

## 武庫川中流部における河川自浄作用および関連現象に関する一考察

村岡浩爾<sup>1)</sup>，古武家善成<sup>2)</sup>，吉田博昭<sup>3)</sup>，佐々木礼子<sup>4)</sup>

### A Consideration for Self-purification and Related Events in the Middle Reaches of Muko River

Kohji MURAOKA, Yoshinari KOBUKE, Hiroaki YOSHIDA and Reiko SASAKI

#### 要 旨

武庫川中流部において河川自浄作用による有機汚濁物質の分解を数値計算で量的に明らかにした。兵庫県公共用水域水質調査および「武庫川づくりと流域連携を進める会」が行う水質一斉調査の結果も用いて検証し、大岩橋から生瀬橋に至る約 12km 区間で 15%程度の有機汚濁の低減が確認された。この自浄作用の認識は、流域の自然保護および人為的負荷の発生削減と処理技術対策の一層の推進を説く成果になると考える。

**キーワード**：武庫川中流部，河川自浄作用，有機汚濁，数値予測，武庫川づくりと流域連携を進める会

**Key words**: Middle reaches of Muko River, Self-purification, organic pollution, numerical prediction, Group for promoting the coordination of local residents in the Muko River Basin

#### 1. はじめに

武庫川は全国の重要な河川の中でも 21 世紀にふさわしい河川として最初に変わらなければならない川だと住民は思っている<sup>1)</sup>。総合治水の名の下で、本当に住民の参加と協働が実現するのは武庫川だと確信しているのである。武庫川づくりと流域連携を進める会（通称、武庫流会）が設立されたのが 2007 年、それ以降 NPO として種々の活動を続けているが、2008 年から自分たちで可能な水質測定を行おうと春秋各 1 回（当初は春 1 回）、武庫川の約 30 地点で測定を続けていて、機会あるごとにその結果を発表している。兵庫県が法律に基づく公共用水域の水質測定を行っている観測点は武庫川水系では 33 地点（千苜貯水池を入ると 34 地点）であり、武庫流会独自の観測の検証や比較もでき、何よりも住民自身が自分たちの手で直接測定したという点は武庫川の水質に理解を深める絶好の活動になっている。

武庫流会が、この水質測定の結果を発表してきた場で一つの関心が持たれたのは、武庫川の河川自浄作用はどの程度であるかということである。すなわち、社会活動や生活の場で使用される水利用の結果としての排水は、通常は下水処理によって浄化され河川に放流されるが、河川自身が持つ自浄作用はどの程度であろうかという点に関心が寄せられたのである。この疑問

に答えることを目的とし、以下の見解と手法によってこの研究を進めることとした。

- (1) 検討の対象を武庫川の中流部、大岩橋から生瀬橋までの 12.2km 区間とする。
- (2) この区間を対象としたのは、人為的な汚濁負荷の流入が少ないこと、河床勾配が大きく瀬や急流部が多いので十分な酸素供給のある区間であることによる。
- (3) 一般に実河川で自浄力について検討された例は少なく、武庫川の自然浄化と中流部の溪谷の価値を理解する一助となる。
- (4) 検討に必要な水質観測資料が武庫流会および兵庫県で整っており、この検討により河川自浄作用に関するこれまでの科学的知見の実証例となりうる。

#### 2. 武庫川とその中流部の概要

武庫川流域とその水系の主要な諸元は表 1 に示すとおりであり、2 級河川でありながら氾濫域の人口並びに社会資産は全国で第 10 位に位置する重要な河川である<sup>2,3)</sup>。河川地形の特徴として、支川・羽束川流入点から生瀬橋までの中流部とされる区間においては、農地の広がる上流部の河川勾配 (1/200~1/1,000)、および市街地である下流部の河川勾配 (約 1/2,000) よりも河川勾配 (1/100~1/200) が大きいという点であり、通称、

<sup>1)</sup>武庫川づくりと流域連携を進める会/大阪大学名誉教授, <sup>2)</sup>武庫川づくりと流域連携を進める会/神戸学院大学

<sup>3)</sup>武庫川づくりと流域連携を進める会, <sup>4)</sup>武庫川づくりと流域連携を進める会/(有)アイ・ディー・ピー

表 1 武庫川流域および水系の主要諸元

主要項目	諸元
・流域圏面積	約 580km <sup>2</sup> (うち下流氾濫面積約 80km <sup>2</sup> )
・幹線流路延長	85.7km
・流域人口	流域圏人口約 140 万人, 阪神地域の想定氾濫域人口約 110 万人
・土地利用	山林 63%, 農地 16%, 市街地 16%, ゴルフ場 4%, その他 1%
・主要ダム	青野ダム, 山田ダム, 丸山ダム, 千苅ダム, 川下川ダム, 深谷池
・年間降水量	1,200~1,600mm

武庫川溪谷と呼ばれる景勝地である。

検討の対象とする中流部の河川図を図 1 に示す。また本考察で自浄作用の数値計算に用いる当該河道モデルの設定図とその諸量の記号を図 2 に示す。これらの図において検討の対象とする支川は、国土地理院発行の 1:25,000 地形図 (平成 17 年 9 月 1 日発行 1 刷) に名称が記載されている支川 (川下川, 僧川, 名塩川, 太多田川) に限ることとするが, このうち川下川は合流点のすぐ上流に川下川ダムがあり, 平常時は本川への流入水がないためモデル計算の対象支川にはならない。

### 3. 検討対象河道の諸量

#### 3.1 自浄作用計算に当たっての境界値および初期値

図 2 に示した河道モデルで, 自浄作用解析モデル (後述) で計算するに当たって必要な境界値の設定値を表 2 にまとめた。地点間距離の設定には国土地理院発行の 1:25,000 地形図から読み取った値を用いる。計算上の

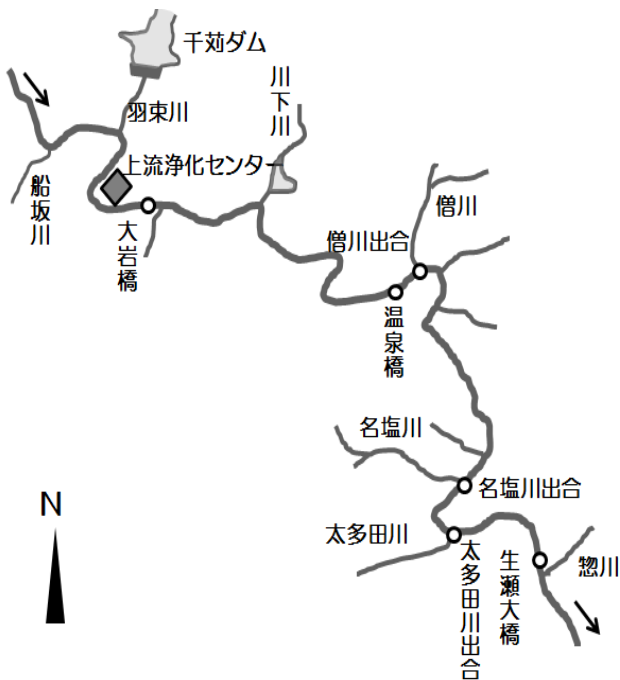


図 1 武庫川中流部河川図

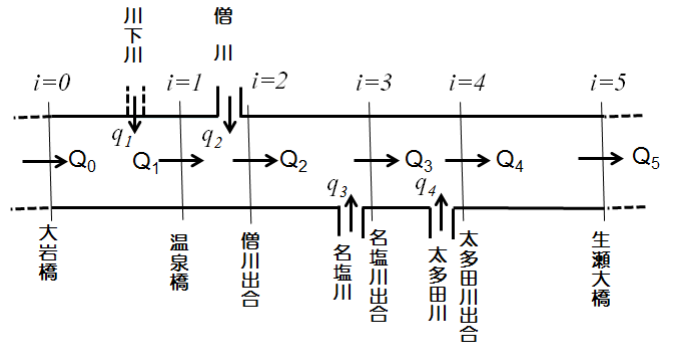


図 2 検討対象の河道モデル

最終目的は, 上流端 (大岩橋  $i=0$ ) で与えた水質 (BOD の値) が流下と共にどう変化していくかを追跡し, 下流端 (生瀬橋  $i=5$ ) でどの程度自浄作用による濃度の減少があるかを知ることである。このため表 2 に示すような諸量の設定が必要となり, その設定方法について以下に記述する。

### 3.2 流況に関する設定

#### 3.2.1 本川流量の設定

計算に当たって設定すべき地点流量は図 1 あるいは表 2 に示した地点  $i=0\sim 5$  の流量である。まず  $i=5$  の生瀬橋の流量の設定について述べる。

生瀬橋は正常流量の監視基準点でもあり, 1993 年以降の流況が兵庫県によって示されている<sup>4)</sup>。それによると同地点での平水流量, 低水流量, 濁水流量は表 3 に示している。これらの流量の決定に用いる水位-流量曲線 (H-Q 曲線) の式は国土交通省の資料<sup>8)</sup>に記載されており, 以下の通りである。

$$Q = 33.99 \times (H + 0.59)^2 \quad (1)$$

適用範囲:  $H = -0.50 \sim 0.20$  (m)

ここに  $Q$ : 流量 ( $m^3/s$ ),  $H$ : 武庫川河川工事に用いる基準水面 ( $H=0$ ) から測った水面の水位 (m)

式 (1) において  $H = -0.59$  とおくと流量  $Q$  は 0 となるので, 最深点から測った水深  $h$  は  $H + 0.59$  となる。

表 2 計算のための設定諸量

地点名 $i$	大岩橋 $i=0$	温泉橋 $i=1$	僧川出合 $i=2$	名塩川出合 $i=3$	太多田川出合 $i=4$	生瀬橋 $i=5$
累積距離 $x$ km	0	4.8	5.1	9.8	10.8	12.2
区間距離 $\Delta x_i$ km		4.8	0.3	4.7	1	1.4
流量 $Q_i$ $m^3/s$	4.15	4.15	4.33	4.54	4.68	4.68
流速 $U_i$ m/s	0.47	0.52	0.51	0.36	0.25	0.19
濃度 BOD $C_i$ mg/L	2.9 1.9 1.0	(計算値)	(計算値)	(計算値)	(計算値)	(計算値)
支川名	-	(川下川)	僧川	名塩川	太多田川	-
支川流量 $q_i$ $m^3/s$	-	-	0.18	0.21	0.14	-
支川濃度 BOD $c_i$ mg/L	-	-	0.3	0.7	0.3	-

表 3 生瀬地点における平水時・低水時・濁水時流量 (m<sup>3</sup>/s) (1993-2004) <sup>3)</sup>

流量	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	平均
平水時	9.41	4.26	3.94	6.47	8.74	-	-	3.86	4.46	2.35	6.87	4.98	5.54
低水時	7.48	1.90	2.85	4.49	6.38	-	-	2.72	2.56	1.88	4.36	3.45	3.81
濁水時	4.11	1.49	1.43	2.59	3.10	-	-	2.26	2.05	1.49	2.18	1.83	2.25

現実に河床の洗掘、堆積によって河床高さは変わるので、式(1)は状況に応じて修正されているものと見られるが、表 3 における流量は式(1)を基本に得られた数値である。

先に述べたように、水質の測定時は平水あるいは低水の間で測定されていると見られるが、実際にどのような流量であるかはまったく不明である。したがってここでは表 3 において平水流量の平均および低水流量の平均をとり、その両者の平均値、すなわち  $(5.54 + 3.81)/2 = 4.68 \text{ m}^3/\text{s}$  を生瀬橋の流量に設定し、表 2 中に記入している。

生瀬橋から上流の地点 (i=0~4) の流量は、その河道区間で支川の流入がなければ生瀬橋の流量と同じである。実際には、「2. 武庫川とその中流部の概要」で述べたように 4 支川 (実質、平常時の水量がない川下川を除く 3 支川) の流入があるので、下流から上流へ順次支川流量を減じていくことで地点流量が定まる。この支川流量の設定については次項に述べる。

### 3.2.2 支川流量の設定

僧川、名塩川、太多田川の 3 支川についての平常時 (平水あるいは低水の流況) の流量に関する資料はない。したがって土木学会、山本、および高橋の文献<sup>5-7)</sup>から推定する以外にない。

流域に降った雨が河川の基準点に出てくるまでの過程、すなわち流出過程に関しては、土木学会水理公式集<sup>5)</sup>「短期流出 (洪水流出)」と「長期流出 (低水流出)」とに分類されている。前者の場合、洪水に対する治水計画などで、ひと雨の降水量に対してどの程度の水量が短期に流出してくるかという流出率が設定されることで洪水のピーク流量が決められる。これに対し後者の場合、降雨の少ない期間において、単位流域面積からどの程度の水量が安定して流出してくるかが着目され、水力発電や農業用水などの確保可能な水量の算定に用いられるものである。本検討では平常時の流況が対象となるので、支川の流量は長期流出現象として捉えることにした。

さて、洪水比流量についてはこれまで多くの資料や文献があるが、本検討においては直接関係がないのでここでは述べない。検討に必要な低水比流量は流域の地形、地質、植生の 3 大要素と土地利用形態が関係することはいうまでもないが、実測や量的な検討の資料は非常に少なく、文献より以下の 4 項目が低水比流量に関して重要な情報であると判断した。

- a) 文献 6) p.128 より、農業用水の取水を意図した日本の河川流量は 1 日あたり、1km<sup>2</sup>あたり、雨量 1mm に相当する流量である。したがって 100km<sup>2</sup>あたりの流量に換算すれば 1.16m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>となる。
- b) 文献 7) p.42 より、小河内ダムで予測された比流量は、平水量として平均的に 2.35 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>、低水量として平均的に 1.90 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>となる。
- c) 文献 7) p.209 の「付録表 5 日本の主要河川の流域面積とその順位、比流量」より、近畿地方の代表河川、紀ノ川、淀川、由良川の比流量の値を抽出すると表 4 のようになる。
- d) 文献 7) p.170 「図 70 水源地帯濁水量分布」を参考にすると、武庫川流域付近の比流量は 1~2m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>と読み取られる。

以上のことから本検討に用いる武庫川の支川の平常時比流量 R を

$$R = 1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2 \quad (2)$$

と想定する。この比流量 R は流域面積 100 km<sup>2</sup>あたりとしているが、小流域面積ではその単位は 1km<sup>2</sup>とするのが普通で、その場合は比流量の値は 1/100 となる。本論で扱う支川の流域は小流域なので、その流域面積を A km<sup>2</sup>とすれば、支川の平常時流量 q m<sup>3</sup>/s は次式で求められる。

$$q = RA/100\text{m}^3/\text{s} \quad (3)$$

支川の流域面積は国土地理院の地形図から読み取ることとし、その値と式(3)による計算値 q の結果は表 5 のごとくである。

このように推論しても支川流量 q の確定的な値は設

表 4 近畿地方代表河川の平水時の比流量<sup>6)</sup>

河川	流域面積 (km <sup>2</sup> )	比流量 (m <sup>3</sup> /s/100km <sup>2</sup> )			地点
		平水量	低水量	濁水量	
紀ノ川	1,660	2.61	1.45	0.83	橋本
淀川	8,240	3.11	2.43	1.61	枚方
由良川	1,880	2.86	1.83	0.86	福知山
平均		2.86	1.90	1.10	

表 5 支川の流量

支川	流域面積 A (km <sup>2</sup> )	流量 q (m <sup>3</sup> /s)
僧川	9.19	0.09~0.18
名塩川	10.72	0.11~0.21
太多田川	6.86	0.07~0.14

表 6 武庫流会一斉調査時の目視観測による流水幅 (Bm) および流心流速 (Um/s)

観測日(月日)	大岩橋		温泉橋		僧川出合*		名塩川出合*		太多田川出合*		生瀬橋	
	B	U	B	U	B	U	B	U	B	U	B	U
2011春(06/05)	37	0.5	48	0.7	-	-	-	-	-	-	55	0.1
2011秋(10/30)	36	0.7	57	0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.15
2012春(06/03)	38	-	50	0.4	-	-	-	-	-	-	30	0.3
2012秋(11/11)	38	0.2	50	0.5	-	-	-	-	-	-	70	0.2
平均	37	0.47	51	0.52	-	0.51	-	0.36	-	0.25	52	0.19

\*僧川出合、名塩川出合、太多田川出合については予測の仕様がなく、流速について温泉橋と生瀬橋の値を距離割りにして当てた。

定できないので、計算に用いる  $q$  値は表 5 の上限値を当てるものとし、それを表 2 の支川流量  $q_i$  欄に記載している。また、これによって、本川の計算断面の流量は最下流の生瀬橋流量から順次支川流量を差し引くことによって求められ、その値も表 2 の流量  $Q_i$  欄に記載している。

### 3.2.3 地点流速の設定

予測計算のために各断面における流速  $U_i$  は与えなければならない。武庫流会で行った 3 つの目視観測：①

流心部分での川幅 B、②浮遊物の流れに着目した流速 U、③流心部分の水深 h を行っているが、この結果をまとめた表 6 の流速 U を以て予測計算のための値とする。なお、水深 h は目視観測では無理な場合が多く信頼性が乏しいので、表中には示していない。

以上により、自浄作用の予測計算に必要な流況の諸量は設定された。

### 3.3 水質調査資料について

#### 3.3.1 本川水質の設定

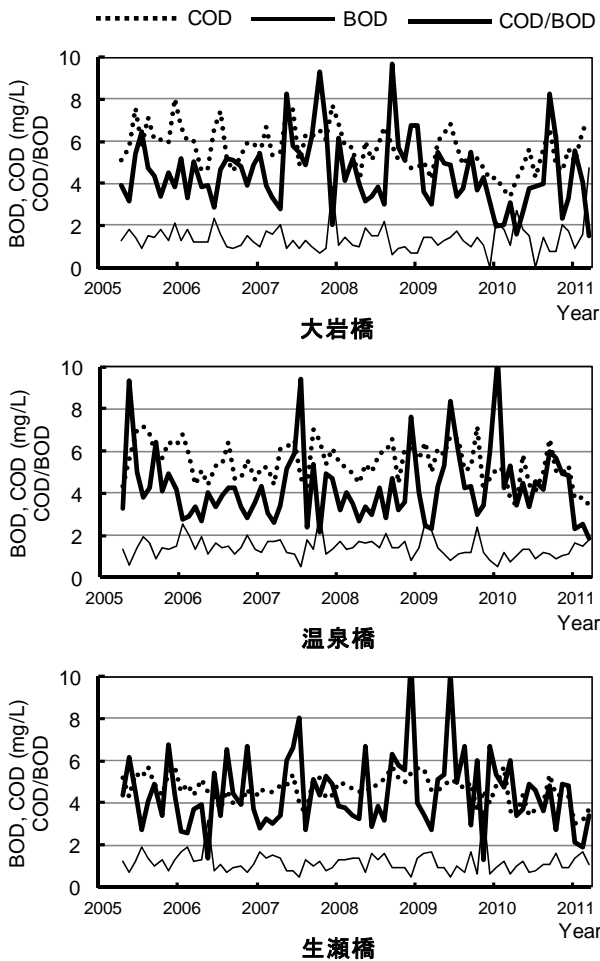


図 3 兵庫県測定資料による COD, BOD, COD/BOD 比の経月変化

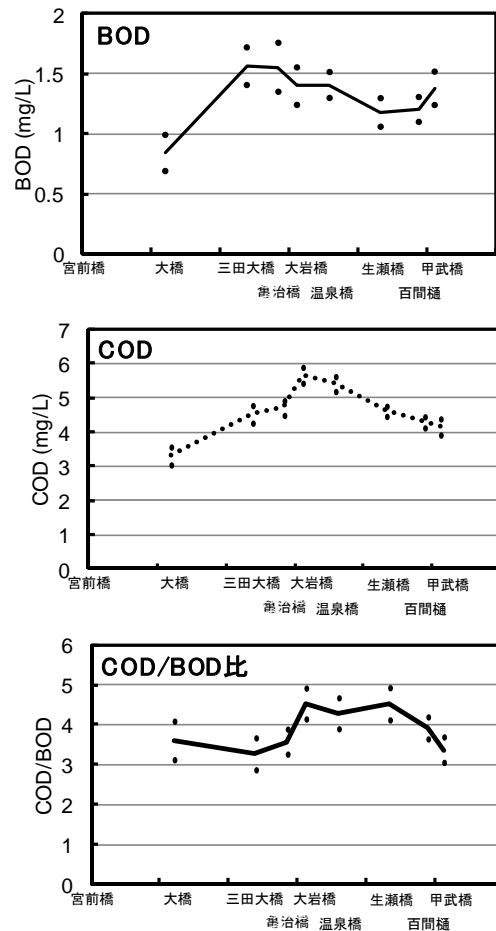


図 4 兵庫県測定資料による本川流下方向における COD, BOD, COD/BOD 比の 6 年平均値の変化  
ドットの間は各平均値の 95%信頼区間を示す。

表 7 兵庫県資料による 2005～2010 年度春期・秋期の BOD, COD, COD/BOD 比の平均値

	大岩橋			温泉橋			生瀬橋		
	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	COD/BOD	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	COD/BOD	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	COD/BOD
春期平均	1.6	6.5	4.1	1.3	5.8	4.5	0.93	4.7	5.1
秋期平均	1.3	5.4	4.2	1.4	5.4	3.9	0.82	4.7	5.7

注: 2009年秋期の生瀬橋BODに異常値があるので、これを省いて平均している。

武庫川においては公的に 36 地点で測定がなされ、武庫流会で行う観測地点は最近では 29 地点である。

河川自浄作用の効果は「4. 河川自浄作用の予測計算」に詳述しているが、主要な効果は微生物による有機汚濁物質の分解である。この効果は BOD の値の変化で表される。一方、武庫川の水質は、公的な観測は水質汚濁防止法によって定められる河川の測定計画に則って兵庫県及び関係自治体が観測を行い、その結果を兵庫県がまとめて公表している。

ここで留意すべきことは、武庫流会で行っている測定項目はパックテストによる COD だということである。したがって同じ有機汚濁物質の指標であっても BOD と COD とでは分析値が異なる。一般に、COD 分析は酸化剤によって強制的に有機物質を分解させるので、試水を 20℃、5 日間暗所静置で微生物分解させて得られる BOD 分析値よりも値が大きい。その COD/BOD 比は河川や季節によって変化することが知られているものの、ある程度の相関がある（この点に関しては補遺 1 で詳述する）。そこで COD および BOD の両者を測定している兵庫県の測定で、2005 年度から 2010 年度の 6 年間について、大岩橋、温泉橋、生瀬橋の各月の COD, BOD および COD/BOD 比の経月変化をグラフ化し、それを図 3 に示す。また図 4 には同資料による本川流下方向におけるそれらの 6

年平均値の変化を示す。

図 3 に見られるように、COD, BOD および COD/BOD 比には季節変化は見られるが、経年的に見れば COD の場合を除き大きな変化は見られない（この点に関しては補遺 2 で詳述する）。また図 4 によって BOD と COD のパターンが類似しているが、COD/BOD 比を見ると一定の比率でなく、おおむね 3～5 の範囲で分布している。また、BOD, COD の変化は上流から大岩橋にかけて増加の傾向にあるが、これは三田付近で流入負荷が高まってきていること、大岩橋の上流約 500m 地点に武庫川上流浄化センターがあってそこからの排水が流入している点があげられる。大岩橋から生瀬橋に向けて人為的な負荷流入は少ないと考えられているから、その間での濃度の減少は自浄作用によるものではないかと推察される。この点について、本考察の主目的である自浄作用の数量化とその信用性の評価を行おうとするものである。

なお、兵庫県資料による大岩橋、温泉橋、生瀬橋における 2005～2010 年度春期（6 月）・秋期（11 月）の BOD, COD, COD/BOD 比は、表 7 の通りである。COD/BOD 比は、温泉橋では春期の方が大きいのに対し生瀬橋では秋期の方が大きく、一定ではない。しかし、自浄作用を数値的に評価するには何らかの値を与えねばならない。したがって春期と秋期に大きな差のない大岩橋

表 8 武庫流会による COD パックテストの測定結果

調査年		大岩橋	温泉橋	生瀬橋
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
春期	2008	>8	5	>7
	2009	>8	>8	7.5
	2010	>8	>8	3
	2011	>8	7.3	4.3
	2012	8	8	6.3
平均		9.6	8.1	5.8
秋期	2009	>8	>8	>8
	2010	>8	8	6
	2011	4	4.5	6
	2012	3	3	5
平均		6.8	6.4	6.8

注: 「>8」は10, 「>7」は8として平均値を計算した。

表 9 武庫流会による関連支川における COD パックテストの測定結果

調査年		有野川 有馬橋	船坂川 畑久保橋	名塩川 名塩橋
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
2011	春期	1.5	2.3	3.0
	秋期	1.0	2.0	4.0
2012	春期	1.0	3.3	2.7
	秋期	1.5	1.0	3.0
2013	春期	1.7	3.0	3.0
	秋期	1.0	1.0	5.0
平均	春期	1.4	2.9	2.9
	秋期	1.2	3.0	4.0
全平均		1.3	2.9	3.5

の観測値に着目し、表7より4.1と4.2の平均として  
 $COD/BOD=4.2$  (4)

を全資料に関するCOD/BOD比の値と決める。大岩橋を対象とするのは、この地点が数値計算の始点となることにもよる。

武庫流会の測定したパックテストによるCOD値は、表8のごとく8mg/Lより高い数値を示すことが多い。これはパックテストに用いたキットによる測定限界値が8mg/Lを越えたことを意味するが、実際にどのような値かは決定できない。この点についてはこれまでの現地観測の経験からCODが大幅に高いということは考えられず、また本論では自浄作用理論式の結果と観測値との乖離がどの程度であるかを検証することを目的としているため、 $>8$ は10mg/L、 $>7$ は8mg/Lと略近似をして整理することとした。

### 3.3.2 支川水質の設定

本考察の対象となる僧川、名塩川、太多田川の流入流量については表5のごとく推定できたが、BODあるいはCODの値については測定資料がない。したがって表9に示す武庫流会測定以外の支川のパックテストCODを参考にする。

ここで僧川流入水のCOD濃度は表9の有馬橋程度、名塩川流入水は名塩橋程度、太多田川流入水は有馬橋程度とし、BODについては式(8)によって与えるものとして表10に表す。表中のBOD値については表2にも転記している。

## 4. 河川自浄作用の予測計算

### 4.1 自浄作用の概念

すでに「3.3.1 本川水質の設定」で述べたように、河川の自浄機能の対象項目は、通常、有機物質による汚濁指標であるBOD(生物化学的酸素要求量)であり、本考察でもこれを対象とする。

この自浄作用は物理的(支川の流入による濃度の希釈や濃縮、有機物質の沈殿など)、化学的(化学反応を起こす物質の混入による有機物質の変化など)、生物的(微生物による有機物質の分解など)な効果による<sup>9)</sup>。本論の対象河川区間は流れが速く有機物質の沈殿は考

表10 計算に用いる支川水質の濃度

濃度(mg/L)	僧川	名塩川	太多田川
COD	1.3	3.5	1.3
BOD	0.3	0.7	0.3

表11 計算に用いる大岩橋のCODおよびBOD濃度  $C_0$

大岩橋濃度 $C_{i=0}$ (mg/L)	Case 1	Case 2	Case 3
COD	12	8	4
BOD	2.9	1.9	1.0

えられず、化学物質の流入も考えられないことから、支川の流入および微生物の分解を予想して検討を行う。また河川水中の有機物質の指標としてCOD(化学的酸素要求量)があるが、酸化剤によって強制的に有機物質を分解するこの指標はBODの分析では分解しきれない難分解性有機物まで分解してしまうので、通常CODはBODより大きな値となる。最近、ある特定の区間では難分解性の有機物について問題視されているが、本論では水質環境基準項目であるBODを対象に考察を進める。

### 4.2 予測計算モデル

水中の有機物質の微生物分解による脱酸素現象の反応式はStreeter-Phelps式で表される<sup>10)</sup>。水中の有機物質濃度CをBOD値とすれば同式は

$$dC/dt = -k_1 C \quad (5)$$

$t=0$ で $C=C_0$ の初期条件の下で解は

$$C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (6)$$

ここに $k_1$ :脱酸素係数であり、河川の流速や混合、および水温等によって決まる数値である。もともとStreeter-Phelps式も実験系で導かれた反応式であるので、実河川に応用するには多くの観測資料を参考にすることが必要である。ここでは比較的汚濁が進んだ浅い河川の値<sup>7)</sup>を参考にし、 $k_1=0.2\sim 0.3$ (1/日)を設定対象にするものとする。

分解によって酸素が消費されると溶存酸素量が減少するので、溶存酸素量を規定する理論式もある。しかし本論での対象河川区間は「1.はじめに」で述べたように急流部であるため十分な酸素の供給があると考えられる。したがって溶存酸素の変化を問題にせず、式(5)、(6)による濃度Cの追跡だけやればよい。

### 4.3 予測計算の手順

式(6)を差分計算するに当たり、流況が平常時であるため定常流であると見なせる。すなわち各計算区間(i, i+1)で流速 $U_i$ が一定であり、支川が流入するまでは流量 $Q_i$ も一定である。したがって

$$U_i = \Delta x_i / \Delta t_i \quad (7)$$

を式(6)に代入すると区間(i, i+1)において

$$C_{i+1} = C_i \exp(-k_1 \Delta x_i / U_i) \quad (8)$$

となり、これより上流断面(i=0)、すなわち大岩橋の濃度 $C_0$ を与えれば順次下流の断面における濃度 $C_i$ が求まる。

ここで、上流端の境界値としての大岩橋の濃度 $C_0$ をどう設定するかであるが、BOD、CODに関する兵庫県の観測は図3、図4によってどの地点でも変動が大きいことが判るし、武庫流会観測のCODも表8によってばらつきが大きいのが判る。特に武庫流会のデータはパックテストという簡易方法によるため、観測の誤差も含まれている。したがって大岩橋地点の初期値をどう与えてよいか迷うところである。ここでは自浄作用の効果が現実の水質に対してどの程度かを判断することが

表 12 COD に関する予測計算, 兵庫県調査, 武庫流会調査の結果

地点	大岩橋	温泉橋	僧川出合	名塩川出合	太多田川出合	生瀬橋	減少率 <sup>1)</sup>	
累積距離 X(km)	0	4.8	5.1	9.8	10.8	12.2		
地点 i	0	1	2	3	4	5		
COD計算値 <sup>2)</sup> (mg/L)	12	11.7	11.2	10.5	10.1	9.9	0.83	
対応BOD(mg/L)	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4	2.4		
COD計算値 <sup>2)</sup> (mg/L)	8	7.8	7.5	7.1	6.8	6.7	0.84	
対応BOD(mg/L)	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.6		
COD計算値 <sup>2)</sup> (mg/L)	4	3.9	3.8	3.6	3.5	3.5	0.86	
対応BOD(mg/L)	1.0	0.93	0.90	0.86	0.84	0.82		
県調査 <sup>3)</sup> (mg/L)	春期	6.7	5.9	-	-	-	4.7	0.70
	秋期	5.3	5.4	-	-	-	4.7	0.89
武庫流会調査 <sup>4)</sup> (mg/L)	春期	9.6	8.1	-	-	-	5.8	0.60
	秋期	6.8	6.4	-	-	-	6.8	1.00

<sup>1)</sup> 大岩橋(i=0)から生瀬橋(i=5)までのCODの減少率

<sup>2)</sup> 計算の上流端初期値(i=0におけるCOD値)を3通り(12, 8, 4mg/L)に設定

<sup>3)</sup> 春期(6月)および秋期(11月)の2005~2010年(6回)の平均値

<sup>4)</sup> 春期(6月)は2008~2012年(5回), 秋期(11月)は2009~2012年(4回)の平均値

主であることから, 観測値のばらつきの範囲を考慮に入れ, 大岩橋の COD の値を 12mg/L (Case 1), 8mg/L (Case 2), 4mg/L (Case 3) の 3 ケースを当てることとする。COD と BOD の関係は, 既に論議したように, 式(4)の関係があるので, 計算に用いる大岩橋の境界値濃度  $C_{i=0}$  は表 11 のごとくに整理できる。

また, 脱酸素係数  $k_1$  は 0.2~0.3 (1/日) と予想したが, 計算ではその平均値である  $k_1=0.25$  を当てるものとする。

以上によって計算に必要な諸量は全て確定された。これらは表 2 に全て記載している。そして表 2 に「(計算値)」と記されているところを数値計算で与えることになる。

ここで予測計算の一部を示す。

【計算例 1】大岩橋 (i=0) から温泉橋 (i=1) への濃度変化 (Case 1 の場合)

濃度  $C_{i=0}$  (BOD 値) は表 11 の Case 1 を採ることにより 2.7 である。温泉橋の濃度  $C_{i=1}$  の計算式は, 式(6)より  $C_{i=1}=C_{i=0}\exp(-k_1t_{i,i+1})$  ここに  $k_1=0.25$ ,  $t_{i,i+1}$  は i から (i+1) までの流下時間, これを差分化すると  $t_{i,i+1}=\Delta x_i/U_i$ , 大岩橋の流速  $U_{i=0}$  は表 2 より 0.47m/s, これより大岩橋から温泉橋の流下時間は 0.112 日, よって  $C_{i=1}=0.972C_{i=0}$ , これより温泉橋の濃度は 2.78 に減少する。

【計算例 2】温泉橋 (i=1) から僧川出合 (i=2) への濃度変化 (Case 1 の場合)

温泉橋の濃度は【計算例 1】の結果から  $C_{i=1}=2.78$ , これを上流条件として【計算例 1】と同様の計算を進めると, 僧川出合の濃度  $C_{i=2}$  は 2.77 と求まる。しかし僧

川出合の直上流から僧川の流が合流するので, 混合により濃度が変化する。僧川の流量  $q_{i=2}=0.18\text{m}^3/\text{s}$  および僧川の濃度 (BOD)  $C_{i=2}=0.3$  は既に表 2 に記載されているので, 本川の流量  $Q_{i=1}$  と混合させることにより僧川出合の濃度が 2.67 と求まる。この場合, 僧川の流入水の BOD は低いので希釈効果が働き, 本川上流からの濃度よりも低くなる。

以下, 同様の手順で i=3, 4, 5 と濃度を求め, 生瀬橋での濃度が計算される。Case 2, Case 3 の場合も同様である。また, 式(8)の関係より, 求めた BOD を COD に換算することもできる。

## 5. 計算結果の評価

計算結果を COD についてまとめたのが表 12 である。この表には兵庫県調査の結果および武庫流会の調査結果も春期, 秋期に分けて記載している。またこの表をグラフに表したのが図 5 である。図中の折れ線は計算によって得られた自浄作用による COD の減少を表している。図中には兵庫県および武庫流会の観測値を離散値としてプロットしている。また減少率とは, 大岩橋から生瀬橋に至る区間で自浄作用によって減少した COD (または BOD) の率を示すものである。

まず断っておくことは, COD と BOD は式(4)による比例関係にあると仮定した。その上立って計算結果を見ると以下のようなことが判る。

(1) 脱酸素係数  $k_1$  を 0.25 とした場合の計算で, 有機汚濁物質による水質は自浄作用によって大岩橋から生瀬橋の間で 83~86%に減少している。

(2) 計算値と比較するため, 兵庫県, 武庫流会で行っ

ている調査結果を図5にプロットした。水質の値としてはばらついているが、流下に伴う水質（COD）の減少の度合いは計算と大きな差はないことが判る。これによって本考察における自浄作用の程度は現実の自浄作用の実態を表しているものと思われる。すなわち武庫川中流部では自浄作用によって15%程度の汚濁の低減が見られる。

(3) この区間では有機汚濁物質の直接的な流入（未処理の排水や大量の下水処理水）はないので、もし自浄作用以外の理由で水質が変わるとしたらそれは支川の流入による影響と見てよい。図5で判るように、温泉橋と僧川出合の距離は短いにもかかわらず水質が減少しているのは、僧川の水質がBODにして0.3mg/Lと低い値であるため、希釈によって本川の水質がよくなっていると見られる。

(4) 同様の視点で名塩川出合や太多田川出合の水質を見ると、本川の水質が顕著な変化がないのは支川の水質がさほどよくないか、支川流量が本川に比べて大きくないので影響をあまり受けないためかと見られる。

(5) 本川の水質改善を進めるには汚濁の発生量を減少させること、並びに負荷の流入を極力低減させることが基本であるが、良好な水質と豊富な水量を持つ支川の流入を確保することが大切であろう。

以上のことから、渓谷のある武庫川中流部でどのような自浄作用という自然力が働いているかが量的に明らかになった。この結果は、武庫川水系の水質保全を

より深く推進していく過程で、下水処理施設等水処理技術の適正化を図るためだけでなく、支川の流域を含む自然環境保全の重要性を示唆することにもなると考えている。

## 6. おわりに

武庫流会の水質部会が中心になって行ってきた年2回の水質調査もそのデータが蓄積し、データそのものから論ずる水質問題だけではなく、武庫川の水環境を広く見渡す論議の場ができてきたことは、大変喜ばしいことと感じている。本考察も武庫川中流部が単なる渓谷美としての自然的価値の認識に終わるのでなく、河川の自浄機能という観点から水環境の在り方を見つめるきっかけの一つになったという点で成果が得られたと考えられる。今後も水質の資料や現地の水環境の実態の認識から、流域を連携することの重要性を探っていききたい。

## 謝 辞

この考察を進めるきっかけになったのは、武庫流会が2008年以来続けてきた水質一斉調査の結果の蓄積があったことに合わせ、武庫川の水環境実態と内在する課題が武庫川に深い関心を持つ市民の間で徐々に具象化してきたからである。その意味で、これまでの水質一斉調査の参加者および協力者の各位に多大の謝意を表したい。

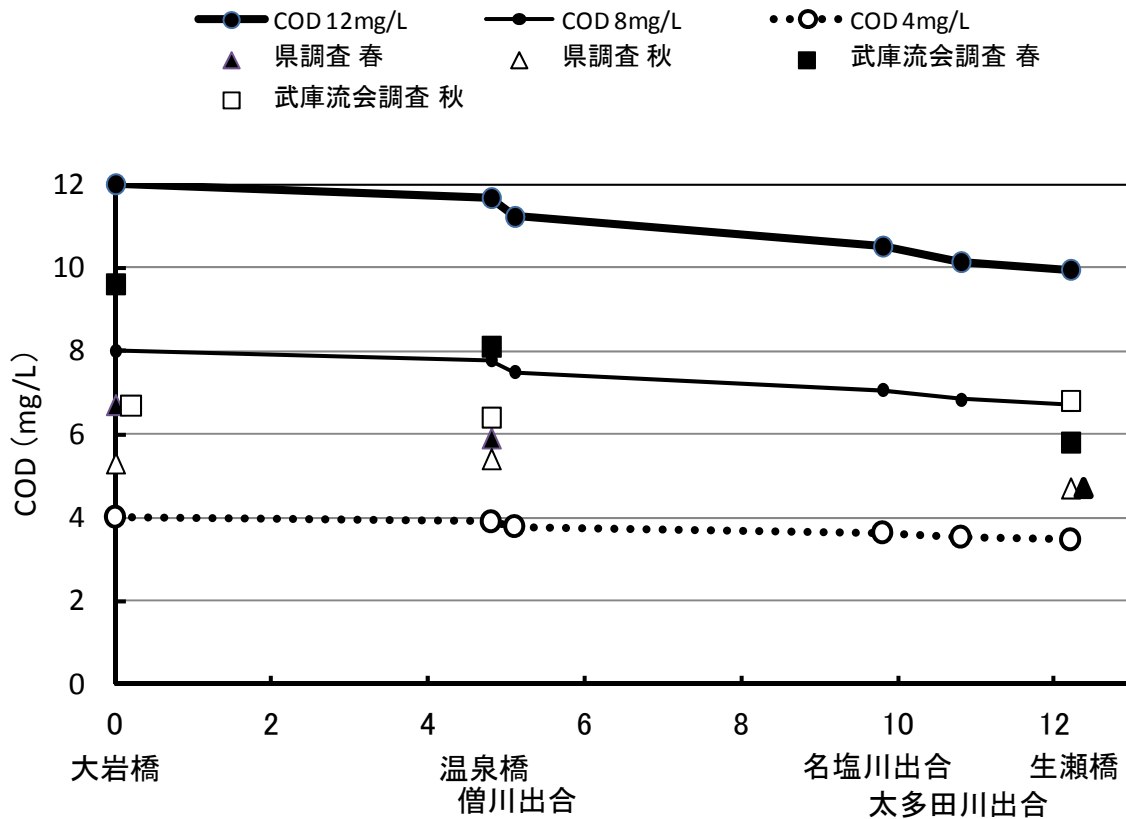


図5 予測計算によるCODの変化および兵庫県・武庫流会の観測結果



この調査の全参加者名（在住市）を以下に示す。

（敬称略，50音順）浅倉景子（西宮市），伊藤益義（宝塚市），印藤五一（三田市），上田 宏（宝塚市），岡田 隆（伊丹市），小川嘉憲（西宮市），奥川和三郎（西宮市），北添慎吾（神戸市），木村公之（神戸市），草薙芳弘（尼崎市），古武家善成（神戸市），酒井秀幸（篠山市），佐々木礼子（宝塚市），白川政昭（西宮市），白神理平（西宮市），田中美寿（西宮市），谷田百合子（西宮市），田村博美（宝塚市），土谷厚子・牧夫（三田市），中 義昭（宝塚市），長峯純一（三田市），仁木啓太郎・博子（神戸市），野田 剛（西宮市），野々村知久（宝塚市），波田 剛（宝塚市），福井寿彦（西宮市），法西 浩・満子（西宮市），松田 哲（宝塚市），南垣英樹（芦屋市），村岡浩爾（神戸市），山本義和（宝塚市），吉田博昭（尼崎市）

参考文献

- 1) 武庫川流域委員会（2006）武庫川の総合治水へむけて 提言書，168pp. .
- 2) 村岡浩爾，田村博美，佐々木礼子（2011）ダムに頼らない武庫川の川づくりとまちづくり，環境技術，40（11），690-694.
- 3) 兵庫県（2011）武庫川水系河川整備計画，82pp. .
- 4) 兵庫県（2009）武庫川水系河川整備基本方針 一利水に関する資料，6pp. .
- 5) 土木学会（2009）第3章 流出解析，「水理公式集（平成11年版）」，pp. 35-47，丸善，東京.
- 6) 山本荘毅（1972）水文学総論，「水文学講座 1」，227pp.，共立出版，東京.
- 7) 高橋 裕（1978）河川水文学，「水文学講座 11」，218pp.，共立出版，東京.
- 8) <http://www.river.go.jp/nrpc0305gDisp.do?mode=&officeCode=7169&obsrvtnPointCode=13&timeAxis=60>
- 9) 國松孝男，村岡浩爾（1987）河川汚濁のモデル解析，pp. 101-109，技報堂出版，東京.
- 10) 土木学会（2004）環境工学公式/モデル/数値表，pp. 355-357，丸善，東京.

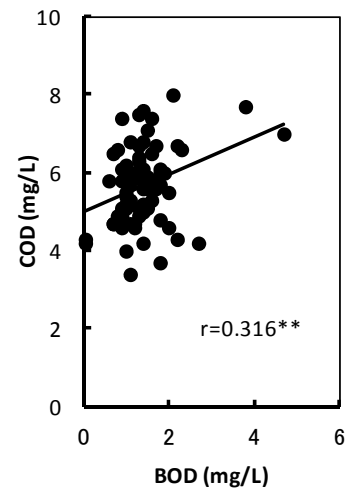
補遺 1

大岩橋，温泉橋，生瀬橋における BOD-COD 相関性について 2005～2010 年度における兵庫県の測定データを用いて検討したところ，生瀬橋を除き，大岩橋では有意水準 1% ( $r=0.316^{**}$ ， $N=72$ )，温泉橋では有意水準 5% ( $r=0.264^*$ ， $N=72$ ) で有意な正の相関関係が認められた。大岩橋の結果を補遺図 1 に示す。

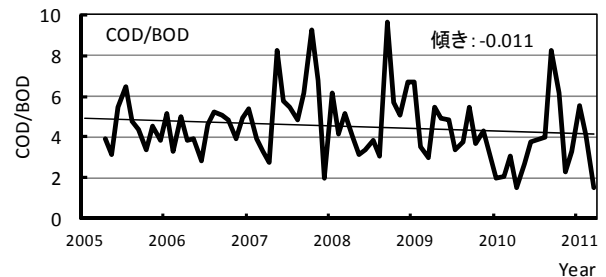
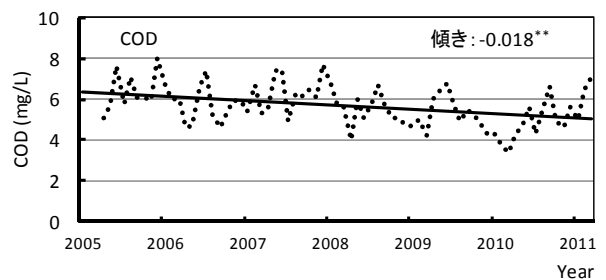
近畿地方における他の河川の事例では，大阪市内河川 37 地点の 2005～2009 年度間の全データに関して，有意水準 1% で有意な正の相関関係 ( $r=0.715^{**}$ ， $N=2,220$ ) が得られている（新矢将尚ほか（2010）第 10 回環境技術学会研究発表大会 40 周年記念シンポジウム予稿集，26-27）。

補遺 2

図 3 に示した大岩橋，温泉橋，生瀬橋の COD，BOD および COD/BOD 比に関する経年的変動傾向を検討するた



補遺図 1 大岩橋における BOD-COD 相関関係



補遺図 2 大岩橋における COD および BOD/COD 比の経年変動傾向

めに，濃度または比の値を目的変数，累積月数を説明変数とする単回帰分析により回帰直線の傾き（回帰係数）の有意性を検定した。

BOD および COD/BOD 比については，3 地点ともに傾きが有意にならず経年的に大きな変動はないと判断された。一方，COD については，3 地点ともに有意水準 1% で有意な負の傾きが認められ，2005～2010 年度間で経年的な減少傾向があると判断された。一例として，大岩橋における COD と COD/BOD 比に関する結果を補遺図 2 に示す。