

# 由良川における BOD と COD の長期推移

田口 寛 日下 哲也

Long-term Changes of BOD and COD in Yura river

Hiroshi TAGUCHI Tetsuya KUSAKA

## 要 旨

人為的汚濁が少ない由良川の水温が、都市域と同程度の増加率を示すことについては既に報告した。水温上昇に伴い、水質が悪化することが考えられたため、有機汚濁指標である BOD と COD を中心に 1981 年度から 2008 年度までの長期推移を調査した。BOD は、上流の安野橋では、平均値で 0.5 mg/L 未満と非常に清浄な水質を保ったままであったが、山家橋は増加率 0.023 mg/L/年 で増加していた。しかし、以久田橋から下流は、増加率が地点別に -0.01 から -0.015 mg/L/年 と減少傾向を示した。山家橋では、通年で、年増加率が高く、上流の由良川ダムの影響が推察された。一方、COD は、増加率が 0.006 から 0.024 mg/L/年の範囲にあり、すべての地点で増加傾向を示した。安野橋では、湧水の水温上昇に伴う森林地域から流出する有機物濃度の増加、そして、中流ではダムでの藻類の発生による COD の増加が考えられた。しかし、最下流の由良川橋の増加率は 0.006 mg/L/年 と小さく、自然浄化作用が働いていると考えられた。

キーワード：由良川、BOD、COD、水温

key words : Yura river, BOD, COD, Water temperature

## はじめに

気候変動に関する政府間パネル第 4 次報告書 (IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約 (文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省) :[http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr\\_spm.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr_spm.pdf)) によれば、地球規模での気温上昇が生じ、それによる影響も明らかとなってきた。水環境への気温上昇の影響は、東京湾<sup>1)</sup> や琵琶湖<sup>2)</sup>、淀川水系<sup>3, 4)</sup> での水温上昇にみられている。それらによると、都市域での水温上昇は、人間活動による影響も大きいことが示されている。そこで、人間活動の影響が少ないと考えられる日本海に注ぐ由良川の水温について検討したところ、気温の経年的な上昇とともに水温の上昇傾向がすべての調査地点で観測され、その上昇率は都市域のそれと匹敵することが明らかとなった。<sup>5)</sup>

水温上昇の影響として、湖沼においては、底層水温の上昇に伴う、全層循環時期の変化、貧酸素状態の拡大、底質からの有機物やリン等の溶出量の増加による富栄養化の促進等が懸念されている。一方、河川における水質への影響についての報告は少ない。従来から、霞ヶ浦<sup>6)</sup> や琵琶湖<sup>7)</sup> 等の湖沼で、BOD と COD のかい離現象が課題となっていて、そのかい離現象が湖沼だけでなく都市域を流れている淀川水系<sup>8)</sup> 等でも報告されてきている。しかし、人間活動の影響が大きくなく、汚濁の少ない水系での研究<sup>9)</sup> は少ない。そこで、有機汚濁の少ない由良川について、有機汚濁指標項目の長期推移と水温との関係を解析したところ、若干の知見が得られたので報告する。

(平成22年9月1日受理)

## 方法

解析対象には、「京都府公共用水域及び地下水の水質測定結果」の 1981 年度から 2008 年度までの由良川水系に係るデータを用いた。検討地点は、図 1 に示した、毎月のデータがある由良川本川 6 地点、支川 3 地点で、水質項目は、BOD、COD、水温、pH、溶存酸素、溶存酸素飽和率、SS、全窒素、全リン、気温、採水月、年月日と



図 1. 由良川及び支川の採水地点

●は、由良川本川の毎月のデータがある採水地点、●は、支川の採水地点、○は、由良川本川の奇数月のデータがある採水地点、■はダムを示す。

図中番号は、以下のとおり

①：黒瀬橋、②：土師橋、③：天津橋、

①：大野ダム、②：和知ダム、③：由良川ダム

した。BOD と COD のかい離状況をみるために、両者の比も計算した。流量は、国土交通省の自動観測装置の公表データである水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) を用い、参考として、京都府ダイオキシン測定事業において測定されたデータ (未発表) も用いた。解析方法は、地点毎に、全平均値、相関係数と主成分分析、表計算ソフトのエクセルのシリアル値を用いた年月日との直線回帰式の傾きから月ごとの年増加率、及び、移動平均値に基づく季節調整変動法から得られるトレンド成分を用いた年増加率を計算した。報告下限値未満のデータは、0 として計算した。また、上流域での考察のために、奇数月データのある出合橋、大野ダム下、須川橋についても同様に平均値とトレンド成分を用いた年増加率を求めた。

## 結果及び考察

### 1. 主成分分析と相関係数

表 1 に、由良川 6 地点の主成分分析結果で得られた第 1 主成分から第 3 主成分までの因子負荷量が 0.55 以上の項目を示した。第 1 主成分の寄与率は、25% から 35%、第 2 主成分と第 3 主成分は、10% から 20% の範囲にあった。表 2 に、BOD、COD 及び水温と全調査項目間の相関係数のうち、有意水準 1% で相関があった組み合わせについて、地点数及びそれらの相関係数の平均値を示した。また、6

地点すべてで、全窒素と全リンが正の相関、SS と年月日で負の相関、安野橋を除く地点で、BOD/COD と年月日に負の相関があった。

第 1 主成分は、すべての地点で月、気温、水温を含み、季節変動が明確な成分と考えられた。以久田橋から下流地点では、COD が含まれ、季節変動をしていることを表していた。相崎らの霞ヶ浦<sup>6)</sup>、岡本らによる琵琶湖<sup>7)</sup>での研究で、湖沼では COD が明瞭な季節変動を示し、プランクトンの増殖が COD の変動に大きく影響することを報告している。一方、新矢らによると、COD は淀川下流域では季節変動を示さないという報告<sup>10)</sup>があり、河川では季節変動が明瞭でないと考えられた。今回の結果では、COD と水温に正の相関があったことから、安野橋を除く地点では、水温上昇に伴い、上流域に位置するダムでの藻類の増殖が起こり、結果として COD が上昇したことが考えられた。一方、BOD については、第 1 主成分に入っている地点は以久田橋のみで、以久田橋以外では季節変動がないことを示し、BOD と COD の相関があることと異なったが、その原因は不明であった。以久田橋から下流の第 2 主成分は、SS を含んでいるので、懸濁成分と考えられ、BOD が懸濁成分としての挙動をしていたと考えられた。一方、COD は第 2 主成分での因子負荷量が大きくなく、SS と COD に相関があったことと一致しなかった。中路らの千曲川での主成分分析結果では、SS と COD とが同じ主成分にあると報告<sup>11)</sup>している。今回の結果と異なったのは、SS の平均濃度が由良川で全平均が

表 1. 由良川主要 6 地点の主成分分析結果

	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
安野橋	月、気温、水温	COD、年月日	全窒素、溶存酸素飽和率
山家橋	月、気温、水温	全窒素、BOD、全リン	SS
以久田橋	月、気温、水温、BOD、COD、全窒素、全リン	SS、BOD	溶存酸素飽和率、pH
音無瀬橋	月、気温、水温、COD、大腸菌群数、全リン	SS	年月日、溶存酸素
波美橋	月、気温、水温、COD、大腸菌群数、全窒素、全リン	SS、BOD	年月日、COD
由良川橋	月、気温、水温、COD、全窒素、全リン	SS、BOD	年月日、溶存酸素飽和率

主成分のうち、因子負荷量が 0.55 以上の項目

対象項目は、年月日、月、気温、水温、pH、溶存酸素飽和率、BOD、COD、SS、大腸菌群数、全窒素、全リン

表 2. 由良川主要 6 地点における水温、BOD 及び COD と各項目の相関がある地点数とそれらの相関係数の平均値

	BOD	COD	SS	pH	全窒素	全リン	溶存酸素	溶存酸素飽和率	大腸菌群数	BOD/COD	月	年月日	気温
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(%)	(個/100mL)				(°C)
水温	4※ (0.24)	6※ (0.38)	0	3 (0.27)	4※ (0.32)	4※ (0.49)	6※ (-0.90)	2 (0.23)	5 (0.29)	1 (0.18)	6※ (0.48)	0	6※ (0.94)
BOD		6※ (0.39)	3 (0.25)	0	6※ (0.28)	4※ (0.47)	4※ (-0.25)	0	1 (0.48)	6※ (0.82)	0	5※ (-0.16)	4※ (0.23)
COD			6※ (0.35)	3 (0.21)	6※ (0.44)	4※ (0.67)	6※ (-0.36)	0	6※ (0.30)	1 (-0.23)	2 (0.20)	4 (0.20)	6※ (0.38)

全角数字は、有意水準 1% で相関がある地点数、() 内は、それらの相関係数の平均値を示す。

※：以久田橋から下流の 4 地点が含まれていること示す。

3.2 mg/L、千曲川で17 mg/Lと差があったこと、CODが季節変動を示したことが影響したと考えられた。また、上田が、由良川の3地点での年平均値を用いた相関関係を調査した結果、地点毎でCODとSSとの関係が異なり、SSとCODの相関がないことを報告している<sup>12)</sup>が、今回の結果とは異なっていた。これらのことは、統計解析を行う場合、単一の方法での考察の危険性を示しており、複数の統計手法を行うことの必要性を示した。また、以久田橋から下流地点では、BOD、CODと全リン、全窒素に相関があるなど、多くの項目間で相関があり、大きな変動がない水質状況で流下していると考えられた。

## 2. 移動平均値を用いた増加率

図2に、本川6地点の移動平均値に基づくトレンド成分とその回帰直線、表3に、移動平均値を用いたBOD、CODと水温の年増加率と全データの平均値の結果を示し

た。また、奇数月のみの地点も考察に加えるために、両者のデータがある地点での年増加率の差の検定をt分布を用いたところ、有意水準1%で差がない結果となった。但し、由良川の水質は良好で、絶対値は小さいため、少しの差が大きな増加率となっていることを考慮する必要がある。特に、大野ダム下までは、非常に清浄な水質が保たれていることを示した。山家橋のBODが、他と異なり増加傾向を示した点については、3.で後述する。以久田橋から下流のBODの減少は、上田が報告したように、流域における下水処理の整備率の向上や種々の低減対策によるものである<sup>12)</sup>。

一方、CODは、須川橋を除き、増加傾向を示した。SSの増加率が、-0.03 mg/L/年(安野橋)から-0.18 mg/L/年(由良川橋)の範囲で減少しているの、増加したCODの多くは溶解性であるといえる。今井らは、森林等から河川へ流入する有機物の大部分は、フミン質で生物

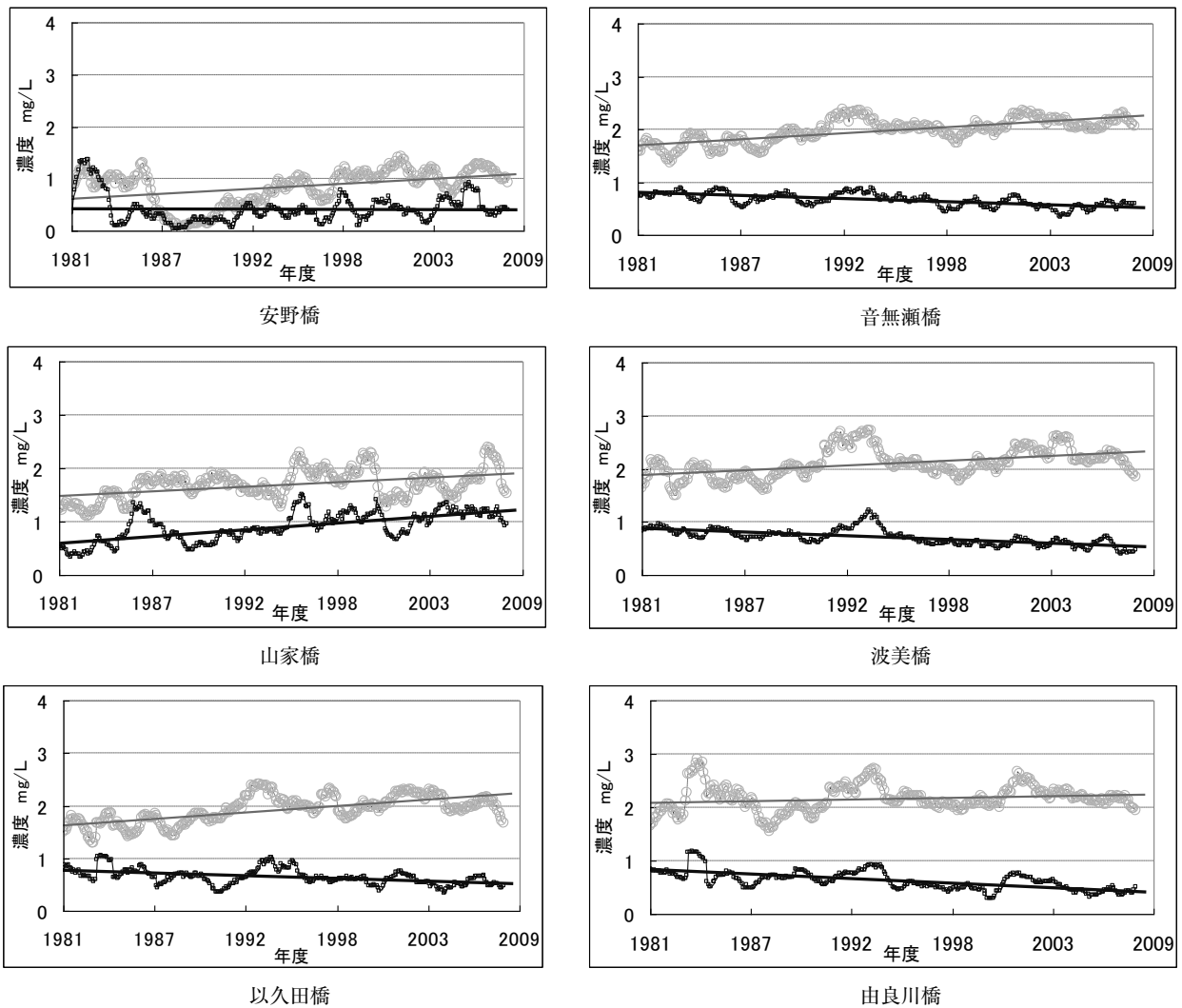


図2. 由良川6地点(安野橋、山家橋、以久田橋、音無瀬橋、波美橋及び由良川橋)におけるBODとCODの推移図(1981年度～2008年度)

—○— BODのトレンド成分    -○- CODのトレンド成分    — BODの回帰直線    — CODの回帰直線  
移動平均値を用いた季節調整法で得られたトレンド成分と、それと年月日(表計算ソフトのエクセルのシリアル値を用いた)との回帰直線を示した。



表 3. 由良川本川 9 地点と支川 3 地点の年増加率と全期間平均値

		由 良 川									上林川	土師川	牧川
		出合橋	安野橋	大野ダム下	須川橋	山家橋	以久田橋	音無瀬橋	波美橋	由良川橋	黒瀬橋	土師橋	天津橋
BOD	年増加率	—	—	—	-0.007	0.023	-0.010	-0.011	-0.013	-0.015	0.014	-0.009	-0.015
	平均値	<0.5	<0.5	0.5	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	1.0	0.6	1.3
COD	年増加率	0.024	0.018	0.006	—	0.017	0.022	0.020	0.017	0.006	—	0.013	0.014
	平均値	0.8	0.8	1.1	1.8	1.7	1.9	2.0	2.1	2.2	1.8	2.2	1.9
水温	年増加率	0.021	0.022	0.024	0.034	0.054	0.016	0.051	0.041	0.031	0.021	0.016	0.016
	平均値	11.9	13.1	14.4	14.9	14.8	14.9	15.7	15.6	15.9	15.6	16.2	15.2

年増加率は、移動平均値を用いた季節調整法によるトレンド成分の年月日のシリアル値との直線回帰式の傾きを年あたりに換算した値。平均値は、全データを用いた平均値。

—：増減がないことを示す。(有意水準 1% で、測定日との相関がないことが棄却されなかった。)

分解されにくく、河川では、そのフミン質が主要な難分解性有機物であると報告している<sup>13)</sup>。岡本らは、由良川上流地域と近い朽木地域から琵琶湖に流入する安曇川では、難分解性有機物の増加傾向はないと報告している<sup>7)</sup>が、今回の結果では、ダムより上流の出合橋や安野橋で、CODの増加傾向がみられたことから、森林地域からのフミン質の流入の増加は否定できない。國松・瀬戸によると、安曇川上流の朽木の森林地域の流出水の平均 COD が 1.6 mg/L と計算されていて<sup>14)</sup>、由良川上流域に比べ、高濃度であり、今後、由良川でもフミン質の溶出増により、CODが高くなる可能性がある。

また、安野橋から下流にあるダムの内、大野ダムは、増加傾向を和らげており、和知ダムでは、COD濃度は上流地点より高いが、その増加傾向はなくなっていた。綾部市等のホームページ (<http://www.city.ayabe.kyoto.jp/view.rbz?nd=110&of=1&ik=1&pnp=61&pnP=110&cd=3998> ほか)によると、下水処理等の整備率の向上や、水道水の使用量や人口の増加がないことから、山家橋での経年的な COD の増加傾向は、由良川ダムの影響が考えられた。水温上昇とともにダムで藻類の増殖が起り、CODの増加が生じたと考えられた。しかし、現在、ダムの藻類調査は行われていないため、今後の推移を把握するためには、それらの調査が必要である。一方、山家橋から波美橋まで COD の増加率に差がなく、そのまま流下したが、最下流の由良川橋では COD の増加傾向が小さかった。これは、波美橋から下流域では有機物量が少なく、狭隘で攪拌が十分に行われるため、浄化作用が働いたと考えられた。また、自浄作用は水温上昇で向上するため、河口域では、水温上昇による水質悪化の可能性は小さいと考えられた。

BOD と COD の比については、地域別に -0.009 から -0.01 / 年の減少傾向を示し、由良川においてもかい離現象がみられることが分かった。同様な現象がみられている霞ヶ浦<sup>13)</sup> や鶴川<sup>8)</sup> による淀川水系の河川の研究では、主な要因は、生物処理を行う下水処理等の普及や種々の低減対策により、生物分解性のある有機物量が減少してき、生物に分解されたいものが増加してきているためと推察されている。しかし、それらがどのような化合物か

は不明のままである。今回の場合は、ダム下流域では、同様な対策等による BOD の減少とダムでの COD の増加傾向によると考えられるが、上流域では、水温上昇に伴うフミン質の溶解性が増加したためかい離現象がみられることになったと考えられた。

### 3. 山家橋の BOD の増加傾向

二宮・若林は、鶴見川でみられる BOD の増加原因は、アンモニア性窒素等の消化作用による酸素要求量の増加によると報告している<sup>15)</sup>。しかし、由良川は、都市域の下水処理放流水の影響が大きい鶴見川とは環境が異なり、今回の要因とは考えられなかった。また、山家橋の直上流に流入する上林川で BOD に増加傾向がみられたが、流量は 0.1 から 0.4 m<sup>3</sup>/sec で、由良川の綾部での年平均流量の 30 から 40 m<sup>3</sup>/sec に比べ少なく、本川への影響は小さいと考えられた。さらに、原因を考えるため、山家橋上流・下流地点の BOD の月ごとの年増加率を図 3、月ごとの pH の最高値を図 4 に示した。図 4 から、山家橋と須川橋は、季節に関係なく、ダムでの藻類の発生による炭酸同化作用で、pH が高くなったことが推察された。一方、大野ダム下での水質は安野橋と差がなく、大野ダムでの藻類発生が少ないことが推察された。和知ダム下流の須川橋では、BOD、COD が大野ダム下より高いが、経年の増減が小さく、和知ダムでの、水温上昇による藻類の増殖増加への影響が大きくなかったことが考えられた。また、大野ダムの有効貯水量が 21,320 千 m<sup>3</sup> で、和知ダム 1,286 千 m<sup>3</sup>、由良川ダム 302 千 m<sup>3</sup> と差があり、滞留時間の差が水質に影響していることが考えられた。そして、山家橋で増加傾向を示した BOD は、下流の以久田橋では、経年的には減少傾向で、平均値も小さく、分解されやすいことが示された。今井らは、プランクトンの一次生産物質の親水性中性物質は容易に生物分解を受けることを報告<sup>16)</sup> していることから、由良川ダムでは滞留時間が短いため、それらの多くの部分が、生物分解されやすい状態のまま山家橋へ流下してき、以久田橋までの間で、生物分解を受けたと考えられた。すなわち、山家橋での BOD の増加傾向は、由良川ダムでの藻類の増殖によると考えられた。

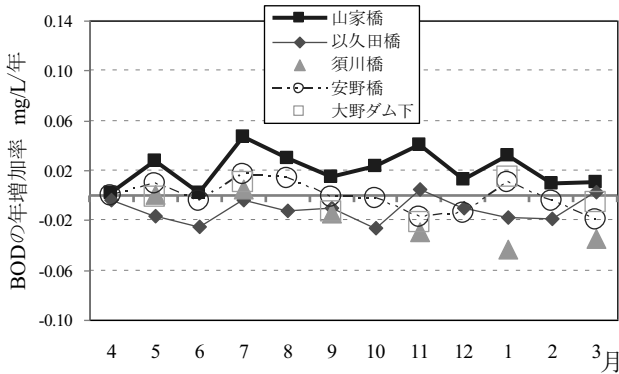


図 3. 由良川 5 地点（安野橋、大野ダム下、須川橋、山家橋及び以久田橋）における月別の BOD の年増加率（1981 年度～2008 年度）  
月別のデータと年度との回帰直線の傾きから年増加率を計算した。

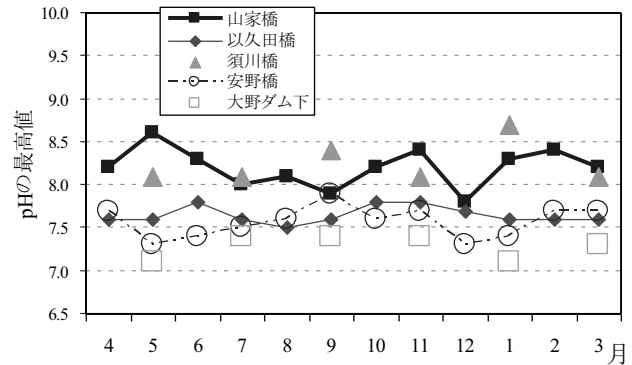


図 4. 由良川 5 地点（安野橋、大野ダム下、須川橋、山家橋及び以久田橋）における月別の pH の最高値（1981 年度～2008 年度）

### 謝辞

この報告は、日本水環境学会関西支部環境モニタリング情報部会の活動の一環としてとりまとめたもので、会員の協力に感謝する。

### 引用文献

- 1) 安藤晴夫, 柏木宜久, 二宮勝幸, 小倉久子, 1999. 東京都内湾の水質の長期変動傾向について, 東京都環境科学研究所年報, 1999, 60-67.
- 2) 中室克彦, 奥野智史, 前澤希, 坂崎文俊, 田口寛, 福永勲, 西海暢展, 加賀城直哉, 服部幸和, 2006. 琵琶湖における水温上昇の実態把握とその要因解析, 水環境学会誌, 31 (11), 713-718.
- 3) 福永勲, 小紫将吾, 中室克彦, 奥野智史, 服部幸和, 加賀城直哉, 西海暢展, 田口寛, 日下哲也, 2008. 河川・湖沼水温上昇に及ぼす環境要因の地域特性, 大阪人間科学大学紀要 HumanSciences, 7, 119-125.
- 4) 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 (2), 177-181.
- 5) 田口寛, 日下哲也, 2009. 由良川の水質状況－水温の長期変動について－, 京都府保健環境研究所年報, 54, 62-65.
- 6) 相崎守弘, 松重一夫, 今井章雄, 朴濟哲, 1998. 霞ヶ浦における有機性汚濁物質に関する研究, 国立環境研究所研究報告霞ヶ浦臨湖実験施設研究報告集 12, 138, 20-27.
- 7) 岡本高広, 佐藤祐一, 早川和秀, 古角恵美, 中村敏博, 藤良平, 小松直樹, 北川典孝, 一瀬諭, 奥村陽子, 坪田てるみ, 古田

世子, 南真紀, 大野達雄, 青木眞一, 藤原直樹, 安藤大輔, 小林博美, 吉田美紀, 山本春樹, 2009. 難分解性有機物を含めた有機物による琵琶湖の水質汚濁メカニズムについて, 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 5, 25-35.

- 8) 鶴川昌弘, 2010. 淀川水系における COD の状況, 平成 21 年度河川水質機構調査第 29 報淀川水質汚濁防止連絡協議会河川水質機構調査小委員会, 4-64.
- 9) 松井妙子, 小林正, 2004. 新潟県における河川水質の類型別経年変化, 新潟県保健環境科学研究所年報, 19, 98-102.
- 10) 新矢将尚, 西尾孝之, 藤原康博, 大島詔, 北野雅昭, 福山丈二, 2007. 大阪市内水域における難分解性有機物の特性解析, 大阪市立環境科学研究所報告, 69, 31-38.
- 11) 中路勉, 港和行, 牧清忠, 入江鎌三, 1981. 河川水質の統計学的研究 (Ⅱ) 長野県内千曲川水質への多変量解析の適用, 信州大学農学部紀要, 18 (1), 109-119.
- 12) 上田彬博, 2003. 京都府の公共用水機における水質の経年推移について－京都府北部主要河川の状況－, 京都府保健環境研究所年報, 48, 115-123.
- 13) 今井章雄, 松重一夫, 永井孝志, 富岡典子, 木幡邦男, 野原精一, 佐野友春, 相崎守弘, 福島武彦, 海老瀬潜一, 永測修, 2004. 湖水溶存有機物 (DOM) の特性・起源と機能・影響に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告, 湖沼における有機炭素収支の物質収支および機能・影響の評価に関する研究, 19-42.
- 14) 國松孝男, 須戸幹, 1997. 森林溪流の水質と汚濁負荷流出の特徴, 琵琶湖研究所報, 14, 6-15.
- 15) 二宮勝幸, 若林信夫, 2009. 鶴見川中流域における水質の長期変動の特徴, 横浜市環境科学研究所報, 33, 68-74.
- 16) 今井章雄, 松重一夫, 木幡邦男, 井上隆信, 野原精一, 相崎守弘, 福島武彦, 滝一夫, 2001. 湖水中に蓄積する難分解性有機物の発生原因の解明, 国立環境研究所特別研究湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究, 3-21.