

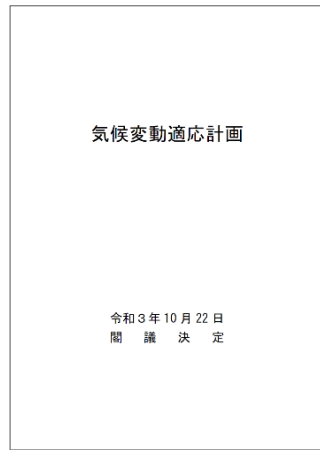
河川流域の水溫変動特性を説明する重要な特徴量の検出とその解釈

—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—

溝口裕太¹⁾・赤松良久²⁾・宮本仁志³⁾・崎谷和貴¹⁾

1)土木研究所 2)山口大学大学院 3)芝浦工業大学

はじめに



気候変動適応法

→気候変動影響評価報告書（最新R2）

→**気候変動適応計画（最新R3）**

淡水生態系に関する適応の基本的な施策

→**水系を基軸とした生態系ネットワークの形成の推進**
(本川の上下流間や、本支川間の連続性を確保することで、生物が自由に往来できる環境を整える。)

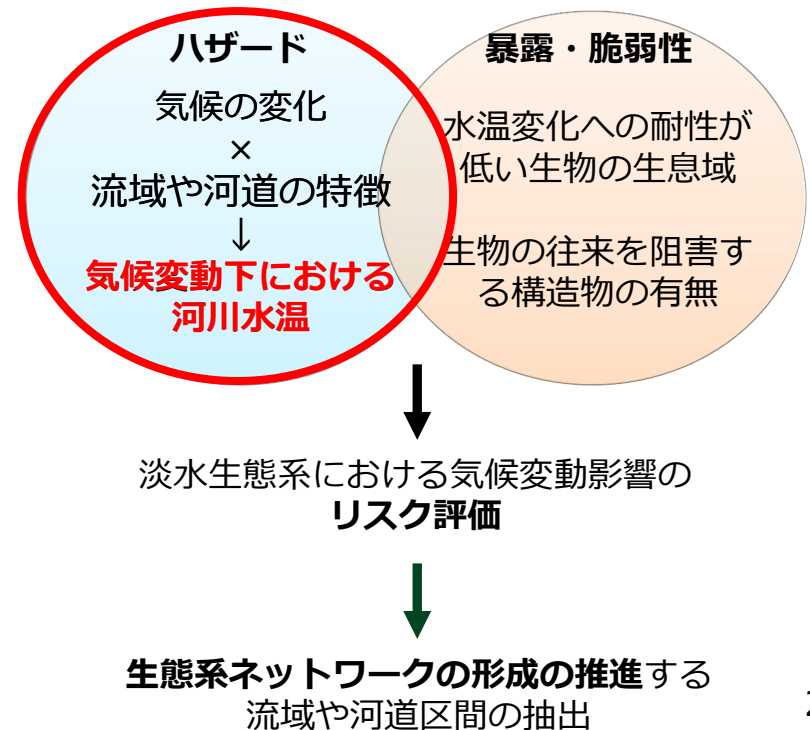
生態系ネットワークの形成の推進には、施策を実施する**流域や河道区間を絞り込む**ことが不可欠である。

その実現には、気候変動による淡水生態系への影響を明らかにし、リスクを評価する必要がある。

ハザード、暴露・脆弱性の明確化が重要となる。

<淡水生態系におけるリスクが高まり難いと考えられる例>

- 湧水（基底流出）が豊かであり、気候変動下においても河川水温の変化が小さい（ハザード）。
- 水系内に、将来の水温変化に耐えられない生物が生息していない（暴露）。
- 河川構造物の魚道は十分に機能しており、冷水性魚類は水系内を自由に往来できる（脆弱性）。



はじめに

気象変動下における河川水温

↑
物理モデル（熱輸送方程式）による推定が可能
↑
将来の気候（短波・長波放射など）を境界条件

課題（初期・境界条件の設定の難しさの例）

- 精緻な河川地形（航空レーザー測量）
- 河畔林等による遮光効果
- 水系の水収支（取水量）
- 都市や水田からの排水量と温度
- 基底流出（湧水）の量と温度
- 観測水温データの少なさ（境界条件、再現性）

対象流域と河道区間の絞り込み

物理モデルによる河川水温の予測は大きな労力を要する。したがって、対象流域や河道区間を絞り込むために、簡便なスクリーニング手法の開発が重要である。

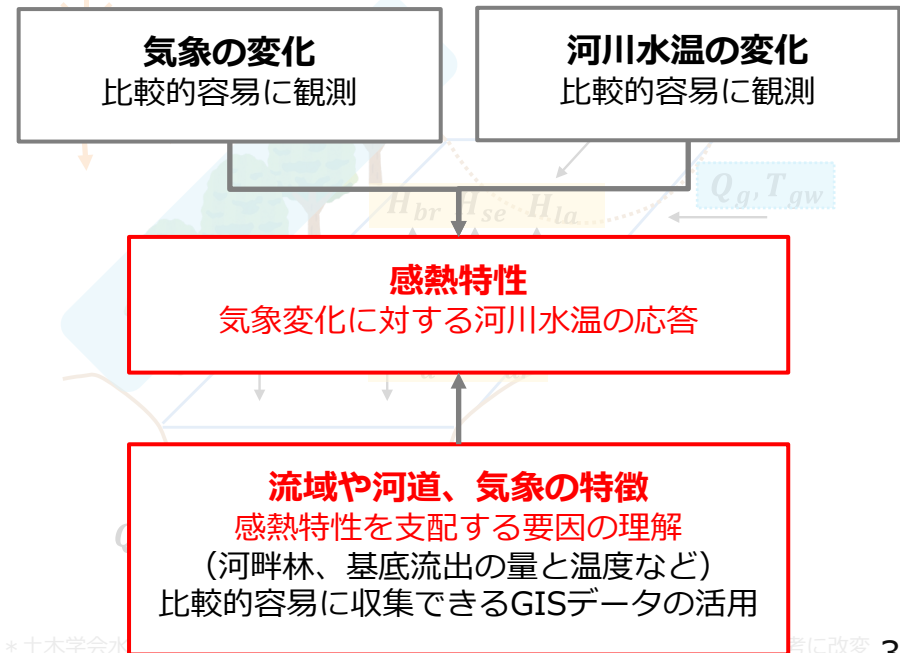
本研究の目的

気象変化に対する河川水温の応答特性（感熱特性）は、流域や河道のどのような特徴に左右されるのか、中国地方の3流域における夏季と冬季を対象に、理解を深める。

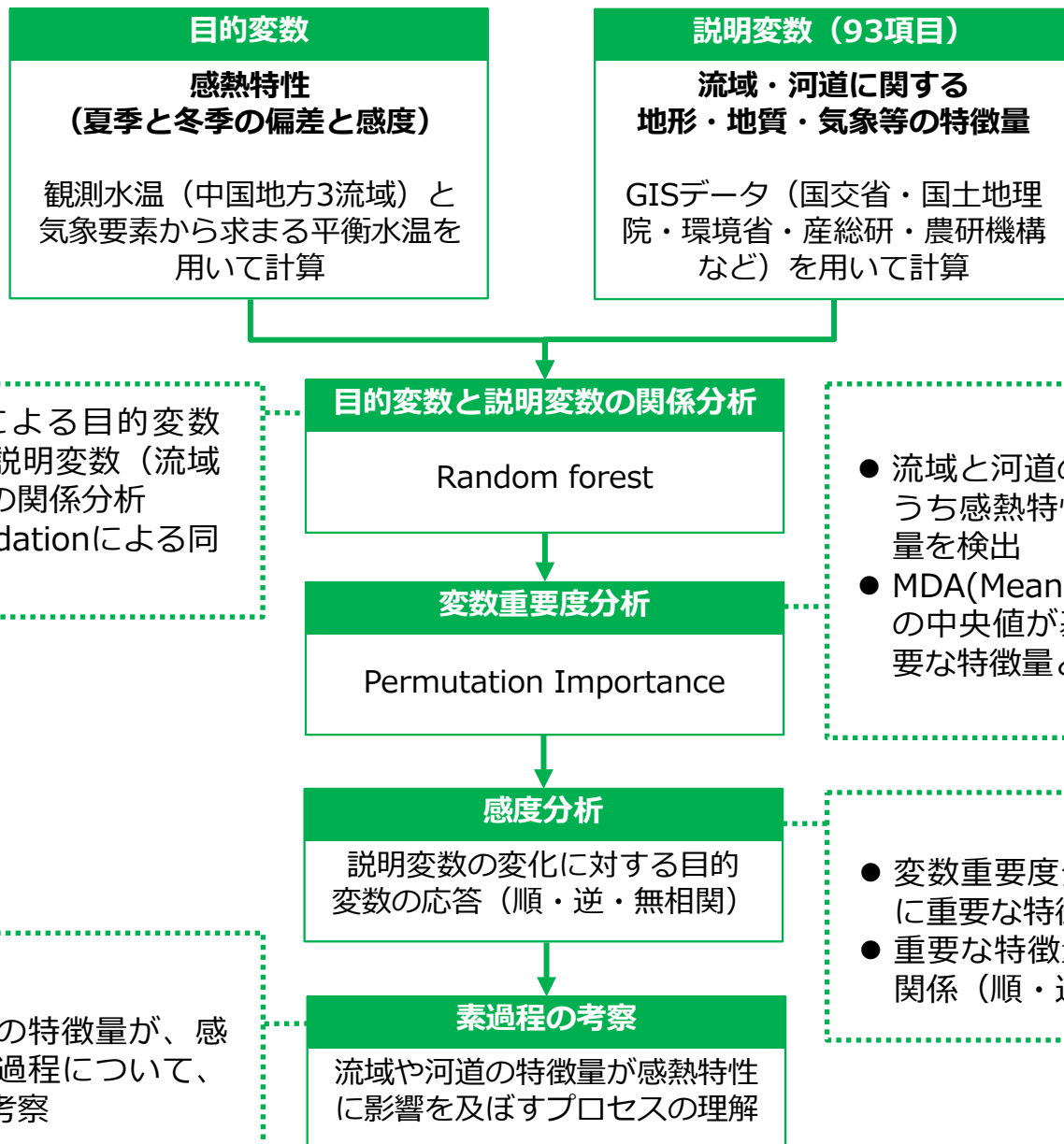
熱輸送方程式*

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \bar{D}_a \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \\ = \frac{B}{\rho_w c_w A} (H_s - H_{sr} + H_a - H_{ar} - H_{br} - H_{se} - H_{la}) \\ + \frac{P}{\rho_w c_w A} H_g + \frac{Q_g}{AL_x} (T_{gw} - T_w) \end{aligned}$$

$H_s - H_{sr}$: 短波放射, $H_a - H_{ar}$: 長波放射, H_{br} : 長波逆放射,
 H_{se} : 顕熱, H_{la} : 潜熱, H_g : 河床伝熱, Q_o, Q, Q_g, Q_t : 流量
(流入, 流出, 河床からの地下水流入, 支川からの流入), $T_{wo},$
 T_w, T_{gw}, T_{tw} : 水温 (同上)



材料と方法 研究の手順



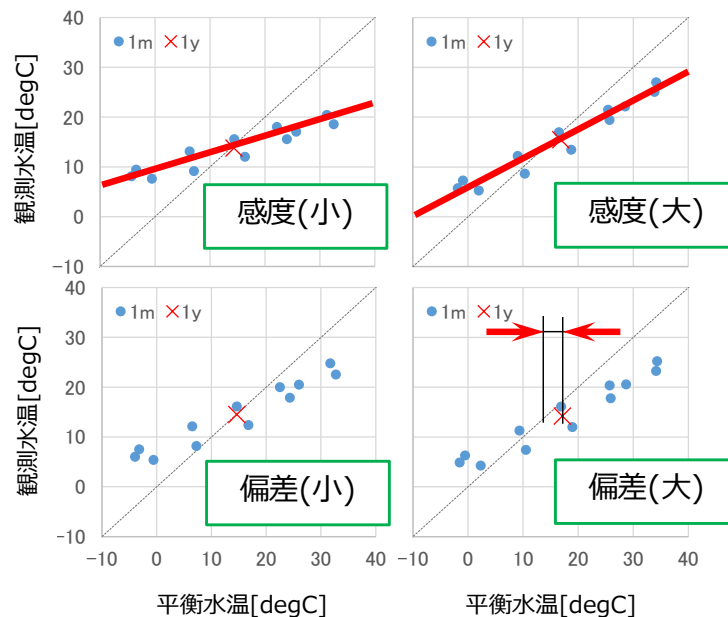
材料と方法 感熱特性（目的変数）

現地観測

- 中国地方3流域の66地点（高津川30地点、佐波川19地点、小瀬川17地点）に据置型の水温計（Onset社製Water Temperature Pro v2）を設置
- 対象期間は、4年間（2017年3月～2021年2月）
- 感熱特性は、全66地点に対して夏季（6月～8月）と冬季（12月～翌年2月）の観測水温を用いて計算

感熱特性

- 夏季と冬季の熱平衡偏差と修正熱感度を用いる。それぞれ、観測水温と平衡水温から計算される。
- 平衡水温は、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。
- 熱平衡偏差は値がゼロに近いほど、修正熱感度は値が大きいほど、気象変化に対する河川水温の応答性は高いと考えられる。
- 感熱特性（気象変化に対する河川水温の応答性）の観測点ごとの違いを流域や河道の特徴から理解する。



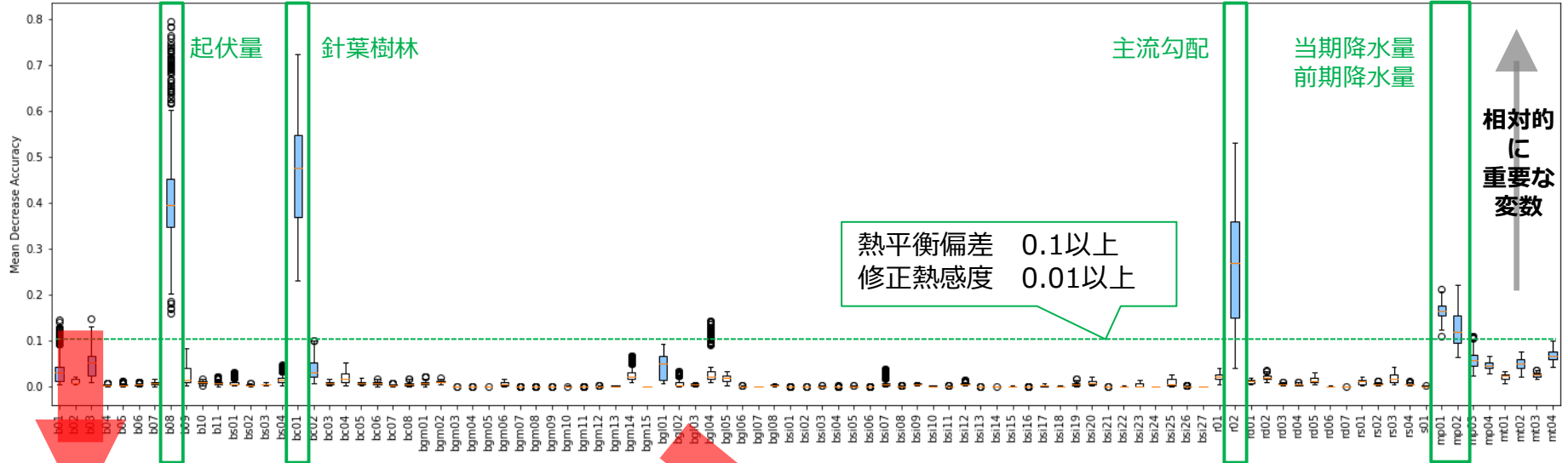
材料と方法 流域や河道の特徴量（説明変数 93項目）

- 流域・河道に関する地形・地質・土壌・気象等の特徴量
- GISデータ（国交省・国土地理院・環境省・産総研・農研機構など）を用いて計算

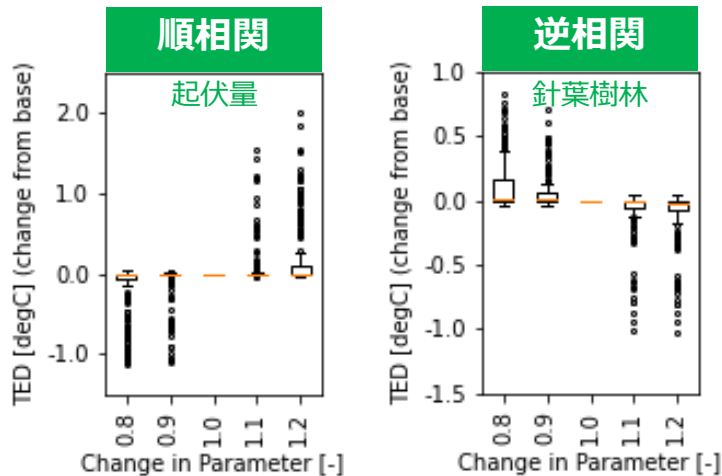
流域基本	b01	集水面積	流域地形	bgm09	小起伏丘陵地	流域土壌	bsi17	赤・黄色土壌	
	b02	流域集中度		bgm10	大起伏丘陵地		bsi18	細粒灰色低地土壌	
	b03	形状係数		bgm11	火山性丘陵地		bsi19	粗粒灰色低地土壌	
	b04	平均傾斜		bgm12	砂礫台地（中）		bsi20	灰色低地土壌	
	b05	平均標高		bgm13	砂礫台地（上）		bsi21	粗粒褐色低地土壌	
	b06	最低標高		bgm14	扇状地性低地		bsi22	褐色低地土壌	
	b07	最高標高		bgm15	三角州性低地		bsi23	細粒グライ土壌	
	b08	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(黄褐色系)	ダム	s01	ダム貯水量		
	bgm03	大起伏山地	bsi11	乾性褐色森林土壌(赤褐色系)		気象	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(黄褐色系)	mp03		前々期降水量		
	bgm06	小起伏火山地	bsi14	褐色森林土壌(赤褐色系)	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			

結果 変数重要度分析・感度分析

変数重要度分析 相対的に重要な変数を検出（夏季の熱平衡偏差の例）



感度分析 重要な変数の相関関係の明確化（順・逆・無相関に分類）



分析結果の集約

夏季と冬季の偏差と感度を左右する変数の比較

	熱平衡偏差 (TED)			修正熱感度 (mTS)		
	Annual	Summer	Winter	Annual	Summer	Winter
	Mar - Feb	Jun - Aug	Dec - Feb	Mar - Feb	Jun - Aug	Dec - Feb
流域						
地被						
地形						
土壌						
河川						
気象						
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			•			

夏季と冬季の熱平衡偏差と修正熱感度を左右する重要な変数の類似点を明確化

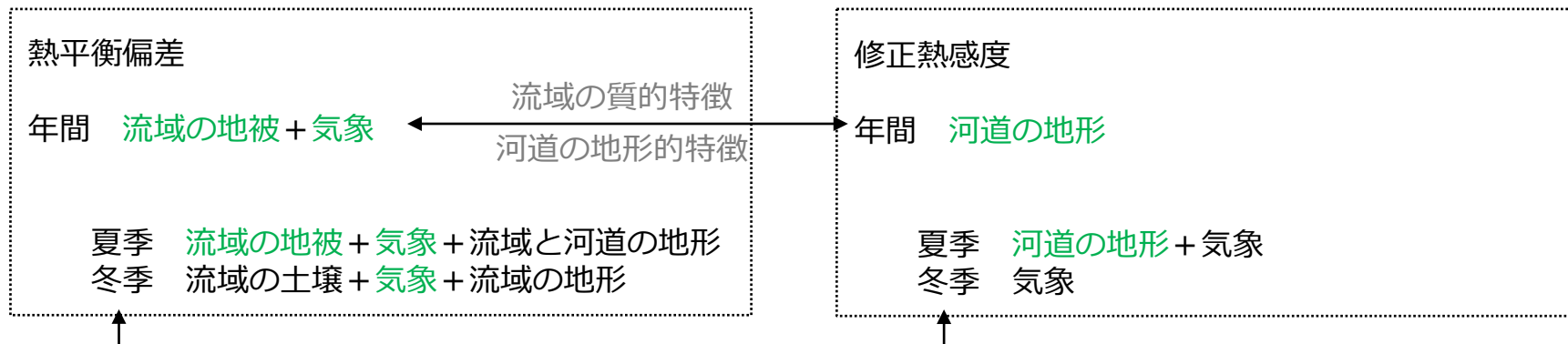
重要な変数が、河川水温の変化にどのような素過程を経て影響を与えるか考察

結果 変数重要度分析・感度分析

		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			●			

+ : 順相関
 - : 逆相関
 ● : 無相関

Mean Decrease Accuracyが「熱平衡偏差 (TED) 0.1以上、修正熱感度 (mTS) 0.01以上」を重要な変数として検出



「季節」ごとでは、河川水温の感熱特性の両者の違いがやや不明瞭になる。

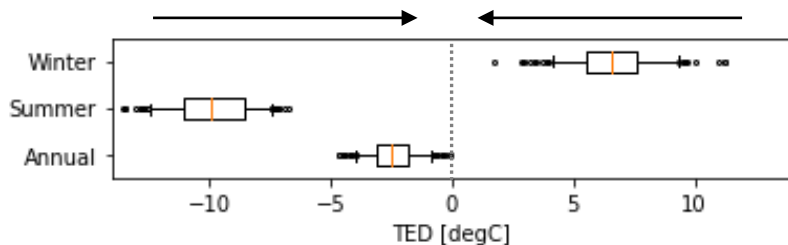
結果 変数重要度分析・感度分析

		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			●			

+ : 順相関
 - : 逆相関
 ● : 無相関

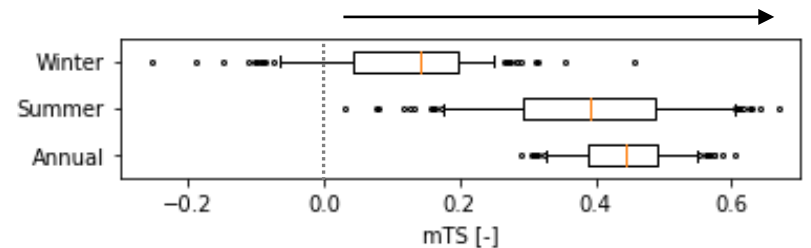
年間と夏季は「+」、冬季は「-」のとき、
 熱平衡偏差の値はゼロに近づく。
 →気象の影響を受けやすい。

値がゼロに近づくほど気象の影響を受けやすい。



年間、夏季、冬季において、
 修正熱感度の値が大きくなる。
 →気象の影響を受けやすい

値が大きいほど気象の影響を受けやすい。



考察 重要な特徴量が感熱特性に及ぼす影響の解釈

		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			●			

- + : 順相関
- : 逆相関
- : 無相関

流域の質的な特徴量 (地被、土壌)

針葉樹林 「占有面積は小さいほど」
水面や地表面への日射を抑制する効果は小さい

乾性褐色森林土壌 (黄褐色) 「占有面積は大きいほど」
低・濁水量の減少に貢献する

→河川水温は、気象変化の影響を受けやすい。

流域と河道の地形的な特徴量

起伏量 「大きいほど」
主流勾配 「小さいほど」
重心距離 「大きいほど」

河川下流域であることを意味する。

大起伏丘陵地 「占有面積が大きいほど」
豊・平・低・濁水量の減少に貢献する可能性がある。

→河川水温は、気象変化の影響を受けやすい。

考察 重要な特徴量が感熱特性に及ぼす影響の解釈

		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			●			

- + : 順相関
- : 逆相関
- : 無相関

気象 (降水量)

降水量 「小さいほど」
河川流量の減少に貢献する。

→河川水温は、気象変化の影響を受けやすい。

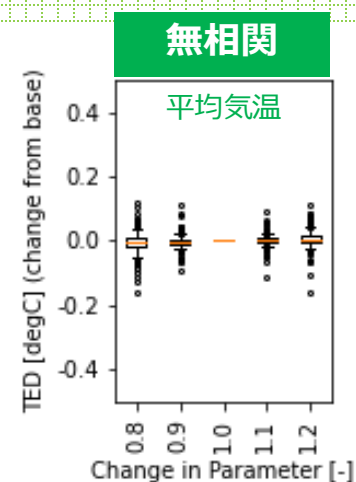
ただし、当期降水量は直接流出、前期・前々期降水量は基底流出の起源であると考えられ、流出経路の違いが、順・逆相関に影響を与えていると考えられる。

気象 (平均気温)

平均気温 「無相関」

変数重要度分析から、冬季の熱平衡偏差に大きな影響を与えることが明らかになった。

しかし、感度分析では、明瞭な相関関係はみられず、無相関となった。



結論

夏季と冬季について、感熱特性である修正熱感度と熱平衡偏差を求めた上で、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Random Forestを構築した。その後、Random Forest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。

- 年間の熱平衡偏差や修正熱感度の特徴量との類似性は、冬季と比べて**夏季の修正熱感度や修正熱感度**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。
- 季節ごとの分析では、年間の熱平衡偏差と修正熱感度にみられた、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。