

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

PROPOSAL OF A DETECTION METHOD FOR DOMINANT FACTORS
EXPLAINING CHARACTERISTICS OF WATER TEMPERATURE
IN OZE, SABA AND TAKATSU RIVER BASINS IN CHUGOKU REGION, JAPAN

溝口裕太¹・赤松良久²・宮本仁志³・中村圭吾⁴

Yuta MIZOGUCHI, Yoshihisa AKAMATSU, Hitoshi MIYAMOTO and Keigo NAKAMURA

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 博(工) リバーフロント研究所 (〒104-0033 東京都中央区新川1-17-24)

(研究当時: 土木研究所水環境研究グループ)

流域規模での水温特性の支配要因を明らかにするために、前報で課題とされたRandom Forestの精度向上を図った上で、変数重要度分析と感度分析を実行し、重要な流域・河道特性の検出を試みた。その結果、熱平衡偏差と修正熱感度を説明する重要な特徴量には、全89項目の説明変数から26項目が検出され、とりわけ、熱平衡偏差は広葉樹林、新生代堆積岩、黒ボク土壌など流域の質的(地被、地質、土壌)、修正熱感度は主流勾配、主流長、集水面積など流域の地形的な特徴量から説明されることが明らかになった。また、それら特徴量が2つの水温特性の応答性に及ぼす主たる要因は、河川水量(地表水)と基底流出(地下水)の量や質、河道を流下する水塊と大気との熱交換の時間に基づき解釈できることを認めた。

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温レジームに変化をもたらす。水圏生態系に対する影響には未解明な部分が多く、さらなる研究の進展が待たれるものの、一方で、気候変動適応計画²⁾が2021年10月に閣議決定されたように、顕在化する影響に先んじた対策も重要である。その一つに、エコロジカル・ネットワークの整備がある。これは、河川上下流間や、本支川間の連続性を高めることで、例えば、高水温耐性に乏しい生物の生息適地への移動を助け、河川生態系に対する気候変動の影響緩和を図るものである。その整備の検討は、将来水温の精緻な予測に基づくことになるが、熱輸送方程式による予測モデルの構築には多大な労力を要するため、全国109水系で一律に進めることは困難である。したがって、気候変動の影響を受けやすい流域、河川の特徴の理解に

基づきスクリーニング法を構築し、優先度にしたがって対策を講じることが肝要と言えよう。そこで前報^{3,4)}では、気象の変化に対する河川水温の感熱特性を捉える水温指標を提案した上で、それらの空間変化を流域と河道の特徴から説明するために、統計モデルのプロトタイプを構築した。これまでに、説明力の高い特徴量を検出する一連の手法の有用性が認められる一方、統計モデルとして用いたRandom Forest(以下、RF)の再現性が課題とされた。そのため本稿では、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、河道に関する特徴量を加えることで説明変数を充実させ、RFの精度向上を図る。その上で、変数重要度分析と感度分析を実行することで、水温特性を支配する重要な流域と河道の特徴を明らかにする。

2. 材料と方法

表-1 流域および河道に関する特徴量

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

(1) 現地観測

中国地方の一級水系である高津川、佐波川および小瀬川を対象流域とした。現地観測の詳細は前報^{3,4,5)}に譲るが、観測点は流域全体を網羅するように設定し、高津川30、佐波川19、小瀬川17地点である。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つの水温特性を計算するために、15分間隔の観測値から月、年平均値を求めた。

(2) 水温特性

RFの目的変数は、前報⁴⁾と同様に2つの水温特性を採用した。具体には、観測水温と平衡水温の年平均値の差である熱平衡偏差 ($M_aT_w - M_aT_{eq}$, M_aT_w : 年平均観測水温, M_aT_{eq} : 年平均平衡水温) と、両者の月平均値の回帰直線の傾きである修正熱感度 (dM_mT_w/dM_mT_{eq} , M_mT_w : 月平均観測水温, M_mT_{eq} : 月平均平衡水温) である。なお、平衡水温とは、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温を意味する。それらの計算方法と、空間変化の特徴は前報^{4,6)}に譲るが、熱平衡偏差は大気の熱環境からの独立性、修正熱感度は大気の熱環境の変化に対する応答性を示すものであり、2つの水温指標ともに値が大きいほど、気象の影響を受けやすいことを意味する。なお、観測値に長期間の欠損がなく、1年ごと(2017年、2018年、2019年、2020年の3月1日から翌年2月末日)に水温特性を計算できた173のデータセットを目的変数とした。

(3) 流域および河道に関する特徴量

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、河道に関する特徴量を既往研究⁷⁻¹⁵⁾を参考に、表-1のように設定し、RFの説明変数とした。前報⁴⁾では33項目としたが、本稿ではRFの精度向上のために、流域の地形、地質、土壌に

する特徴量を加えて89項目とした。

それぞれの特徴量は、水文解析から求めた観測点の集水域ごとに計算した。紙面の都合上、前報⁴⁾と重複するものは割愛し、新たに追加もしくは計算方法を見直した特徴量のみを示す。まず、流域地形の15項目、土壌27項目は土地分類基本調査、地質の8項目は20万分の1日本シームレス地質図を参照^{16,17)}し、面積割合として求めた。また、地形と土壌の特徴量の項目数は土地分類基本調査と同数とし、地質は既往研究^{10,11)}の区分にしたがって設定した。このほか、集水域重心距離は集水域の立体重心と観測点との直線距離、河川方位は集水域内の流路を90°ごとの4方位(北、東、南、西)に区分し、全流路長に対する割合とした。次に、計算方法を見直した斜面方位は8方位から河川方位と同数の4方位に集約し、河川密度はStrahler位数ごとに河川延長を集計した上で、集水面積で除して求めた。図-1には、ArcGIS 10.7 (ESRI社製)による地理空間情報¹⁶⁻¹⁹⁾の解析から求まる流域と河道に関する特徴量の対象3流域における範囲を示す。これは、本稿で構築するRFの適用限界の目安である。

(4) 水温特性を説明する重要な特徴量の検出

水温特性の空間変化を説明する重要な流域と河道の特徴量を検出するために、前報⁴⁾と同様にRFを構築した上で変数重要度分析を実行した。RFの目的変数は熱平衡偏差もしくは修正熱感度であり、説明変数は表-1に示す89項目の特徴量である。なお、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。このほか、変数重要度分析では、RFなど機械学習で多用されるMDA (Mean Decrease Accuracy) を指標に、重要度の高い特徴量を検出した。この値が大きいほど、特徴量の重要度が高いことを意味する。また、MDAは特徴量の説明力の大きさの指標であり、目的変数と説明変数との相関関係の正負は明らか

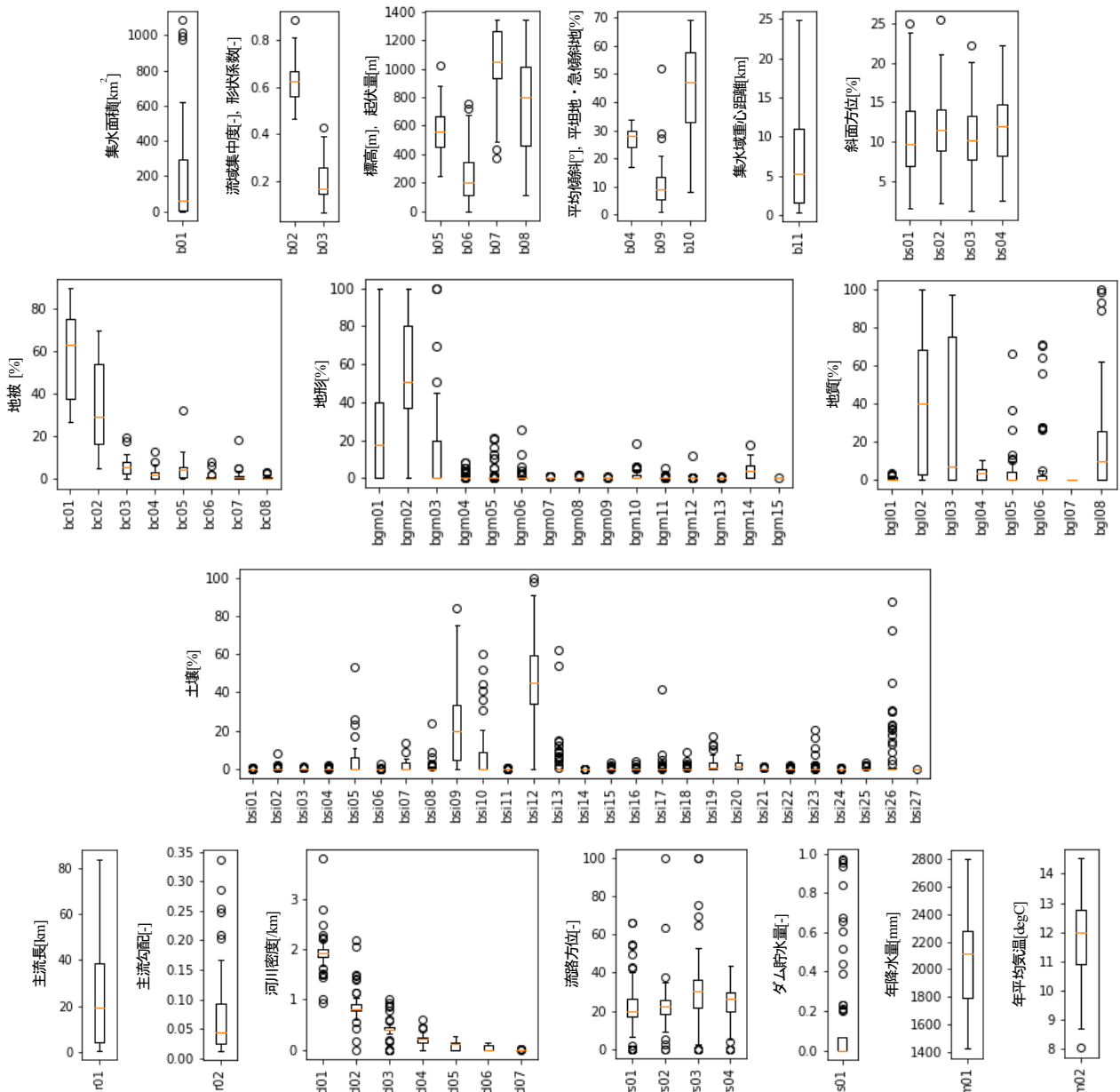


図-1 流域および河道に関する特徴量（エラーバーの上下限值：第1, 3四分位数±1.5×四分位範囲，○：外れ値であり，記号の意味は表-1の通りである．図-2, 3についても同様の表記とする．）

にできない．そこで，検出された流域と河道の特徴量に対して感度分析を行い，説明変数が±10，20%変化した際の目的変数の応答を確認した．

その後，河川水温の形成機構の基本である水塊と大気との熱交換および熱容量を意味する河川流量の観点から，本稿で検出された重要な特徴量について文献調査に基づき考察した．

3. 結果と考察

(1) ランダムフォレストの再現性

はじめに，RFの再現性を論じる．2つの水温特性に関する精度を前報⁴⁾と比較すると，熱平衡偏差のR²は0.63

から0.80，RMSEは0.74から0.43[degC]，また，修正熱感度のR²は0.63から0.75，RMSEは0.04から0.03[-]となり，いずれも改善した．これは，説明変数の項目数の増加に加え，データセットの充実がRFの精度の改善に貢献したと考えられる．なお，データセットは101から173，変数の項目数は33から89の増加である．

(2) 変数重要度分析

変数重要度分析の結果を図-2に示す．なお，MDAの中央値が全説明変数の中央値の平均を上回ったものを重要な特徴量とした．また，その集約結果を表-2に示す．ここでは，感度分析による水温特性それぞれの応答性に基づき，特徴量を順相関，逆相関，無相関に分類して記載した．例えば，熱平衡偏差と順相関にある広葉樹林で

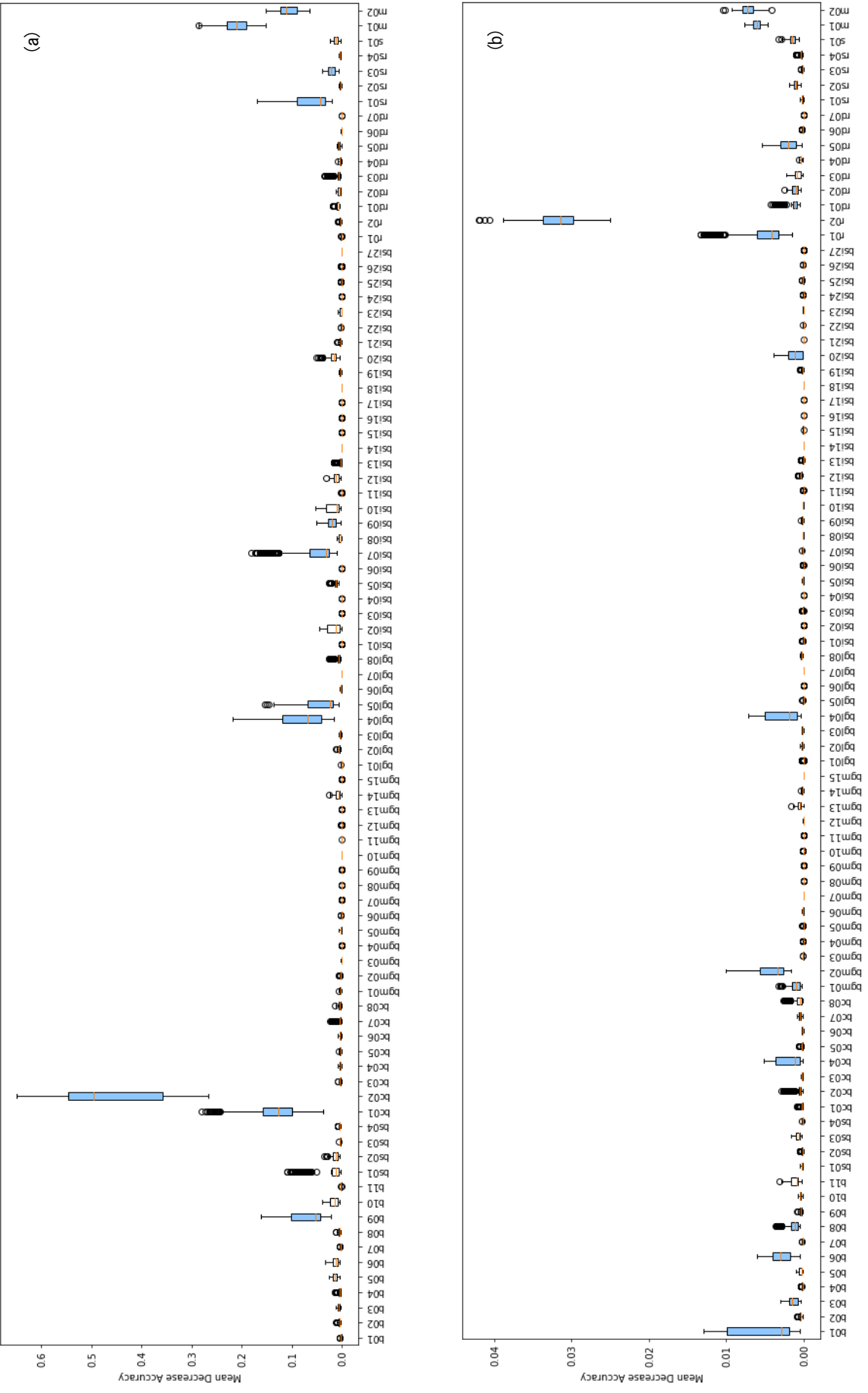


図-2 (a) 熱平衡偏差 ($M_{T_{\#}} - M_{T_{eq}}$) と (b) 修正熱感度 ($dM_{T_{\#}}/dM_{T_{eq}}$) に関する変数重要度 (MDA)の中央値が全説明変数の中央値平均を上回るものを青く着色

あれば、その面積割合が大きいほど、偏差が大きくなることを意味する。重要な特徴量には、表-2と感度分析から除外した気象に関連する特徴量（年降水量，年平均気温）を含む26項目が検出された。これは全体の29%（26/89項目）にあたる。図-2と表-2から、2つの水温特性は異なる流域と河道の特徴量から説明されることがわかる。熱平衡偏差は最も重要度の高い広葉樹林と、針葉樹林、新生代堆積岩、中・古生代堆積岩、黒ボク土壌など流域の地被、地質、土壌、修正熱感度は最も重要度の高い主流勾配と、主流長、集水面積、河川密度、中起伏山地など流域や河道の地形に関する特徴量が検出された。このうち、熱平衡偏差の地被、修正熱感度の河道に関する特徴量は前報⁴⁾でも同様に検出されている。本稿では、説明変数の項目数を増やすことで、熱平衡偏差は流域の質的、修正熱感度は流域の地形的な特徴量から説明されることを、より明確に示すことができた。

このように、重要な特徴量を明らかにすることは、RFの構築に必要な説明変数の項目数の絞り込みと捉えることができる。RFの入力データの効率的な準備につながり、他の流域における同手法の適用の際に、作業性という観点から有利に働くと考えられる。ただし、同手法は内挿問題への適用が妥当であり、本稿の対象3流域と似た特徴を持つ地域での活用には限定されることに留意が必要である。

(3) 感度分析

a) 修正熱感度

変数重要度分析から検出された重要な特徴量について、感度分析の結果を踏まえて議論を深める。表-2のように、修正熱感度と順相関を認めたのは集水面積のほか8項目、逆相関は主流勾配のほか4項目、明瞭な関係を認めなかった特徴量は2項目となった。修正熱感度と順相関を認めた集水面積、起伏量、主流長は値が大きいほど、逆相関である主流勾配、最低標高は値が小さいほど、源頭部から遠ざかり、河口に近づくことと捉えることができる。河川水温の形成機構という視点では、源頭部から遠ざかるほど、河道を流下する水塊と大気との熱交換の時間は長く^{7,8)}、気象の影響を受けやすいため、修正熱感度は高まりやすいと考えられる。

b) 熱平衡偏差

熱平衡偏差と順相関を認めたのは広葉樹林のほか4項目、逆相関は針葉樹林と流路方位（北）、明瞭な関係を認めなかった特徴量は黒ボク土壌となった（表-2）。

まず、最も重要な特徴量として検出された広葉樹林（図-3(a)）と、同様に地被に属する針葉樹林（図-3(b)）に焦点をあてる。熱平衡偏差と針葉樹林には逆相関を認める一方、広葉樹林は順相関となり、類似する応答性を持つと想定したが相反する結果になった。この理由として、落葉期における地表面の日射と積雪の影響が考えられる。すなわち、落葉期の広葉樹林は、水・地表面に日

表-2 感度分析に基づく重要な特徴量の分類

		変数重要度分析	感度分析
熱平衡偏差	平地 広葉樹林 新生代堆積岩 中・古生代堆積岩 [乾性褐色森林土壌] 流路方位(南)		順相関
	針葉樹林 流路方位(北)		逆相関
	黒ボク土壌		無相関
修正熱感度	集水面積 [起伏量] [裸地] [小起伏山地] [新生代堆積岩] [灰色低地土壌] 主流長 河川密度 (rd02) [流路方位(東)]		順相関
	[形状係数] 最低標高 中起伏山地 主流勾配 河川密度 (rd01)		逆相関
	河川密度 (rd05) ダム貯水量		無相関

[] : 相対的に重要度の低い特徴量（それぞれの水温特性の値と比較して感度分析結果が2オーダーより小さいもの）

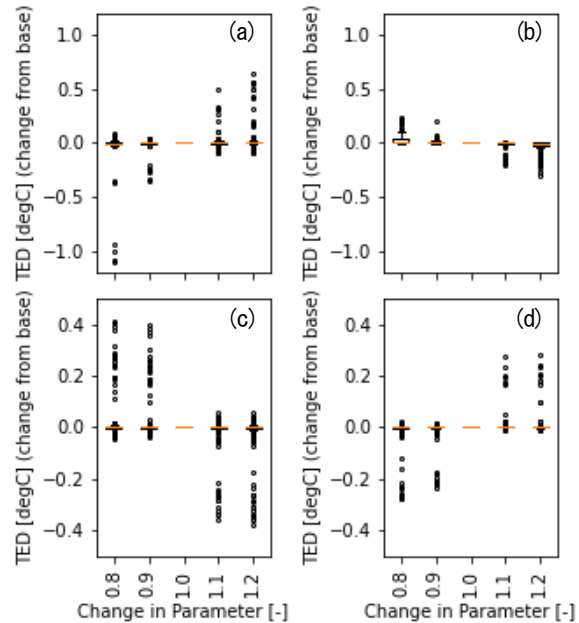


図-3 説明変数である(a) 広葉樹林、(b) 針葉樹林、(c) 流路方位（北）と(d) 新生代堆積岩を±10、20%変化させた場合の熱平衡偏差（TED）の応答

射が到達しやすいため、針葉樹林と比べて河川水温や、基底流出の温度を左右する林内地温は高まりやすい^{20,21)}。また、積雪期には、広葉樹林では大きな積雪深のために針葉樹林と比べて地温は高く、その変動は小さく安定するという報告がある²¹⁾。このように、広葉樹林の影響は大きく、その季節性が河川水温の年平均値を押し上げたため、熱平衡偏差と順相関になったと推察される。したがって、本稿で対象とした年間値を基本とした議論に加えて、1年をいくつかの期間にわけて分析することで、特定の季節への水温特性の依存性や、それを説明する重要な特徴量を明確化できると考えられる。

流路方位は、水表面での日射の授受を左右する特徴量である。熱平衡偏差とは流路方位（北）が逆相関、流路方位（南）が順相関となり、流路方位（北）の相対的に高い重要性が示唆された（図-2、図-3(c)）。既往研究⁸⁾では、日射量の多い南向き流路での昇温が顕著であることを明らかにしており、これは、北向き流路が多いほど水温特性が小さい本稿の結果を逆説的に支持するものである。

このほか、地質、土壌を中心に、河川流量を左右する

特徴量が検出され、とりわけ、低水量 (Q275), 湧水量 (Q355) との密接な関係が指摘されている¹⁰⁻¹⁴⁾。このことは、河川水量 (地表水) や、それに占める基底流出量 (地下水) の大きさと持続性が、熱平衡偏差を支配する一因であることを示唆するものである。熱平衡偏差と順相関にある新生代堆積岩 (図-3(d)) と中・古生代堆積岩は、その値が大きいほど、低・湧水量は小さいとされる¹⁰⁻¹⁴⁾。低・湧水量の多寡は、河道を流下する水塊そのものであり、その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い。また、低・湧水量は基底流出量に支配¹⁰⁾されるが、基底流出は地表水と比べて水温の日・年較差は小さいため、その量が少なれば河川水温の変化を緩和する効果は小さいと考えられる。

他方、熱平衡偏差と順相関の平坦地、無相関の黒ボク土壌は、その値が大きいほど低・湧水量は大きいとされる¹⁰⁻¹⁴⁾。したがって、先述の熱容量、基底流出量だけでなく、水塊が河道を流下する時間や、河道に流出するまでの時間を含めた解釈が必要だと言える。平坦地 (図-3(b)) と黒ボク土壌は、降水を保持する機能が高いとされる¹²⁻¹⁵⁾。河川に流出するまでの時間が長いほど、地表付近や帯水層にある水塊の温度は、気象や、それに支配される地温の影響を受けて変化しやすく、低・湧水量の増加による効果が相殺されたものと考えられる。

4. 結論

本稿では、説明変数の項目数の充実によって、前報⁴⁾で課題とされたRFの精度向上を図った上で、変数重要度分析と感度分析を実行し、水温特性を支配する重要な流域と河道の特徴の明確化を試みた。

変数重要度分析の結果、水温特性を説明する重要な特徴量として26項目が検出された。加えて、熱平衡偏差は、広葉樹林、新生代堆積岩、黒ボク土壌など流域の質的 (地質、地質、土壌)、修正熱感度は、主流勾配、主流長、集水面積など流域の地形的な特徴量から説明されることが明らかになった。感度分析の結果を踏まえると、修正熱感度の応答性は、河道を流下する水塊と大気との熱交換の時間に、熱平衡偏差は、それに加えて河川水量 (地表水) と基底流出 (地下水) の量や質に基づく解釈の妥当性を認めた。しかしながら、水温特性の詳細な応答性の理解は、河川水温の形成機構に基づく議論が不可欠であり、今後の課題である。

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, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 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) 河野蒼仁, 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*, 74, pp.I_463-I_468, 2018.
- 6) 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.
- 7) 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, *Hydrol. Process.*, 34, pp.583-597, 2020.
- 8) 牧野富彦, 宮沢哲男: 豊川水系黄柳川の河川水温について, *水温の研究*, 26, pp.13-20, 1983.
- 9) 末永博, 溝口裕太, 田中規夫, 井原和彦, 又吉健太: 河川合流点での水位・流量ピーク時刻の集中を支配する降雨および流域特性の分析と集水域間の比較, *河川技術論文集*, 25, pp.121-126, 2019.
- 10) 虫明功臣, 高橋裕, 安藤義久: 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, *土木学会論文報告集*, 309, pp.51-62, 1981.
- 11) 石田和也, 宮本仁志: 気候・地質・土地利用の影響を考慮したリンクマグニチュードによる河川水系の流況推定, *土木学会論文集B1*, 68, pp.I_487-I_492, 2012.
- 12) 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.
- 13) 横尾善之, 沖大幹, 川崎雅俊, 坂田加奈子: 湧水比流量の増加要因に着目した全日本地下水涵養ポテンシャルマップの作成, *土木学会論文集B1*, 67, pp.I_385-I_390, 2011.
- 14) 志水俊夫: 山地流域における湧水量と表層地質・傾斜・植生との関係, *林業試験場研究報告*, 310, pp.109-128, 1980.
- 15) 安藤義久, 吉田憲生: 山地流域の直接流出特性と流域特性の対応関係に関する研究, *水利科学*, 171, pp.36-49, 1986.
- 16) 国土交通省: GISホームページ, <https://nlftp.mlit.go.jp/index.html>, 2020.
- 17) 産総研地質調査センター: 20万分の1日本シームレス地質図V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2.html>, 2021.
- 18) 国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2020.
- 19) 環境省 自然環境局 生物多様性センター: 第6-7回自然環境保全基礎調査 植生調査報告書, <http://www.biodic.go.jp/>, 2020.
- 20) Dugdale, S. J., Malcolm, I. A., Kantola, K. & Hannah, D. M.: Stream temperature under contrasting riparian forest cover, *Sci. Total Environ.*, 610-611, pp.1375-1389, 2018.
- 21) 柳原未侖, Ali, R., 乃田啓吾, 伊藤健吾, 千家正照: 林相の異なる流域における渓流水温の特性, *農業農村工学会全国大会講演要旨集*, 68, pp.564-565, 2019.

(2022. 3. 25受付)