

河川流域の水溫変動特性を説明する 重要な特徴量の検出とその解釈 — 中国地方の小瀬川・佐波川・高津川における 夏季と冬季の観測水溫を対象に —

DETECTION OF DOMINANT FACTORS EXPLAINING FLUCTUATION
CHARACTERISTICS OF WATER TEMPERATURES IN RIVER BASINS AND
THEIR INTERPRETATION – ON SUMMER AND WINTER WATER
TEMPERATURES OBSERVED IN OZE, SABA AND TAKATSU RIVER BASINS
IN THE CHUGOKU REGION, JAPAN –

溝口裕太¹・赤松良久²・宮本仁志³・崎谷和貴⁴

Yuta MIZOGUCHI, Yoshihisa AKAMATSU, Hitoshi MIYAMOTO and Kazutaka SAKIYA

¹正会員 博(工) 土木研究所流域水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 博(工) 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 博(工) 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

⁴正会員 修(工) 土木研究所流域水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

夏季と冬季の河川水溫の感熱特性について流域規模での支配要因を明らかにするために、感熱特性を目的変数、流域、河川、気象に関する特徴量を説明変数としてRandom Forestを構築した上で、変数重要度分析と感度分析を実行し、感熱特性を説明する重要な特徴量の検出を試みた。その結果、冬季よりも夏季と年間において検出された特徴量が類似し、熱平衡偏差については針葉樹林と降水量、修正熱感度は主流勾配に一致がみられた。これは、夏季と年間の感熱特性の値の範囲が似通っていたことが一因だと推察された。このほか、修正熱感度は流域や河道の地形的な特徴量、熱平衡偏差は地形的な特徴量に加えて流域の質的な特徴量から説明されることがわかった。また、それら特徴量が河川水溫に影響を及ぼす素過程は、水塊と大気との熱交換の時間や、河川流量の多寡を介した熱容量、基底流出の量や質に基づき解釈された。

Key Words: water temperature characteristics, basin and channel characteristics, random forest, variable importance analysis

1. 序論

気候変動は将来にわたって河川における水溫レジームに変化をもたらすことが懸念されている¹⁾。2021年10月に閣議決定された気候変動適応計画²⁾では、河川水溫の変化の把握、予測に向けた科学的知見の集積と、それを支えるモニタリングの重要性が指摘されている。しかしながら、日本において、河川水溫の連続的なモニタリングが実施される観測点や観測期間は限られる。仮に、将来、モニタリングの充実が図られたとしても、多地点、長期間のデータがある気象のように、平年値や経年変化に基づき、観測水溫の現状の理解や、将来の予測につな

げるには、多くのデータが必要になる。これまで著者らは、限られたデータから観測水溫を理解するために、気象データから計算できる平衡水溫(水表面を境界としたときの大気と水塊とが熱的平衡状態にあるときの理論水溫)を基準に、それと観測水溫を関係づけた感熱特性の修正熱感度(Modified thermal sensitivity; 以下、mTS)と熱平衡偏差(Thermal equilibrium difference; 以下、TED)を提案し、それらの空間分布を説明する流域や河川に関する特徴量を明らかにした³⁾⁴⁾⁵⁾。これら感熱特性を基準として用いることで、限られたデータからでも観測水溫の高低の評価や、観測点の重要度を明確にでき、仮に将来、水環境や、河川生態系に対して水溫変化の影響が顕在化した場合には、経年的な水溫変化の理解や効率的な

表-1 流域・河川・気象に関する特徴量 (溝口ら⁵⁾に加筆)

流域基本	b01	集水面積	流域地形	bgm09	小起伏丘陵地	流域土壌	bsi17	赤・黄色土壌	
	b02	流域集中度		bgm10	大起伏丘陵地		bsi18	細粒灰色低地土壌	
	b03	形状係数		bgm11	火山性丘陵地		bsi19	粗粒灰色低地土壌	
	b04	平均傾斜		bgm12	砂礫台地 (中)		bsi20	灰色低地土壌	
	b05	平均標高		bgm13	砂礫台地 (上)		bsi21	粗粒褐色低地土壌	
	b06	最低標高		bgm14	扇状地性低地		bsi22	褐色低地土壌	
	b07	最高標高		bgm15	三角州性低地		bsi23	細粒グライ土壌	
	b08	起伏量		流域地質	bg101		第四紀火山岩	bsi24	粗粒グライ土壌
	b09	平坦地			bg102		第三紀火山岩	bsi25	グライ土壌
	b10	急傾斜地			bg103		深成岩	bsi26	粗粒残積性未熟土壌
	b11	集水域重心距離			bg104		新生代堆積岩	bsi27	砂丘未熟土壌
斜面方位	bs01	北	bg105		中・古生代堆積岩	河川基本	r01	主流長	
	bs02	東	bg106	変成岩	r02		主流勾配		
	bs03	南	bg107	新生代付加体	河川密度	rd01	1次河道		
	bs04	西	bg108	中・古生代付加体		rd02	2次河道		
流域地被	bc01	針葉樹林	流域土壌	bsi01		岩石地	rd03	3次河道	
	bc02	広葉樹林		bsi02		岩屑性土壌	rd04	4次河道	
	bc03	草地		bsi03		多湿黒ボク土壌	rd05	5次河道	
	bc04	裸地		bsi04		粗粒多湿黒ボク土壌	rd06	6次河道	
	bc05	田地		bsi05		淡色黒ボク土壌	rd07	7次河道	
	bc06	畑地		bsi06	層厚黒ボク土壌	流路方位	rs01	北	
	bc07	荒地		bsi07	黒ボク土壌		rs02	東	
	bc08	建物用地		bsi08	湿性褐色森林土壌		rs03	南	
流域地形	bgm01	小起伏山地		bsi09	乾性褐色森林土壌		rs04	西	
	bgm02	中起伏山地		bsi10	乾性褐色森林土壌(黄褐色)	ダム	s01	ダム貯水量	
	bgm03	大起伏山地		bsi11	乾性褐色森林土壌(赤褐色)		mp01	当期降水量	
	bgm04	山麓地 I		bsi12	褐色森林土壌		mp02	前期降水量	
	bgm05	山麓地 II		bsi13	褐色森林土壌(黄褐色)	mp03	前々期降水量		
	bgm06	小起伏火山地		bsi14	褐色森林土壌(赤褐色)	mt01	当期平均気温		
	bgm07	中起伏火山地		bsi15	黄色土壌	mt02	前期平均気温		
	bgm08	大起伏火山地		bsi16	赤色土壌	mt03	前々期平均気温		

観測網の構築という観点から、河川環境管理への貢献が期待できる。

前報^{4,5)}では、流域規模の空間分布を概観するために、1年ごとの感熱特性が対象とされたが、本報では季節性に焦点をあてることとし、夏季と冬季の感熱特性を対象とした。夏季は冷水性魚類、冬季は外来生物の分布域を説明する一因であると考えられ、河川水温と河川生態系の一体的な議論への展開が期待できる。なお、前報^{4,5)}と同様に、感熱特性を目的変数に、一方、流域、河川、気象に関する特徴量を説明変数にしてRandom Forest (以下、RF) を構築した上で、変数重要度分析と感度分析を実行し、感熱特性を説明する重要な特徴量の検出を試みた。さらに、検出された特徴量について、年間と季節ごとの類似性から感熱特性の適用性と、河川水温の形成機構に基づき妥当性を確認した。

2. 材料と方法

(1) 現地観測

中国地方の一級水系である高津川、佐波川、小瀬川を対象流域とした。現地観測の詳細は前報⁶⁾に譲るが、観測点は、それぞれの流域の源頭部付近から感潮域の上流までを網羅するように、高津川30、佐波川19、小瀬川17地点とし、流心近傍の河床の礫背面に据置型の水温計 (Onset社製Water Temperature Pro v2) を設置した。対象期間は、2017年3月1日から2021年2月28日の4ヵ年とし、次節に記す2つの感熱特性を計算するために、15分間隔

の観測値から、5日および3ヵ月平均を求めた。

(2) 感熱特性

RFの目的変数には、観測水温と平衡水温から計算されるmTSとTEDを用いた³⁾。なお、mTSは大気の大気環境の変化に対する応答性、TEDは大気の大気環境からの独立性を示し、mTSは大きいほど、TEDはゼロから遠ざかるほど気象の影響を受けやすいと解釈できる。

前報^{4,5)}では、1年間を対象に感熱特性であるmTSとTEDを求め、その特性を説明する重要な特徴量の検出を試みられた。本報では、3月～翌年2月までの対象期間を4つにわけ、6～8月を夏季、12月～翌年2月を冬季とした上で、観測水温と平衡水温の5日平均の回帰直線の傾きをmTS (dT_{w5D}/dT_{eq5D} , dT_{w5D} : 5日平均観測水温, dT_{eq5D} : 5日平均平衡水温), 観測水温と平衡水温の3ヵ月平均値の差をTED ($T_{w3M}-T_{eq3M}$, T_{w3M} : 3ヵ月平均観測水温, T_{eq3M} : 3ヵ月平均平衡水温) と定義した。また、これ以降には、年間、夏季、冬季のmTSをmTS_{ANN}, mTS_{SMMR}, mTS_{WTR}, TEDをTED_{ANN}, TED_{SMMR}, TED_{WTR}と表記する。

(3) 流域・河川・気象に関する特徴量

直接的および降雨流出過程を介して間接的に河川水温に影響を及ぼすと想定された流域、河川、気象に関する特徴量を表-1のように設定し、RFの説明変数とした。なお、流域や河川の特徴量は、前報⁹⁾と同じ項目数、計算方法とする一方で、気象は、年間の降水量と平均気温の2項目から、当期、前期、前々期の降水量と平均気温の6項目とした。なお、夏季の当期は6～8月、前期は3～5月、

前々期は12月～2月，冬季の当期は12～2月，前期は9～11月，前々期は6月～8月である．このように，過去の気象を説明変数に加えることで，気象の履歴が河川水温に与える影響の考慮を試みた．

また，降水量と気温は，農研機構メッシュ農業気象データ（The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO）（<https://amu.rd.naro.go.jp/>）^{7,8)}が提供する約1km四方の3次メッシュデータから，それぞれ3カ月の合計または平均を求め，集水域ごとの空間平均を特徴量として用いた（図-1）．

(4) 感熱特性を説明する重要な特徴量の検出

a) ランダムフォレスト

感熱特性の空間分布を説明する流域，河川，気象の特徴量を明らかにするために，RFを構築した上で，変数重要度分析と感度分析を実行した．RFの目的変数はmTSとTEDの2つの感熱特性，説明変数は表-1の93項目の特徴量であり，説明変数の項目数は，多重共線性および過学習の観点からRFの構築に際して問題がないことを確認した．RFに必要な回帰モデルの最大深さ，モデル数などのパラメータは前報^{4,5)}にしたがって設定し，季節ごと感熱特性ごとに4つのRFを構築した．また，構築したRFの精度は，5分割交差検証を実行し， R^2 （決定係数）とRMSE（二乗平均平方根誤差）に基づき評価した．なお，RFの実装には，pythonの機械学習のモジュールであるsklearn0.22.1を使用した．

b) 変数重要度分析と感度分析

変数重要度分析は，PIMP（Permutation Importance）によって実行し，そこで得られるMDA（Mean Decrease Accuracy）を指標に，重要な特徴量の検出を試みた^{4,5)}．MDAが大きいほど相対的に重要な特徴量であることを意味する．PIMPでは，目的変数と説明変数の相関関係の正負を分析できないため，説明変数を±10，20%変化させた感度分析を実行し，目的変数と説明変数の関係を順相関，逆相関，無相関に分類した⁵⁾．さらに，水塊と大気との熱交換や，熱容量などの観点から，重要な特徴量が河川水温に影響を及ぼす素過程の解釈を試みた．なお，PIMPの実装には，RFと同様にsklearn0.22.1を使用した．

3. 結果と考察

(1) 季節ごとの感熱特性

はじめに，季節ごとの感熱特性の違いを論じる．図-2に示すように，修正熱感度は年間（mTS_{ANN}），夏季（mTS_{SMMR}），冬季（mTS_{WTR}）の四分位範囲が，それぞれ0.39～0.49，0.29～0.49，0.04～0.20となり，熱平衡偏差はTED_{ANN}，TED_{SMMR}，TED_{WTR}の四分位範囲が，それぞれ-3.11～-1.81℃，-11.04～-8.53℃，5.53～7.58℃と

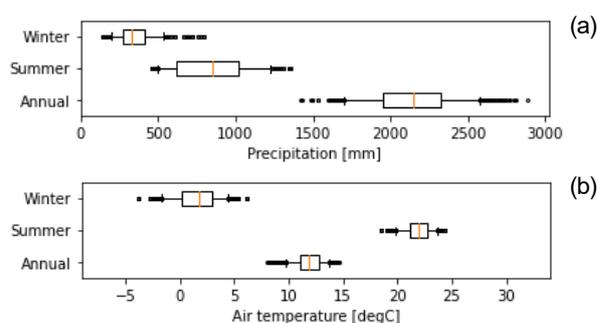


図-1 (a)降水量と(b)平均気温

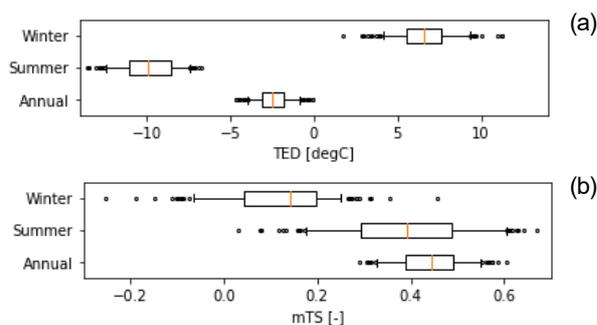


図-2 (a)熱平衡偏差 (TED) と(b)修正熱感度 (mTS)

なった．mTSは年間と夏季の四分位範囲は類似する一方，冬季は，それらの範囲より小さく，気象の変化に対する河川水温の応答は小さいと推察される．また，TEDは年間と夏季の四分位範囲は負数，冬季は正数となった．TEDがゼロから遠ざかるほど気象の影響を受けやすいと考えられるので，感度分析において年間と夏季はTEDと特徴量とが順相関，冬季は逆相関のとき，気象の影響を受けやすい傾向にあると考えられる．このように，年間と夏季の感熱特性は類似するが，冬季は異なる性質を持つことがわかる．

(2) ランダムフォレストの再現性

次に，RFの再現性を論じる．本報では，季節ごと感熱特性ごとに4つのRFを構築した．mTS_{SMMR}とmTS_{WTR}の R^2 は0.69と0.45，RMSEは両者ともに0.08[-]，また，TED_{SMMR}とTED_{WTR}の R^2 は0.76と0.73，RMSEは0.78と0.85[degC]となった．前報⁵⁾では，mTS_{ANN}の R^2 は0.75，RMSEは0.03[-]，また，TED_{ANN}は0.80，0.43[degC]であったことから，それらと比較して本報のRFは，mTS_{WTR}を除き R^2 が若干の低下，RMSEが2～3倍ほどの増加となった．

PIMPを用いて計算されるMDAは，その性質上，RFの精度に左右される．そのため，年間の感熱特性ごとのRFに比べて，RMSEが大きい季節ごとのRFは，MDAが大きく計算される傾向にあると推察される．次節では，PIMPによって季節ごと感熱特性ごとに検出された特徴量の類似性を論じるが，TEDはMDAが0.1以上，mTSは0.01以上の特徴量に焦点をあて，巨視的な比較を行うこ

表-2 熱平衡偏差 (TED) と修正熱感度 (mTS) を説明する重要な特徴量の比較 (ここでは、比較のためにTEDはMDA \geq 0.1, mTSはMDA \geq 0.01の特徴量を対象とし、TEDもしくはmTSと特徴量とが順相関は+, 逆相関は-, 無相関を●と表記する。)

		熱平衡偏差 (TED)			修正熱感度 (mTS)		
		Annual Mar. - Feb. (TED _{ANN})	Summer Jun. - Aug. (TED _{SMMR})	Winter Dec. - Feb. (TED _{WTR})	Annual Mar. - Feb. (mTS _{ANN})	Summer Jun. - Aug. (mTS _{SMMR})	Winter Dec. - Feb. (mTS _{WTR})
流域	起伏量		+				
	集水域重心距離			-			
地被	針葉樹林	-	-				
	広葉樹林	+					
地形	大起伏丘陵地			-			
土壌	乾性褐色森林土壌 (黄褐色)			-			
河川	主流勾配		-		-	-	
気象	年降水量	-					
	当期降水量						
	前期降水量		+			-	-
	前々期降水量		-	+		+	+
	年平均気温	-					
	当期平均気温			●			

ととする。なお、異なるRFを用いたPIMPの結果について、微視的に比較する場合や、極端に精度の異なるRFを用いた比較には、留意が必要だと考えられる。

(3) 変数重要度分析と感度分析

PIMPによって検出された感熱特性を説明する重要な特徴量について、年間と季節ごとの類似性を論じる。年間の感熱特性に関する特徴量について、MDAの中央値が平均を上回ったのは、TED_{ANN}では、広葉樹林、針葉樹林など地被、新生代堆積岩、中・古生代堆積岩など地質、黒ボク土壌、乾性褐色森林土壌など土壌、年降水量、年平均気温など気象であり、また、mTS_{ANN}は、集水面積、形状係数、最低標高、起伏量、小起伏山地、中起伏山地など流域地形、主流長、主流勾配、河川密度 (1次, 2次, 5次河道), 流路方位 (東) など河川地形となった⁹⁾。このように、TED_{ANN}は地被、地質、土壌など流域の質的な特徴量、mTS_{ANN}は流域や河川の地形的な特徴量によって説明されることがわかる。

次に、季節ごとの感熱特性を説明する重要な特徴量に関して、PIMPの結果を図-3に例示する。これらは、TED_{SMMR}とTED_{WTR}の結果であり、MDAによって特徴量の相対的な重要度が明瞭になった。また、表-2は、季節ごと感熱特性ごとに出力されたPIMPの集計結果である。ここでは、感熱特性と特徴量との感度分析の結果を表示するとともに、年間と季節ごとの感熱特性を比較するために、前報⁹⁾のTED_{ANN}とmTS_{ANN}の結果を併記した。

a) 熱平衡偏差

TEDについて、検出された特徴量の類似性を論じる。表-2のように、夏季に関しては、針葉樹林、降水量 (夏季, 春季) はTED_{SMMR}とTED_{ANN}の両者で検出、起伏量、主流勾配はTED_{SMMR}のみで検出される一方、TED_{SMMR}で

は広葉樹林、平均気温は検出されなかった。冬季は、降水量 (秋季, 夏季), 平均気温 (冬季) がTED_{WTR}とTED_{ANN}に一致する特徴量であり、集水域重心距離、大起伏丘陵地、乾性褐色森林土壌 (黄褐色) はTED_{WTR}のみで検出され、広葉樹林は検出されなかった。

TED_{SMMR}は、流域の質的な特徴量である地被と気象 (降水量) から説明され、TED_{ANN}との一定程度の類似性がみられる。他方、TED_{ANN}とは異なり、起伏量と主流勾配の重要度の高さが示唆され、これらはmTS_{ANN}を説明する流域や河川の地形的な特徴量である。また、TED_{WTR}では、TED_{ANN}と同様に気象 (降水量, 平均気温) を検出したが、流域や河川に関する特徴量には類似性はみられなかった。このほか、TED_{WTR}で検出された乾性褐色森林土壌 (黄褐色) は流域の質的な、集水域重心距離と大起伏丘陵地は地形的な特徴量である。

検出された特徴量が、河川水温に影響を及ぼす素過程を考察する。TED_{SMMR}の特徴量については、集水域に占める針葉樹林の面積割合が大きいほど、水面や地表面への日射量が抑制されることから河川水温は気象の影響を受けにくい一方で、主流勾配が小さく、起伏量の大きい下流域は大気との熱交換の時間は長く、気象の影響を受けやすいと推察される^{9),10)}。また、TED_{WTR}は、低・渇水量の減少を招く乾性褐色森林土壌 (黄褐色) や、豊・平・低・渇水量の減少を招く小起伏山地に隣接し、それと地形的な性質が似ている大起伏丘陵地が検出された¹¹⁾。低・渇水量が少なく熱容量が小さければ、河川水温は気象の影響を受けやすく、また、低・渇水量を支配する基底流出量は、地表水と比べて水温の日・年較差は小さいことから、その量が少ないと河川水温の変化を緩和する効果は小さい。集水域重心距離は、集水域の立体的な重心と観測点との距離を意味する特徴量であり、その値が

大きい下流ほど気象の影響を受けやすいと推察される。降水量の大きさは河川流量の多寡を意味する。したがって、降水量が大きいほど気象の影響を受けにくいと考えられるが、 TED_{SMMR} では当期降水量は順相関、前期降水量は逆相関となった。当期降水は直接流出、前期降水は基底流出の起源だと考えられ、流出経路の違いが順、逆相関に影響を及ぼすと推察される。なお、河川水温が気象の影響を受けやすいと考えられるTEDがゼロに漸近するのは、負数である TED_{ANN} と TED_{SMMR} は目的変数と説明変数が順相関、正数である TED_{WTR} は逆相関であることに留意が必要である。

b) 修正熱感度

mTSについて、検出された特徴量の類似性を論じる。表-2のように、夏季に関しては、主流勾配は mTS_{SMMR} と mTS_{ANN} の両方で検出、降水量（夏季、春季、冬季）は mTS_{SMMR} のみで検出された。冬季は、 mTS_{ANN} と一致する特徴量はなく、降水量（冬季、秋季）が TED_{WTR} のみで検出された。このように、mTSに関しても、TEDと同様に、夏季（ mTS_{SMMR} ）の特徴量に年間（ mTS_{ANN} ）との類似性がみられた。また、TEDとは異なり、 mTS_{SMMR} に関する重要な特徴量には、 TED_{ANN} に関する流域の質的な特徴量は含まれず、 mTS_{ANN} を説明する地形的な特徴量のみが検出された。検出された特徴量が河川水温の形成機構に与える影響については、前項と同様に、主流勾配の大・小は上・下流域を、降水量は河川流量を介した熱容量の大・小を意味すると推察される。

4. 結論

本報では、夏季と冬季について、感熱特性である修正熱感度（mTS）と熱平衡偏差（TED）を求めた上で、それらを目的変数、流域、河川、気象に関する93項目の特徴量を説明変数としてRFを構築した。その後、RFを用いて変数重要度分析と感度分析を実行し、感熱特性を説明する重要な特徴量の検出を試みた。さらに、検出された特徴量について、年間と季節ごとの類似性から感熱特性の適用性を確認するとともに、重要な特徴量が河川水温に影響を及ぼす素過程を考察した。

年間の TED_{ANN} や mTS_{ANN} の特徴量との類似性は、冬季と比べて夏季の TED_{SMMR} や mTS_{SMMR} にみられた。これは、年間と夏季の感熱特性の値の範囲が似通っていたことが一因だと推察された。検出された特徴量が河川水温に影響を及ぼす素過程は、水塊と大気との熱交換の時間や、河川流量の多寡を介した熱容量、基底流出の量や質（水温）に基づいて解釈された。また、本報では、年間から季節へと時間解像度を高めることで、 TED_{ANN} の複数の特徴量について、季節ごとの重要度の違いが明確になる

ことを期待した。検出された特徴量に一定程度の類似性はみられるものの、 TED_{SMMR} と TED_{WTR} では、 TED_{ANN} とは異なる流域や河川の特徴量や、 TED_{ANN} を説明する流域の質的な特徴量に加えて、 mTS_{ANN} の地形的な特徴量が検出された。このように、季節ごとの分析では、年間のTEDとmTSにみられた、それぞれの感熱特性を説明する重要な特徴量の違いが不明瞭になるものが一部にみられた。観測された河川水温を理解する上での基準として活用することを想定し、引き続き、他の季節を含めた検討を重ねることで、感熱特性の適用性を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) Huguet, F., Parey, S., Dacunha-Castelle, D., Malek, F.: Is there a trend in extremely high river temperature for the next decades? A case study for France, *Natural Hazards and Earth System Science*, 8, pp.67–79, 2008.
- 2) 閣議決定: 気候変動適応計画, 134p, 2021.
- 3) 溝口裕太, 赤松良久, 宮本仁志, 中村圭吾: 平衡水温を用いた流域スケールの河川水温管理指標の提案, *河川技術論文集*, 27, pp.289–294, 2021.
- 4) 溝口裕太, 赤松良久, 宮本仁志, 中村圭吾: ランダムフォレストと変数重要度分析を用いた河川流域での水温変化特性の支配要因の検出, *土木学会論文集B1*, 77, pp.I_997-I_1002, 2021.
- 5) 溝口裕太, 赤松良久, 宮本仁志, 中村圭吾: 中国地方の小瀬川・佐波川・高津川を対象にした河川流域の水温変動特性を説明する重要な流域・河道特性の検出手法の提案, *河川技術論文集*, 28, pp.151–156, 2022.
- 6) 河野誉仁, 赤松良久, 乾隆帝: 中国地方一級水系における河川水温の時空間構造変化, *土木学会論文集B1(水工学)*, 74, pp.I_463-I_468, 2018.
- 7) 大野宏之, 佐々木華織, 大原源二, 中園江: 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成, *生物と気象*, 16, pp.71–79, 2016.
- 8) 小南靖弘, 佐々木華織, 大野宏之: メッシュ農業気象データ利用マニュアル, 農研機構, Ver.4, 67p, 2019.
- 9) Home, J. P., Hubbart, J. A.: A spatially distributed investigation of stream water temperature in a contemporary mixed-land-use watershed, *Water*, 12, pp.1756, 2020.
- 10) Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P., Hannah, D. M.: Influence of landscape and hydrological factors on stream-air temperature relationships at regional scale, *Hydrological Processes*, 34, pp.583–597, 2020.
- 11) 横尾善之, 沖大幹: 流域の気候・地形・土壌・地質・土地利用が河川の流況に与える影響, *水工学論文集*, 54, pp.469–474, 2010.

(2023. 3. 24受付)