

亀岡盆地の氾濫解析に基づく日吉ダムの治水操作手法の検討

京都大学大学院工学研究科 学生会員 岩本 麻紀
京都大学防災研究所 正会員 竹門 康弘
京都大学防災研究所 正会員 野原 大督
京都大学防災研究所 正会員 角 哲也

1. 研究の背景と目的

淀川水系桂川上流域では洪水による浸水被害が頻発しており、特に狭窄部である保津峡によって、亀岡盆地では農地や家屋の浸水被害が度々発生してきた。また、亀岡市内では支川の合流部が霞堤として開口しており、平成30年7月豪雨においても、亀岡市曾我谷川西側の水田が冠水した。現在、桂川上流の日吉ダムでは、ダム下流の河川改修が進んでいないことなどから、中小規模洪水を重視した暫定的な洪水調節が行われている。しかし、この調節方法では、大規模洪水の場合、降雨の早い段階でダムの洪水調節容量が使い切られて、下流の洪水氾濫の危険性が高まる可能性がある。本研究では、降雨のスケール及びパターンとダムの洪水調節方法を変えながら、桂川上流域の氾濫解析を行うことで、様々な規模の洪水時の氾濫被害をバランス良く軽減することが期待できるダムの治水操作手法を検討する。

2. 桂川上流域の氾濫解析

桂川上流域の氾濫解析には、降雨流出氾濫モデルであるRRIモデル¹⁾を用いた。亀岡盆地を含む請田地点上流を対象とし、入力地形データと流向データは、山崎らによる空間解像度30mの日本域表面流向マップの水文補正標高²⁾を150mにアップスケールしたものを用いた。次に、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータにより対象流域を山地と平地に分類し、表1のようにモデルパラメータを設定した。平成30年7月豪雨による日吉ダムへの流入量について再現性を確認したところ、NS係数は0.884となり高い再現性を示した。降雨シナリオには、表2に示すように、既往出水から降雨波形と再現確率の違いを考慮して、4つの洪水を抽出し、さらに平成30年7月豪雨時の7日未明に由良川・加古川流域にかかった強雨域が同時期に桂川上流域にかかったと仮定した場合

の仮想豪雨の計5種類の降雨シナリオを用いた。日吉ダムの治水操作手法については、洪水調節開始流量150 m³/s、300 m³/s、500 m³/sの一定量放流方式を検討した。

3. 結果

降雨シナリオ(a)の場合の日吉ダムの放流量と貯水量の変化と、亀岡地点での流量の変化を図1に示す。図1から、計算上で異常洪水時防災操作に入る時刻は、150 m³/s放流方式では7月6日の3時から4時の間であるのに対し、300 m³/s放流方式では約12時間遅くなった。また、500 m³/s放流方式では、異常洪水時防災操作を行わずに済むため、亀岡地点での2回目のピーク流量は1,270 m³/sまで抑えられ、150 m³/s放流方式でのピーク流量1,634 m³/sよりも約364 m³/s小さくなった。しかし、1回目のピーク時には、500 m³/s放流方式の場合が残流域流出と重なって亀岡地点のピーク流量が最も高くなった。表3に治水経済調査マニュアルから亀岡盆地の家屋と農地の被害を算出した結果を示す。被害額の合計が最も小さくなる洪水調節開始流量は、降雨シナリオ(a)(e)では500 m³/s、(b)(c)(d)では150 m³/sとなった。各シナリオでの期待被害額が最小となるのは、150 m³/s放流方式となった。

表1 モデルパラメータの設定値

パラメータ	山地	平地
n [m ^{-1/3} s]	0.3	0.2
d [m]	1.0	0.8
φ [-]	0.471	0.471
k _v [m/s]	-	6.54×10 ⁻⁵
S _f [m]	-	0.1
k _a [m/s]	0.1	-
φ _u [-]	0.05	-
n _{river} [m ^{-1/3} s]	0.02	0.02

キーワード 日吉ダム, 洪水調節, RRIモデル

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 iwamoto.maki.82v@st.kyoto-u.ac.jp

表2 降雨シナリオ

降雨シナリオ	元となる降雨イベント	最大24時間雨量 [mm]	最大48時間雨量 [mm]	再現確率 (48時間雨量)	降雨波形
a	2018年7月前線	304	438	約1/50	複数ピーク
b	2013年台風18号	296	330	約1/20	中央集中
c	2004年台風23号	183	239	約1/5	後方集中
d	1989年9月前線	208	236	約1/5	複数ピーク
e	仮想豪雨	294	497	約1/100	複数ピーク

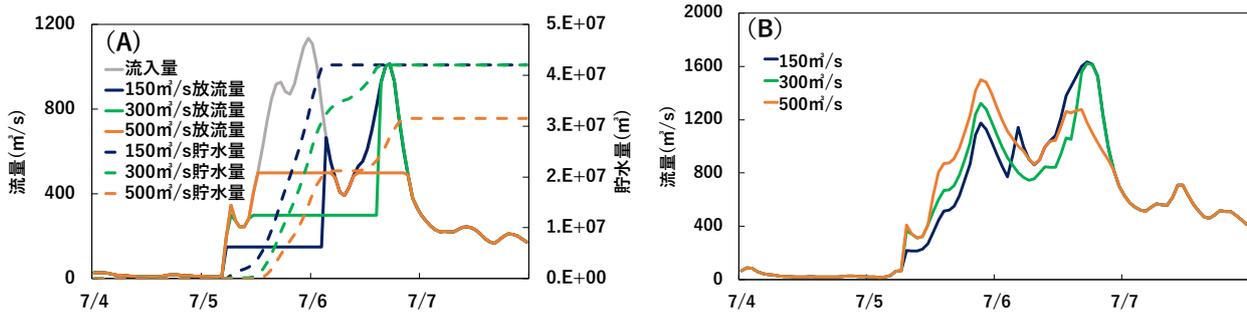


図1 降雨シナリオ(a)での流量, (A)日吉ダム地点, (B)亀岡地点

表3 各降雨シナリオでの経済被害額 (単位: 十億円)

	再現確率 (48時間雨量)	150 m³/s			300 m³/s			500 m³/s		
		家屋	農地	合計	家屋	農地	合計	家屋	農地	合計
a	約1/50	13.94	2.98	16.93	13.94	2.98	16.92	12.99	2.96	15.95
b	約1/20	13.36	2.09	15.45	14.96	2.19	17.15	19.34	2.28	21.62
c	約1/5	3.45	1.03	4.48	3.63	1.11	4.73	4.23	1.21	5.44
d	約1/5	6.79	1.69	8.48	6.79	1.69	8.48	6.81	1.71	8.52
e	約1/100	27.57	3.35	30.91	27.57	3.35	30.91	25.24	3.34	28.57
平均被害額		-	-	15.25	-	-	15.64	-	-	16.02
期待被害額		-	-	0.80	-	-	0.83	-	-	0.90

4. 結論

本研究では, RRI モデルを用いて桂川上流域の降雨・流出・氾濫解析を行い, 複数の降雨シナリオについてダム洪水調節方式を変化させた場合の河川流量, 水位, 氾濫域と水深, 氾濫被害の変化を分析した. その結果, 再現確率 1/100~1/50 程度の大規模洪水では 500 m³/s 一定量放流が, 1/20~1/5 程度の中小規模洪水では 150 m³/s 一定量放流が, 亀岡地点の浸水による被害額が最も小さくなった. 今後の課題としては, 霞堤などの河川構造物の再現性を高めて氾濫解析の精度を向上させるため, より細かい地形データや実際の河道断面データ等を用いてモデル精度を改善していく必要がある. また, さらに多くの降雨シナリオを用いて氾濫解析を行うことで, 降雨波形や継続時間, 再現確率による下流の浸水被害への影響を詳

細に評価し, 最適なダム治水操作方式を検討する手法の構築を行う予定である.

参考文献

- 1) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信: 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No1, pp.14-29, 2013.
- 2) 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.74, No.5, pp.I_163-I_168, 2018.

2016年の台風10号による久慈川の洪水氾濫と流木の影響

首都大学東京

高崎忠勝

中央大学理工学研究所 ○土屋十園

1. はじめに

本報は2016年8月の台風10号による岩手県北部水害の調査報告りをもとに、久慈川における洪水氾濫に流木が果たした影響に関して検討をしている。もしもこの洪水において流木が橋梁群に捕捉されていなければ、堤防からの溢水氾濫による被害はなかったか、あるいは大規模に至らなかったという仮説に基づいて流出解析を行い流木の有無による河川水位の溢水の検討を行っている。

2. 久慈川の水害の特徴

台風10号による総降雨量は、2016年8月29日0時から31日12時までの主要地点の久慈市下戸鎖278.5mm、岩泉町248.0mm、刈屋226.5mm、久慈139.5mm、山形178.5mmであり、三陸沿岸域に近い北上高地に集中している。その結果、久慈市の被害は死者1名、全壊31棟、大規模半壊194棟、一部破損7棟、床上浸水1,279棟、床下浸水747棟、合計2,258棟（うち住宅1,223棟）であり、東日本大震災の津波被害1,248棟（うち住宅568棟）を1,010棟上回る被害であった。

3. 久慈川氾濫と流木の状況

(1) 溢水氾濫状況

2016年11月20日、久慈市内の氾濫調査、浸水痕跡調査を行った。調査はスタッフ、レーザー距離計等を使用し、目視により65地点の地盤からの浸水深を計測した。久慈市消防課の資料²⁾を参考に住民のヒアリングも行い堤防からの溢水氾濫状況を確認し、浸水マップを作成した。図-1に溢水、浸水深の計測箇所を示した。久慈川の浸水面積は約0.63km²であり、支川長内川上流右支川の小屋畑川では0.016km²であった。最大浸水深は市街地で223cmであった。溢水箇所は上流から下流に向けて、上の橋上流の右岸と次の中の橋間の右岸から、中の橋からJR鉄道橋までの左右岸から溢水、更に久慈橋までの左岸の堤防から溢水している。いずれの箇所も流木が橋梁の橋台、橋桁、欄干等に捕捉され、橋の上流側に集中している。上の橋では左岸に流木が捕捉され右岸から溢水している。住民へのヒアリングでは上の橋上流の地点及び久慈橋より下流では溢水していないことが分かっている。



図-1 久慈市内の痕跡調査箇所と氾濫流



図-2 久慈川 JR 鉄橋に捕捉された流木²⁾

(2) 橋梁に捕捉された流木の状況

図-2は2016年9月1～2日、洪水低減後のJR鉄橋に捕捉された左岸堤防から見た流木である。流木は全ての橋脚、橋台などに横断的に捕捉されている。流木の直径20～30cm、長さ5～10mの小灌木からの大木まであり、幹・枝葉が一体の樹木も見られる。また、河川敷のグラウンドに設置されたフェンスが流木や小灌木、雑草を捕捉して高水敷に転倒している。



図-3 生出町 (St. 1)、八日町 (St. 2) の水位観測所

(3) 久慈川の河川水位

図-3は生出町水位観測所 (St. 1)、八日町水位観測所 (St. 2) の位置を示した。図-4は観測されている水位計のハイドログラフである。中の橋右岸上流

の八日町水位計 (St. 2) のハイドログラフのピークは7.46mであり、堤防天端7.28mを0.18m超えている。即ち、溢水したことを示している。また、St. 2地点では基準点と横断面の関係が不明であり、H-Q関係式は未作成である。3.2Km上流 (St. 1) は既往H-Q関係式が存在するが、今回の洪水を適用すると最大水位を大きく上回り、適用範囲を大きく超える

ことがわかった。また、洪水期間中の総流量が総降水量を上回り水収支の点からも使用できないと判断した。

4. 流出解析による検討

(1) 河川水位と水位・流量関係式

上記の理由から 2015 年洪水を含む 2014～2016 年の 3 か年間の流出解析を行い、水位・流量関係式を作成する方法を検討した。計算は 4 段タンクモデルを用いて久慈川流域の降雨流出解析を行い、上流の生出町 (St. 1) の観測ハイドログラフに適合するように Manning 式、連続式から粗度係数 n の最適化を行い、H-Q 式を作成した。Manning 式の流積 A 、径深 R 、水面勾配 I は岩手県の資料³⁾をもとに設定し、粗度係数 n は 2016 年の算定した総流量を再現できる値を Manning の逆解析により算定した。得られた n の値は 0.037 であり河道の粗度係数として妥当な範囲にあると判断した。作成した St. 1 の水位・流量曲線を図-5(左)に示した。この水位・流量曲線から水位データを適用して算定した St. 1 の最大流量は $1,033\text{m}^3/\text{s}$ となる。次に、上記 St. 1 と同様に St. 2 の水位・流量曲線を作成した。St. 2 の水位データについては基準高と横断面の位置関係が不明なため、粗度係数 n および水位データの基準高を Manning 式の逆解析により算定した。得られた n の値 0.038 は St. 1 に近い値であり、妥当な範囲の値であると判断した。St. 2 の水位・流量曲線を図-5(右)に示した。

(2) 生出町水位観測 (St. 1) のタンクモデルの適用

流域面積の算定は GIS ソフト Map Window を使用した。流域面積は St. 1: 262.005km^2 、St. 2 が 270.595km^2 となる。St. 2 は St. 1 の 1.03 倍の流域規模を有する。タンクモデルは降雨量と流量は日単位である。モデルパラメータは田中丸ら (1995) と同様に SCE-UA 法によって同定し、誤差評価関数は Nash-Sutcliffe 指標を用い (NS) 0.57 を得た。流量の観測値は、水位と H-Q 式の両データを入手できた 2015 年を対象とした。その結果、計算流出量は 2014 年 928mm 、2015 年 836mm 、2016 年 889mm であり、2015 年の観測流量 827mm を概ね再現できている。St. 1 の年間流量に流域規模を考慮して 1.03 倍したものを St. 2 の年間流量とした時、この流量となる水位の零点高は 1.8m であり、粗度係数は 0.038 となり、St. 1 と St. 2 で概ね近似値が得られた。St. 2 の最大水位は 7.46m であり、堤防天端高 7.28m より 0.18m 高い。St. 2 の水位・流量曲線から天端高に対する流量は $1,267\text{m}^3/\text{s}$ となっている。

(3) 流木による水位上昇と流木の捕捉がない場合の水位

図-6 は最適化による 2 地点の流量曲線である。図-5 の水位・流量曲線で算定した最大流量は St. 1 が $1,033\text{m}^3/\text{s}$ 、St. 2 が $1,365\text{m}^3/\text{s}$ であり、St. 2 の流量は St. 1 の 1.32 倍になっている。St. 1 と St. 2 の間に大きな流入はなく、流域面積の違いは 1.03 倍であり、2 箇所流量に大きな違いはないと考えられる。8 月 30 日 20 時以降に St. 1 と St. 2 の流量の違いが大きくなり、流木の影響によって St. 2 の水位が急上昇したと推測される。図-6 の赤色点線 St. 2 (流域規模) は、St. 1 の流量を 1.03 倍したものであり、St. 2 の流木の捕捉がないときの流量を示している。このとき最大流量は $1,073\text{m}^3/\text{s}$ であり、水位・流量曲線によるものより $293\text{m}^3/\text{s}$ 小さい。この流量に対する水位は 6.90m であり観測水位より 0.56m 低く、更に堤防天端高を 0.38m 下回る。従って、橋梁による流木の捕捉による水位上昇がない場合、溢水氾濫による被害はなかったか、大規模に至らなかったと考えられる。

参考文献

- 1) 土屋十園・小山直紀・大石裕泰・佐伯博人：2016年8月の台風10号による岩手県北部水害調査報告，自然災害科学，Vol. 36，No. 4，2018，pp. 409-427，2018。
- 2) 岩手県久慈市災害対策本部および同消防課：台風第10号浸水状況図（久慈川），2016年11月18日。
- 3) 岩手県県北広域振興局土木部：<http://www.pref.iwate.jp/kenpoku/>，2016年11月18日。

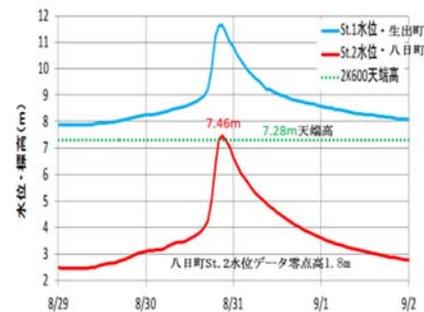


図-4 生出町 St. 1, 八日町 St. 2 の
ハイドログラフ

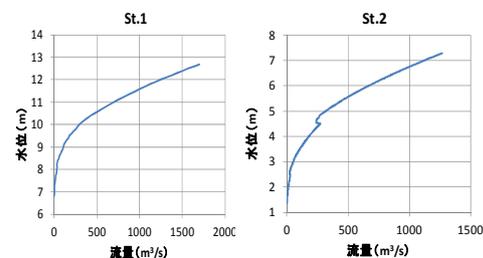


図-5 最適化による St. 1, St. 2 の水位流量曲線

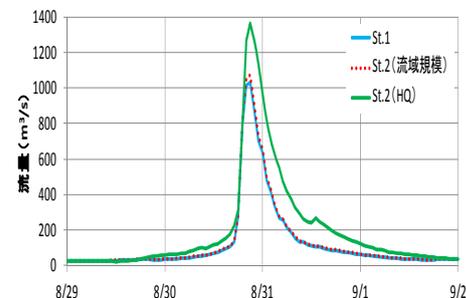


図-6 最適化による St. 1, St. 2 の流量曲線

衛星画像及び地上撮影画像による積雪面積情報を考慮した融雪流出解析

寒地土木研究所 寒地河川チーム 山田 嵩¹
長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 陸 旻皎

1. はじめに

正確な積雪情報の把握は水資源の有効活用や融雪洪水の予測において重要である。衛星画像を用いれば広範囲の積雪情報が得られるが、時間解像度が小さい等の問題がある。一方で地上撮影画像では、情報が得られる範囲（以後、視認領域）は狭いが時間解像度を大きくできる。

そこで本研究では、衛星画像及び地上撮影画像の積雪情報の相関関係に着目し、衛星画像及び地上撮影画像による積雪面積情報を考慮した融雪流出解析を行うことを目的とした。

2. 相関解析

本研究では、対象とする大谷ダム及び笠堀ダム流域の面積標高曲線により、流域を 10 個の標高帯に分割し、QGIS を用いて視認領域を作成した。

作成した視認領域と衛星画像を組み合わせ、視認領域及び流域全体での積雪面積率を計算した。積雪判別には積雪指標 NDSI を用いた。

3. 地上撮影画像

写真の撮影対象期間は 2018 年 4 月 1 日から 2018 年 4 月 23 日までであり、撮影日数は 10 日間である。撮影は大谷ダム及び笠堀ダムの天端より行った。

標高帯の切り出しはカシミール 3D により作成した模擬写真により行っており、積雪判別の閾値には吉田ら(2006)の方法を参考に赤バンドを対象に設定した値を用いた。

適用した手法では目視で積雪、非積雪を判別して各々に教師領域を設定、次に各々の教師領域での赤バンドの中央値を算出した。この各々の中央値に対する平均値を積雪、非積雪領域ごとに算出して、両者の中央値を閾値とした。教師領域は 10 個とし、閾値は各写真に対して設定している。

積雪面積率の計算は対象領域ごとに、閾値以上のピクセル数及び対象領域全体でのピクセル数を合計し行った。ダム流域の積雪面積率の推定式には 1 次関数及び正規化ベータ関数を用いた。正規化ベータ関数は(0,0)及び(1,1)を通る性質を持つ。

4. 融雪モデル

融雪モデルは小池ら(1985)の融雪モデルをベースに、放射収支の計算に太田(1992)のモデルを用いて、底面融雪を考慮したものである。入力データには降水量、気温、日照時間を用いており、計算期間は 2014 年 10 月 1 日から 2015 年 5 月 31 日まで及び 2017 年 10 月 1 日から 2018 年 5 月 31 日までである。

また、ダム流入量より降雨量を減算した値を 5 月 31 日から 3 月 1 日まで加算して、流域の積雪水量を推定した。推定した積雪水量と衛星画像による積雪面積率をプロットして、積雪面積率と積雪水量の関係を推定した。

5. 結果と考察

図 1 には標高帯 5 における積雪面積率の散布図を、図 2 には地上撮影画像による積雪面積率の時系列変化、図 3 には地上撮影画像と衛星画像による積雪面積率の散布図を、図 4 には 2018 年の融雪モデルの計算結果（補正前）を図 5 には融雪モデルの計算結果-2018（地上撮影画像による積雪面積率補正後）をそれぞれ示す。

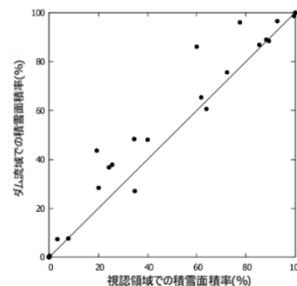


図 1 標高帯 5 における積雪面積率の散布図

¹ 旧所属 長岡技術科学大学 大学院工学研究科 環境社会基盤工学専攻

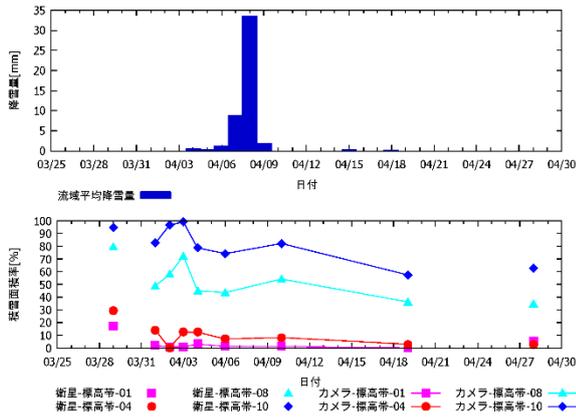


図 2 地上撮影画像による積雪面積率の時系列変化
(正規化ベータ関数)

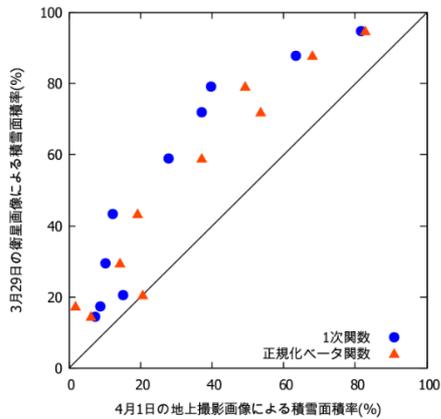


図 3 地上撮影画像と衛星画像による
積雪面積率の散布図

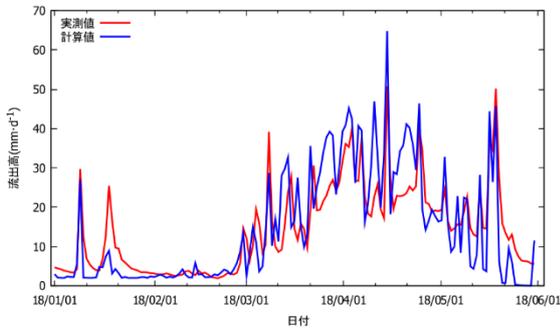


図 4 融雪モデルの計算結果-2018 (補正前)

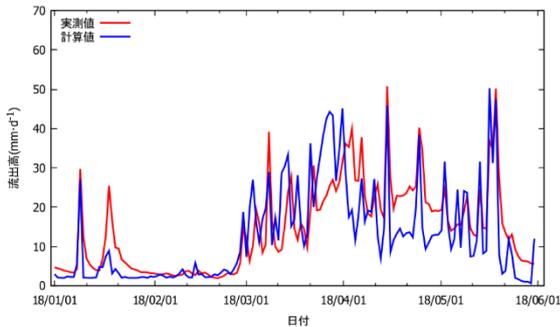


図 5 融雪モデルの計算結果-2018
(地上撮影画像による積雪面積率補正後)

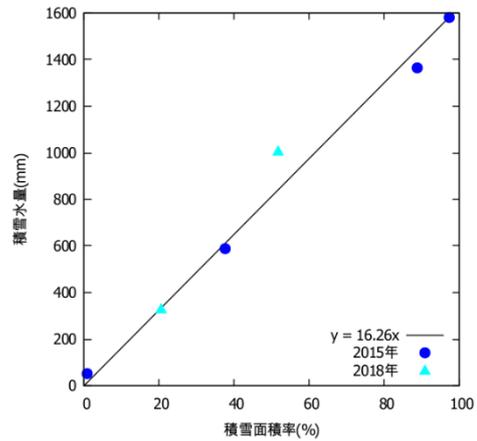


図 6 積雪面積率と積雪水量の散布図

図 1 を見ると、視認領域での積雪面積率と流域全体の積雪面積率には強い相関があり、視認領域での積雪面積率から流域全体の積雪面積率を推定できるといえる。

一方で図 2 及び図 3 を見ると、地上撮影画像による積雪面積率は、時系列変化は妥当だが衛星画像との比較では過小評価となり、負のバイアスが確認できた。これは、地上撮影画像において植生領域の影響があり、衛星画像の撮影日が 2 日前のため融雪が生じたためと考えられる。そのため、積雪面積率の推定精度向上が必要といえる。

融雪モデルによる計算では、図 4 より計算値は実測値の変化の傾向を概ね再現できた。一方で図 5 に示す地上撮影画像による積雪面積率補正後は、融雪末期で過小評価となっている。これは、地上撮影画像による積雪面積率には負のバイアスがあったためと考えられる。また、図 6 より積雪面積率と積雪水量の間には明瞭な相互関係があることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、衛星画像において視認領域での積雪面積率及び流域全体での積雪面積率を比較して積雪面積率に強い相関があることを示した。一方で実際に地上撮影画像により推定した積雪面積率は、負のバイアスがあり過小評価であった。融雪モデルにフィードバックを行った場合でも、融雪モデルの計算値は過小評価となった。今後は、AI によるダム流入量の予測を行う予定である。

1. 目的

IPCC 第 5 次評価報告書では、地球温暖化の影響で大雨の頻度、強度の増加といった極端気象が世界的に増加する可能性が高いことが報告されている。よって、今後、洪水災害も頻発していくと予測される。そこで本研究では、これまでにない多数のアンサンブル実験を行うことによって、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について十分な議論ができるように作成された大規模アンサンブル実験のデータベースである d4PDF「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：database for Policy Decision making for Future climate change」を用いて、九州地方を対象に将来の豪雨変化の解析をおこなった。

2. 内容

2. 1. モデルバイアスの検証

本研究では d4PDF のデータのうち、水平解像度約 20km で日本全域をカバーする領域実験結果を用い、九州地方における過去実験 2500 年分、4°C 上昇実験 5400 年分、2°C 上昇実験 3240 年分の解析を行った。まず、モデルバイアスの有無を検証するために、九州地方 110 地点における 1 時間、48 時間最大降水量の過去実験データと実際の観測データの比較を行った。図-1、図-2 は結果の一例として前原市における 1 時間、48 時間最大降水量のヒストグラムである。図-1 の過去実験データと観測データを比較すると、過去実験データは約 20mm の降水量のとき、最頻値になるが、観測データは約 40mm の降水量のときに最頻値になり、過去実験データの方が低い値の降水量で最頻値になるため、バイアスが大きいことが確認できる。図-2 の過去実験データと観測データを比較すると、過去実験データは約 100mm の降水量のときに最頻値になり、観測データは約 150mm の降水量のとき最頻値になり、バイアスは 1 時間最大降水量の場合よりも小さいことが確認できる。図-1、図-2 の特徴は、前原市以外の地点においても概ね似たような傾向を示している。これらの結果から、1 時間最大降水量については、通常の降雨に加えて積乱雲の発生による局地的大雨などが観測データに反映されるためにバイアスが大きくなり、48 時間最大降水量については、1 時間よりも時間の幅が広く、局地的大雨が発生した場合にも観測データに反映されにくくなるため、バイアスが小さくなると考えることができる。

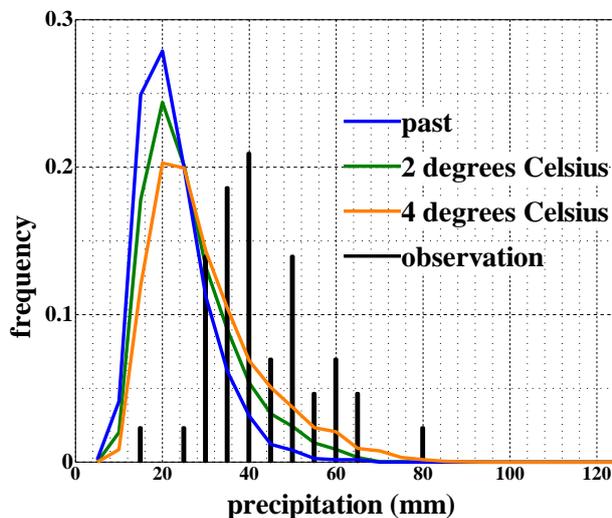


図-1 前原市の 1 時間最大降水量

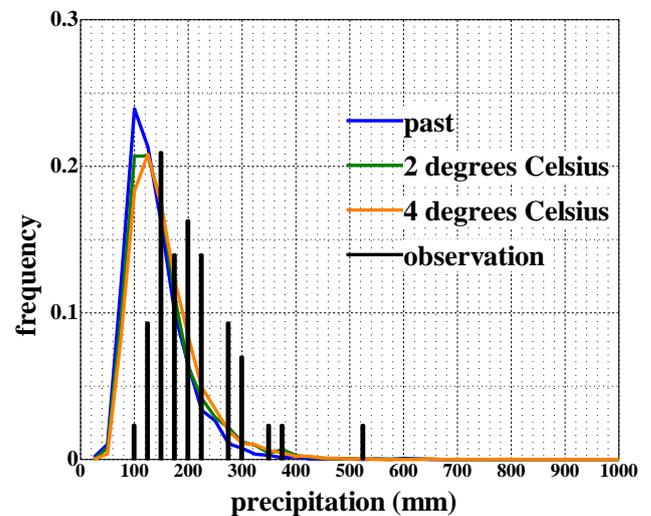


図-2 前原市の 48 時間最大降水量

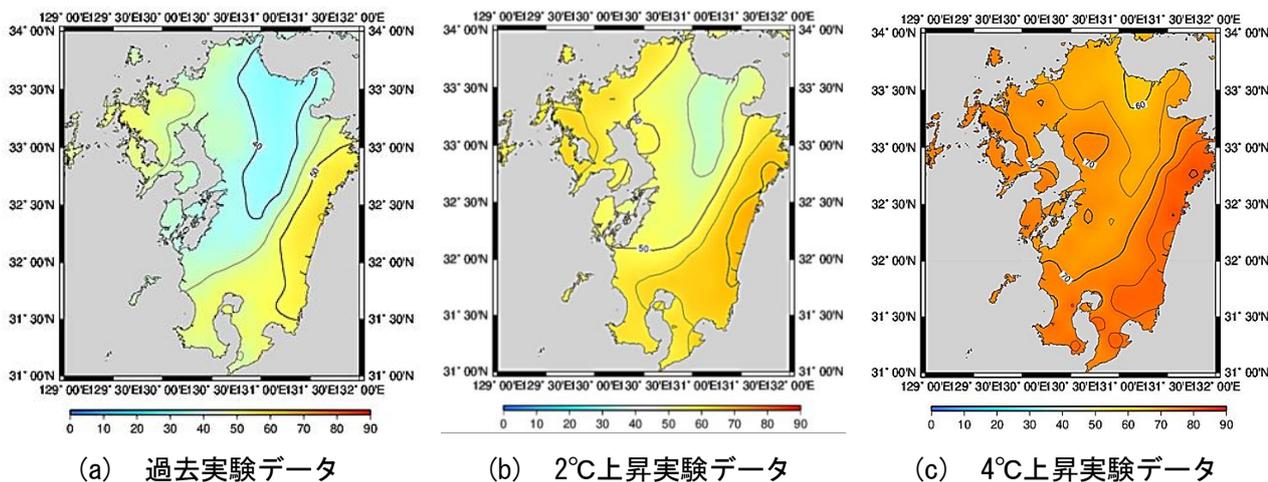


図-3 九州における1時間最大降水量・再現確率50年の分布

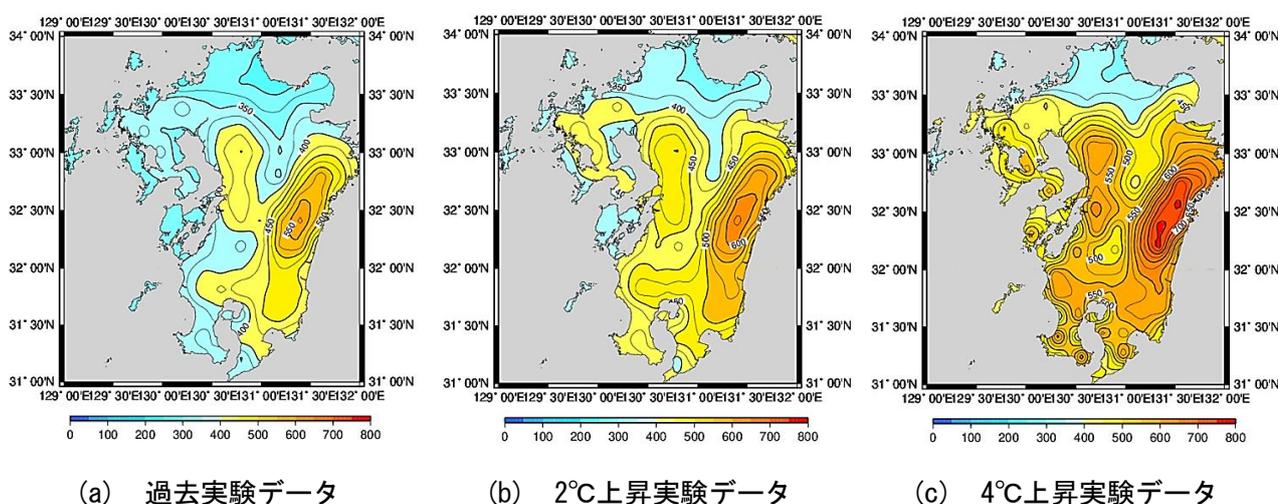


図-4 九州における48時間年最大降水量・再現確率50年の分布

2. 集中豪雨の将来変化

図-3、図-4の(a)は九州での過去実験データによる再現確率50年の1時間、48時間年最大降水量の分布を表したコンター図、(b)、(c)は同様にそれぞれ2°C上昇実験、4°C上昇実験を示す。再現確率の算出に当たっては全アンサンブルデータ(過去実験3000年分、2°C上昇実験3240年分、4°C上昇実験5400年分)を用いて年最大降水量に対する累積確率分布を作成し極値分布を用いて算出した。図-3の(a)、(b)、(c)を比較すると、地球の平均気温が上がるにつれて暖色系へと変化していることが確認できる。全ての実験で、南東部および西部で降水量が多くなる傾向になっており、九州内の1時間降水量の分布特性は、温暖化後も大きくは変化しないことが分かる。図-4の(a)、(b)、(c)を比較すると、1時間年最大降水量と同様に地球の平均気温が上がるにつれて暖色系へと変化していることが確認できるが、地域によって差が見られ、九州北部ではそれほど大きな変化はなく、九州南部および西部で大幅な増加傾向にあることが確認できる。

3. 結論

本研究から、d4PDFデータにはモデルバイアスが確認でき、特に1時間雨量を解析する場合に顕著に見られることが分かった。また、地球温暖化の影響により、平均気温が上昇するにつれて九州全域で年総降水量が増加し、集中豪雨の強度・頻度ともに高くなっていくことが分かった。さらに、集中豪雨の変化には地域差があり、北部では増加量は比較的少ないが、南部では大幅な増加が予測される。

河川環境評価のための Ecological Region について

東京工業大学 環境・社会理工学院 巖島 怜

1. はじめに

河川生態系の保全及び修復のためには、対象となる場の環境の健全度の評価が必要であり、潜在的な生物相が相同とみなせる領域の設定が必要である。生態系が概括的に類似した領域は、Ecological region (Ecoregion) と定義され、環境の質の評価、生態系管理、及び自然修復事業のアセスメント等に利用されている。北米大陸では、地質、自然地理、植生、気候、土壌、土地利用、野生動物及び水文の諸要因を対象に、欧州では魚類及び水生昆虫の固有性 (endemism) に基づき、Ecological region が設定されている。一方、島嶼や半島を多く含む地域では生物相が地域的に細分化されていることなどから、Ecological region の設定が困難な現状にある。日本列島は南北に長い弧状列島であり、複数の Biome を縦断していることや激しい地殻変動等の地理的立地や複雑な地史により、生物多様性のホットスポットとなっている。従って、生物相の健全度を比較する際に Ecological region を適切に設定することが重要である。

本研究は、魚類相に着目し、研究者及び行政機関が実施した魚類調査の結果を統合し、各流域の魚類相の類似度から Ecological region の設定を行うことを試みた。また、その分類に寄与する要因について、従来、生物地理区分線や地質プロセス等の地史的要因が定性的に議論されていたが、本研究ではそれらの議論に加え気象、地形データに基づく定量的解析を行い、魚類相の分類要因について考察を行った。

2. 研究方法

日本列島に位置する流域面積 150km²以上の 181 河川を対象とした。対象河川は、日本国内に位置する魚類データが公表されている河川から、生物データは国土交通省水辺の国勢調査 (1998 年～2016 年) 及び環境省自然環境保全基礎調査 (1978, 1994) の調査結果に加え、63 の文献によって情報を追加した。また、国立環境研究所の外来種データベースを用い、当該河川に移入されたと判断される魚類を解析の対象外とした。対象河川に生息する純淡水魚及び回遊魚を解析の対象とした。河川汽水域に生息する回遊魚は海流の影響を受けて日本列島に浸潤しており、Ecological region を設定するうえで重要な種であることから解析対象とした。一度の調査でも生息が確認された場合は、当該流域に生息する魚種として扱った。対象河川の分類には、二元指標種分析 (Two-Way Indicator Species Analysis : TWINSPAN) を用い、魚類相の類似度から分類を行った。TWINSPAN の計算には、PC-ORD ver4 (MjM Software Design) を使用した。

次に、魚類相の類型化の結果に及ぼす環境要因を把握するための解析を行った。環境要因として気象要因 (海水温の年平均値、気温の年平均値、流域内降雨量の年平均値) 及び地形要因 (流域平均勾配の逆数及び形状比) を指標として採用した。これらのデータは、日本海洋データセンター、気象庁、国土地理院数値地図 50m メッシュ、及び地理情報システム (GIS : Geographic Information System, 以下 GIS と記述) から取得した。魚類相の類型化に影響を及ぼす物理要因を把握するため、魚類相の分類を目的変数に、環境要因を説明変数として類型木による解析を行った。解析結果の説明基準としてジニ係数を採用し、交差確認法を用いて最適な分岐数を算出した。解析の実行には、統計解析ソフト R を用いた。

3. 研究の内容

(1) 魚類相の分類結果とその特徴

TWINSPAN により対象河川を分類した結果、対象とした 181 河川は、16 のグループによって分類された (図-1)。総種数は Group I の河川で 52.4 ± 9.2 種と最も多く、次いで Group I に近接する Group J (48.6 ± 8.5 種) で及び九州島に位置する Group L (46.9 ± 7.1 種) で多かった。また、総種数は Group I から南北に向かうに

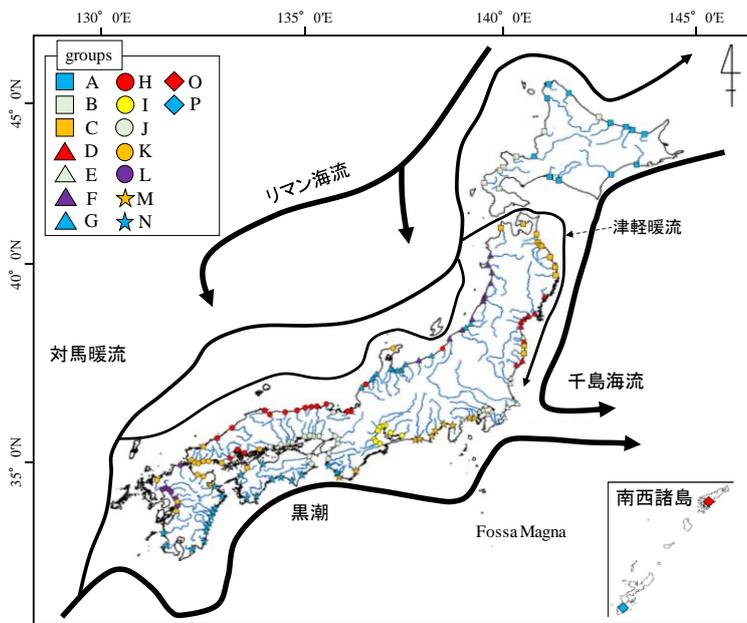


図-1 181河川を対象とした魚類相の分類結果

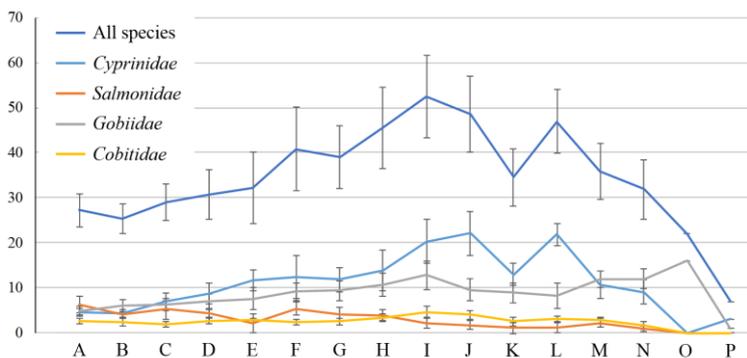


図-2 各グループの魚類相の特徴

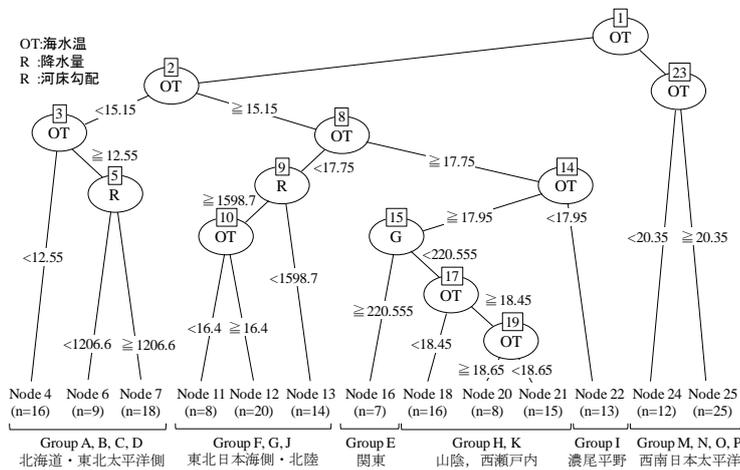


図-3 魚類相の分類結果を目的変数、環境要因を説明変数とした決定木の結果

※図1～3はItsukushima, 2019(Ecol. Indic. 96, pp.69-80)を一部改変したものである。

地域では、低い降水量が魚類相に影響を及ぼしている可能性がある。また、河床勾配は分岐 15 でのみで選択され、勾配が緩い関東地方の河川群を分類する要因となっている。今回対象とした比較的大規模な河川でも勾配が大きい河川が多いが、関東平野は日本列島最大の平野であり、緩勾配河川が多い。他の河川とは異なる縦断勾配が魚類相に影響しているものと考えられる。分岐 15 で勾配が小さいグループに分類された河川は、中国、瀬戸内、山陰の諸河川 (group H, J, and K) は、複数の node に分散しており、今回対象とした環境要因を用いた分類予測が困難な河川群である。中国地方は、河川争奪や古水系の接続などの複雑な地史的要因が魚類相の形成に影響していると考えられる。

つれ減少傾向であった。コイ科種数も総種数と類似した傾向を示しており、Group J で最多の 22.1 ± 4.9 種、次いで、Group L (21.9 ± 2.5 種)、Group I (20.2 ± 4.9 種) であった。サケ科魚類は北日本及び日本海流入河川で多く確認されており、北海道に位置する Group A で最多の 6.3 ± 1.9 種、次いで、Group C (5.3 ± 2.2 種)、Group F (5.4 ± 1.4 種) であった。南西諸島に属する Group O 及び Group P ではサケ科魚類は確認されていない。一方、ハゼ科魚類はサケ科とは異なり、列島の北部で種数が少なく、南へ向かうほど種数が増加する傾向にある。ハゼ科種数が最も多かったのは Group O であり、16 種が確認された。次いで、黒潮の影響を受ける太平洋側の流入河川で構成される Group I で 12.8 ± 3.2 種であった (図-2)。

(2) 魚類相の分類結果と気象・地形要因

決定木による解析の結果、全体の 12 の分岐のうち最も多く選択されたのが海水温であり、次いで降水量、河床勾配であった。全体の誤分類率は 40.9% であり、北日本に位置する Group A, C, D や南日本に位置する Group N, O, P での中率が高いのに対し、西日本の瀬戸内海や山陰に位置するグループでは誤分類率が高い傾向がみられた (図-3)。

回遊魚の日本列島への浸潤には、海流が大きな影響を及ぼしており、魚類相の分類結果を説明する変数として、海水温が多くの方岐で選択された理ものと考えられる。また、降水量は、東瀬戸内や北海道の魚類相の分類結果に影響を及ぼす要因として選択された。流量変動特性は魚類群集構造に影響を及ぼすことが指摘されていることから、この2つの

マイクロプラスチックの分析方法と高松市を流れる河川における特徴

香川大学工学部 吉原航平
香川大学創造工学部 石塚正秀
香川大学創造工学部 上村 忍
香川大学創造工学部 西岡彩美

1. はじめに

近年、マイクロプラスチック（以下、MP）が注目されている。マイクロプラスチックは直径 0.3-5 mm のプラスチック片であり、大きさが非常に小さいプラスチックである。これまで、海洋における生態研究を中心に研究が進められてきた（例えば、Mato et al. (2001)）。プラスチック製品は有機物と比較して分解されにくいため、一旦、自然界中に放出されると、長期間そのまま存在する。そのため、動物や人間の健康に長期的な影響を与える可能性がある。しかし、生態系がマイクロプラスチックをどの程度許容できるのか、また、具体的にどのような影響を与えるのかについては明らかとなっていない。

海域における MP 量を考える場合、河川を通じた陸からの供給が考えられる。工藤ら (2017) は日本国内における河川水中のマイクロプラスチック汚染の実態とその調査手法の基礎的検討を行った。国内 18 河川での調査の結果、得られた MP 数密度 ($0.0064\text{--}2.5$ 個/ m^3) は日本近海 ($0.6\text{--}4.2$ 個/ m^3) より 1 オーダー小さく、河川ごとに材質構成に違いがみられ、大きさは 2 mm 以下がほとんどであったことを明らかにした。また、Kataoka ら (2019) は河川流域の人間活動の影響が大きいほど、河川の MP 汚染が進行していることを明らかにした。

そこで、本研究では、瀬戸内海に位置する都市の一つである高松市の河川に着目し、マイクロプラスチックが存在するのか、存在するとしたらどのような種類があるかについて明らかにすることを目的とする。

2. 研究手法

(1) 河川調査

香川県高松市を流れる詰田川水系の 2 級河川の御坊川（流域面積 18 km^2 ）の河川水を 2019 年 5 月 16 日に、新川水系 (131.9 km^2) の新川と春日川において 2019 年 6 月 10 日に採水した（図-1）。御坊川の周



図-1 高松市の土地利用（平成 26 年）と調査河川、採水地点（赤丸）（高松市（2018）に加筆）

辺は建物用地が多く（図中の桃色）、市街地率が高い。いずれも、気象庁高松アメダス観測所において 3 日間先行雨量が観測されていない、平水時に実施した。

(2) 採水方法

河川内にプランクトンネットを 5 分間浸して、浮遊懸濁物を採取した。ネットを引き上げた後、ネットの下部に集められた MP を採水瓶に捕捉した。さらに、ネット内に残った MP を採取するために、洗瓶にいたれた蒸留水で洗い出した。なお、採水瓶は、ガラス製で滅菌済みである。また、電磁流速計（KENNEK 社製、VP2000）を用いて、河川の流速を計測した。流速、プランクトンネットの断面積、採水時間から、濾水（ろすい）量を計算した。

(3) 分析方法

分析は、FT-IR スペクトル（Fourier Transformation Infrared spectroscopy: フーリエ変換赤外分光分析装置、パーキンエルマー社製、Spectrum™ 100）を用い、ATR（Attenuated Total Reflection: 全反射吸光度測定）法により計測した。FTIR スペクトルとは、分子の構造などを調べる分析方法の一つである。分子はそれぞれ固有の振動数を持ち、赤外線を照射することで、

固有の振動数に対応した波長の赤外線を吸収する。この特性により、分子の構造に応じた赤外線吸収スペクトルを得ることができる。

3. 研究の結果

(1) 既知サンプルの分析

様々なプラスチックのスペクトルの形状を把握するために、種類がわかっているものを対象に分析を行った。ポリエチレン (PE) 製のビニール袋の結果を図-2 に示す。2910、2840 および 1460、710 cm^{-1} にシャープな吸収ピークが確認された。ポリエチレンはエチレンが重合した構造を持つ高分子であり、包装材料や容器などに使用されている。いずれのピークも C-H 結合に由来し、主に C-H 結合で形成される C-H の結合を有するエチレンの特徴を示すスペクトルが得られた。

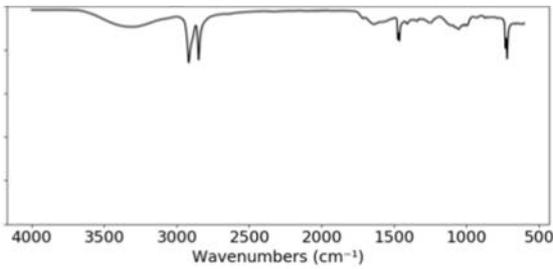


図-2 PE 製のレジ袋の FT-IR スペクトル

(2) 河川調査の結果

図-3 は、御坊川で採取された懸濁物質の一部を示す。ピンセットを用いて懸濁物を選別した。写真左側の黄四角印の二つの物質は、その形状からマイクロプラスチックと考えられる。

(3) FTIR による分析結果

図-4 は御坊川で採取した懸濁粒子のスペクトルを

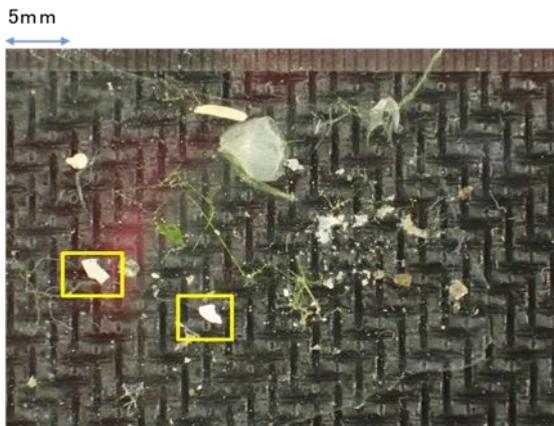


図-3 御坊川で採取された懸濁物質

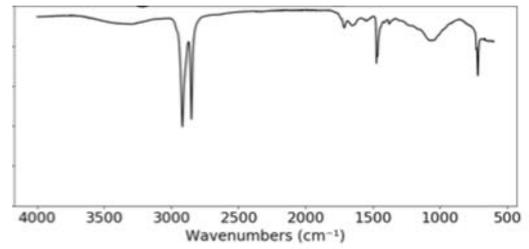


図-4 御坊川の懸濁粒子の FT-IR スペクトル

示す。図-2 で示した既知サンプルのレジ袋と比較すると、2840、1470、710 cm^{-1} 付近にあるピークの位置がほぼ同じであることから、PE と推定される。

図-5 は新川における分析結果を示す。こちらも同様に、スペクトルの形状から PE であることがわかる。一方、春日川においては明瞭な特徴を示す懸濁物はみつからなかった。

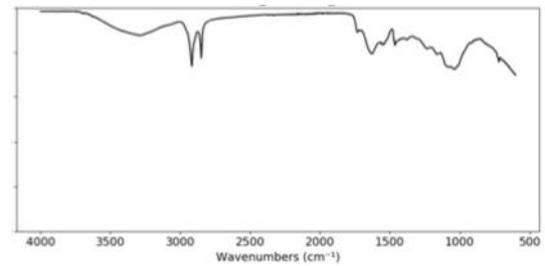


図-5 新川の懸濁粒子の FT-IR スペクトル

4. まとめと今後の課題

今回の調査・分析により、高松市を流れる河川において、PE 製のマイクロプラスチックが発見された。調査方法や分析の前処理は改善の余地があることから、継続的に採取、分析を行う予定である。

参考文献

- 1) Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. and Kaminuma, T.: Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment, *Environmental Science & Technology*, Vol.35, No.2, pp.318-324, 2001.
- 2) 工藤功貴,片岡智哉,二瓶泰雄,日向博文,島崎徳波,馬場大樹: 日本国内における河川水中のマイクロプラスチック汚染の実態とその調査手法の基礎的検討, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.73, No.4, pp. I_1225-I_1230, 2017.
- 3) Kataoka, T., Nihei, Y., Kudo, K. and Hinata, H.: Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan, *Environmental Pollution*, Vol.244, pp.958-965, 2019.

水質項目のデータ同化に関する種々の検討と課題

大阪大学大学院工学研究科 入江 政安

1. はじめに

気象学や海洋学分野で先行するデータ同化技術は主に状態推定、つまり再現と将来予測のために用いることが多い。水質のデータ同化を考えた場合、水質の再現予測よりむしろモデルパラメータの修正やモデル自体が持つ課題を抽出できることのほうが有意義である。しかし、その実現に当たっては課題が多い。本報では、水質項目のデータ同化において、これまで得られている課題について整理する。

2. データ同化

データ同化は、逐次型と非逐次型に分けられる。逐次型の代表例はアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) 法であり、新たな観測値が得られるたびに同化して、同化対象をアップデートする。同化終了後から次の同化まではパラメータや外力条件、境界条件など、不確実性を含む制御変数を変更した複数アンサンブル (10~100 アンサンブル?) を計算し、次の同化時点では、アンサンブルと観測値の差から修正量を算出する。非線形モデルをそのまま使用することができ、新たなコーディングが必要ないことが長所である。一方、非逐次型の代表例は4次元変分法 (4D-Var, アジョイント法) である。4D-Var は時間進行方向に進行させるタンジェントリニアモデルと時間後退方向に逆進させるアジョイントモデルを用いて、同化一期間内の複数の観測値と整合の良い同化結果を得る。時間後退を実現するには、モデルを線形化する必要があり、修正分は線形化モデルで近似的に求めることができると仮定し、線形モデルで進行と後退を行う。この結果、モデルが本来持つ非線形性が同化結果に良くない影響を及ぼす。これを回避するため、4次元変分法に EnKF 法を組み合わせる線形化しない手法などが提案されている。

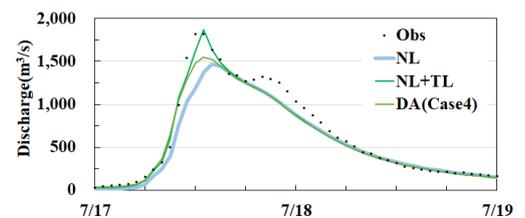


図-1 分布型流出モデルで洪水をデータ同化した結果、NL+TL と DA の差がモデルの非線形性の影響を表している。(小田ら, 2018)

3. 水質項目自体の特殊性

海洋におけるデータ同化では、流速や水位以外には、水温や塩分、クロロフィルが同化対象とされる場合が多い。塩分は負の値に近づくことがなく、水温が負になることは稀である。また、それらの誤差が正規分布から大きく外れることはない。クロロフィルはゼロになる可能性があるが、クロロフィルのデータ同化は内部生産がある水域で行われる

ことが多く、問題が生じる可能性は多くない。一方で、国内の沿岸域や湖沼の貧酸素化研究において溶存酸素濃度 (DO) を同化するとき、無酸素に近い水塊があるのに DO の誤差が正規分布であると仮定してしまうと、同化後の DO は負の値になる可能性が高くなる。そ

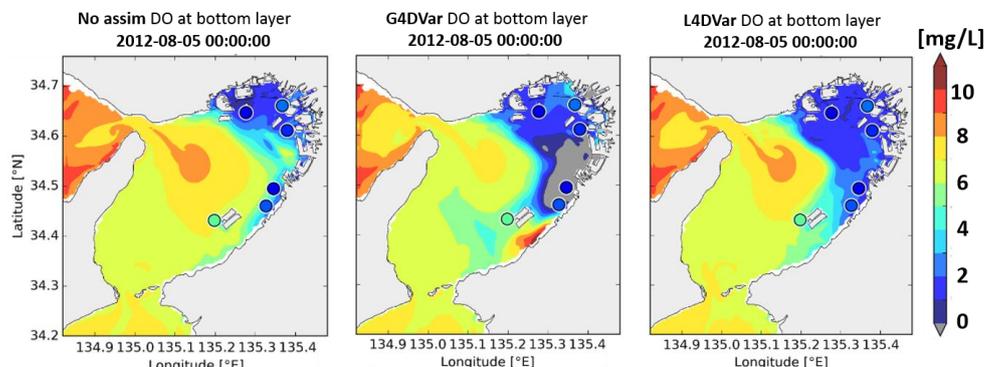


図-2 底面 DO の同化結果. 左: 同化なし, 中: 正規分布を用いた同化あり, 右: 対数正規分布を仮定した同化あり, の結果であり, 平面分布は計算値, ○印の中の色は観測値を, 図中灰色部は負の値を示す。(Irie ら, 2019)

キーワード データ同化, クロロフィル, DO

連絡先 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 irie@civil.eng.osaka-u.ac.jp

ここで、一つの方法として、DO を含む水質項目については対数正規分布（水温・塩分は正規分布）を仮定する（入江ら，2017）．図-2，図-3 に，大阪湾の定点自動観測システムによって常時観測されている1時間間隔，5地点のDO・クロロフィルの鉛直

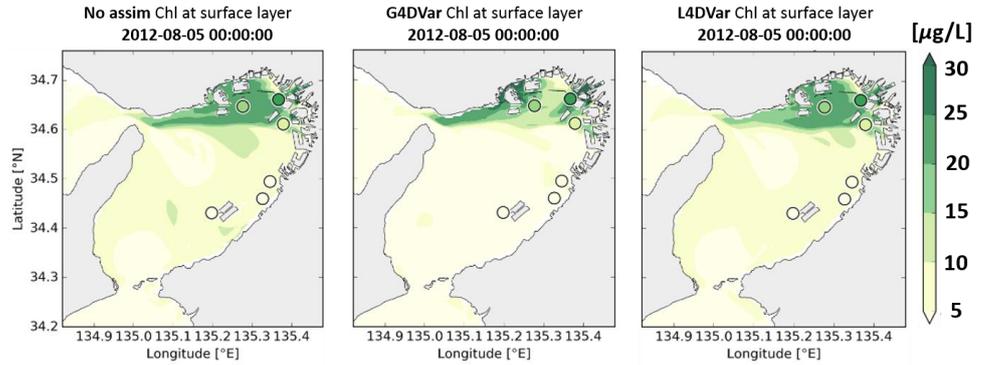


図-3 表層クロロフィルの同化結果. 左：同化なし，中：正規分布を用いた同化あり，右：対数正規分布を仮定した同化あり，の結果. (Irieら，2019)

分布を同化した場合の結果を示す (Irieら，2019)．底層のDO分布を見ると，正規分布を仮定した場合には負の領域が見られるが，対数正規分布の場合はこの領域が解消されている．その一方で，表層クロロフィルにおいては，正規分布の場合，同化後の値が観測値にかなり近づいているのに対し，対数正規分布にすると，その効果が弱くなっていることが分かる．対数正規分布を仮定することによりかえって再現性が低下する現象は中層のDOについても見られた．

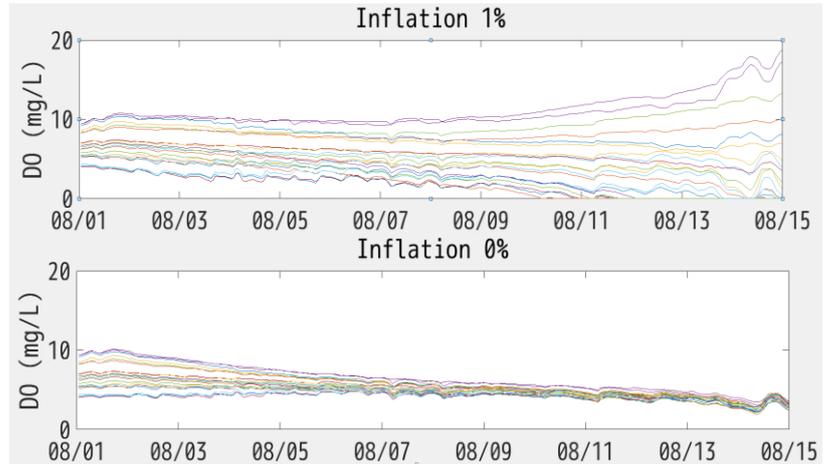


図-4 大阪湾中央部でのアンサンブルメンバーの時間変化. 上：インフレーション率1%，下：0% (吉野ら，未公表)

さらに，もう一つの課題はEnKF法で観られるアンサンブルメンバーがシュリンクする（ばらつきが小さくなる）現象である．気象場のデータ同化に比べ海域の同化ではシュリンクしやすいと言われているが，一度シュリンクしてしまると，次に状態変数が大きく変動するときに追従できなくなり，再現性が低下する．沿岸域や湖沼では外洋に比べて日変動が大きいこともあり，シュリンクは大きな問題となりえる．そのため，EnKF法ではシュリンクを防ぐために，新たな同化前後にアンサンブルの共分散を広げる「インフレーション」という手法が採られる．図-4に大阪湾でDOをEnKF法により同化するときインフレーションの割合を変化させた場合の，湾中央付近の貧酸素ではない地点のアンサンブルメンバーの拡がりを示す．この地点はもともとDOが大きく変動しない地点であるが，0%の場合はシュリンクしている様子が確認できる．その一方で，1%の場合，アンサンブルメンバーは広がっており，下がる方向の一部のアンサンブルがゼロに張り付く結果となっている．その結果，アンサンブルの平均で見た場合，DOは8/11ごろより一転上昇傾向となり，最終的にはあり得ない数値となる．感度解析の結果，DOのインフレーション率は0.5-0.6%程度が良いことが分かった．

4. まとめ

本報では主に大阪湾での水質項目のデータ同化の例を示し，外洋ですでに実施されているデータ同化の手法を沿岸域・湖沼で使用した場合に新たに発生する課題について述べた．特に，無酸素に近い水塊がある水域での計算は，同化パラメータの感度解析や観測値の持つ誤差分布の表現法の入念な検討が必要であり，今後も検討を進めていく予定である．

謝辞：本研究の一部はJSPS 科研費 JP16KK0128, JP17K06576により実施された．記して謝意を表す．

参考文献：小田ら(2018)．アジョイント法を用いた分布型流出モデルのパラメータ推定，土木学会論文集 B1(水工学)，74(5)，I_145-I_150．／入江ら(2017)．対数正規4次元変分法を用いた水質鉛直分布のデータ同化：双子実験による評価，土木学会論文集 B2(海岸工学)，73(2)，I_1243-I_1248．／Irie et al. (2019). Assimilation of vertical chlorophyll and oxygen profiles using the lognormal four dimensional variational method: A case study in Osaka Bay, Japan. Ocean Predict 19, Oral presentation.

河川におけるマイクロプラスチック輸送量評価に向けて

東京理科大学理工学部土木工学科 助教 ○片岡 智哉
東京理科大学理工学部土木工学科 教授 二瓶 泰雄
東京理科大学理工学研究科土木工学専攻 修士1年 小林 俊介

1. はじめに

海洋におけるプラスチックごみの環境汚染は、5mm以下のマイクロプラスチック（MP）の発生により深刻化する。筆者らは、全国各地の河川のMP汚染状況を調査し、9割の調査河川でMPが発見され、人為的影響により水質が悪化している河川でMP汚染が進行していることを指摘した¹⁾。これは陸域でMPが発生していることを有意に示唆している。日本近海は世界の海洋における平均MP濃度の27倍であることが指摘されており²⁾、我が国の陸域から海域へのMP輸送量の評価が急務である。これまで筆者らは、全国河川から海域へのMP輸送量評価を最終目標に据えて、河川におけるMP濃度の①横断面分布調査、②出水時調査、③全国河川調査を実施してきた。そこで、本講演では、これらの結果について紹介するとともに、MP輸送量の評価のための課題点について述べる。

2. 研究手法

(1)横断面分布調査の概要：観測サイトは、東京湾に注ぐ江戸川・野田橋である。観測は平常時を対象とし、横断分布観測を3回（2017/5/31, 2017/7/26, 2017/9/15）と鉛直分布観測を2回（2018/10/30, 2018/11/29）実施した。横断分布観測では水表面の8点、鉛直分布観測で流心にて8層でMPを採取した。

(2)出水時調査の概要：観測サイトは江戸川・野田橋であり、2017/9/17-18と2017/10/23-25の2回実施した。いずれの出水時も流芯の水表面においてMP濃度を計測した。1回目の出水観測は最大流量が674m³/sであり、2回目のそれは1107m³/sであり、1回目比べて2回目の出水規模が大きかった。

(3)全国河川調査の概要：国内29河川36地点を対象に、平常時に水表面のMP濃度を計測した。計測したMP濃度を観測点から上流域の流域特性（流域面積、人口密度、市街地率、農地率）や観測点近傍の水質（pH, BOD, SS, DO, TN, TP）と比較して国内河川におけるMP汚染実態を把握した。

(4)MP採取方法：いずれの調査も共通して口径30cm、目合い0.335mmのプランクトンネット（No.5512-C 簡易プランクトンネット、離合社製）を用いてMPを採取してきた。このネットを橋上から垂らし、河川水表面に一定時間静置した。ネット開口部にはデジタル濾水計（2030R6, GENERAL OCEANS 製）を取り付け、静置時間にネットを通過した水量（以下、濾水量）を計測した。ネットの水表面での静置時間は、5分間を基本として流況に応じて調整し、流速が早い出水時は3分間、流速が遅い時は10分間静置した。なお、自然通水のため、流況に応じて変動するが、平均ろ水量は15m³であり、十分なる水量を確保できていることを確認した。横断面分布調査では、MP採取と同時に超音波ドップラー流速計（ADCP, Teledyne, RDI 製）を用いて流速分布も実施した。また、出水時調査では、MP濃度と濁度との関係を見るために、多項目水質計（Compact-CTD, JFEアドバンテック社製）を用いて濁度を測定した。

(5)MP分析方法：採取されたサンプルを実験室に持ち帰り、目合い0.1mmのフィルターで濾過し、フィルターの上に残った試料を乾燥させる。乾燥試料からMPの候補物質を目視で抽出し、ウルトラマイクロ天秤（XPR2UV, METTLER TOLEDO 製）を用いて質量計測し、CCDカメラ（HDCE-20C, ASONE 製）付電子顕微鏡（SZX7, Olympus 製）によるサイズ計測を行った。そして、フーリエ変換赤外分光光度計（IRAffinity-1S, 株式会社島津製作所製）を用いて、MP同定及び材質測定を行った。同定されたMP個数とMP質量を採取時に計測したろ水量で除すことで、単位水量あたりのMP個数（MP数密度、単位：個/m³）とMP質量（MP質量濃度、

キーワード マイクロプラスチック、濃度、横断面分布、流域特性、水質、輸送量

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641 東京理科大学理工学部土木工学科 TEL: 04-7124-1501 (4072)

単位：mg/m³) を評価した。

3. 結果と考察

(1) 横断面分布調査：2018/10/30 及び 2018/11/29 に江戸川野田橋で計測した MP 数密度の鉛直分布を図-1 に示す。水表面と河床の近傍で MP 数密度が高い。10/30 は両者が同オーダーであるが、11/29 は水表面に比べて河床の MP 数密度が 1 オーダー高い。ここでは示さないが、MP 質量濃度も水表面と河床の近傍で高く、MP 数密度と類似した鉛直分布となっていた。水表面から河床までの MP の材質割合の鉛直分布を調べると、水表面は比重が 1 以下の材質（ポリエチレン (PE)，ポリプロピレン (PP) 及びポリスチレン (PS)) の割合が高く、河床は比重が 1 以上の材質の割合が高かった。このことは、河川内の鉛直混合下であっても比重が 1 より大きな MP が底面に堆積していることが示唆され、MP 輸送量を評価する上で、河床における MP 濃度を調べることの重要性を指摘する。

(2) 出水時調査：MP 濃度 C と流量 Q の相関関係を図-2 に示す。流量が大きくなると、MP 濃度のばらつきが大きくなるが、MP 濃度が流量に依存して増加する正の関係があった。そこで、汚濁物質の輸送特性と同様に、次式で近似した。

$$C = aQ^b \quad (1)$$

ここで、係数 a 及び b は最小二乗法で決定し、得られた結果を図-2 の上部に示す。MP 数密度と MP 質量濃度のいずれも統計学的に有意な関係が得られた。特に、近似式の傾きに相当する係数 b が同オーダーであることは興味深い。MP の比重や大きさの違いにより MP 数密度と MP 質量濃度にばらつきが生じるが、両者が同様の割合で流量に依存して増加することを示唆する。なお、図-2 は水表面における MP 濃度のため、今後上記(1)の鉛直分布を考慮して河川での MP 輸送量を評価していく予定である。

(3) 全国河川調査：全国 29 河川 36 観測点で計測した MP 濃度と観測点から上流域の市街地率を比較したところ、両者に統計学的に有意な相関関係があった (図-3)。同様に人口密度とも比較しても有意な関係が得られ、人口が集中する市街地を流下する河川で MP 濃度が高いことが明らかとなった。また、MP 観測点近傍の水質観測所の水質階級別の平均 MP 濃度を算出したところ、MP 濃度が清涼な河川 (階級 AA) で低く、汚濁河川 (階級 D) で有意に高かった (図-4)。これは、汚濁河川で MP 汚染が進行していることを示唆する。今後、更に観測点数を増やしてこれらの流域特性から MP 濃度の違いを考慮して日本全国河川から海域への MP 輸送量の評価を試みる予定である。

参考文献 1) Kataoka et al., *Environmental Pollution*, Vol.244, pp.958-965, 2019., 2) Isobe et al., *Marine Pollution Bulletin*, Vol.101(2), pp.618-623, 2015.

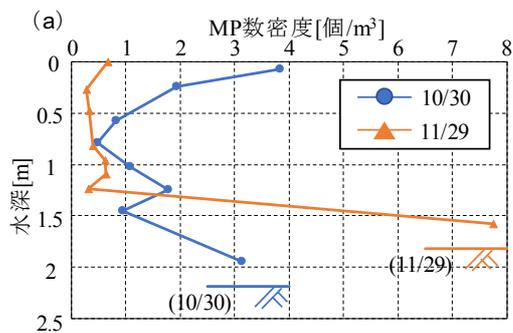


図-1 MP 数密度の鉛直分布

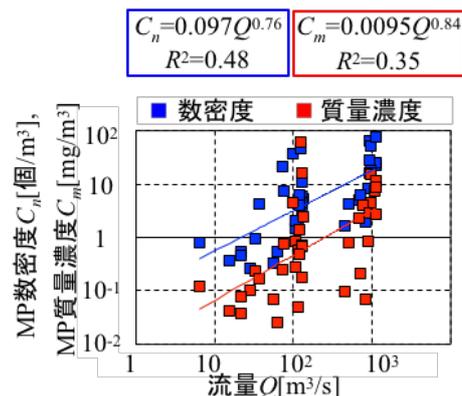


図-2 MP 濃度と流量の相関関係

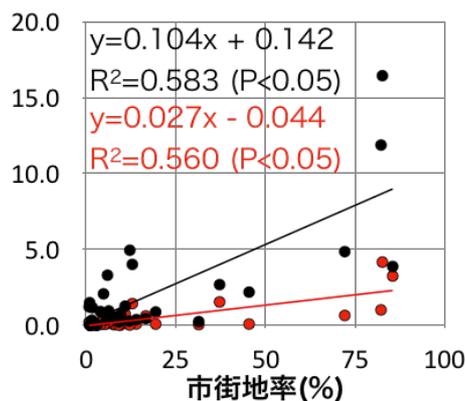


図-3 MP 数密度(黒)及び質量濃度(赤)と市街地率の相関関係

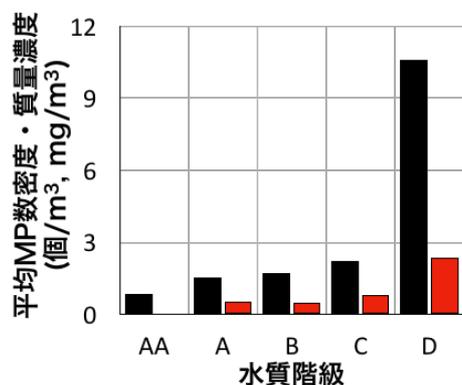


図-4 MP 濃度と水質階級の関係

都市化の程度の違いが河川水温の変動特性に与える影響について

芝浦工業大学大学院 学生会員 ○西俣淳一
 芝浦工業大学 正会員 宮本仁志

1. はじめに

近年、グローバルな気候変動が河川地先の生態系に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。この河川環境を規定する重要指標の一つとして河川水温が挙げられる。河川水温は水圏の生態系や人間の経済活動に深く関連しており、例えば、都市の人工排水が河川水温を上昇させて水生生物に対して影響を及ぼすことなどが例示される。本稿では、この河川水温の季節変動について、首都圏を貫流して東京湾に流入する多摩川と、兵庫県南西部で瀬戸内海に流入する揖保川を対象にして、その変動特性を分析・比較した。

2. 対象河川

図-1 に対象とする多摩川と揖保川の流域を示す。多摩川は流域面積 1,240km²、南北方向に 20km、東西方向に 115km の羽状流域である。流域内人口は約 425 万人であり、土地利用は上流域の森林に対し、下流域では東京都と神奈川の県境を流れているため都市化が著

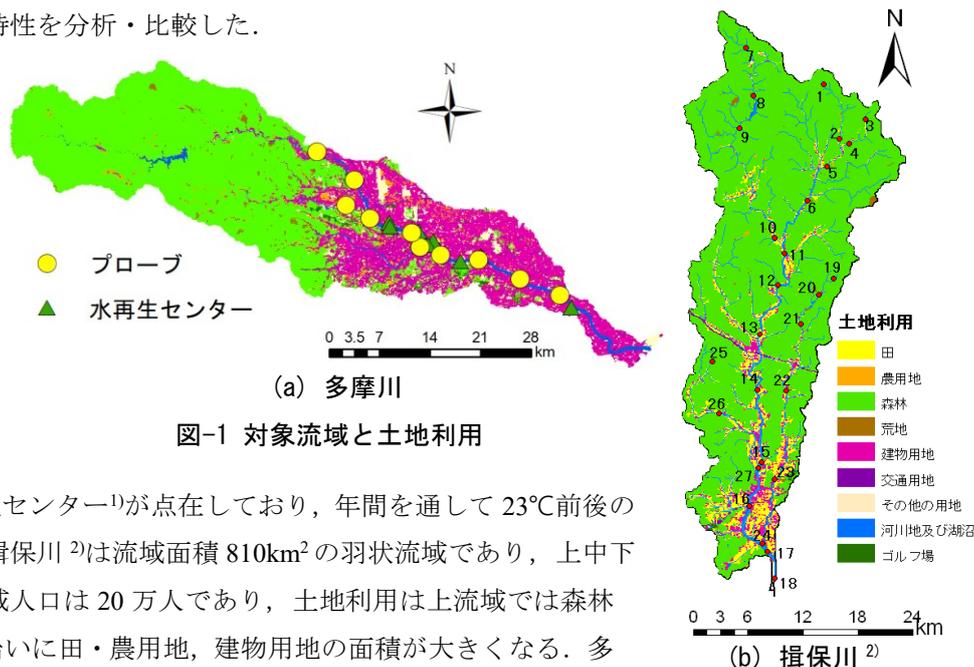


図-1 対象流域と土地利用

しい。中・下流域では 8 つの水再生センターが点在しており、年間を通して 23℃前後の排水が多摩川に流入する。一方、揖保川²⁾は流域面積 810km²の羽状流域であり、上中下流が比較的明確に認識できる。流域人口は 20 万人であり、土地利用は上流域では森林が、それ以南の中・下流域で河川沿いに田・農用地、建物用地の面積が大きくなる。多摩川と異なり水再生センターからの大きな排水は揖保川では行われていない。

3. 河川水温と気象量の関係

河川の水温変動に影響を与える要因として、水面や潤辺からの熱フラックス、支川や下水処理施設からの移流熱などがある。水面からの熱フラックスは河川の水温形成に第一義的に重要であるが、それは気象による部分が大きい。図-2 は多摩川下流域での 2015 年 7 月の河川水温と気象量の関係である。上図の左軸は河口から 32km と 37km の河川水温目盛、右軸は国土交通省石原観測所の河川流量³⁾目盛である。下図は気象庁府中気象観測所の日照時間⁴⁾である。上図より 7 月中旬の大きな出水によって河川流量は約 8℃降下している。その後、流量の減少と日射の回復によって水温は出水前の値まで再上昇する。これより、河川水温は日射や天候などの気象変化によって大きく影響されることが確認される。

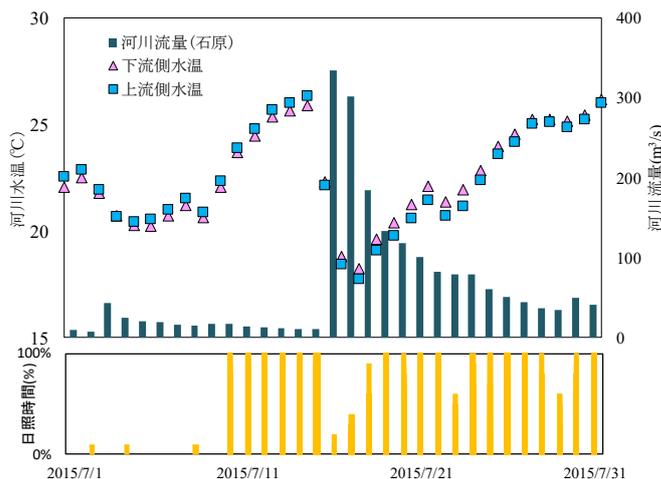


図-2 河川水温と気象量の関係

4. 河川水温の変動特性の分析

本節では表-1 に示す 4 区間で河川水温の変動を分析する。多摩川の中流及び下流 1 区間ではその中間で水再生センターからの処理水が河川に流入する。

表-1 対象区間

河川	河口からの距離	データ期間
多摩川中流	42～54km	2017/12～2018/11
多摩川下流1	32～37km	2014/12～2015/10
多摩川下流2	18～24km	2017/12～2018/11
揖保川	17～23km	2006/5～2013/4

4-1. 多摩川中流

図-3(a)に多摩川中流の河川水温・平衡水温・区間内の処理水温・単位流下距離あたりの水温変化量の時系列を示す。単位流下距離あたりの水温変化量は全期間を通じて正值をとり、冬季から春季にかけて大きく受熱となる。

4-2. 多摩川下流 1

図-3(b)に多摩川下流 1 の同項目を示す。単位流下距離あたりの水温変化量は僅かに変化するが、流下に伴う水温変化はほぼないと見て取れる。一方、冬季から春先にかけて平衡水温と河川水温の乖離が大きいことより、河川水温が変化しないのは上流からの移流水塊が既に処理水によって高温であることが要因の一つと推察される。

4-4. 多摩川下流 2

図-3(c)に多摩川下流 2 の同項目を示す。単位流下距離あたりの水温変化量は、冬季から春季にかけては負、夏季から秋季にかけては正となり、多摩川の他区間と比較して異なる変動傾向となった。平衡水温との比較から、この水温変化は、区間途中での処理水流入の影響がないため、流下に伴って平衡値に漸近するように河川水温が変化することに対応していると考えられる。

4-3. 揖保川

図-3(d)に揖保川の同項目(データ期間の平均値)を示す。ここでは比較のために観測地点上流の集水域面積が多摩川下流 1 とほぼ同じ地点を分析した。単位流下距離あたりの水温変化量を見ると年間を通して若干の受熱傾向である。また、河川水温と平衡水温はほぼ同じ値となり、河川水温が水面熱収支的に平衡状態になる。これは多摩川 3 区間のいずれとも異なる傾向であり、主に処理水流入の有無による熱収支の違いがそれぞれの河川区間の水温形成を特徴づけるといえる。

5. まとめ

河川水温の観測値をもとにして多摩川の中・下流と揖保川の季節変動を分析した。多摩川中流では年間を通して流下に伴い昇温した。一方、下流では処理水流入の有無により流下に伴う水温変化が異なる傾向を示した。さらに、揖保川の対象区間では、ほぼ水面熱収支が平衡状態となり昇温幅は小さく示された。

参考文献

1)東京都下水道局 <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/>, 2) 浦野, 宮本, 前羽, 戸田: 河川流域の流水水温形成における基底流水温の影響について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1681-I_1686, 2013., 3)国土交通省 水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>, 4) 気象庁 <https://www.jma.go.jp/>.

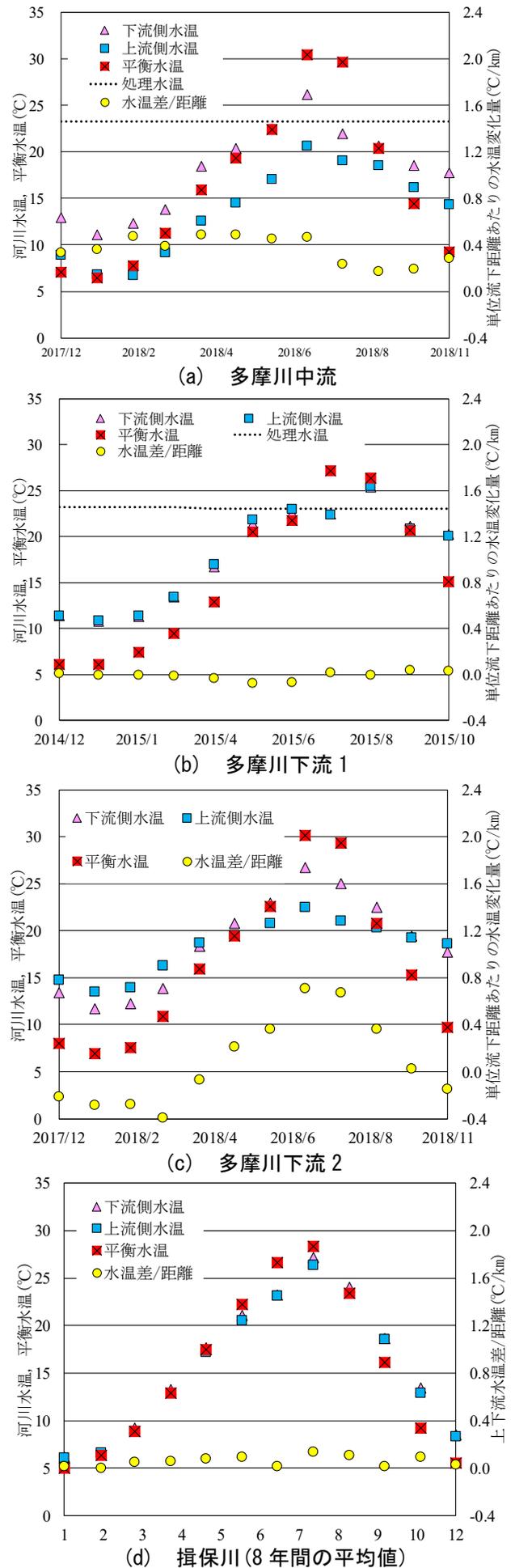


図-3 河川水温時系列

気泡循環対策の施設規模指標に関する理論構築における予備的考察

鹿児島大学 正会員 ○古里 栄一
鹿児島大学 曹 磊
水資源機構 久納 誠
水資源機構 今本 博臣
鹿児島大学 奥西 将之
鹿児島大学 前田 広人

1.はじめに

気泡循環対策は、水資源開発施設の貯留水品質管理における重要な手法である。的確な本対策の適用のためには、工学的適用が効率的に可能であるとともに、十分な学術的根拠に基づく指標が有用である。実用上は施工据付前の段階における基本設計と、稼動後の管理指標とが必要である。本発表では、前者の基本設計指標のうち、吐出空気量と基数からなる施設規模を対象とする。

後述するように、近年わが国では経験的な指標である以下の k 値(丹羽ら 1995)が使用されることがあり、水資源機構ダムでは多くの水域で有害藍藻類の抑制に成功している(今本ら 2013)。

$$k = \frac{\sqrt{Q_{0-P}}}{A_{s-P}} \quad (1)$$

ここで、 Q_{0-P} : 大気圧下での吐出空気量[NL/min.], A_{s-P} : 夏季の湛水面積[km²]である。ここでは、空気量と湛水面積は、実用単位系であることを示すために添え字の-Pを付した。

現在は目標とする k 値は経験的な数値が使用されているが、費用対効果の高い的確な対策実施のためには、理論的な目標 k 値が必要である。図1に、実貯水池における k 値と流入リン濃度との関係を示す。図よりわかるとおり、概ね200から300を境にして、対策効果の発現状況が変わること、この遷移区間では流入栄養塩濃度の上昇に応じて効果が得られる k 値が高くなる傾向が伺える。図中破線は、効果の有無に関する境界線を示したものである。ただし、この境界は図のキャプションに示したような条件あくまで暫定であり、この線に基づく基本設計を推奨するものではない。本発表では目標 k 値の理論構築を行なう上での基礎としての幾つかの考察等を行なった結果について報告するものである。

2.施設規模基本設計にかかる先行知見と課題

気泡循環対策は、artificial circulation (Lorenzen and Fast, 1977, Pastorok et al, 1982, Coocke et al., 2005)や曝気循環対策(国土交通省2005, 2018)として、国内外で数10年以上前から主要な富栄養化対策手法として適用されるとともに(国土交通省2005, 2018)、様々な学術・技術的な膨大な研究・開発が実施されてきた。この中から、上述した施設規模の設計方針として、以下の事例が存在する。気泡循環対策の基本設

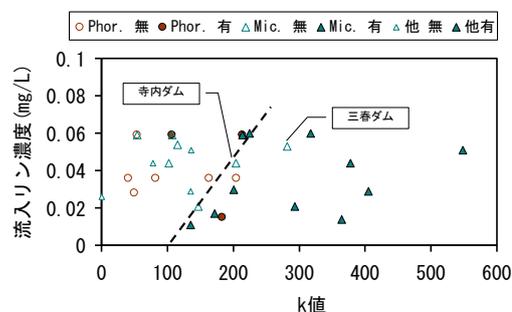


図-1 施設規模(k 値)と流入河川水リン濃度の関係(塗潰しは効果有り、白抜きは効果が認められなかった事例を示す。)(データは、今本ら(2013)より)(旧名)Phormidium属については、 k 値との明確な関係がデータ範囲では認められないために、境界線はMicrocystisに関するものである。また、ダム名を記した境界線の定義からはずれる2データは、共に浅い入り江がアオコ発生源と想定される水域である。こうした貯水池形状特性に加え、取水放流や貯水位変動等の影響が含まれていないことに留意が必要である。

計における要素としては、対策目的である混合状態形成における混合水深の設定方法(Lorenzen and Fast, 1977, Pastorok et al, 1982, 上田ら2005, 古里ら2017)や、施設規模としての吐出空気量(国土交通省2005, Pastorok et al, 1982)に加え、流体力学的観点から高いエネルギー効率を確保できる1基あたり空気量の設定方法(Asaeda and Imberger 1993)などが存在する。また、鉛直次元モデル(森北ら1987)や二次元モデル(梅田2005)実務的には数値解析モデルを用いて数値実験的に水質保全目標を満たす施設規模を設定される方法が多い。

こうした中で土木研究所により約25年前に提唱された k 値(式1)が近年は水資源機構ダムで用いられており、適切な k 値を満たす施設規模とすることにより多くの多目的ダムにおいて有害藍藻類の抑制に成功している(今本ら2013)。 k 値は単純な式で得られるとともに、数値解析モデルの複雑性に伴うパラメーター設定の恣意性や解析作業負荷の大きさを回避できるという優位性がある。ロバストな指標であることから、一つの設計手法として有用性が高い。しかも、式1および以下の簡易な考察からわかるとおり、吐出空気量と気泡噴流量が線形ではなく、ほぼ空気量の1/2乗に比例するという水理学的な特性が考慮されており、これらは海外の設計法の事例でも見当たらない点である。また図1からわかるように、概ね300以上の k 値であれば対策効果は得られる可能性が極めて高いことも経験的に明ら

かである。しかしながら、経験値であることから、過剰性能設計となる可能性も存在する。これは直ちに施設設置費の増加につながり好ましくない。また、k値式で用いられる数値はSIではなく実用単位系であるために、理論的な考察では見通しが悪い。これらの2課題について、本発表では簡易な考察を行なう。

3.k 値の水理学的特性

気泡噴流で生じる広域水平密度流の影響を最も単純に表現すれば、気泡循環で生じる広域水平流量と貯水容量との比として、循環時間を τ_s とすれば、古里ら(2015)の解析と同様に下式となる。なお、本論文では、広域水平密度流の3層構造の中で植物プランクトンのハビタットである表層部を対象とするために、添え字をsとする。

$$\tau_s = \frac{V_s}{Q_s} \quad (2)$$

ここで、 V_s は表層容量、 Q_s は気泡循環で生じる広域水平密度流のうち、表層の集約的流動の流量である。

また単純化して表層容量は湛水面積(V_s)に比例するとする。

$$V_s \propto A_s \quad (3)$$

次に Q_s については、吐出空気量(Q_0)のべき乗数で表すとし、室内実験と現地調査を含む多くの知見から得られた1/2乗則(古里ら2015)を用いれば、以下の通りとなる。

$$Q_s \propto Q_0^{1/2} \quad (4)$$

以上より、下式の通りk値は時間の逆数に関連する単位を潜在的に有している。つまり気泡循環による広域密度流発生時の回転率に関係する。

$$\tau_s \propto \frac{A_s}{\sum \sqrt{Q_0}} = \frac{1}{k} \quad (5)$$

4.k 値の単位系の整理

実務で用いられるk値式はSI単位ではなく、工学的実用単位として、空気量は民生品コンプレッサーの諸元で用いられるNL/min.が、湛水面積は大型ダム諸元で用いられる km^2 が使用されている(丹羽ら1995)。

ここで、従前用いられているk値を実用的単位系k値として k_p とし、SI単位系数値のk値を k_{SI} とすれば、以下の通りとなる。なお、 k_p 式で用いる空気量と湛水面積は、実用単位系であることを示すために添え字の-Pを付した。単位の違いより α は 4.1×10^{-9} となる。

$$k_p = \frac{\sum \sqrt{Q_{0-P}}}{A_{s-P}} = \alpha \frac{\sum \sqrt{Q_0}}{A_s} = \alpha k_{SI} \quad (5)$$

なお、用いる数値に応じて、それぞれのk値の単位は $(\text{NL}/\text{min.})^{0.5}/\text{km}^2$ (k_p)、 $(\text{ms})^{-1}$ (k_{SI})である。SI単位系を用いても力学的な意味が明確ではないが本質的には上で考察したように時間の単位を潜在的に有すると考えるべきである。また、 α の数値から明らかな通り、もしSI単位系を用いるとk値の値は大きなべき乗

数となり、実務者には扱いづらい数値である。このため、工学的実用においては、従前用いられてきた単位系のk値の有用性があると思われる。

4.今後の課題

気泡循環対策の施設規模の指標であるk値に関する理論的考察を行い、要求されるk値の理論化が必要である。

謝辞:本研究の一部は河川財団河川基金助成事業および高橋産業経済研究財団研究助成事業、水資源機構総合技術センター受託研究、琉球大学国際沖縄研究所 共同利用・共同研究事業、ダム技術センター共同研究により行われた。ここに記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 丹羽薫, 久納誠, 久保徳彦, 真田誠至: 流動制御システムに関する実験, 土木研究所資料, 第3375号, 101-102, 1995.
- 2) 今本博臣, 田作光良, 古里栄一: 曝気循環によるアオコ、カビ臭抑制の効果検証—9 ダム貯水池の実証実験結果から—, ダム工学, Vol.23, No. 4, pp.278-289, 2013.
- 3) Lorenzen, M. and Fast, A.: A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management, EPA-600/3-77-004, 1977.
- 4) Pastorok, R.A., Lorenzen, M.W. and Ginn, T.C.: Environmental aspect of artificial aeration and oxygenation of reservoirs: A review of theory, techniques, and experiences, 192pp., NTIS Technical Report, E-82-3, 1982.
- 5) Cooke G.D., Welh E.B., Peterson S.A. and Nicholds S.A.: Restroration and management of lakes and reservoirs, 3rd ed. CRC, 591p, 2005.
- 6) 国土交通省河川局: 曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案), 平成17年10月版, 2005.
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課: ダム貯水池水質改善の手引き 平成30年3月, 2018.
- 8) 上田倫子, 吉田延雄, 横山繁樹, 澤田寿: 曝気式循環施設における混合水深の考え方の一考察, ダム工学, Vol. 15, No.1, 5-13, 2005.
- 9) 古里栄一, Bhuyan, J. K., Marteinsen, M., Nixdorh, B., 今本博臣: 新しい臨界水深評価手法としての修正Sverdrup式—気泡循環の吐出水深設計指針として—, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No. 4, I_985-I_990, 2017.
- 10) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, 249, pp. 35-57, 1993.
- 11) 森北佳昭, 畑孝治, 三浦進: 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル(その1), 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室, 土木研究所資料第2443号, 1987.
- 12) 梅田信: 曝気循環を考慮した貯水池内流動に関する数値解析モデルの構築と検証, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1165-1170, 2005.
- 13) 古里栄一, 久納誠, 丹羽薫, 梅田信: 貯水池気泡循環対策による広域水平密度流 ～低プルーム数における実用式～, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 71, No.7, III_455-III_466, 2015.

河道外貯留ダムが河川の土砂連続性に及ぼす影響

石塚淳也¹・小林草平²・竹門康弘²・角 哲也²

¹京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

²京都大学防災研究所

1. はじめに

ダムは長年運用するなかで、貯水池における堆砂の進行や、水質の変化、土砂連続性の遮断による下流の河床地形や生態系への影響などの様々な問題が顕在化してきた。河道外貯留方式(図-1)は、本川の河道内に大きな構造物を設けることなく貯水することが可能であり、土砂や生物の連続性が維持されることから、下流における河床地形や生物相に対する貯水池による影響を軽減することが期待される。

しかし、河道外貯留方式に関する研究はほとんどなく、その効果については不明な点が多い。本研究では、河道外貯留ダムがどのように環境へ影響を及ぼしているかを研究することを目的とし、国内に河道外貯留ダムがどの程度存在し、どのような目的で運用されているかを把握するために抽出・類型化を行なった。また、群馬県の道平川ダムを対象に河床・底生動物の野外調査を行なって、ダムが河川環境へ及ぼす影響を検討した。

2. 研究手法

(1) 河道外貯留ダムの抽出・類型化

ダム年鑑2013より間接流域を持つダムを選び、それらについて、総流域に占める間接流域の面積の割合が0.5以上、有効貯水容量が100km³以上のものに絞ってダムを抽出した。さらに、国土地理院地図などを用いて、河道外貯留の形を取っているかを確認した。

次に類型化を行なった。ダムの目的によって貯水池の構造や導水方式などの違いにより河川への影響のしかたが異なることが考えられるため、まず3グループ(1:治水が主目的, 2:利水が主目的, 3:発電用調整池)に分類し、諸元情報を基にグループ間で間接流域面積や貯水容量、それらの関係に違いがあるかを確認した。また、一部のダムについては衛星写真から貯水池の利用状態を確認した。

(2) 道平川ダムにおける現地調査

群馬県が管理する道平川ダムは、洪水調節を主目的と

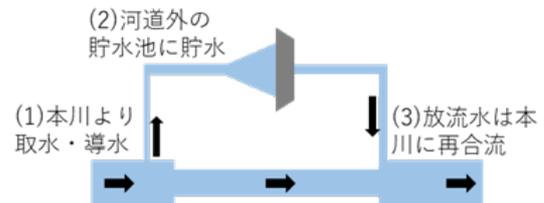


図-1 河道外貯留方式の模式図

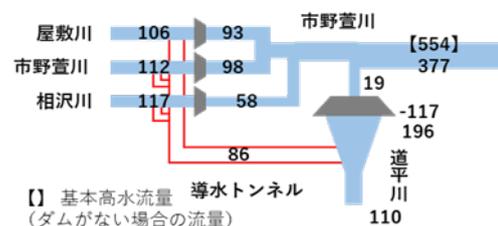


図-2 道平川ダムの流量配分図

し、既得用水の安定化・河川環境維持、上水道用水の確保・供給も行なう多目的ダムである。市野萱川上流の3つの河川それぞれから取水し導水する形になっている(図-2)。土砂連続性への影響について評価するために、各取水ダムの上流・下流、道平川ダム流入部・直下、本川区間のダム放流水合流前後の計10地点において、河床材料、底生動物、水質等に関する調査を行なった。

各地点で河床の写真撮影し、画像より粒径を判定し、粒径加積曲線を求め、代表粒径から河床材料の移動性の指標である無次元掃流力を算出した。また底生動物を採集し、分類群を特定し、個体数を記録した。

3. 結果と考察

抽出の結果、37基のダムを抽出した(分類1:8基, 分類2:27基, 分類3:2基)。分類間で間接流域面積と総貯水容量の関係が異なった(図-3)。分類1は相当雨量(総貯水容量を間接流域面積で除した値)が他の分類より大きく、洪水調節機能を十分に有しているといえる。分類3は発電用調整池であり、発電所に常に送水するという性質から、広大な間接流域を持ちながら総貯水容量は極めて小さかった。分類2については、貯水池の利用状態によって常時貯水型と期間限定型に細分化した(図-4)。その結果、期間限定型の方が相当雨量は大きく、

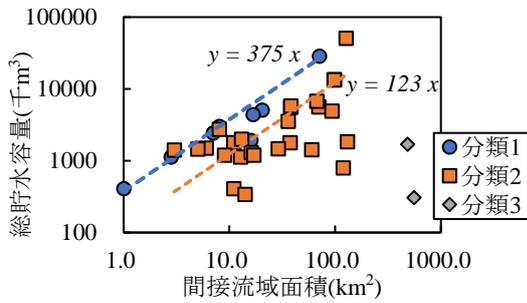


図-3 間接流域面積と総貯水容量の関係

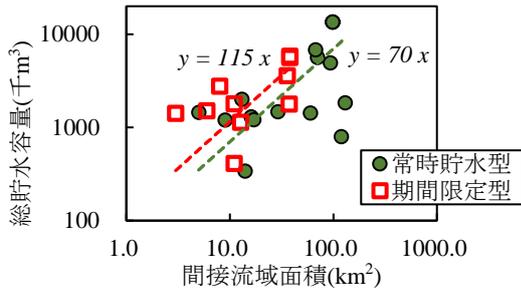


図-4 分類2の間接流域面積と総貯水容量の関係

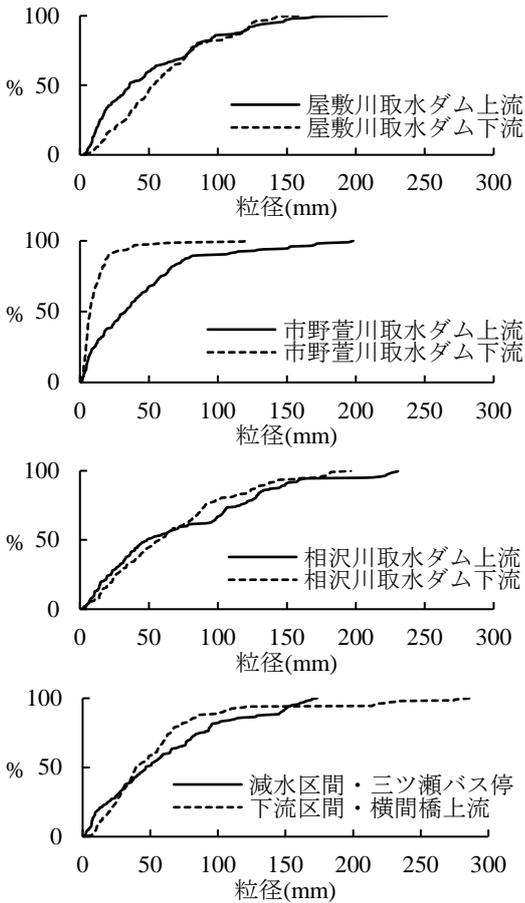


図-5 各地点の粒径加積曲線

間接流域面積は小さい傾向があった。

道平川ダムの各地点、本川区間（三ツ瀬バス停、横間橋上流）における分派による粗粒化もみられなかった。

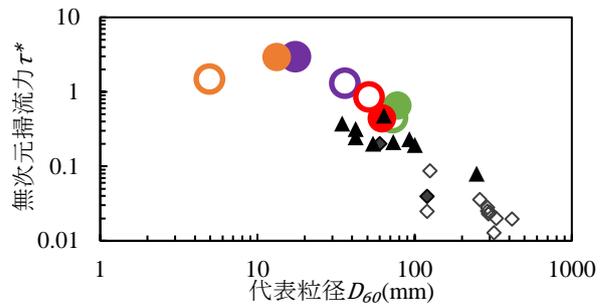


図-6 無次元掃流力

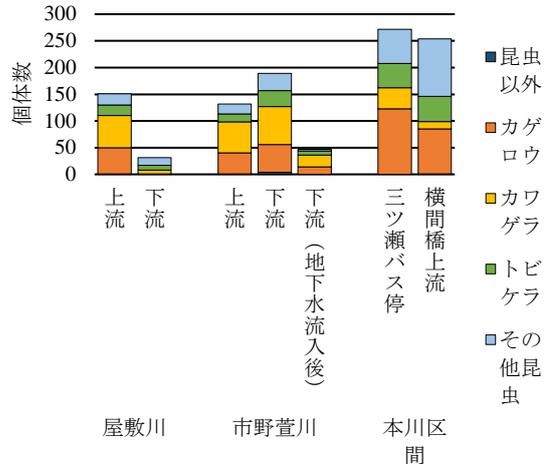


図-7 各地点の底生動物の採取個体数

無次元掃流力（図-6）について、本川区間と相沢川取水ダム上下流では自然河川とほぼ同等であった。その他の地点は無次元掃流力がより大きい傾向にあるが、これは取水ダムによって勾配が低下し粒径が小さくなったことが原因であると考えられる。これらの結果により、取水ダムによる土砂移動の遮断は生じていなかったことが示唆された。底生動物の個体数（図-7）を見ると、今回調査した地点では一般的なダム河川下流でみられるトビケラなどの安定的な河床を好む動物の卓越はなく、土砂移動が維持されていることが示唆された。

4. まとめ・今後の課題

今回は類型化によって河道外貯留方式の数値的特徴を把握するとともに、道平川ダムにおける影響を評価することができた。

今後は、他のダム、とくに利水を主目的としたダムに関する調査を行ない、目的による環境への影響の違いを評価するとともに、洪水調節・貯水池堆砂・水質への影響についても研究を進めることが必要である。

ダム貯水池の形状を利用した濁水対策 —3次元解析モデルを用いた対策効果の予測評価—

CTI 建設技術研究所

守谷 将史、柳井 信一、森井 裕、大川 佳子

1. はじめに

早明浦ダムでは、昭和 50 年のダム完成以降、濁水長期化が課題となっており、これまでにグリーンベルト事業(裸地への植栽等)や選択取水設備の設置等の対策が実施されてきた。これにより濁水は低減されてきたが、現在も大規模な出水時等には写真 1 のように濁水長期化がみられる状況である。

本研究は、早明浦ダムの特徴的な貯水池形状を利用した清水温存フェンスによる濁水対策について、その効果を 3 次元解析モデルにより予測評価するとともに、効果的な運用方法を検討したものである。



写真 1 H30.7 出水後の状況

2. 清水温存フェンスの概要

図 1 に示すように、清水温存フェンスは 3 枚のフェンスで構成され、「出水時にはダムサイト付近の湾曲部に清水を温存」し、「出水後に温存した清水を放流」することで濁水長期化を低減するものである。

フェンス①、②は浮沈式として、出水時は浮沈部を閉じて清水を温存し、出水後に浮沈部を開いて清水を流下させる。ただし、浮沈部の開操作だけでは湾曲部に温存した清水が移動しないことが想定されるため、固定式のフェンス③により湾曲部の清水を押し出す流れを作る。

フェンスの深さは、5m、10m、15m で濁水低減効果と費用を比較し、最も効率的に濁水低減ができると予測された 10m としている。

3. 3次元解析モデルの概要

ダムの水質解析には流下方向と鉛直方向の水質変化を表現できる鉛直 2 次元モデルが一般的に使用されるが、清水温存フェンスによる対策では、平面的な濁水の挙動が重要となる。このため、図 3 のように水平方向 50~100m 間隔、鉛直方向 1m 間隔でメッシュ分割した 3 次元解析モデルを用いて対策効果の予測評価を行った。

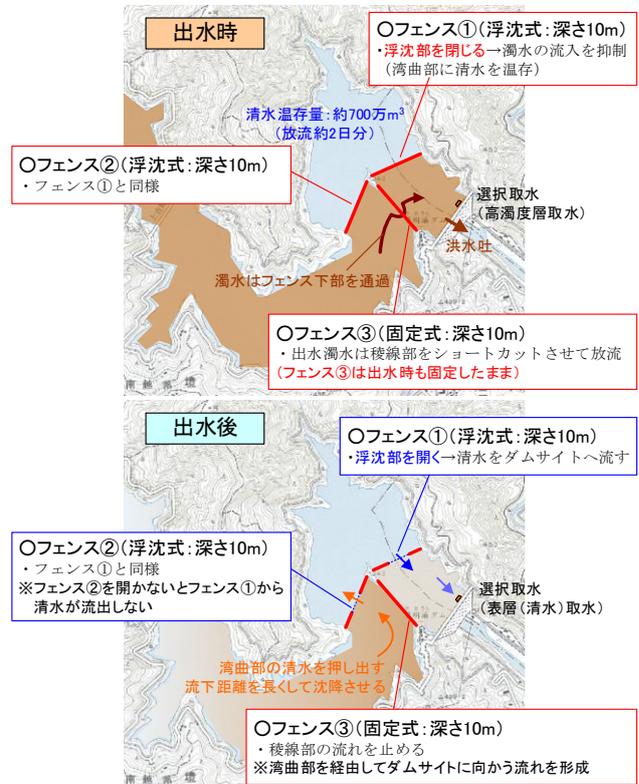


図 1 清水温存フェンスのイメージ 出水後

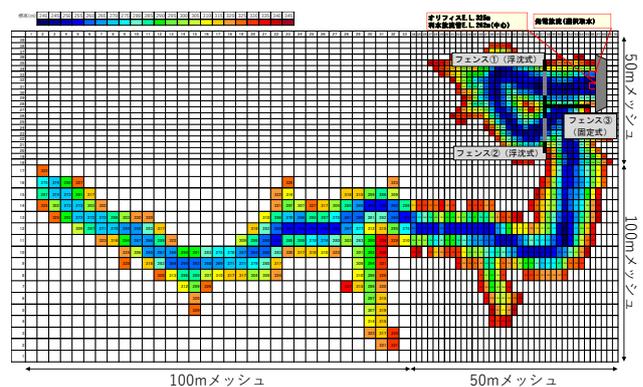


図 2 モデルメッシュ図

4. 清水温存フェンスによる濁水低減効果

(1) 予測条件

上記の 3 次元解析モデルを用いて、清水温存フェンスを使用した場合の濁水低減効果を予測評価した。予測条件として、清水温存フェンス以外の流入量や放流量、選択取水設備の運用方法等は実績と同様とした。早明浦ダムでは、濁水を早期に放流するために選択取水は出水中は高濁度層から取水し、出水後に表層取水に切り替える運用を実施している。清水温存フェンス

は、選択取水を表層取水運用に切り替えるタイミングで浮沈部を開き、清水を放流することとした。

(2) 予測結果

比較的規模が小さい H24.9 出水等では、温存した清水を放流することで、図 3 に示すように、濁水の評価基準として設定されている放流濁度 10 度以下に低減することができる予測された。しかし、出水規模が大きい H16.8 出水等では、図 4、図 5 のケース 1 (青色) に示すように放流濁度を低減できるが、濁度 10 度を下回ることができないと予測された。

5. 効果的な運用方法の検討

(1) 予測条件

大規模出水時に対し、放流濁度を 10 度以下に低減するための運用として、放流濁度がある程度低下してから清水を放流する運用(浮沈部の開操作を遅らせる運用)を検討した。

(2) 予測結果

浮沈部の開操作を遅らせることで、図 4、図 5 のケース 2 (緑色) に示すように、放流濁度をより早く 10 度以下に低減できると予測された。しかし、清水温存期間はフェンスによりダムサイト付近の水域が孤立し、中層の比較的濁度が高い水を上層に引き上げながら取水することになるため、浮沈部開操作までの放流濁度は高くなると予測された。

これを回避するため、フェンス③を浮沈式とし、清水温存期間にフェンス③の浮沈部を開く運用を検討した。その結果、図 4、図 5 のケース 3 (紫色) に示すように、清水温存期間中の放流濁度上昇も抑えながら、放流濁度 10 度超過日も低減できると予測された。

6. まとめ

本研究では、早明浦ダムの特徴的な貯水池形状を利用し、平面的な濁水の挙動を変化させる清水温存フェンスによる濁水対策の効果を、3 次元解析モデルを用いることで予測評価した。これにより、当初想定していた対策諸元・運用における課題が抽出され、より効果的な対策を提案することができた。

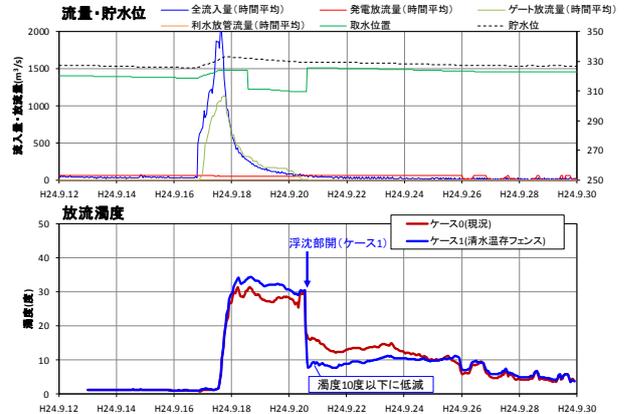


図 3 放流濁度予測結果 H24.9 出水(中規模出水)

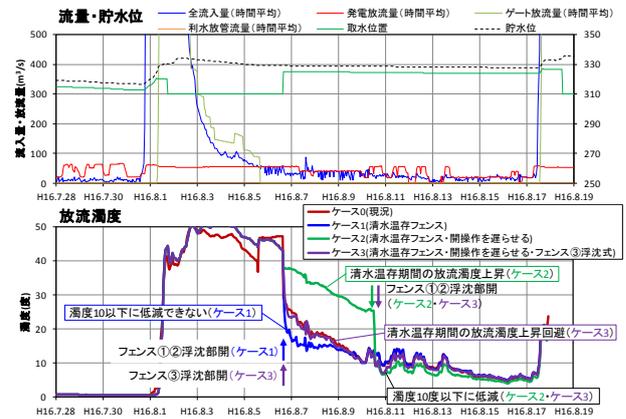


図 4 放流濁度予測結果 H16.8 出水(大規模出水)

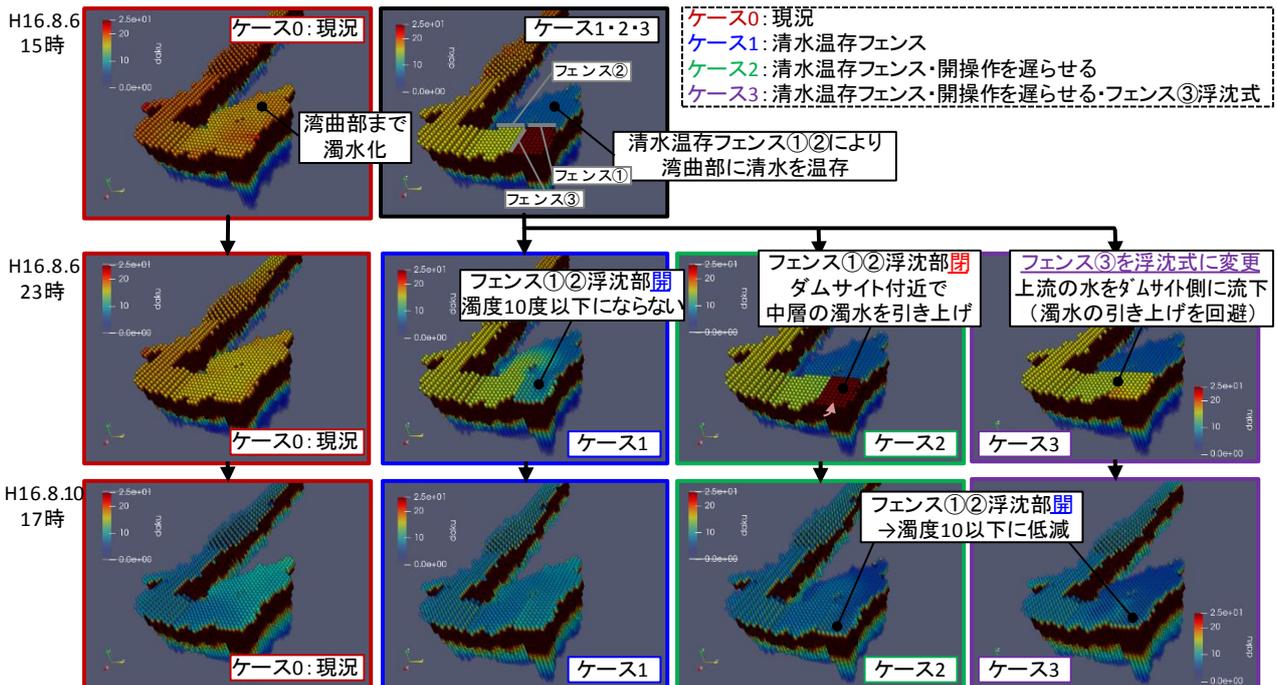


図 5 濁度の 3 次元分布の変化 H16.8 出水(大規模出水)

佐賀県藤津郡太良町に形成された潮汐蛇行の形状・流況特性

京都大学防災研究所 竹林洋史

1. はじめに イタリアのベニスなどのように、海域に近い低平地には潮位変動に起因した流砂によって蛇行流路が形成される。このような蛇行流路は潮汐蛇行流路と呼ばれ、その形成機構については、現地調査や線形不安定解析により多くの研究が実施された(例えば)。また、潮位変動によるガリの形成については、数値シミュレーションによる研究も実施されているが、潮汐蛇行流路の形成、発達過程や発達した潮汐蛇行流路の流況特性や流砂特性に関する知見は不足しており、潮汐蛇行流路を水路実験や数値シミュレーションによって再現するに至っていない。本研究では、佐賀県藤津郡太良町に形成された潮汐蛇行流路について現地調査と潮汐流の数値シミュレーションを実施し、潮汐蛇行流路の形状・流況特性および流砂特性について検討する。

2. 調査河川の概要 図1に調査対象流路の場所と上空から撮影した流路の様子を示す。対象流路は、有明海に面した佐賀県藤津郡太良町の漁港内に形成されている。漁港には、西の多良岳から(図1の写真上から)小規模な河川が流れ込んでいるが、平時は河川に表面流は存在しない。対象地点は潮位変動の幅が広く、大潮の時は4m程度となる。漁港内には非常に多くのムツゴロウが生息しており、有明海内でもっとも生息密度が高いと言われている。河床材料の粒径は、0.1mm以下の細粒土砂で構成されている。なお、対象地点はラムサール条約によって指定されている干潟に含まれていない領域である。

3. 調査方法 現地調査は、定期的に干潮時にドローンによって流路形状の写真測量を実施するとともに、10分に1回の時間間隔でインターバルカメラによって漁港の様子を撮影した。また、圧力式水位計によって、水深の連続観測を実施した。さらに、蛇行の一部を人工的に短絡させ、その後の流路変動特性について検討を実施した。

4. 調査結果 図1に示すように、流路幅50cm程度の蛇行角の比較的小さい蛇行流路(本川)が存在し、その流路に小規模な流路(支川)が複数流入していることがわかる。支川の蛇行角は本川よりも大きい。また、支川の流路にはさらに小規模な流路が横流入しており、フラクタル状の流路網を形成している。図2に潮位の時間変化を示す。対象地点は潮位変動幅が大きいため、潮位が低い時間帯は蛇行形成領域よりもかなり沖まで干潟が露出して流路の中には浸透流起源の表面流のみが存在し、-1.2m程度の水位で保たれている。

図3に蛇行の一部を人工的に短絡させた場合の流路形状の変化を示す。短絡によって三日月湖となった流路の大部分は土砂で埋没したが、下流側の流路は蛇行波長が短く、蛇行角が大きい小規模の流路となっていることがわかる。また、短絡した流路の湾曲の曲率は時間とともに大きくなり、短絡した場所の上下流の約1波長区間で流路の位置が大きく変化している。なお、この領域は、2018年10月から2019年4月の連続観測で流路形状の変化がほとんど見られなかった領域である。つまり、河道の短絡のような大きな変化が発生すると、一ヶ月程度の

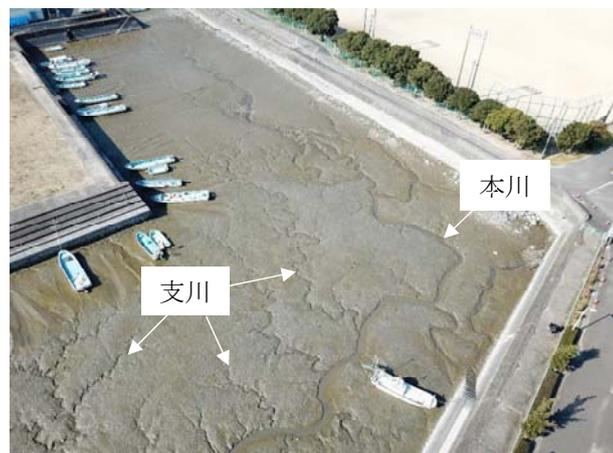


図1 調査対象流路の場所と上空から撮影した流路

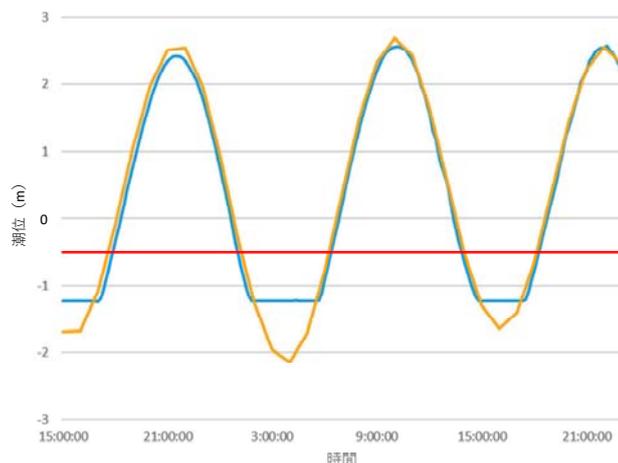


図2 実測潮位(青)と気象庁による沖の潮位(黄)

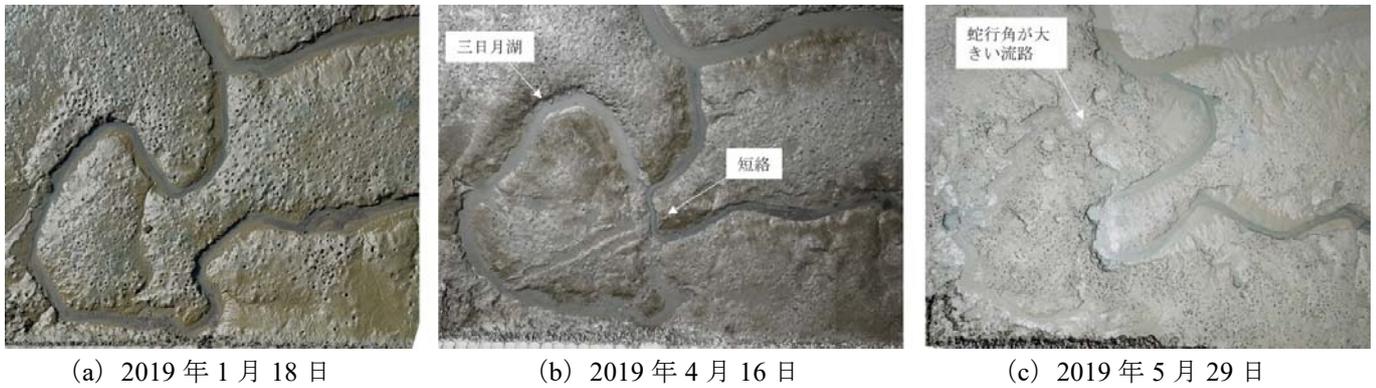


図3 蛇行短絡による流路変動

短時間でも流路が大きく変化することがわかる。

5. 数値解析の概要 数値解析では、図4に示す本川の2波長程度の蛇行区間を対象に流況の解析を実施した。解析に用いた基礎方程式は、竹林らによる飽和浸透流を考慮した平面二次元流れの浅水方程式³⁾である。下流端には実測した潮位から対象地点の潮位に換算した値を与えた。潮位低下時は上流端の水面勾配に対応した流量を上流端に与え、潮位上昇時は下流端の水面勾配に対応した負の流量を下流端に与える。

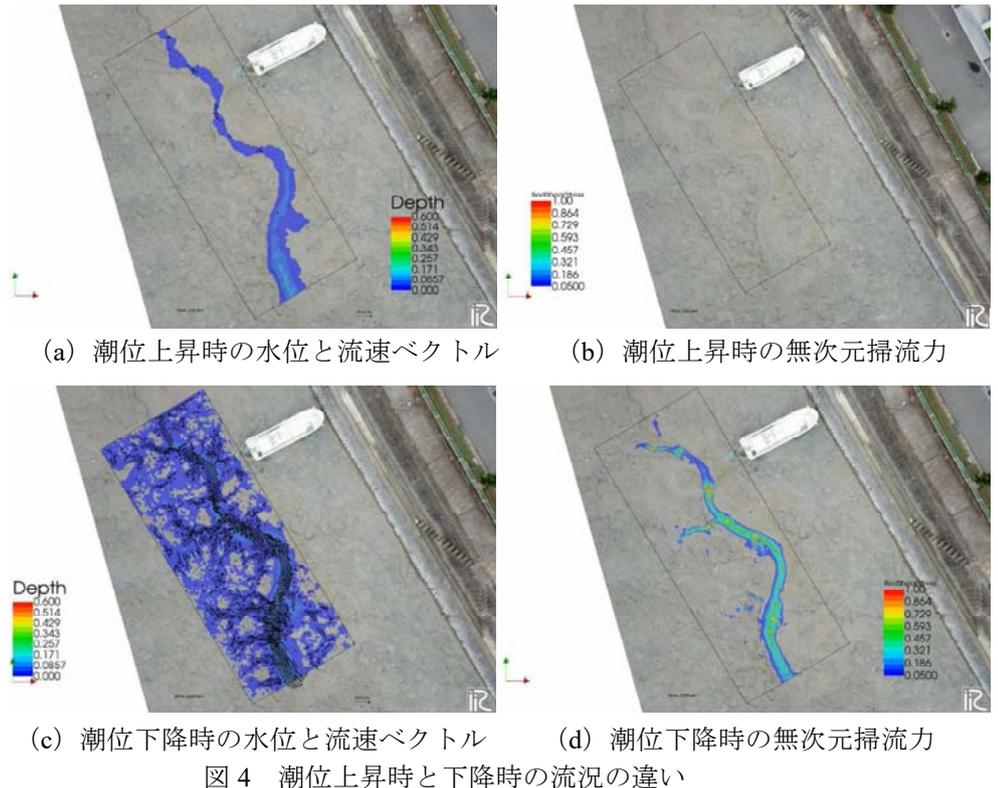


図4 潮位上昇時と下降時の流況の違い

6. 解析結果 図4に潮位上昇時と下降時の水位、流速ベクトル、無次元せん断力の時空間的な変化を示す。なお、流速については5cm/s、無次元せん断力については0.05以上の値のみを表示している。潮位上昇時は流路内で水深は大きな値を示すが、流速が小さく、無次元掃流力は0.05となる時間帯は無かった。一方、潮位下降時は、潮位の高い時間帯は流速が遅いため無次元掃流力が0.05以上とならず、流砂は発生しない結果となったが、潮位が低下するに従い、支川の水が本川に集まるとともに水面勾配が大きくなるため、流速が大きくなり無次元掃流力が大きな値を示した。つまり、太良町の漁港に形成された潮汐蛇行は、流路周辺の水は24時間動いているにもかかわらず、流砂が発生して地形が変動するのは潮位低下時の僅か数時間であり、潮位上昇時の流れは蛇行流路の形成には寄与していないことが明らかとなった。これは、潮位変動による往復流によって蛇行形状の発達を議論している線形安定解析の結果とは大きく異なっている。

謝辞 本研究の現地調査の実施においては、太良町社会福祉協議会及び太良町漁業協同組合にご協力頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献 1) Seminara, G. & Tubino, M.: J. Fluid Mech. 440, 49–74, 2001., 2) 岩崎ら：水工学論文集, 第53巻, pp.745-750, 2009., 3) 竹林ら：水工学論文集, 第47巻, pp.631-636, 2003.

小渋ダム排砂バイパストンネルにおけるインパクトプレートを用いた掃流砂観測

京都大学 工学研究科 学生会員 ○小柴 孝太
京都大学 防災研究所 正会員 角 哲也

1. はじめに

排砂バイパストンネル (Sediment Bypass Tunnels, SBT) は、貯水池堆砂対策手法の一つであり、ダムの上流から洪水と共に流入してくる土砂を下流へとバイパスするトンネル構造物である。SBT は効率的かつ、コスト・環境双方に対して持続可能な技術である点で有望であるものの、高速で流下する礫によるトンネルインバートの摩耗問題が未だ大きな課題として残る。2017 年に京都で開催された、第 2 回国際排砂バイパストンネルワークショップにおいて、当問題を解決するために重要な研究課題は、以下の三点に集約された：1) どのように礫が SBT 内を流下するのか、2) インバートに礫がどのように衝撃を与えているのか、3) どのような摩耗対策が効果的か。

著者らは、上記課題の特に 2 と 3 を明らかにすることを目的として、流速が大きい環境でも土砂モニタリングが可能な、インパクトプレートと呼ばれる間接的掃流砂観測手法の開発および長野県小渋ダム SBT における現地観測を行ってきた。小渋 SBT では、2016 年の初運用よりインパクトプレートを用いた計測を 8 回の SBT 運用期間中に行っており、土砂動態に関する知見が集まりつつあるので、当論文で報告する。

2. インパクトプレート

インパクトプレート (IP, (株) ハイドロテック, 図-1) は、河床に埋め込まれたスチールプレート (49.2 cm × 35.8 cm × 1.5 cm) とその背面に導入されたマイクロフォンから構成される。IP の上部を通過した土砂がプレートに衝突した際に生じる音響エネルギーをマイクロフォンで捕捉し、得られた信号を解析することで粒径や土砂量など流下土砂の情報を得る。IP は、生波形を 50 kHz で記録したのち、得られた波形を砂防分野で広く使用実績があるパルス数 (I_{ps}) とよばれる特徴量に変換する。 I_{ps} とは、音響信号値 (単位: ボルト) が一定の閾値を超えた回数を記録した値である。このとき、信号は 10 段階の増幅率 (Amp) で増幅され、それぞれの Amp に対して I_{ps} がカウントされる。ここで、高 Amp は高感度に相当し、幅広い粒径の礫による衝突が I_{ps} として検出される一方で、低 Amp は低感度に相当し、相対的に大きな粒径の礫のみが検出される。つまり、 Amp 別の I_{ps} から粒径加積曲線を推定することを意図して提案された特徴量である。 I_{ps} の詳細なカウント方法は Koshiba et al. (2018) に述べられている。

小渋 SBT には 5 基の IP が吐口横断方向に設置され、SBT 運用に合わせて計測を行っている (図-2)。これは、流下土砂量の時間変化だけでなく、トンネル湾曲による土砂移動の横断方向の非対称性も観測するためである。

3. 小渋 SBT 運用の観測例 (2017 年 10 月 22 日, 23 日)

2017 年 10 月 22 日から 23 日にかけて、台風 21 号の接近に伴い、約 10 時間にわたり小渋 SBT が運用された。図-3 に SBT 運用中及び前後期間のダム流入量及びバイパス流量、コンジットゲート流量、呑口の水位、貯水池の水位を示す。ゲートは最初、下流環境の急激な変化を避けるために、階段状に開度が上げられた。その後、バイパス流量が約 100 m³/s に到達すると全開にされ流水はバイパス効率が高いフリーフローへと移行した。流入量の減少を受

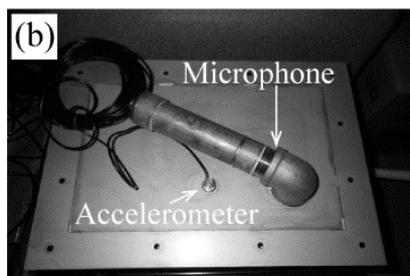
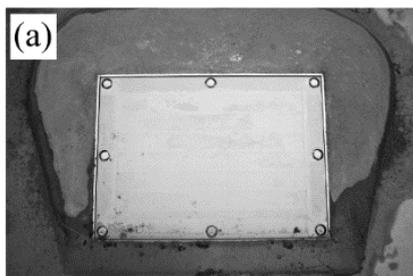


図-1 小渋ダムに設置されたインパクトプレート, (a) 正面, (b) 背面

図-2 5 基の IP の配置

キーワード 排砂バイパストンネル, 流砂観測, インパクトプレート

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 E-mail: koshiba.takahiro.47v@st.kyoto-u.ac.jp

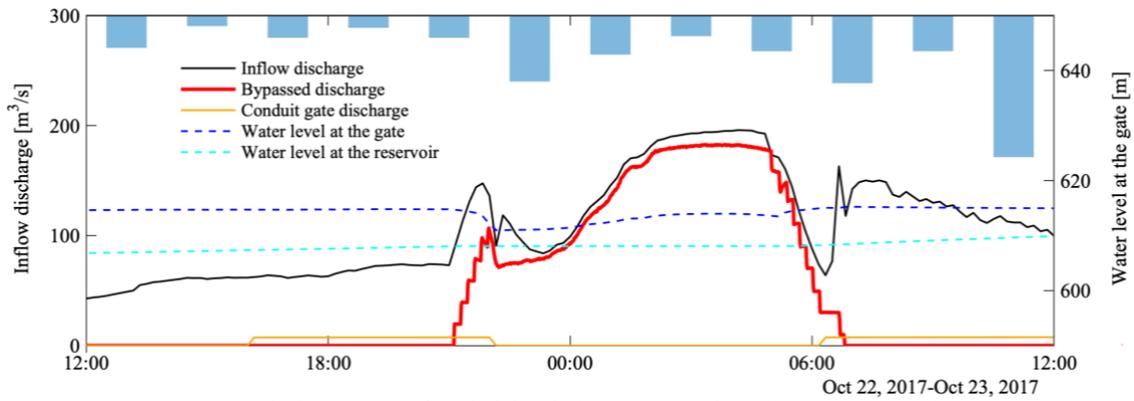


図-3 小渋 SBT 運用時の水文観測データ (2017 年 10 月 22 日, 23 日)

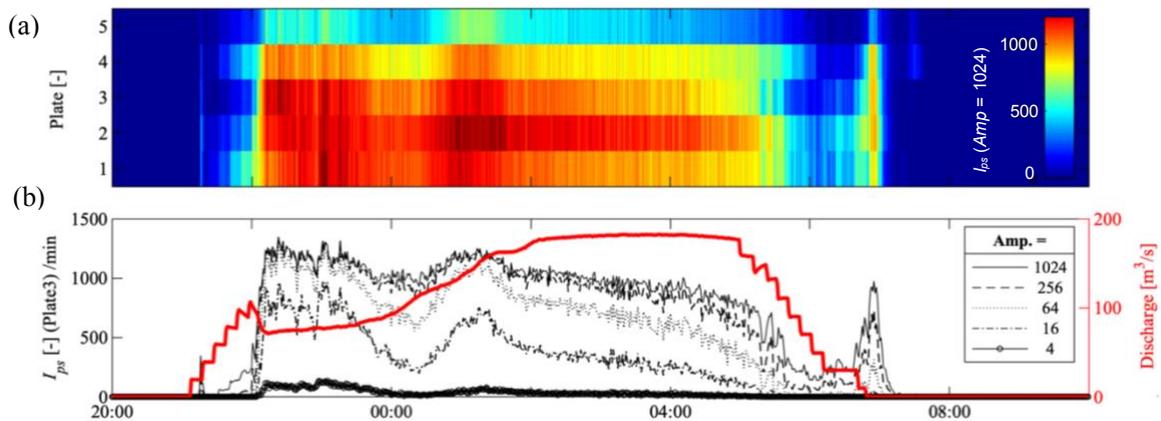


図-4 IP による観測結果, (a) 各 IP (図-2 のプレート番号に対応) によって計測された I_{ps} ($Amp = 1024$) , (b) プレート 3 により計測された I_{ps} ($Amp = 1024, 256, 64, 16, 4$)

け、再び階段状の操作で閉扉を行い、流入量が下がり切る前にゲートは完全に閉められている。これは、閉扉過程においても、SBT 内の流量を十分に高く維持することで、SBT 内の土砂堆積を防ぐためである。

IP による計測の結果を図-4 に時系列で表す。図-4a は 5 基それぞれの IP による I_{ps} ($Amp = 1024$ 倍, 最高増幅率) を示す。また、図-4b は、バイパス流量とプレート 3 (図-2 の番号と対応) がカウントした I_{ps} のうち、5 つの Amp に対応する値を示す。これらより以下のことがわかる：

1. プレート 4, 5 による I_{ps} の値は他のプレートによる値と比べて小さい (図-4a)。これは、トンネル湾曲による二次流の発生に起因していると想定される。つまり、土砂はトンネル湾曲の内側に集中するため、外側に位置するプレート 4, 5 では流砂量が小さくなる。奈良県旭 SBT では、インバート摩耗の実測値がトンネル湾曲内側で大きいことが報告されており、今回の計測結果と一致している (Nakajima et al., 2015)。
2. 図-4b より、土砂の到達・流下終了時点が明確に確認される。また、流砂量の相対的な時間変動が I_{ps} の時系列変動より確認できる。特に、フリーフローになった直後に大きな流砂量が現れたことが推測される。
3. 図-4b より粒度について流量が最大値に達する前に、低感度の I_{ps} ($Amp = 4$) が最大値を観測している。これは、フリーフローになった直後に大粒径礫が SBT に引き込まれたことを示している。また、2 時から 5 時にかけては、 I_{ps} が全ての Amp に対して一定率で減少しており、流砂量は減っているものの、粒径分布の変化は小さかったことが推測される。以上のように、 Amp 別 I_{ps} から凡その粒径の時間変化が推測可能である。

参考文献

Koshiha, T., Auel, C., Tsutsumi, D., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2018). Application of an impact plate-Bedload transport measuring system for high-speed flows. *International journal of sediment research*, 33(1), 35-46.

Nakajima, H., Otsubo, Y., & Omoto, Y. 2015. "Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam", *Proc. Int. Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilung 232 (Boes, R.M, ed.), ETH Zurich, Switzerland:21-32.

砂分主体の置土の流出・流下状況に関する現地調査

八千代エンジニアリング株式会社 小林真之, 鈴木伴征

1. はじめに

近年、ダム堆砂対策やダム下流河川の河川環境改善を目的として、様々な河川で置土による土砂還元が実施されている。土砂還元を実施する際には、治水面・利水面・環境面に配慮して、置土に用いる土砂の質や量を設定する。しかし、置土に使用する土砂は現地の採取場所の制約条件に大きく左右されるため、濁水の主成分となる細粒分が含まれる場合がある。

また土砂還元を実施する場合、必要に応じてその土砂の流下範囲や到達範囲を把握するためのモニタリング調査を行うが、置土の粒径成分が浮遊砂が主体の場合、到達範囲が広範囲に及ぶことから、流下実態を把握することは困難である。

そこで今回、堆砂対策の影響把握を目的として実施した A ダムの下流における計 5 回分の土砂還元試験における、置土の流出状況と置土のトレーサー追跡調査から得られた知見について紹介する。

2. 対象地の概要

今回対象とした A ダムは、堤高 25m 程度の重力式コンクリートダムであり、ダム完成当初から計画の堆砂速度を超過しており、現在堆砂率が 150%以上となっている。流域は泥岩や砂岩が主体で有り、ダム堆砂の粒度構成としては 70%を砂分、粘土・シルト分が 25%を占めている。

A ダム下流の B 川は、ダムから約 10km までの河床勾配は 1/100~1/200 であるが 10km 下流~河口は 1/1000 程度となり、比較的緩やかな河床勾配となっている。B 川中流~A ダム間では河床低下が生じており、護岸の被災等が報告されている。

A ダムでは、ダムの堆砂を用いた置土による土砂還元試験を 7 年前から計 5 回実施しており、ダムから 150m 程度下流の右岸側に置土している (図 1)。

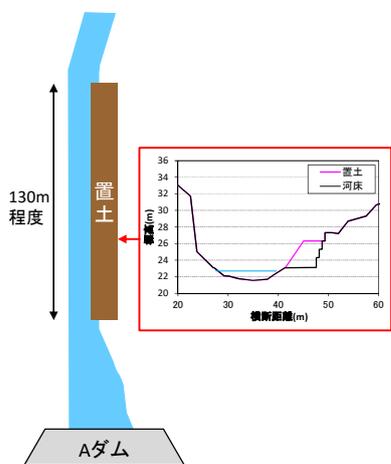


図 1 A ダム下流での置土の設置イメージ

3. 現地調査の概要

(1) 置土の流出量調査

A ダム下流での置土の設置イメージを図 1 に示す。置土は延長 130m 程度、幅 5~10m、高さ 2.5~4m で、河川に沿って縦断的に細長に設置している。細長形状の置土の流出状況を把握するため、ポールや巻き尺等を用いた簡易計測を定期的に行うことで置土の流出量を把握した。

(2) 置土のトレーサー追跡調査

置土の流下距離を把握するために、カラーサンドをトレーサーとして用いた追跡調査を実施した。調査に使用するカラーサンドは代表粒径が 0.3 mm と 1.0 mm の 2 種類のものを使用し、置土の高さ方向に 3 段ほどを敷いて、置土と同時に流出する構造とした。置土の流出後にダム~河口 (約 30km) の砂州等に設定した代表箇所 11 地点で土砂を採取した。その後、採取した土砂を乾燥させ、乾燥重量 100g 当たりに含まれるカラーサンドの個数と粒径を目視により確認した。

なお、トレーサー追跡調査は第 1 回試験~第 3 回試験の計 3 回で実施し、カラーサンドの色は 1 回目が赤色、2 回目が青色、3 回目が緑色を使用した。

4. 置土の流出に関する現地調査

(1) 置土の流出状況

A ダム下流での置土の設置概要と流出状況を図 2 に示す。第 1 回試験では、1500 m³ の置土を設置し、設置 3 日後に発生したピーク流量 110 m³/s の出水によりほぼ全量が流下した。第 2 回試験では、3100 m³ を設置したが最初の出水までに 2.5 ヶ月ほどかかり、その後置土の高さ半分程度まで冠水する 50 m³/s 以上の出水が 6 回生じ、そのうちピーク流量 260 m³/s の比較的大きい出水が生じたが、全量の流出には至らなかった。第 3 回試験では、2000 m³ の置土を設置し、30 日後に発生した 240 m³/s の出

項目	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
置土流出量・残存量 (m ³)					
	置土高(m)	3	4	2.5	3
置土の粒径					
	設置時期	出水期	非出水期	出水期	非出水期
設置から最初の出水まで経過日数	3	79	30	-(*)	10
設置から調査までの経過日数	11	242	48	-(*)	10
出水規模 (m ³ /s)	110	260	240	-(*)	150
出水回数 (50m ³ /s以上)	2	7	2	-(*)	1

※調査期間内に出水発生せず

図 2 A ダム下流での置土の設置概要と流出状況

水で90%が流出した。第4回試験では、2000 m³の置土を設置したが、その後出水が発生せず置土がほとんど流下しなかった。第5回試験では、2000 m³の置土を設置し、10日後に発生した150 m³/s出水でほぼ全量が流出した。

また第2回、第4回試験では、置土設置から数ヶ月後には置土が固化した状況となり、さらに植生が繁茂するなど、流出しづらい状況となった。

(2) 置土の流出に関する考察

置土性状・流況と置土流出率との相関性を図3にまとめる。置土流出率と置土性状や流況の各指標との想定される相関性を確認し、整合が取れている指標を抽出したところ、置土の流出しやすい条件として、以下の条件が確認された。

- ① 置土の粘土成分の割合：置土の粘土成分の割合が小さいほど、流出率が高くなる様子が見られる。これは粘土成分が少ない土砂ほど粘着性が小さく、置土が固化しにくく、置土が流出しやすい状況であると考えられる。
- ② 最初の出水までの期間：置土の設置完了から出水が生じるまでの期間が短いほど、自重による圧密の影響を受けて固化する可能性が低くなり、置土流出しやすくなると考えられる。また第2回試験や第4回試験等では出水が少ないため植生の繁茂し、さらに流下しにくくなる状況が確認された。
- ③ 置土の高さ・置土量：置土量が少なく置土の高さが低いほど、施工時の転圧や自重による圧密がしにくくなり、置土が固化しにくい状態であると考えられる。

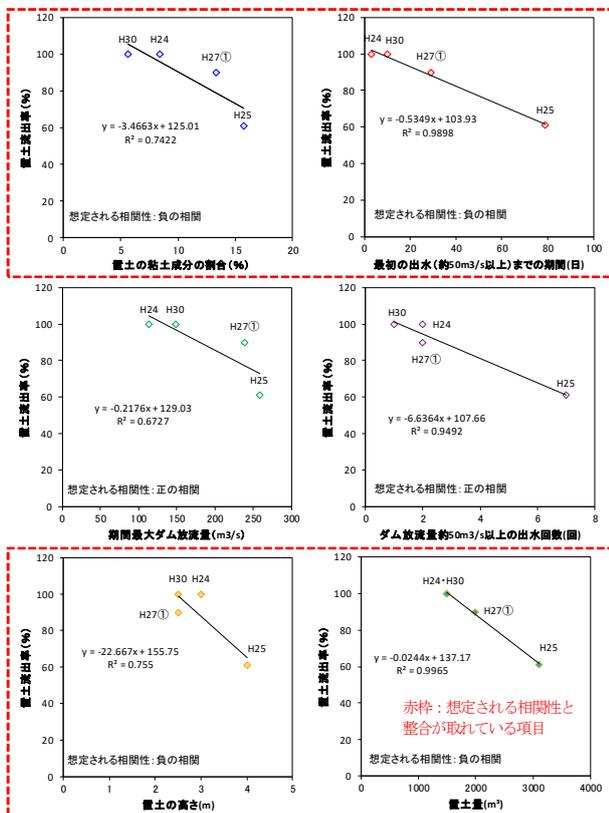


図3 置土性状・流況と置土流出率との相関性

5. 置土の流下に関する現地調査

第1回～第3回試験で実施したトレーサー追跡調査結果を図3に示す。第1回試験(カラーサンド：赤)では、置土がピーク流量が60,110 m³/sの2出水で流出し、上流の調査地点の他、中流～河口まで広い範囲で堆積している状況が確認された。

第2回試験、第3回試験では、ピーク流量が200 m³/s以上の出水で置土が流出し、中流～下流の調査地点で青や緑のカラーサンドがほとんど確認されなかった。このことから、Aダムで放流量が200 m³/s以上になるとダム直下の置土は河道に堆積する海域まで一気に流出すると考えられる。一方、赤カラーサンドは中流から下流にかけて、青や緑のカラーサンドより含有数が多い結果となった。これは、赤カラーサンドは一度河床に堆積したため200 m³/s規模の出水が発生しても河床付近の流速は非常に小さく、第1回試験の置土は比較的河床に留まったものと推測される。

また青カラーサンドに着目すると、第3回試験では第2回試験で確認されなかった地点でも発見された。このことから、一度河床や河岸部に堆積した置土が徐々に流下していき、新たに堆積しているものと考えられる。

6. 最後に

土砂還元を使用する土砂は、貯水池の土砂であるため、少なからず細粒分は含まれることから、設置時期・設置形状をより工夫するなど対応していく必要がある。今後もモニタリング調査を継続していき、さらに知見を増やすと共に考察を深めていきたい。

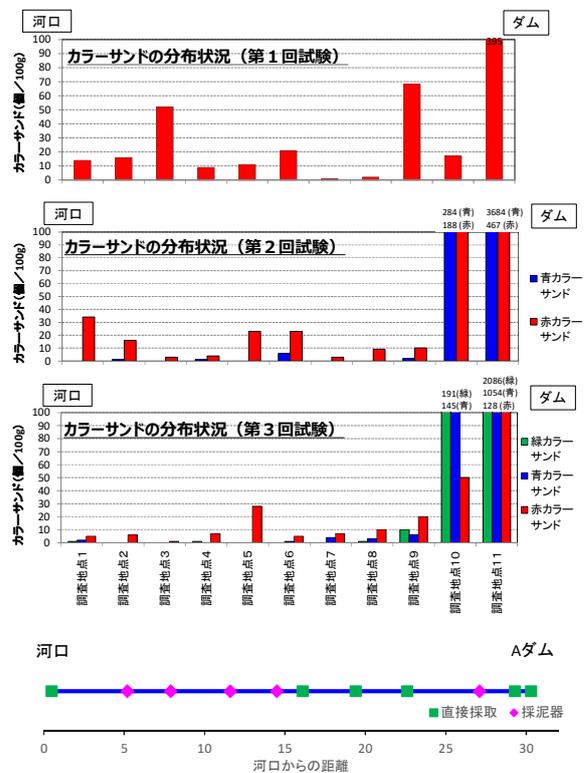


図4 トレーサー追跡調査結果(第1回～第3回試験)

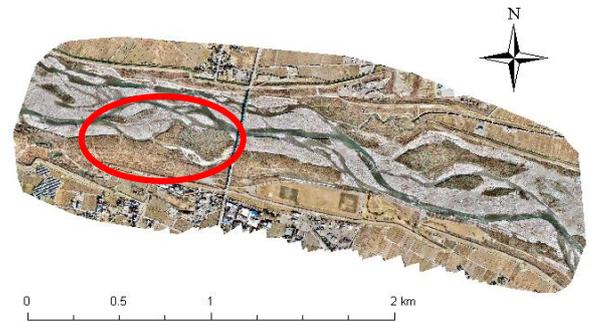
UAV 画像のあいまい性・取得時期の違いを考慮した機械学習による 河川地被分類手法の精度検討

芝浦工業大学大学院 学生員 ○百瀬 文人
元芝浦工業大学 近藤 大樹
(株)建設技術研究所 正会員 永矢 貴之

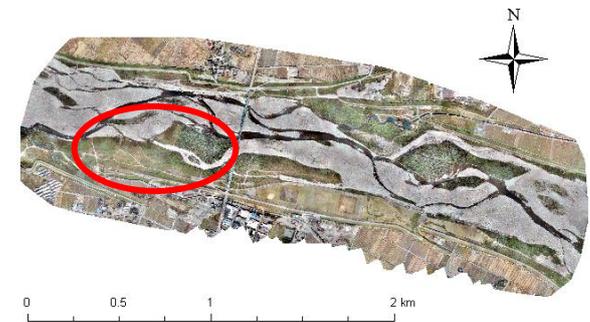
(株)建設技術研究所 正会員 佐藤 拓也
(株)建設技術研究所 正会員 岩見 収二
芝浦工業大学 正会員 宮本 仁志

1. はじめに

近年、砂州や高水敷に安定的な植生域が拡大繁茂し、治水と生態系の双方の観点から河川管理上の問題となっている。これに対して既往研究¹⁾では、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)で得られる河川空間情報に機械学習を適用することで、河道内土地被覆の自動判別手法を検討した。しかし、影や木本・草本の混在など、画像のもつ「あいまい」性が介在する部分で誤分類となることが課題となっていた。さらに、**図-1(a)**の赤丸で例示される植生域では、**図-1(b)**でより深い緑となる。このように時期の異なる画像間ではデータの質に違いがあるため、このような場合の精度検討も課題であった。そこで本稿では黒部川 4-6km 区間を対象として以下の 2 つの検討を行った: 1) 2017 年の UAV 画像について、あいまい性を陽にした新しい土地被覆分類を定義し、その有無が機械学習の精度に及ぼす影響、2) 2018 年の UAV 画像により機械学習を行い、2017 年を地被分類することで時期の違いが精度に及ぼす影響。



(a) 2017 年 11 月 28 日 撮影



(b) 2018 年 11 月 3 日 撮影

図-1 UAV の RGB オルソ画像

2. 解析手法

2.1 現地観測・SfM 処理と画像の前処理

2017・2018 年において黒部川の対象区間を UAV 搭載のマルチスペクトルカメラで撮影し、PIX4D による SfM 処理により RGB 画像と正規化植生指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)、数値表層モデル DSM(Digital Surface Model)を取得した。DSM はさらにウェーブレット変換を用いて河川縦断勾配を除いた標高データに加工し、ラプラシアンフィルタを用いて DSM のエッジを抽出した¹⁾。

2.2 あいまい性を考慮した土地被覆分類の定義

既往研究¹⁾では土地被覆の真値は RGB を元にして手動で水面・裸地・草本・木本に分類・同定していた。本稿ではそれらに加えて、あいまい部分を考慮した新しい分類を定義した。分類は基本的に RGB の目視によって行った。表-1 に目視判断基準を示す。目視判断基準には、当該オブジェクト(後述)内で明確に土地被覆分類が可能な面積占有率を用いた: 80%以上;明確な分類, 60~80%;あいまいな分類, 60%未満;モザイク。さらに目視判断が困難な場合は、機械学習で使用する特徴量 (NDVI/DSM 高波数) のしきい値を定義し、それを判断基準とした。その上で、データセット作成に際してこれらの組み合わせにより正確真値・中間真値・あいまい真値を設定した: 正確真値;表-1 の①~

表-1 RGB 画像の目視判断基準

占有率	80%以上	60%~80%	60%未満
土地被覆分類	①水面	⑥あいまい水面	⑩モザイク
	②裸地	⑦あいまい裸地	⑫その他、河川構造物
	③草本	⑧あいまい草本	⑬定義外
	④木本	⑨あいまい木本	
	⑤影	⑩あいまい影	

表-2 あいまい性の検討におけるデータセット

	セットA	セットB	セットC
教師データ	あいまい真値	中間真値	正確真値
テストデータ	正確真値	正確真値	正確真値

目視判断基準には、当該オブジェクト(後述)内で明確に土地被覆分類が可能な面積占有率を用いた: 80%以上;明確な分類, 60~80%;あいまいな分類, 60%未満;モザイク。さらに目視判断が困難な場合は、機械学習で使用する特徴量 (NDVI/DSM 高波数) のしきい値を定義し、それを判断基準とした。その上で、データセット作成に際してこれらの組み合わせにより正確真値・中間真値・あいまい真値を設定した: 正確真値;表-1 の①~

④, 中間真値;これに⑥~⑨を追加したもの, あいまい真値;さらに⑤および⑩~⑬を追加したもの. なお, 機械学習を行う際には, 例えば「あいまい水面」は「水面」として学習させた.

2.3 データセットの作成とランダムフォレストによる土地被覆分類

機械学習のデータセットは, GIS で RGB 画像からオブジェクトを作成し, そこに含まれる特徴量の平均・標準偏差を用いたり. 表-2 にあいまい性の検討を行うデータセット A~C の内訳を示す. あいまい性の検討における教師データは, あいまい真値・中間真値・正確真値と変化させた. テストデータは一貫して正確真値を用いた. 一方, 取得時期の違いによる影響を検討するデータセットは D とし, 教師データに 2018 年の正確真値を, テストデータには 2017 年のものを用いた. 機械学習アルゴリズムには RF(Random Forest)を用いた. 精度評価には正解率と再現率の調和平均である F 値に加え, セット D の検討では ArcGIS での画像出力も参照した.

3. 結果と考察

3.1 あいまい性の有無による影響

図-2 に各データセットを用いた学習アルゴリズム別の分類結果を示す. この図の縦軸は F 値であり, それぞれの棒グラフは土地被覆の分類精度である. 図-2 より, F 値はセット A から C で草本 4%, 裸地・木本で 1%増加する. 一方, セット B と C の比較では全ての土地被覆で F 値の変化はない. 以上より, 精度向上に寄与した要因は, ⑥~⑨で定義されたあいまい分類ではなく,モザイクや影などを分けて学習させたことによると判断される.

3.2 撮影時期の違いによる影響

図-2 のセット D の結果では裸地の F 値が 90%と比較的高精度となった. これは, 時期によらず対象地点で裸地の RGB 値が高かったため, 特徴が効果的に学習できたと考えられる. これより, 別時期に取得されたデータを用いても, 特徴量の分布特性によってはある程度精度よく地被分類できる可能性が示唆された.

図-3 にセット D における真値と分類結果の誤分類箇所を示す. 図-3(b)の誤分類の分布と図-3(a)の真値との比較より, 裸地が水面に, また草本が木本に誤分類される頻度が高い. これら誤分類が起こった土地被覆は互いに似た特徴量をもっていた. さらに, 本来真値と同じ分類に同定されるべき土地被覆では, 取得時期の違いによって特徴量の分布特性も歪むため, 誤分類になったと推察される. 今後は, このような誤分類の原因を詳細に調べ, 時期による特徴量の変質が土地被覆の同定精度に与える影響を検討する予定である.

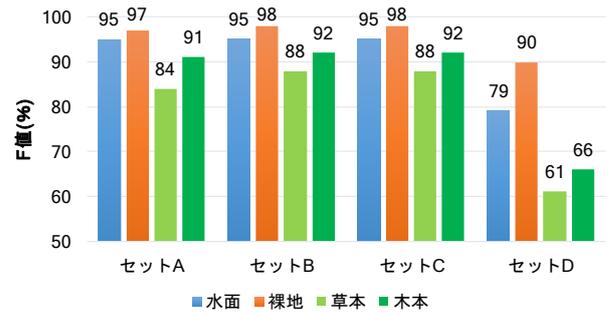
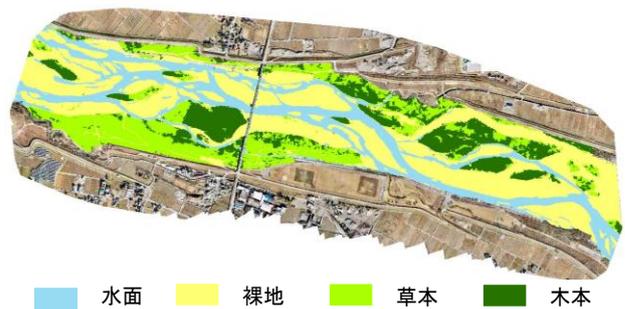


図-2 各データセットにおける土地被覆分類の精度 (F 値)



(a) テストデータの真値



(b) 誤分類

図-3 セット D におけるテストデータの真値と土地被覆分類結果の誤分類箇所

観測水位を用いた流量・低水路粗度係数の推定

九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系 重枝 未玲

1. はじめに

近年、既存の治水施設の機能を適切に評価し、その維持や改善を行う計画型管理が求められている¹⁾。このような管理を行う上で、洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化を総合的に把握することが重要である。本研究では、既存の観測水位を与条件とした流量、粗度係数の推定法²⁾に、低水路と高水敷での流速差による断面間の流れの干渉効果や樹木群境界に作用するせん断力を新たに考慮した流量、低水路粗度係数、横断流速分布を求める準二次元推定法を開発し、実験結果と実河道での痕跡水位の観測結果に基づき同推定法の予測精度を検証した。

2. 観測水位に基づく流量・粗度係数の準二次元推定法の概要

基礎方程式は、式(1)に示す任意の水路形状に適用可能な1次元浅水流方程式と式(2)の分割断面での運動方程式である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + dE/dx = S; U = (A, Q)^T; E = (Q, Q^2/A + gl_1)^T; S = (0, gl_2 + gA(S_0 - S_f))^T \quad (1)$$

$$n_j \cdot s_j / (A_j R_j^{1/3}) \cdot \hat{u}_j^2 + \sum_{k_j} f_{k_j} \cdot s'_{wk} \cdot \text{sgn}(\Delta u_{k_j}) / g A_j \Delta \hat{u}_{k_j}^2 + \sum_{k_j} f_{k_j} \cdot s_{wk} / g A_j \hat{u}_j^2 = 1 \quad (2)$$

$Q = \sum_j u_j A_j$; $\hat{u}_j = u_j / S_f^{1/2}$; $\Delta \hat{u}_{k_j} = \Delta u_{k_j} / S_f^{1/2}$; t : 時間, x : 流下方向, U : 保存量ベクトル, E : 流束ベクトル, S : 発生項・消滅項ベクトル, A : 流積, Q : 流量, g : 重力加速度, S_0 : 河床勾配($=-\partial z_b / \partial x$), l_1 : 静水圧項, l_2 : 河道幅の変化による静水圧項, S_f : 摩擦勾配, n : 分割断面の粗度係数, s : 潤辺, f : 境界混合係数, k : 分割断面境界についての添字, k_j : 分割断面境界 k で分割断面 j にかかわる量についての添字, s'_{wk} : 分割断面境界の潤辺, s_w : 樹木群境界の潤辺長, Δu_{k_j} : 分割断面境界 k での流速差, $\text{sgn}(\bullet)$: \bullet が正の場合1を、負の場合-1を返す関数

式(2)では、分割断面間の流速差による干渉効果や樹木群の境界に作用するせん断力が境界混合係数 f を含む項で考慮される。なお、樹木群内は死水域として取り扱われる。本推定法では、初期流量、河床位、高水敷粗度係数、一区間の低水路粗度係数を与条件として、水面形の経時変化を与えることで、計算格子点での流量、各分割断面での流速と計算格子点間の低水路粗度係数が推定される。なお、方程式の離散化には流束差分離³⁾法を用いた。

流量・粗度の推定手順は次の通りである。1)時刻 t の各格子点の水位より流積、水面幅、潤辺を、時刻 $t+\Delta t$ の水位から流積を求める。2)離散化された連続の式より、底面摩擦および樹木群等によるエネルギー損失を摩擦勾配 S_f として求め、式(2)の分割断面の運動方程式と連続の式から流速 u_j と低水路粗度係数 n_j を求める。3)手順2)で求めた摩擦勾配 S_f を用いて、運動方程式から時刻 $t+\Delta t$ での流量 $Q^{t+\Delta t}$ を求める。

3. 実験の概要

実験装置は、図-1に示す長さ9m、低水路幅0.4m、高水敷幅0.6m、低水路高さ0.049m、水路床勾配1/500の複断面水路である。低水路沿いに樹木を設置しないCaseC-R、設置したCaseC-RVの実験を行った。低水路と高水敷の粗度係数 n は等流実験より、それぞれ $0.012\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$ であることが確認されている。流れは定常流(CaseC-R, RV-S)および非定常流(CaseC-R, RV-U)とした。CaseC-R, RV-Sでは上流から一定流量 $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、CaseC-R, RV-Uでは上流から一定流量 $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、定常状態とした後、計測開始時刻から、流量計が70秒後に $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ 、140秒後に $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ となるようにバルブを調整した。下流端の堰高は、初期の水面形が、堰上げ背水と低下背水となるように設定した。測定項目は、水位 $H(\text{m})$ 、単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ である。水位については、図-1の測定点①～⑨において、定常実験ではポイントゲージで、非定常実験ではビデオカメラで撮影した画像を画像解析することで測定した。流量については、定常実験では流量計で、非定常実験では測定点①・⑤・⑨において、表面流速をPTVで測定し、この結果とlog則から水深平均流速を算定し、これと水位観測に基づく水深から求めた流積との積で算定した。

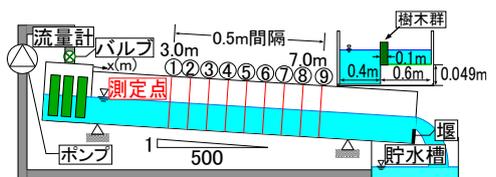


図-1 実験装置の概要

図-1 実験装置の概要

4. 実験結果に基づく推定法の検証

解析の与条件である上流端区間の低水路粗度係数は $0.011\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。この値は、洪水後の実河川において縦断的な水面形は痕跡水位に限定されることから、痕跡水位を与条件として既知の低水路粗度係数区間を

変化させた準二次元推定法を実施し得られた粗度係数値を平均したものである。高水敷粗度係数には等流実験値の $0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$ を与えた。CaseC-R と RV の境界混合係数 f の値は、それぞれ標準値⁴⁾の $f=0.17, f=0.10$ とした。この値は CaseC-R, RV-S の実験結果から逆算した値とも一致していた。図-2 に CaseC-R, RV-U の流量・低水路粗度係

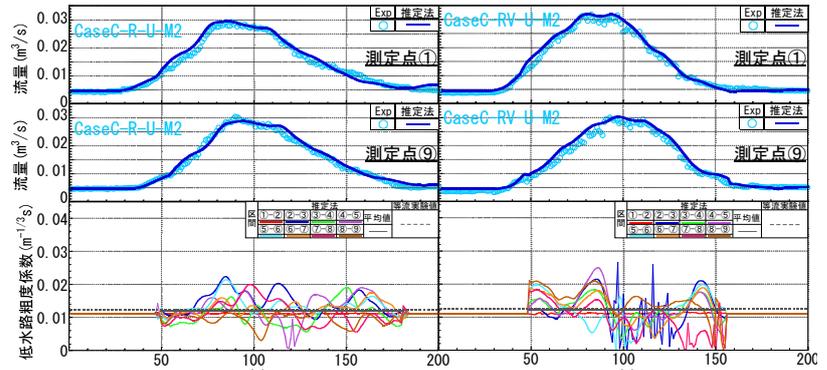


図-2 実験装置非常実験結果に基づく検証(左:CaseC-R-U, 右:CaseC-RV-U)

数の推定結果と実験値との比較を示す。これより、本推定法は、(1)実験値の流量ハイドログラフを再現していること、(2)低水路粗度係数の推定結果は等流実験値周辺を振動しており、最大で 121%の差はあるものの平均的には等流実験値と概ね一致していること、(3)CaseC-R-U では、振動の幅は水位上昇・下降時に変化しないものの、CaseC-RV-U では水位上昇・下降時に粗度係数の振動が大きくなり、ピーク付近では振動の幅が小さくなることなどが確認できる。

図-3 に各 Case のピーク流量時の横断流速分布の推定結果と実験結果との比較を示す。これより、本推定法は、(1)いずれの Case においても、実験値の流速分布を概ね再現していること、(2) CaseC-RV-U は、CaseC-R-U に比べ予測精度が低いこと、などが確認できる。CaseC-RV-U で精度が低くなる要因は、準二次元解析では樹木群内を死水域として取り扱っているが、実際の現象では樹木群内で流速が発生しているためと考えられる。

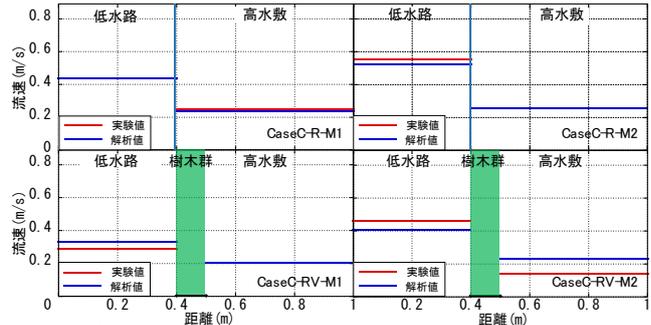


図-3 横断流速分布(上:CaseC-R-U, 下:CaseC-RV-U)

5. 実河川への適用

最後に、準二次元推定法を遠賀川での 2012 年 7 月 13~14 日の出水へ適用し、流量と低水路粗度係数の把握を試みた。入力条件には痕跡水位を用いた。本推定法が常流を対象としているため、セグメント 2 より下流で、河道形状が複断面となっている区間を対象とした。図-4 は、推定結果の一例として、遠賀川の距離標 16~18.6km 地点の推定結果を示したものである。これより、本推定法は、同出水のピーク流量を再現していること、砂州や橋梁など抵抗を増加させる要因がある区間を除き、粗度係数を河床材料から推定される低水路粗度係数を再現していること、などが確認できる。このように、本準二次元推定法は、洪水痕跡を与条件とすることで出水時のピーク流量、低水路粗度係数を把握できることが確認された。

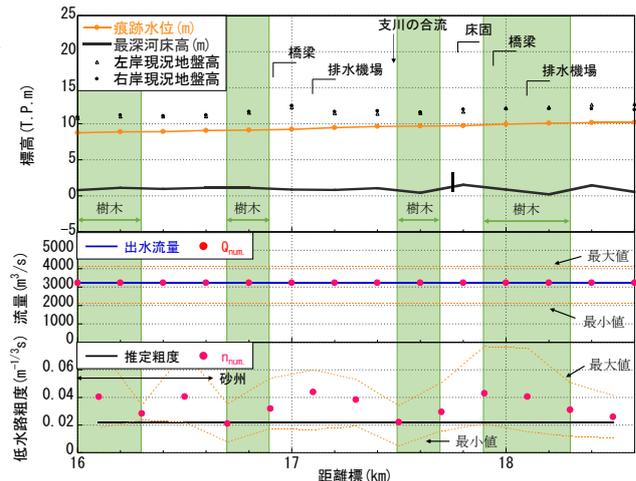


図-4 遠賀川 16~18.6km 区間の推定結果

6. おわりに

本研究から、本準二次元推定法は、(1)複断面水路実験での流量、低水路粗度係数、流速分布を十分な精度で再現できること、(2)実出水での洪水痕跡から実河川での流量、低水路粗度係数の把握が可能であること、などが確認された。

参考文献: 1) 国土交通省:河川砂防技術基準調査編, 2) 重枝未玲ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, I_649-I_654, 2018., 3) Roe, P. L.: *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.2012, 4) 国土技術研究センター(編): 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.