

## 武庫川水系における水温の分布とその長期変動

古武家善成\*

### Spatial distribution and long-term variation of water temperature in Muko River

Yoshinari KOBUKE

#### 要 旨

魚類をはじめとする水生生物の生息等にも大きな影響を及ぼすと考えられる武庫川水系 36 地点の水温に関し、兵庫県が実施した 1973～2011 年度の 39 年間の水質モニタリングデータを用いて、その地点分布および長期変動を統計解析した。解析に際しては気温の影響による誤差をできる限り減少させる手法を用いた。近年の平均水温の分布では、本川冬期に亀治橋から大岩橋にかけて特徴的な上昇がみられ、武庫川上流浄化センター放流水の影響が推察された。支川地点では、夏期・冬期ともに平均気温 - 平均水温間に有意な正の相関関係がみられ、気温の影響が大きいことが示された。本川主要 6 地点の長期変動では、夏期 4 地点、冬期 5 地点で有意な水温上昇がみられ年上昇率が地点間で概ね類似したことから、温暖化の影響が示唆された。冬期の大岩橋では他と比べ大きな年上昇率がみられ、処理能力の変化を考慮した期間別解析結果から、浄化センター放流水の影響が長期変動にも影響していることがわかった。

**キーワード**：武庫川，水温，地点分布，長期変動，統計解析

#### 1. はじめに

昨年 9 月、気象庁は「平成 25 年（2013 年）夏の日本の極端な天候について」<sup>1)</sup>を公表し、西日本の高温、東北地方の多雨および九州南部・奄美地方の少雨が 1946 年以来第 1 位であるなど、極端な天候（極端現象）が発生したことを明らかにした。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、同月に第 5 次評価報告書第 1 作業部会報告書<sup>2)</sup>を公表し、種々の自然科学的根拠を挙げて地球温暖化がさらに進行していることを示し、「地球温暖化の原因が人為起源の温室効果ガスである可能性は『極めて高い』（95%以上の確率）」と指摘した。

このように地球温暖化は一段と進んでおり、それによる水環境への影響が懸念されている。地球温暖化による国内陸水水温の長期変動に関しては、琵琶湖<sup>3)</sup>、ダム湖<sup>4)</sup>など主に湖沼における研究が報告されている。これに関連して、新井<sup>5)</sup>は気候変動と陸水の温度に関する内外文献のレビューの中で、河川に関する報告が少ない理由として、河川水温への影響因子には気温などの気象要素、流速、流量などの水文要素、ダム、取水排水などの人為的要素など多くの因子が関わり、日変化も大きいという調査の困難性を挙げている。

本論文は、兵庫県東部を流れる武庫川水系の水温の地点分布および長期変動について、水質モニタリングデータを用いて統計的に解析し、地球温暖化の影響が

その変動に表れているかを明らかにすることを目的としている。

武庫川は、既報<sup>6)</sup>に記したように、兵庫県内で初めて総合治水の観点で河川整備計画が策定され、兵庫県総合治水条例（2012）制定のきっかけとなった河川である。武庫川水系河川整備基本計画（2011）<sup>7)</sup>には、アユをシンボルフィッシュと位置づけ、魚類にとってより望ましい川づくりに努めることが掲げられている。しかし、アユをはじめとする淡水魚類は、河川の水温上昇により大きな影響を受けることが予測されている<sup>8)</sup>。また、IPCC 第 4 次評価報告書では淡水魚類の回遊への影響が懸念されている<sup>9)</sup>。したがって、武庫川水系の水温変動を明らかにすることは武庫川の川づくりにも非常に重要と考えられる。

このような観点から、本論文では武庫川水系の水温に関する長期変動解析を試みた。解析に当たっては、水質モニタリングデータに関する前記の誤差要因を十分考慮し、その影響をできる限り減少させる手法を用いた。

#### 2. 解析方法

武庫川水系の水温の解析資料として、兵庫県が公表している各年度における「公共用水域の水質等測定結果報告書」<sup>10)</sup>のデータを用いた。気温・水温の測定頻

\*武庫川づくりと流域連携を進める会/神戸学院大学

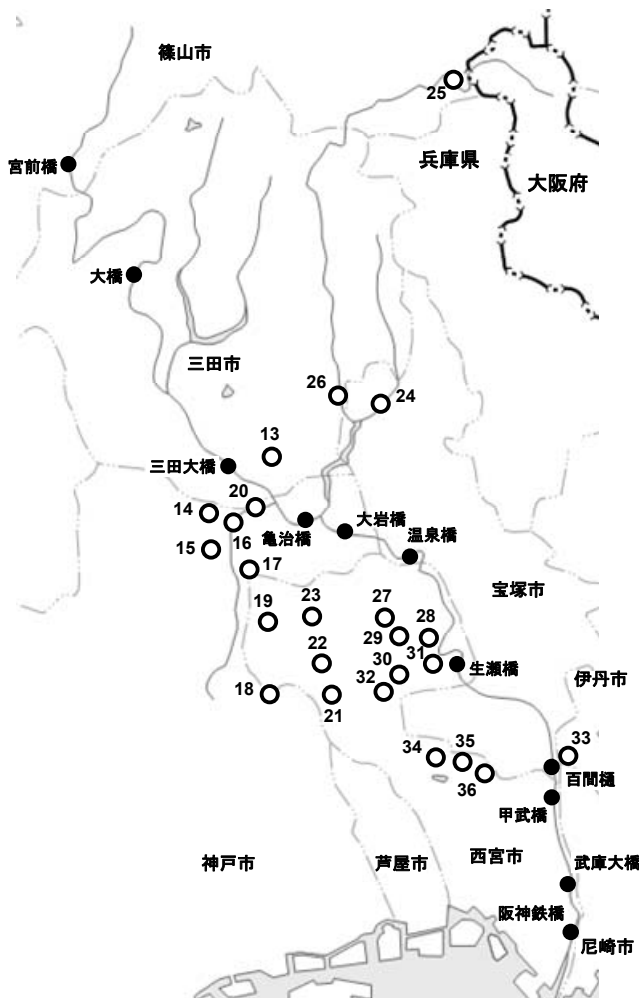


図1 武庫川水系の兵庫県水質モニタリング地点

度は1回/月であり、兵庫県の水質モニタリング地点は図1(支川地点番号は表1参照)に示す36地点である。

水系各地点における近年の平均水温の検討においては、2009～2011年度の3年間のデータを、本川主要地点における長期変動の解析においては、1973年度以降の最長39年間のデータをそれぞれ用いた。

河川水温の日間変動に大きく影響する気温は、モニタリングデータの場合には調査(採水)時刻に依存する。そこで、本解析に用いたデータの調査時刻を解析したところ、「3.1」で詳述するように、地点によって、①調査時刻がどの年度・月でも類似した時間帯の場合と、②大きく2つの時間帯に分離される場合とがあることがわかった。

この結果を踏まえ、夏期(6～8月)の平均水温を求める場合には、①の地点では調査時刻の平均を求め、平均時刻を中心とした前後1時間に含まれるデータを、概ね類似した気温条件での水温とみなし、平均水温を求めるのに用いた。②の地点では、データ数が多い方の時間帯をその地点での代表的な調査時間とみなして採用し、①の地点の場合と同様に採用したデータ群の平均時刻を求め、それを中心とした前後1時間に含まれるデータから平均水温を求めた。冬期(12～2月)の

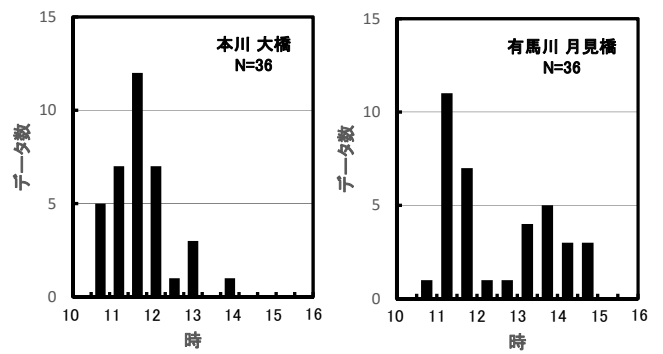


図2 調査時刻の分布例

平均水温に関しても同様の方法で求めた。

解析に際しては、平均値をはじめとする基本統計量や相関係数、回帰分析等の計算には、Microsoft社製表計算ソフト“Excel 2013”を用いた。また、モニタリング調査は年度単位(4月～翌年3月)で実施されているが、解析では年次単位(1月～12月)での検討も適宜用いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 調査時刻の分布

調査時刻の分布の一例として、図2に武庫川本川の大橋および支川有馬川の月見橋の結果を示す。いずれも2009年4月から2012年3月までの3年間計36回の調査時刻の頻度分布である。

本川の大橋の場合は、11:30～12:00を最頻区間とする概ね1峰型の正規分布を示す。一方、有馬川月見橋の場合は、10:30～12:30の調査時間帯(午前)と12:30～15:00の調査時間帯(午後)とにわかれ2峰型の分布を示す。

武庫川に限らず県内の河川水質モニタリングでは、同一河川の各地点における調査順序が固定していることが多いため、調査時刻も調査時期を問わず地点ごとに概ね類似してくると考えられる。調査時刻に関する1峰型の分布はそれを反映している。一方、2峰型の分布では午前と午後の2つの調査時間帯が含まれる。月見橋の原データで詳細を検討すると、2009年度は3ヶ月に1回午後の調査が入り、2010年度は午後の調査頻度がそれより増加し、2011年度にはまた減少していた。

月見橋におけるこのような調査時刻の変動の原因は不明だが、上記の2峰型頻度分布の場合にはデータ数の多い午前を代表的な調査時間帯とみなし、調査時刻の平均値を求める際には午前のデータ群のみを用いた。

各地点の平均水温を求める場合には、調査時刻に関する同様の検討を全ての地点で行った。その結果、本川12地点の平均調査時刻は全て午前中(12時台4地点を含む)であり、支川24地点についても概ね午前中(午前17地点、12時台5地点、午後2地点)となった。

#### 3.2 武庫川水系における近年の平均水温

表 1 武庫川水系本川・支川地点における 2009～2011 年度夏期・冬期の平均水温

No.	河川	地点	夏期(6～8月)						冬期(12～2月)					
			平均水温	95%信頼区間		N	平均気温	平均時刻	平均水温	95%信頼区間		N	平均気温	平均時刻
				下限	上限					下限	上限			
1	武庫川	宮前橋	26.8	25.2	28.5	3	27.3	11:14	5.9	4.9	6.8	2	5.2	10:56
2		大橋	25.0	23.4	26.7	6	27.1	11:14	6.7	4.9	8.5	8	9.3	10:59
3		三田大橋	29.0	26.5	31.6	3	32.0	11:36	5.9	4.0	7.9	3	7.4	11:03
4		亀治橋	24.1	21.9	26.3	7	25.9	11:53	6.9	4.3	9.6	4	8.1	11:18
5		大岩橋	25.6	22.5	28.7	5	26.1	12:14	10.7	9.0	12.4	5	10.0	11:57
6		温泉橋	24.9	22.6	27.2	7	25.5	10:39	8.8	7.7	10.0	9	5.9	10:51
7		生瀬橋	25.1	23.0	27.3	7	28.7	11:53	8.0	6.7	9.3	9	9.0	12:08
8		百間樋	25.5	23.4	27.6	7	30.1	12:37	8.2	6.7	9.6	9	10.8	12:50
9		甲武橋	27.1	24.8	29.5	9	29.9	10:27	9.4	7.8	11.0	8	9.7	10:21
10		武庫大橋	24.6	22.2	27.0	9	27.3	9:03	7.5	5.8	9.1	9	7.1	9:08
11		阪神鉄橋	25.8	23.7	27.9	6	27.5	9:52	10.9	8.4	13.3	5	10.6	9:57
12		南武橋	26.6	24.7	28.5	3	28.1	9:27	6.5	5.8	7.2	3	5.4	9:36
13	山田川	山田滑谷ダム放流口	27.5	25.5	29.6	3	31.8	11:06	4.8	4.6	5.1	3	7.0	10:43
14	長尾川	大江橋	29.4	29.1	29.8	3	31.7	11:58	5.4	3.5	7.3	3	7.3	12:06
15	八多川	才谷橋	30.1	29.4	30.8	3	32.7	12:26	4.4	2.8	6.1	3	6.7	11:50
16	有野川	有野川流末	27.8	26.8	28.8	3	31.9	12:03	4.4	3.4	5.3	3	6.2	12:12
17	西川	西久保橋	27.6	25.6	29.5	3	30.7	11:40	7.4	5.9	8.8	3	7.2	11:35
18	有馬川	長尾佐橋	24.1	23.2	25.0	3	31.1	15:06	7.0	3.4	10.6	3	6.4	14:24
19		明治橋	24.1	21.8	26.3	5	28.0	11:22	9.4	8.3	10.5	9	9.0	11:52
20		月見橋	23.5	20.9	26.0	7	26.2	11:12	6.9	5.1	8.7	9	8.6	12:07
21	船坂川	船坂橋	22.6	21.8	23.3	3	28.2	9:51	6.5	6.0	7.1	3	7.7	9:55
22		下田橋下流	24.2	23.5	24.9	3	28.2	13:11	7.7	6.6	8.8	3	8.5	12:48
23		鍋倉橋	24.3	22.5	26.0	8	28.1	11:05	7.3	6.1	8.5	9	8.7	11:06
24	波豆川	神戸市量水観測地	25.7	23.1	28.2	8	28.8	11:21	5.5	4.4	6.6	9	7.6	11:31
25	羽束川	坂下橋	21.8	21.4	22.1	2	31.0	11:52	6.0	1.2	10.8	3	4.8	12:03
26		神戸市量水観測地	27.1	23.8	30.4	3	30.3	10:18	5.9	5.1	6.8	3	6.6	10:10
27	名塩川	農協南	23.4	19.8	27.0	2	30.0	10:57	7.6	6.0	9.3	3	8.8	10:55
28		名塩川流末	23.7	22.2	25.3	9	28.6	10:27	7.9	6.7	9.2	9	9.8	10:25
29	尼子谷川	新尼子橋	23.3	20.8	25.7	3	26.7	10:48	5.3	5.2	5.3	2	7.5	10:42
30	太多田川	蓬莱峡山荘前	24.6	21.0	28.1	3	29.7	9:58	7.5	6.4	8.7	3	6.8	10:03
31		千都橋	23.5	22.1	24.8	9	27.6	10:11	8.0	6.4	9.6	9	7.7	10:09
32	座頭谷川	座頭谷川流末	25.4	23.1	27.6	3	30.8	10:06	9.6	6.0	13.1	3	7.3	10:03
33	天神川	稲野橋	25.4	22.4	28.3	4	30.0	10:37	6.4	5.2	7.6	3	6.5	10:23
34	仁川	鷲林寺橋	18.0	16.9	19.1	3	22.7	11:06	6.6	1.7	11.5	3	9.3	10:53
35		甲山橋	23.8	21.1	26.4	9	26.6	11:05	8.2	6.6	9.9	9	9.6	10:50
36		地すべり資料館前	18.8	18.0	19.5	3	22.8	10:33	11.5	10.9	12.1	3	12.8	10:18

表 1 および図 3 は、武庫川水系の本川・支川各地点における 2009～2011 年度の平均水温について、夏期(6～8月)、冬期(12～2月)別に求めた結果である。平

均水温に加え平均調査時刻(「平均時刻」)についても夏期・冬期別に示した。図 3(b)の支川の場合は、それぞれの表示が異なる河川の地点である場合が多いので、

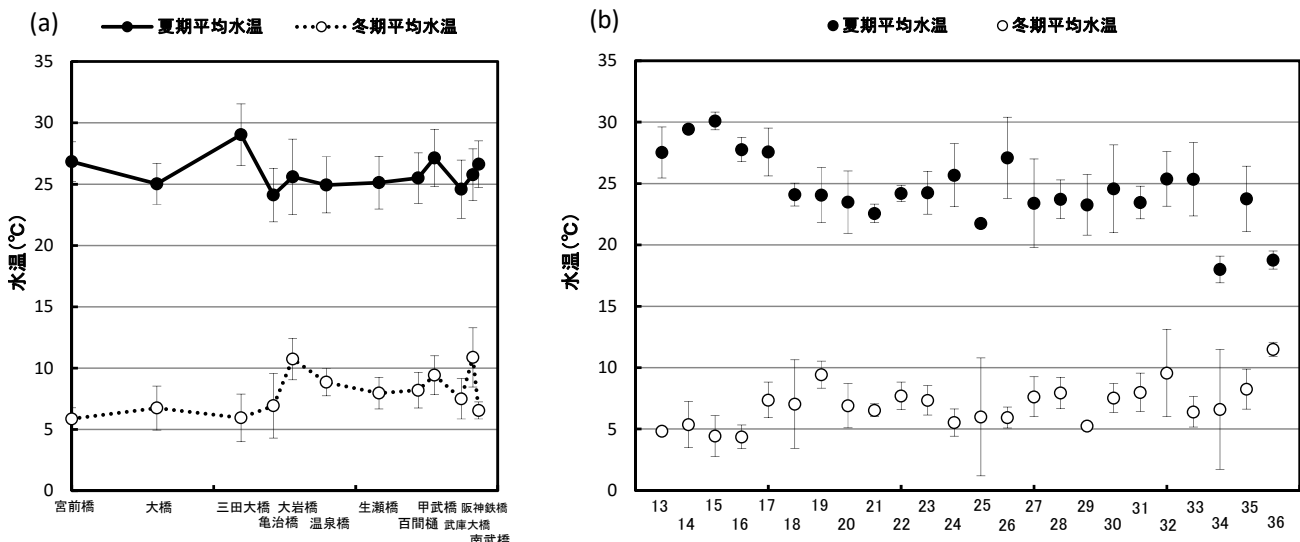


図 3 武庫川水系本川 (a)・支川 (b) 地点における 2009～2011 年度夏期・冬期の平均水温

地点間の連続性を表す直線による連結は行っていない。

各地点のデータ数（「N」）は本川：夏期 3～9，冬期 2～9，支川：夏期 2～9，冬期 2～9 である。データ数が少ない地点があるのは、年間の調査頻度が少ない、または「3.1」の検討結果から解析に用いなかったデータがあるためである。

図3の縦線は平均水温の95%信頼区間を示し、データのバラつきの程度を表す。95%信頼区間とは、複数のデータから求めた平均水温が95%の確率でその区間に存在することを意味している。したがって、例えば、平均水温Aの信頼区間と平均水温Bの信頼区間が重ならない場合、AとBの間には有意水準95%で統計的に有意な差があるといえる。

本川地点の結果を表1および図3(a)に示す。平均調査時刻は夏期、冬期ともに9時から12時の範囲にあり、大きな差は見られない。

夏期では、三田大橋の平均水温（29.0℃）が最も高く直下流の亀治橋の平均水温（24.1℃）が最も低い。この場合は両地点の95%信頼区間が重ならない（三田大橋信頼下限26.5℃，亀治橋信頼上限26.3℃）ので、統計的にも差があるといえる。この要因に関しては、両地点の平均調査時刻はそれぞれ11:36および11:53と類似しており、気温の日変化に関する影響は考えられない。ただし平均気温には違いがあり、亀治橋に比べ都市化している三田大橋の方が高い。一方、両地点の間には有馬川が流入しており、最下流部地点月見橋の夏期平均水温は23.5℃（表1）である。したがって、地域性や有馬川からの低水温流入水が亀治橋の夏期平均水温に影響していることが考えられる。しかし、本川地点全体としてみると、信頼区間の重なり程度から明らかなように、夏期平均水温には大きな差があるとは言えない。

冬期では、亀治橋（6.9℃）から大岩橋（10.7℃）に

かけて約4℃の上昇が明瞭に認められる。この間には支川の羽束川と武庫川上流浄化センター放流水が流入している。羽束川の影響に関しては、羽束川および羽束川支川波豆川の観測地点（いずれも神戸市水量観測地）の水温はそれぞれ5.9℃および5.5℃と高くないが、いずれも千苺ダムよりも上流にあることから、ダムの影響を考慮しなければならない。既報<sup>11)</sup>によれば、冬期に放流水の水温が上昇するダムは多いが4℃以上の上昇例は1～2割である。

一方、浄化センター放流水の冬期の水温は2012年度において17～19℃と報告されている<sup>12)</sup>。また、冬期でも水温が高い下水処理場放流水が冬期の河川水温に大きな影響を及ぼしている事例<sup>13,14)</sup>が明らかになっていること、大岩橋の流量に占める浄化センター放流水量の割合は3割程度と小さくない<sup>6)</sup>ことを考慮すれば、浄化センター放流水が亀治橋 - 大岩橋間の水温上昇に影響していることが推察される。

阪神鉄橋（10.9℃）の平均水温も高いが、ここは潮

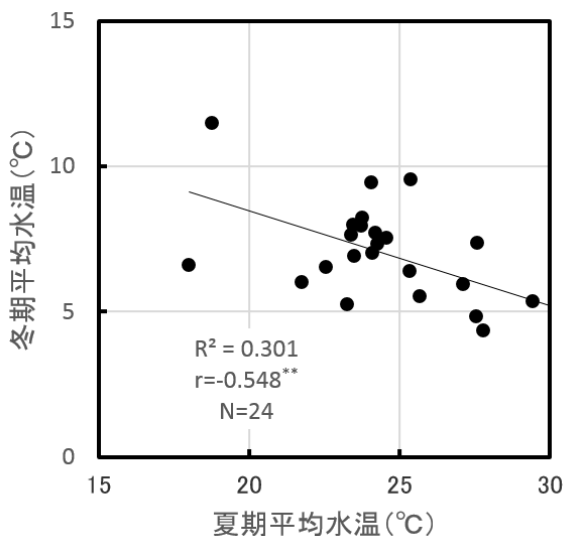


図4 支川における夏期平均水温と冬期平均水温との関係

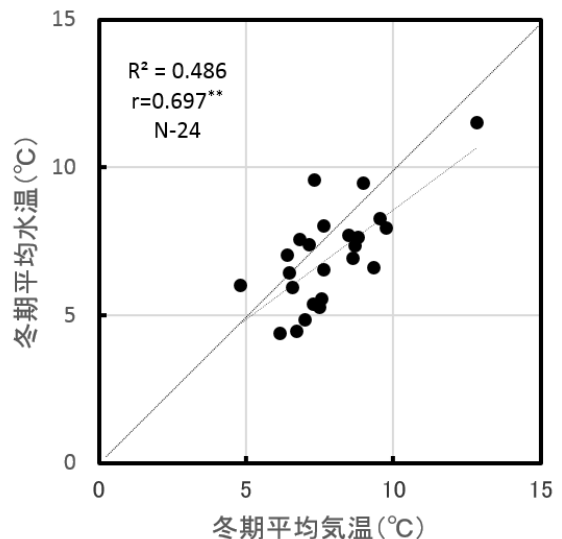
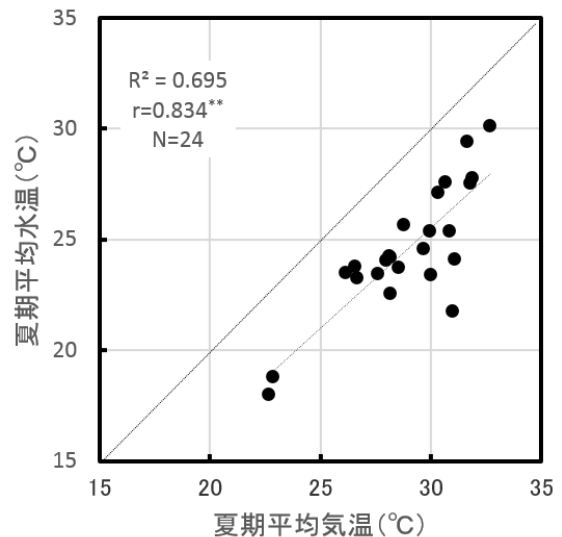


図5 支川における夏期（上）・冬期（下）の平均気温と平均水温との関係

止め堰直上にあることから水流滞留による影響が考えられる。また、その他の特徴として、亀治橋までの上流側地点がそれより下流の各地点に比し低水温状態にある。この点については後に追記する。

支川地点については、表1および図3(b)に示されるように、夏期では、山田川、長尾川、八多川、有野川、西川の各地点が28℃前後で高く、仁川の鷲林寺橋および地すべり資料館前が18℃前後とかなり低い。95%信頼区間からみてその差は明らかである。一方、冬期では、夏期に高かった山田川などの地点において4~5℃と逆

に低い傾向がみられる。

そこで、支川各地点における夏期平均水温と冬期平均水温との関係を検討した。結果を図4に示す。相関係数は $r=-0.548^{**}$ であり、両水温間には有意水準99%で高度に有意な負の相関関係が認められる。この関係をさらに検討するために、平均水温と同様の方法で平均気温を算出(表1)し、支川各地点における平均気温と平均水温との関係を夏期、冬期別に求めた(図5)。夏期の相関係数は $r=0.834^{**}$ 、冬期の相関係数は $r=0.697^{**}$ であり、どちらの季節においても平均気温と平均水温

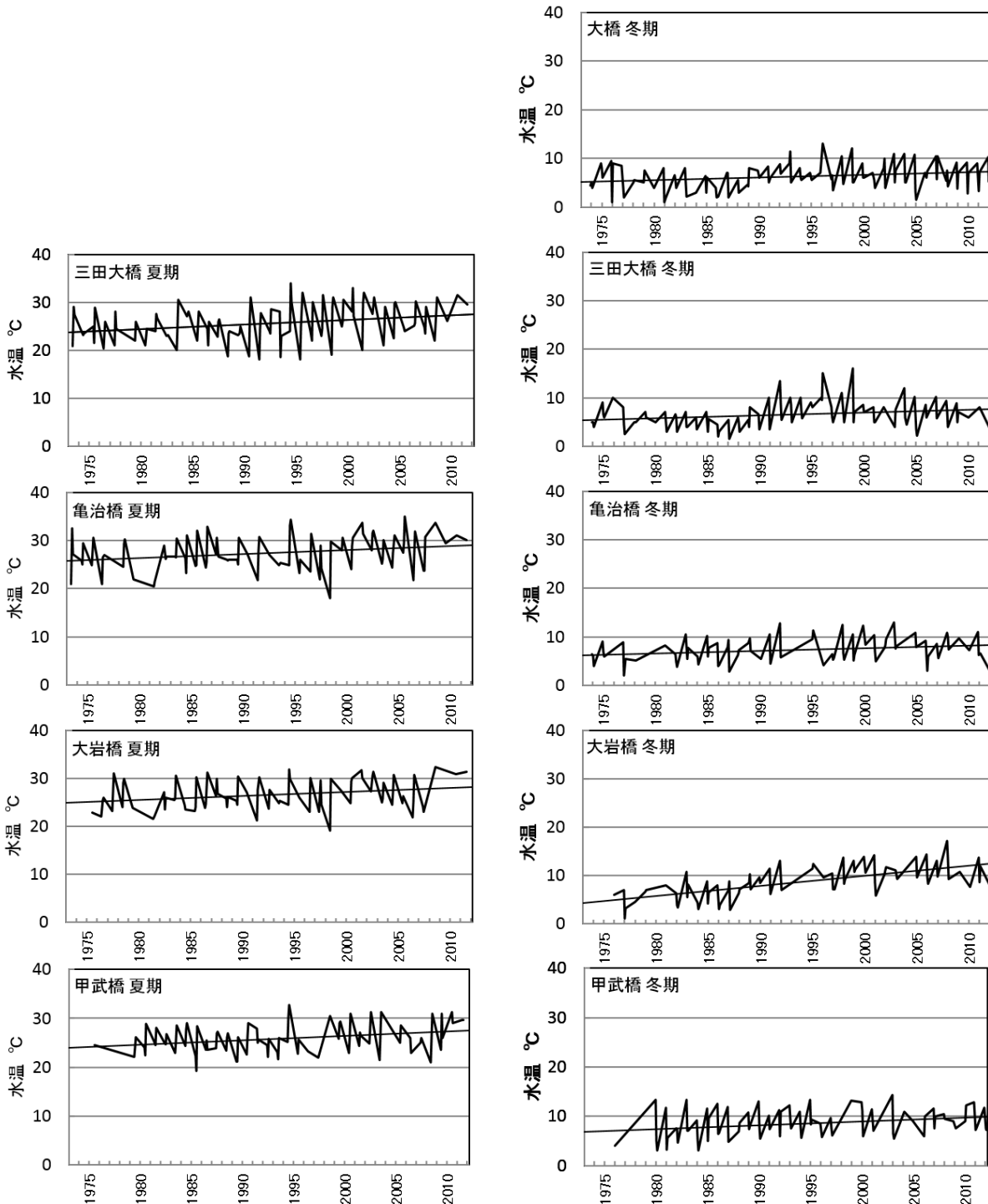


図6 回帰直線の傾きが有意な本川地点における夏期(左)・冬期(右)水温の長期変動

の間には有意水準 99%で高度に有意な正の相関関係が認められる。相関性は必ずしも因果関係を示すものではないが、この結果は支川各地点の水温が気温に大きく影響されていることを強く示唆する。

図には示していないが、本川各地点に関しても同様の関係を検討したところ、夏期の相関係数は  $r=0.749^{**}$ 、冬期の相関係数は  $r=0.633^*$ で、いずれも支川の場合に比べ相関係数が低下し、統計的には有意だが冬期については有意水準が 95%になった。この結果は、本川各地点の水温に対する影響因子として、浄化センター放流水など気温以外の要因についても、支川の場合以上に考慮する必要があることを示すと考えられる。

支川においては、夏期の平均水温が高い地点は冬期の平均水温が低く、夏期の平均水温が低い地点は冬期の平均水温が高い傾向が示された (図 4)。平均水温は平均気温に強く影響されているので、これは、夏期に気温が高く冬期に低い地点とその逆の地点があることを意味している。前者の例は、図 3(b)左端に見られる「No. 13 山田川山田滑谷ダム放流口」, 「No. 14 長尾川大江橋」, 「No. 15 八多川才谷橋」, 「No. 16 有野川有野川流末」で、支川全地点平均に比べ、夏期平均気温は高く冬期平均気温は低かった。後者の例は、同図右端に見られる「No. 36 仁川地すべり資料館前」で、同様に支川全地点平均と比べ、夏期平均気温は低く冬期平均気温

は高かった。このような気温の傾向には地形、土地利用、都市化、地下水流入などの影響があると考えられるが、なぜ生じるかについてはさらに詳細な検討が必要と思われる。

一方、冬期平均水温が低かった本川の宮前橋、大橋、三田大橋、亀治橋に関しては、宮前橋および三田大橋の冬期平均気温は本川全地点平均よりも低かったものの、4地点全体として気温との関係性を統一的に説明することはできなかった。気温以外の要因の影響が少ないことが推察された。

### 3.3 武庫川本川地点における水温の長期変動

本川の主要地点である大橋、三田大橋、亀治橋、大岩橋、百間樋、甲武橋の6地点について、1973年度から2011年度までの39年間の水温データを用いてその長期変動を解析した。

長期変動の解析では年平均値の変動に着目するケースが多い。しかし本解析では、「2.」で述べたように類似の調査時間のデータのみを選択して用いたため、年平均値算出の基になるデータの調査月や年間データ数が年によって異なることになり、各年の平均値を単純に比較して変動傾向を求めることに問題が生じた。そこで、年平均値を用いず原データである各月の水温の変動から長期変動傾向を解析した。

表 2 本川地点の水温・気温の長期変動に関する回帰分析結果

地点	水温(1973~2011)									
	夏期(6~8月)					冬期(12~2月)				
	傾き	切片	データ数	有意水準	上昇率 °C/年	傾き	切片	データ数	有意水準	上昇率 °C/年
大橋	0.0046	23.58	107	—	—	0.0047	5.08	105	95%	+0.056
三田大橋	0.0081	23.70	100	99%	+0.097	0.0051	5.28	94	95%	+0.061
亀治橋	0.0067	25.79	89	95%	+0.080	0.0047	6.20	78	95%	+0.056
大岩橋	0.0071	24.83	79	95%	+0.085	0.0177	4.21	75	95%	+0.21
百間樋	0.0033	26.27	73	—	—	0.0002	8.96	68	—	—
甲武橋	0.0074	23.99	82	99%	+0.089	0.0064	6.89	82	95%	+0.077
地点	気温(1973~2011)									
	夏期(6~8月)					冬期(12~2月)				
	傾き	切片	データ数	有意水準	上昇率 °C/年	傾き	切片	データ数	有意水準	上昇率 °C/年
大橋	0.0029	27.51	107	—	—	0.0025	8.06	105	—	—
三田大橋	0.0071	27.13	100	95%	+0.085	0.0016	9.05	94	—	—
亀治橋	0.0038	27.99	89	—	—	0.0011	7.88	78	—	—
大岩橋	0.0073	26.92	79	95%	+0.088	0.0026	8.34	75	—	—
百間樋	0.0081	27.68	73	—	—	0.0035	9.26	68	—	—
甲武橋	0.0048	26.41	80	—	—	0.0031	7.78	81	—	—

—:有意でない

さらに、年間の月データを全て用いた場合には、例えば夏と冬とで大きく変化する水温グラフからのトレンドの抽出となり、有意な長期変動傾向を得ることができなかった。そこで、本解析では、夏期（6～8月）および冬期（12～2月）それぞれの期間のみに着目し、期間内で大きく変動しない水温データを用いて長期変動を検討した。

陸水の水温の長期変動傾向を明らかにする手法として、経済統計分析法を援用し、季節変動成分や短期変動成分を除いて長期変動成分を抽出する方法が用いられている<sup>4)</sup>。しかし、本解析では前記のようにデータを夏期、冬期に限定したため、複雑な解析法は用いず一次回帰直線による近似を行い、直線の傾きから水温の変化率を求めた。

回帰分析により回帰直線の傾きが統計的に有意（有意水準 95%）または高度に有意（有意水準 99%）であった地点の結果について、**図 6** に示す。用いたデータ系列は夏期または冬期の期間のみなので連続データとは言えないが、変動をわかりやすく示す意味で補完法により全てのデータ間を直線で結んでいる。図では縦軸のスケールを全て同一にしたため、傾きがわかりにくい地点もあるが、夏期では 6 地点のうち三田大橋、亀治橋、大岩橋、甲武橋の 4 地点で有意な回帰直線が得られ、いずれも正の傾きを示した。また、冬期では大橋、三田大橋、亀治橋、大岩橋、甲武橋の 5 地点で有意な回帰直線が得られ、同様に正の傾きを示した。

これらの結果をまとめ**表 2** に示す。表には同様の方法で求めた気温に関する結果も示した。傾きの数値は月単位の上昇率を示すので年単位に換算すると、有意地点の夏期水温の年上昇率は 0.080～0.097℃/年となり、各地点の上昇率は概ね類似している。冬期の場合も大岩橋を除き 0.056～0.077℃/年であり、夏期よりも多少ばらつきが見られるが夏期と同様に概ね類似する。これらの類似性はその要因が各地点に共通することを示している。夏期と冬期における年上昇率の違いに関してはさらに詳しい解析が必要であるが、この結果は、流域に共通する自然的要因としての温暖化の影響を強く示唆する。

一方、大岩橋の冬期の年上昇率は 0.21℃/年であり、夏期および冬期における他の全ての地点の結果と比較しても非常に大きい。その要因として、「**3.2**」で考察したように、水温が高い武庫川上流浄化センター放流水の影響が考えられる。同センターは、1985 年 5 月に日最大処理能力 15,700m<sup>3</sup>/d で供用が開始され、処理施設が順次増設されて 1999 年 10 月以降 100,000m<sup>3</sup>/d の規模で運転されている<sup>12)</sup>。

この下水処理能力については、その増強が放流水量の増加にただちに結びつく訳ではないが、長期的には放流水量の増加に反映すると考えられる。そこで、上記の処理能力増設状況を考慮して、原データを①1985 年 4 月以前、②1985 年 5 月～1999 年 9 月、③1999 年 10 月以降に分け、それぞれの期間別に回帰分析を行った。結果を年上昇率と合わせ**図 7** に示す。

①および③の期間では回帰直線の傾きは有意にならず、処理施設の増設が進行中の②の期間では、年上昇率 0.37℃/年の高度に有意な水温上昇（太字で表示）が認められる。これをまとめると、大岩橋の 1985 年頃までの冬期水温は、上昇傾向がみられるが有意な上昇ではなく、その後 1999 年頃にかけて 5℃程度有意に上昇した後、横ばいで推移している。すなわち、**図 6** に示された大岩橋冬期水温の長期的変動は、このような 3 つの短期的変動に分解でき、特に②および③の期間の変動は、浄化センターの下水処理能力が増加・安定するパターンとよく一致しているといえる。この結果は、武庫川上流浄化センター放流水が大岩橋における長期的な冬期の水温上昇にも強く影響していることを示している。

浄化センター放流水の夏期平均水温は 25～29℃であり冬期平均水温は 17～19℃である<sup>12)</sup>。これに対し、大岩橋における 1970 年代からの夏期水温は概ね 20～30℃、冬期水温は概ね 3℃～15℃の範囲にあり（**図 6**）、夏期では放流水水温が武庫川表流水の水温と同程度であることがわかる。他地点と同様に、大岩橋においても夏期水温の長期変動に対し温暖化の影響が示唆されることから、冬期においても同様の影響があると思われるが、冬期には、河川水温に比べて高温の浄化センター放流水の影響が強く表れたと考えられる。

浄化センター放流水は本川中流部の栄養塩濃度にも影響を与えていることが明らかになっている<sup>6)</sup>が、本結果は水温への影響も大きいことを示している。

陸水に関する水温の長期的な上昇率に関しては、年平均水温による解析が多く本結果と単純には比較できないが、湖沼では、琵琶湖 0.04℃/年、池田湖 0.03℃/年、タンガニイカ湖 0.017℃/年、バイカル湖 0.006℃/年、ワシントン湖 0.026℃/年、チューリッヒ湖 0.016℃/年、ジュネーブ湖 0.0175℃/年、河川では、オーストラリアの河川 0.006～0.014℃/年、ミシシッピー川上流 0.11℃/年、イギリス南部溪流 0.017～0.073℃/年などがレビューされている<sup>5)</sup>。また、国内 9 ダム湖表層

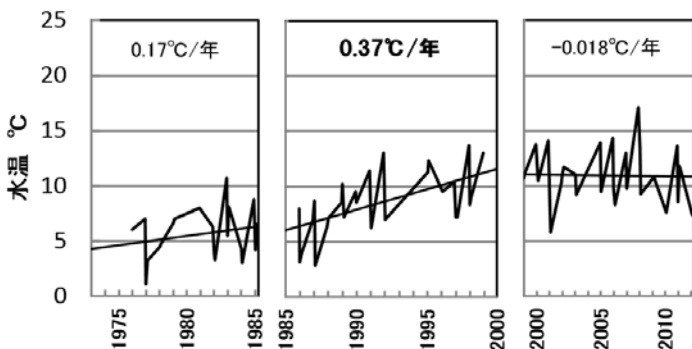


図 7 大岩橋の冬期水温に関する期間別回帰分析結果  
太字の上昇率は有意水準 99%で高度に有意を示す

(1993-2006)  $0.001 \sim 0.077^{\circ}\text{C}/\text{年}$ <sup>4)</sup>、淀川水系河川  $-0.025 \sim 0.011^{\circ}\text{C}/\text{年}$ <sup>13)</sup>などの報告もある。本解析で得られた上昇率は、これらの報告値とオーダー的には一致するといえる。

一方、表2の気温に関しては、三田大橋および大岩橋の夏期の場合を除き有意な上昇はみられなかった。有意な上昇が認められた上記の例では、年間上昇率は水温の場合と概ね類似した。

水温 - 気温の相関関係については表には示していないが、相関解析を行ったところ、夏期、冬期ともに全ての地点で高度に有意な正の相関関係が認められた。また、「3.2」における近年データの解析では、水温に及ぼす気温の影響が本川地点においても示唆された。

これらの点から、多くの地点の夏期・冬期の気温に有意な長期上昇傾向が認められると予想されたが、表2の結果は多くの地点での気温の上昇が統計的には有意でないことを示した。しかし、三田大橋および大岩橋以外でも各地点の回帰直線の傾きは夏期、冬期ともに正である。気温にも長期的な上昇傾向が推察されるが、水温の場合ほど明確には表れていないと考えられる。

#### 4. まとめ

武庫川水系 36 地点の水温に関し、兵庫県が実施した 1973～2011 年度の 39 年間の水質モニタリングデータを用いて、その地点分布および長期変動を統計解析した。

解析に際しては、気温の影響による誤差をできる限り減少させるために、調査時刻が類似したデータをそれぞれの地点で選択的に用いた。

武庫川水系各地点の近年 (2009～2011 年度) の平均水温を解析した結果、本川では、夏期には三田大橋 ( $29.0^{\circ}\text{C}$ ) が最も高く亀治橋 ( $24.1^{\circ}\text{C}$ ) が最も低かったが、誤差を考慮すれば全体として大きな違いは認められなかった。しかし、冬期には亀治橋 ( $6.9^{\circ}\text{C}$ ) から大岩橋 ( $10.7^{\circ}\text{C}$ ) にかけて特徴的な上昇がみられ、その要因として武庫川上流浄化センター放流水の影響が推察された。

支川では、夏期には山田川、長尾川、八多川、有野川などの地点 ( $28^{\circ}\text{C}$ 前後) が高く仁川の地点 ( $18^{\circ}\text{C}$ 前後) が低かったが、冬期にはこの逆の傾向が認められた。この傾向は支川全地点でみられたことから、各地点の平均気温 - 平均水温間の関係性を求めたところ、高度に有意な正の相関関係が夏期・冬期ともに認められ、支川の水温に対する気温の影響が大きいことが明らかになった。

本川主要 6 地点の水温に関する最長 39 年間の長期変動について、各月の水温変動を基礎に夏期、冬期別に

回帰分析により解析したところ、夏期では三田大橋、亀治橋、大岩橋、甲武橋の 4 地点、冬期では大橋、三田大橋、亀治橋、大岩橋、甲武橋の 5 地点で有意な水温の上昇がみられた。年上昇率は、夏期では  $0.080 \sim 0.097^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、冬期では大岩橋を除き  $0.056 \sim 0.077^{\circ}\text{C}/\text{年}$  であり、地点間で概ね類似したことから温暖化の影響が強く示唆された。一方、冬期の大岩橋の年上昇率は  $0.21^{\circ}\text{C}/\text{年}$  と高く、処理能力増設状況を考慮した期間別解析結果から、その主要因として冬期でも水温が高い浄化センター放流水の影響が明らかになった。

#### 参考文献

- 1) [http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/extreme\\_japan/index.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/extreme_japan/index.html)
- 2) IPCC (2013) IPCC WGI Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Technical Summary, 127pp..
- 3) 遠藤修一, 山下修平, 川上委子, 奥村康昭 (1999) びわ湖における近年の水温上昇について, 陸水学雑誌, **60**, 223-228.
- 4) 長尾正之, 鈴木 淳 (2010) 国内 9 ケ所のダム湖における水温傾向の評価に関する予備的研究, 陸水学雑誌, **71**, 27-36.
- 5) 新井 正 (2009) 気候変動と陸水の温度および氷況の変化, 陸水学雑誌, **70**, 99-116.
- 6) 古武家善成 (2013) 武庫川水系の水質 - 市民による 5 年間の調査結果, 武庫川市民学会誌, **1**, 33-40.
- 7) 兵庫県 (2011) 武庫川水系河川整備計画, 82pp..
- 8) 谷口義則, 中野 繁 (2000) 地球温暖化と局所的環境攪乱が淡水魚類群集に及ぼす複合的影響: メカニズム, 予測そして波及効果, 陸水学雑誌, **61**, 79-94.
- 9) IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report, 73pp..
- 10) 兵庫県農政環境部環境管理局 (1974-2013) 昭和 48 年度 - 平成 23 年度公共用水域の水質等測定結果報告書.
- 11) 三輪準二, 村岡敬子, 中西 哲, 小林草平 (2010) ダム貯水池による水質変化の類型化と下流生物への影響評価法に関する研究, 平成 21 年度土木研究所成果報告書 14, 11pp..
- 12) (公財)兵庫県まちづくり技術センター (2013) 下水道事業管理年報 平成 24 年度, 360pp..
- 13) 中室克彦, 奥野智史, 高田聡子, 田口 寛, 井上知明, 上田彬博, 福永 勲, 加賀城直哉, 服部幸和, 厚井弘志 (2006) 都市河川水の水温に及ぼす下水処理場放流水の影響, 水環境学会誌, **29**, 177-181.
- 14) 和波一夫, 安藤晴夫, 石井真里奈 (2010) 下水処理場放流水の河川水温への影響 - 多摩川上流域の冬季の現況, 東京都環境科学研究所年報, 116-120.