020 年 12 月 8 日 閲覧)
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 国土交通省北海道開発局：石狩川水系豊平川整備計画（2006），hkd.mlitt.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html (2020 年 11 月 28 日 閲覧)
- 6) ICHARM Public Works Research Institute, Japan : IFAS ver.2.0 technical manual, pp.247
- 7) 松本和宏：流出解析分野における数値最適化に関する研究，京都大学大学院工学研究科博士論文，2019。
- 8) iRIC : <http://i-ric.org> (2020 年 11 月 24 日 閲覧)
- 9) 内田有吏子ら：急流都市河川豊平川における河道内構造物の維持管理および植生管理に関する検討-平成 23 年 9 月出水を受けて-河川技術論文集，第 18 巻，pp.203-208，2012。