

過去 35 年間の琵琶湖の水質変化と流域環境の変化

大久保 卓也*・東 善広**

1. はじめに

琵琶湖の水質は、1960～70年代に高度経済成長に伴う集水域の人口増加や人間活動の活発化によって富栄養化が進行し、1977年にはウログレナによる赤潮の大発生が問題となった。しかし、その後、「びわ湖を守る粉石けん使用推進県民運動」(1978～1988年)や「琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例」(1979年公布)等による様々な富栄養化防止対策の取り組みによって水質は徐々に良くなる傾向にある。本稿では、これらの琵琶湖の水質変化と流域環境の変化を総合的にレビューし、相互の関係について考察する。また、富栄養化問題が解消されつつある琵琶湖において新たに課題となっている水質、水環境問題について述べ、それらの問題に対する対策の方向性について考える。

2. 琵琶湖の概況

琵琶湖は、面積 670 km²、貯水量 27.5 km³、平均水深 41 m、最深部水深 103 m の湖で、面積と貯水量は日本最大である¹⁾。守山と堅田との間で岸の距離がやや狭くなっており、そこに琵琶湖大橋が架かっており、琵琶湖大橋の北側を北湖(面積 618 km²、平均水深約 43 m、貯水量 27.3 km³)、南側を南湖(面積 52 km²、平均水深約 4 m、貯水量 0.2 km³)と呼んでいる。

琵琶湖に流入する河川としては、流域面積が大きい順に野洲川(流域面積 383 km²)、姉川

(同 369 km²、高時川を含む)、安曇川(同 307 km²)、日野川(同 211 km²)、愛知川(同 202 km²)などがあり、安曇川を除き大きな河川は東岸に流入している²⁾。そのため、東岸に沖積平野が広がり、農地、宅地、工場は東岸に多く分布する。琵琶湖の集水域面積は 3,174 km²であり、滋賀県域(4,017 km²)のうち琵琶湖に流入しない大戸川の流域(面積 190 km²)を除いた陸域が概ね琵琶湖の集水域となっている。集水域人口は、2015年時点で約 140万人となっている。土地利用分類としては、森林が最も多く約 60%を占め、水田(休耕田、転作田を含む)が約 20%、住宅・工場・道路等が約 9%、畑が約 2%となっている(2006年時点、国土数値情報土地利用細分メッシュデータから計算³⁾)。農地は大部分が水田(水田率 92%)であるが、3割程度は転作で麦・大豆等を栽培している⁴⁾。

3. 琵琶湖水質の長期変化

琵琶湖の水質のモニタリングは図 1 に示す地点で国土交通省、水資源機構と滋賀県が共同で実施している⁵⁾。代表的な水質指標について 1975 年度以降(一部 1979 年度以降)の北湖(28 地点)、南湖(19 地点)、瀬田川(2 地点)の表層の年度平均値の推移を図 2 に示す。また、水質の長期変化トレンドをみるため、年度と水質の年度平均値の間に相関があるかどうかをケン

*滋賀県立大学環境科学部教授

**滋賀県琵琶湖環境科学研究センター総合解析部門専門研究員

68 周年秋季講演会(平成 26 年 11 月 8 日)講演

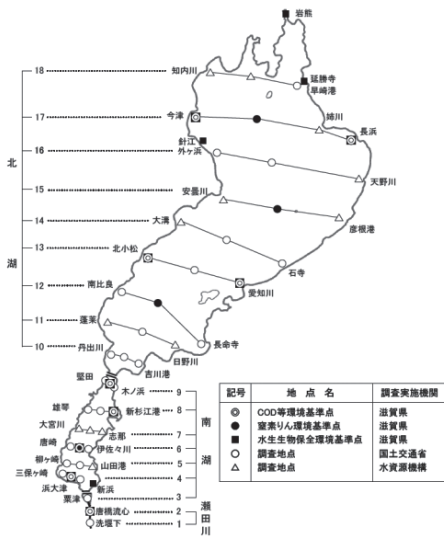


図1 琵琶湖の水質モニタリング地点

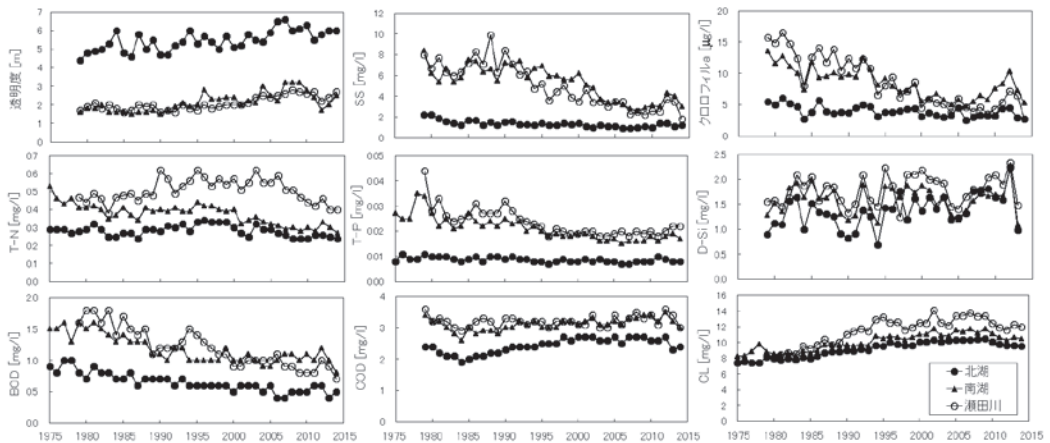


図2 琵琶湖の水質長期変化（北湖，南湖，瀬田川の各水域の年度平均値の変化）

表1 琵琶湖の水域別水質変化トレンドの解析結果
(年度と水域別年度平均値の Kendall 相関係数を示す.)

水域	項目	透明度	SS	クロロフィル a	T-N	T-P	D-Si	BOD	COD	Cl
北湖	相関係数	.524**	-.549**	-.423**	-.211	-.454**	.327**	-.731**	.574**	.699**
	有意確率(両側)	.000	.000	.000	.081	.000	.006	.000	.000	.000
	N	36	36	36	36	36	35	36	36	36
南湖	相関係数	.593**	-.588**	-.559**	-.551**	-.678**	-.007	-.599**	.418**	.633**
	有意確率(両側)	.000	.000	.000	.000	.000	.955	.000	.001	.000
	N	36	36	36	36	36	35	36	36	36
瀬田川	相関係数	.550**	-.705**	-.716**	.049	-.569**	.138	-.772**	.112	.597**
	有意確率(両側)	.000	.000	.000	.682	.000	.249	.000	.367	.000
	N	36	36	36	36	36	35	36	36	36

** 相関係数は 1 % 水準で有意 (両側).

* 相関係数は 5 % 水準で有意 (両側).

ドールの順位相関係数で検定した結果を表1に示す。1%の危険率で有意な相関係数に**，5%の危険率で有意な相関係数に*を付けてある。相関係数がプラスの場合は増加傾向，マイナスの場合は減少傾向を示す。

透明度は，北湖，南湖，瀬田川ともに増加傾向にあり，水中の濁りが少なくなる傾向にあることを示している。この傾向は，同じ3水域においてSS (suspended solids: 懸濁物質) 濃度，および，植物プランクトン現存量の指標であるクロロフィル a 濃度が減少傾向にあることと矛盾なく対応している。次に栄養塩濃度の変化についてみてみると，T-N (全窒素) 濃度は，南湖では減少傾向にあるが，北湖と瀬田川では有

意な長期トレンドはみられなかった。北湖の T-N 濃度は 1995 年頃まではやや増加し、その後減少している。また、瀬田川の T-N 濃度は、1995 年頃までは増加し、その後横ばいで 2005 年頃から減少に転じている。T-P (全リン) 濃度は、北湖、南湖、瀬田川ともに減少傾向にある。このように北湖と瀬田川で T-N と T-P のトレンドに違いがみられる原因としては、①窒素はリンに比べ排水処理プロセスで除去されにくいこと (例えば、大津市下水処理場における T-N、T-P の除去率は、それぞれ 74.1%、90.1%となっている⁶⁾)、②窒素は大気からの負荷量が多いこと⁷⁾、③琵琶湖北湖では植物プランクトンの増殖はリン制限と言われており⁸⁾、リンが減少したことによって植物プランクトンの増殖が抑制され、その結果、窒素が余った可能性があること、などが関係していると考えられる。植物プランクトン増殖に必要な主要栄養素として、窒素、リンの他に珪藻の増殖に必要なケイ酸があるが、D-Si (溶存態ケイ酸) は、北湖で増加トレンドを示した。この原因は不明であるが、①リンが減少したために珪藻が増殖できずにケイ酸が余ってきた可能性、②Cl (塩化物イオン) と同様に琵琶湖内に徐々に蓄積されている可能性が考えられる。

有機物濃度の指標である BOD 濃度は、北湖、南湖、瀬田川ともに減少傾向にある。このトレンドは、SS、クロロフィル a、T-P と同様であり、リン濃度の減少にともない植物プランクトン現存量が減少したことを反映した結果と考えられる。滋賀県水産試験場の調査結果⁹⁾でも、琵琶湖北湖中央部においてプランクトン沈殿量 (プランクトン現存量の指標) は 1972~81 年の間にピークを示し、1980 年頃から減少傾向にあり、同様の長期変化を示している。

一方、同じ有機物指標である COD は、BOD

とは全く異なる変化パターンを示しており、北湖と南湖では増加傾向にある。COD と BOD の変化パターンの違いの原因は、BOD で測定される易分解性有機物の濃度は減少しているが、COD で測定される一部の難分解性有機物 (溶解性で分子量が 1 万以下) の濃度が上昇しているためとの説がある¹⁰⁾。また、分解や吸着、蒸発がない保存性物質の典型である Cl (塩化物イオン) の濃度は北湖、南湖、瀬田川ともに増加傾向にあり、COD の増加が難分解性有機物によるものであることを裏付けているようにみえる。しかし、COD の増加は植物プランクトンの種組成変化が影響しているという説もあり¹¹⁾、COD 濃度増加の原因についてはまだはっきりわかっていないのが現状である。

4. 琵琶湖水質の季節別および水深別の長期変化

琵琶湖の水質の長期変化をみる場合に、年度 (年) の平均値や中央値の変化だけでなく、「季節変化」の変化や「水質の鉛直分布」の変化もみる必要がある。本稿では、滋賀県が今津中央地点と比良中央地点で実施している水深別調査データ (1979~2013 年度) をもとに、各測定水深毎に春季 (4~6 月)、夏季 (7~9 月)、秋季 (10~12 月)、冬季 (1~3 月) の中央値の長期トレンドをケンドールの順位相関係数から検討した。表 2 に各地点別、水深別、季節別のケンドール順位相関係数を求め、危険率 1% と 5% で相関 (トレンド) の有意性を検定した結果を示す。

水温は、2 地点とも夏季から秋季にかけての表層で上昇傾向にある。逆に中層の 15-20 m 層では水温は低下傾向にあり、成層が強化されることにより夏季から秋季にかけて下層への熱伝導率が小さくなっている可能性を示唆している。成層が強化されていることは、焦ら

表2 北湖2地点（今津沖中央，比良沖中央）における水深別，季節別の水質変化トレンドの解析結果（++，+は増加傾向，--，-は減少傾向を示す。ケンドールの順位相関係数の有意性検定結果による。）

観測地点	水深	水温				SS				クロロフィルa				T-N				NO ₃ -N				T-P			
		春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
今津沖中央	0.5m		++	+																					
	5m		++	+																					
	10m				+																				
	15m																								
	20m																								
	30m																								
	40m																								
	60m																								
	80m																								
	底上1m																								
比良沖中央	0.5m		++	+																					
	5m																								
	10m																								
	15m																								
	20m																								
	40m																								
	底上1m																								

観測地点	水深	D-Si				Cl			
		春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
今津沖中央	0.5m	++	+			++	++	++	++
	5m	++				++	++	++	++
	10m	++	+			++	++	++	++
	15m	++	++			++	++	++	++
	20m	++	++			++	++	++	++
	30m	++	++	++		++	++	++	++
	40m	++	++	++		++	++	++	++
	60m	++	++	++		++	++	++	++
	80m	++	++	++		++	++	++	++
	底上1m	++	++	++		++	++	++	++
比良沖中央	0.5m					++	++	++	++
	5m					++	++	++	++
	10m					++	++	++	++
	15m					++	++	++	++
	20m		+	+		++	++	++	++
	40m	++	++	++		++	++	++	++
	底上1m	++	++	++		++	++	++	++

+：相関係数はプラスで、5%水準で有意（両側）。
 ++：相関係数はプラスで、1%水準で有意（両側）。
 -：相関係数はマイナスで、5%水準で有意（両側）。
 --：相関係数はマイナスで、1%水準で有意（両側）。

(注1) 滋賀県環境白書の1979年から2013年の水深別調査データを利用した。
 (注2) 春季は4-6月、夏季は7-9月、秋季は10-12月、冬季は1-3月として各3か月の中央値を求め年度とのケンドール順位相関係数を求めた。

(2015)¹²⁾の解析でも明らかになっている。一方、鉛直混合が活発な冬季においては、長期的な変化トレンドは2地点ともどの水深においても確認できない結果となった。

SSとクロロフィルaは、概ね同じ傾向を示しており、今津沖中央では、すべての季節において上層で減少傾向にあり、比良沖中央では、夏季から秋季にかけて上層で減少傾向にある。また、両地点とも底層でも減少傾向にある季節が多い。

T-Nは、2地点とも夏季の上層で減少傾向を示している。一方、春季から秋季にかけて、60~80m層では増加傾向を示しているが、NO₃-Nではそのような傾向はみられない。NO₃-Nは、今津沖中央の秋季の上層で増加傾向がみられる。これは、以前は植物プランクトンの摂取によって夏季から秋季にかけて上層でNO₃-Nが枯渇

していた状態であったものが、植物プランクトン現存量の低下に伴いNO₃-Nの摂取量が低下し枯渇しなくなったことが影響しているものと推定される。

T-Pは、2地点とも春季の表層で低下傾向にある。一方、今津沖中央では春季の底層で増加傾向にある。また夏季には2地点とも、上層で低下傾向、下層から底層では増加傾向にある。夏季には成層の強度が強くなる傾向にある中で、夏季の表層では窒素やリンの濃度が低下する一方で、夏季の下層から底層では回復した窒素やリンが保持され濃度が高くなっている可能性があるが、さらに詳細な調査・解析が必要である。

D-Siについては、今津沖中央では秋季の上層を除き一般的に増加傾向にあり、特に春季から秋季にかけての中~底層での相関係数が高い。比良沖中央では、春季から秋季にかけては中~

底層で増加傾向を示し、冬季には全層で増加傾向を示している。このようなD-Siの濃度増加の原因については不明である。

CIについては、2地点とも全季節、全層で増加傾向にある。CIのように保存性の高い物質は生物活動による摂取等の影響が小さいため季節による長期変化の違いはほとんどみられず、徐々に琵琶湖に蓄積されていることを示している。

このように北湖の2地点において水深別、季節別に長期トレンドをみた結果、夏季から秋季にかけては成層が強化され、上層ではSS、クロロフィルa、T-N、T-Pが減少傾向にあることがわかった。また、下層でもSS、クロロフィルaは減少傾向にあるが、T-N、T-Pは増加傾向にある季節もあり、四季を通して全層でT-N、T-Pが減少傾向にあるわけではないことがわかった。

5. 流入汚濁負荷量、気象条件の長期変化

これまで琵琶湖の水質の長期変化について述べてきたが、水質や植物プランクトンの経年変化は、①集水域からの栄養塩等の流入量（流入負荷量）の変化、②気温、降水量（流入水量）等の気象条件の変化、③魚類による動物プランクトンの捕食などのトップダウン効果などの生態系構造の変化等によって影響を受ける。③については筆者の専門分野でないため本稿では扱わないことにし、主に①と②について水質変化との対応関係について検討する。

5.1 琵琶湖に流入する汚濁負荷量の変化

北湖、南湖の集水域別のT-N、T-Pの流入負荷量の5年毎の変化を図3と図4に示した。T-N流入負荷量は、北湖では1980年頃、南湖では1975年頃にピークを示し、その後減少している。T-P流入負荷量は、北湖では1975年

頃、南湖では1970年頃にピークを示し、その後減少している。T-P流入負荷量のピークはT-N流入負荷量のピークより5年早い。リンの流入負荷量の減少が窒素に比べて早かったのは、石けん運動（1978～）と琵琶湖富栄養化条例（1979公布）により促進されたリン含有合成洗剤の使用禁止と下水処理場におけるリン除去対策のためと考えられる。琵琶湖の水質変化と流入負荷量の変化を比較してみると、リンについ

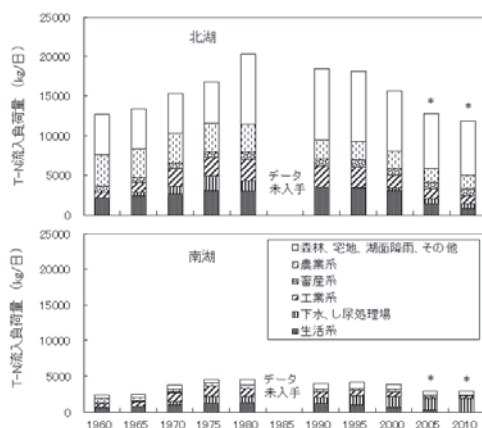


図3 T-N流入負荷量の長期変化（大久保ら¹³⁾のデータに2005、2010年の佐藤ら¹⁴⁾のデータ(*)を追加して作図した。この図で、2005、2010年の畜産負荷量は、2000年と同じ値として設定した。）

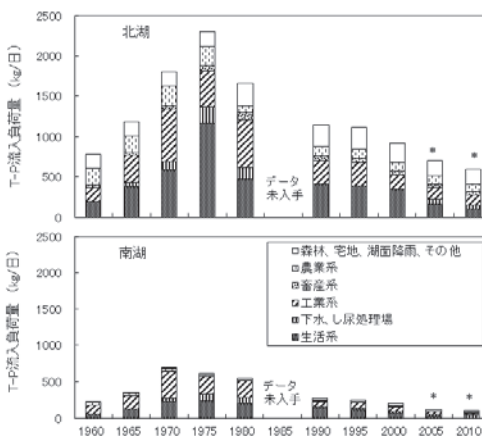


図4 T-P流入負荷量の長期変化（出典は図3と同じ）

では、概ね対応関係がみられるが、窒素については、対応関係が明確でなく、流入負荷量が減少し始めてから10~15年ほど経過してようやく琵琶湖の窒素濃度が低下し始めている。このタイムラグの原因としては、①琵琶湖の水の滞留時間（容量÷流入量の計算で約5年）の影響、②農地等の面源からの排出負荷量算定が不正確で経年変化が把握できていないこと、③窒素の場合は大気由来の負荷量が大きく生活系負荷量減少の影響が現れにくいこと、などが考えられる。農地等の面源からの汚濁負荷量は降雨時に流出する割合が大きい、降雨時を含めて詳細に調査した事例は少なく、そのため面源からの汚濁負荷量は過小評価になっている可能性が高い¹⁵⁾。

琵琶湖に流入する窒素、リン汚濁負荷量の削減に効果的だった対策としては、リン含有合成洗剤の使用禁止の他に下水道整備が挙げられる。滋賀県における下水道普及率の推移を図5に示した。特に滋賀県内の4区域（湖南中部処理区、湖西処理区、東北部処理区、高島処理区）で整備が進められてきた流域下水道は、処理人口が大きく（4処理区合計で計画処理人口が130万人、2014年度末の処理人口が113万人⁶⁾）、終末処理場では窒素、リンを除去する高度処理が行われているため汚濁負荷削減効果が大きい。例えば、湖南中部下水処理場でのBOD、T-N、T-P負荷量の除去率は、それぞれ99.6%、84.9%、98.3%（2014年度平均）である。また、湖南中部下水処理場の処理水は瀬田川に放流されているため、湖南中部処理区の人口（計画で79.5万人、2014年度末で71.1万人⁶⁾）の排水は、琵琶湖には流入しなくなった。これはダイバージョン（流路変更）と呼ばれる富栄養化防止対策としては最も効果の高い対策であり、琵琶湖の他に諏訪湖でもその効果が実証されている。

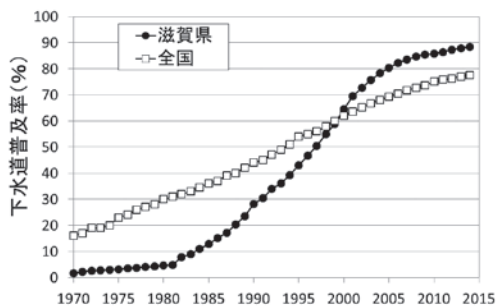


図5 滋賀県の下水道普及率の推移⁶⁾

また、人口密度が低く下水道が整備できない農村地域では、農村集落排水処理施設（いわゆる農村下水道）の整備がされ、大規模下水処理施設に比べ除去率は小さいが窒素またはリンの除去が可能な処理方式（回分式活性汚泥法など）が採用され運用されている（2010年時点で整備集落数407集落、整備人口10.8万人）¹⁶⁾。

水田等の面源汚濁負荷削減対策としては、浅水代かき技術の開発・普及、施肥田植機の開発・普及など¹⁷⁾の他に、適正施肥、濁水流出防止、節水等を進める「環境こだわり農産物認証制度」¹⁸⁾による経済的支援制度が実施されてきた。また、赤野井湾等の閉鎖性水域での底泥浚渫などの対策も実施されてきた¹⁷⁾。しかし、これらの効果については、定量的によくわかっておらず、水質変化との対応関係については不明である。

5.2 気象条件の変化

滋賀県内にある気象観測所8地点（今津、彦根、大津、土山、東近江、信楽、長浜、南小松）における月平均気温の県内平均値の長期変化を図6に示す。12ヶ月移動平均値の長期変化をみると、増加傾向にあるようにみえるが、年度と気温の年度平均値とのケンドール順位相関係数を求めて相関の有意性の検定を行った結果、危険率1%で相関があり増加傾向にあることがわかった。したがって、表2で示した夏季と秋

季における表層水温の上昇は気温の上昇によると推定される。

また、水質に影響を及ぼす可能性がある降水量について、滋賀県内にある気象観測所 10 地点（大津、今津、彦根、近江八幡、土山、東近江、信楽、長浜、南小松、柳ヶ瀬）の県内平均値を求め長期変化をみた結果を図 7 に示す。この長期変化についてもケンドール順位相関係数を求めて相関の有意性の検定を行ったが、有意性は確認できなかった。琵琶湖からの放流水量の長期変化をみても（図 8）、特にトレンドはみられず、年度と放流水量の間に有意な相関はみられなかった。したがって、水質の長期的なトレンドに対して降水量が影響している可能性はないと考えられる。ただし、大雨による洪水

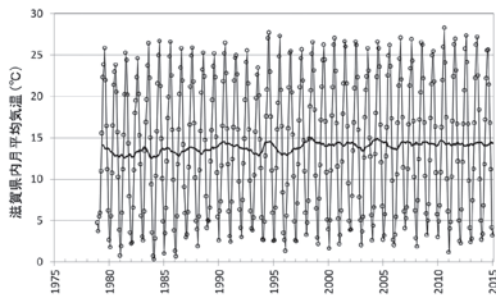


図 6 滋賀県における月平均気温の長期変化（滋賀県内の今津、彦根、大津、土山、東近江、信楽、長浜、南小松における観測値の平均値を示す。太線は 12ヶ月移動平均値の変化を示す。）

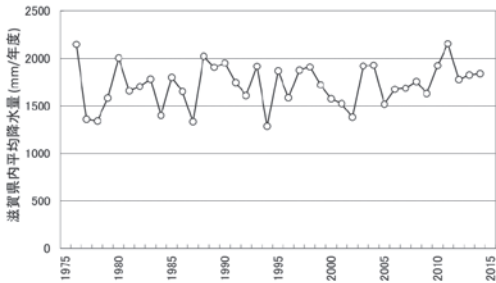


図 7 滋賀県における平均降水量の長期変化（滋賀県内の大津、今津、彦根、近江八幡、土山、東近江、信楽、長浜、南小松、柳ヶ瀬の平均降水量を示す。）

時には大量に土砂や栄養塩が流入し、河口部で濁度が高まるなどの短期的な影響がみられる。しかし、大雨時に流入した栄養塩によって一次生産が高まるなど、洪水イベントが湖内の水質や生態系に対してどのような影響を及ぼしているかについてはよくわかっていない。筆者らが比良沖で調査した結果では¹⁹⁾、数百 mm の大雨があった場合に河川水が流入した層で濁度は高くなるが、その後クロロフィル a が増加する現象がみられず、降雨時に流入した栄養塩が短期的な植物プランクトンの増殖を促している証拠は得られていない。

琵琶湖沿岸の気象観測地点（今津、彦根、大津、南小松）における年度毎の平均風速の長期変化を図 9 に示す。平均風速は増加する傾向がみられるが、ケンドール順位相関係数による検定でも、危険率 1% で年度と平均風速の間に相関があり増加傾向にあることがわかった。

降雪量の長期変化は図 10 に示すように、減少傾向にあるようにみえるが、ケンドール順位相関係数による検定では、年度と降雪量との間に有意な相関はみられなかった。

6. 集水域と湖岸の環境変化

6.1 土地利用の変化

琵琶湖の水質変化と流入負荷量変化との関係

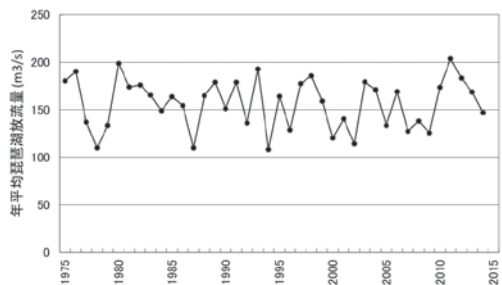


図 8 琵琶湖からの放流水量の長期変化（国土交通省琵琶湖河川事務所観測データから作図）



図9 琵琶湖沿岸気象観測地点(今津, 彦根, 大津, 南小松)の平均風速の変化

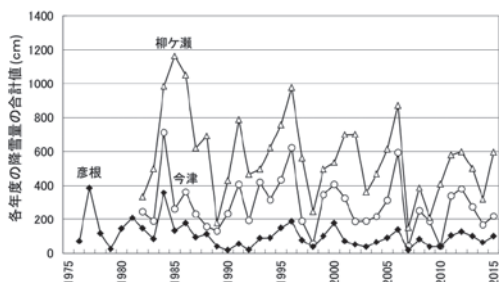


図10 各年度の降雪量合計値の変化

については上記で述べたが、土地利用状況や農地、森林、河川の環境などの集水域環境の変化を把握しておくことは琵琶湖の水質、生態系を考える上で重要である。集水域の土地利用状況の変化を、1976年と2006年で比較すると³⁾、住宅地・市街地が大きく増加し(113.9km²)、農地が大きく減少(-90.6km²)、森林はやや減少(-29.5km²)となっていた。特に、主要道路沿線やJRの駅周辺(瀬田、草津、守山、野洲、彦根等)で都市化が進行し、主に農地が宅地・道路に転用された。人口も交通網の整備や工場の立地に伴い増加しており、1960年に約80万人であった滋賀県の人口は2014年には約142万人になった²⁰⁾。市街地では先に述べたように下水道の整備が進んだが、それに伴い家庭排水は周辺の水路に排出されることはなくなり、下水管とポンプ施設を経由して下水処理施設まで運ばれ、そこで処理されて放流されるようになった。そのため住宅地周辺の排水路は、家庭

排水が流れなくなるため有機物や窒素、リンの供給が少なくなると同時に水量も少なくなることになる²¹⁾。したがって、住宅地周辺の水路は、水質は良くなるが、水量が少なくなり、生物にとってプラスの変化だけでないことに注意する必要がある。

6.2 圃場整備による変化

琵琶湖集水域の変化として、農地における圃場整備は水質、水量、生物の生息環境の面からみて重要な変化である。図11に滋賀県における圃場整備実施面積の変化を示した²²⁾。圃場整備では、機械化を進めるために水田を区画整理し、一筆の面積を広く、四角くした。また、用排水施設が整備され、用水系統と排水系統が分離されることになった。この用排水分離は、①都市化の進行にともない用水が生活排水で汚れる地域が多くなってきた中で、そのような汚れた排水が用水路に流れ込まないようにするため、また、②湿田を乾田化し水田を畑地としても利用できるようにするため排水路を深く敷設する必要があったことが進められた理由として挙げられる。しかし、この用排水分離によって農業濁水や窒素、リンが農地から流出し易くなったことが指摘されている²³⁾。湖岸寄りの農地の圃場整備では、湖岸に建設された揚水ポンプ場から琵琶湖の水が汲み上げられ、農業用水がパイプラインで供給されるシステム(逆水灌漑施設)が整備された。整備の結果、用水に困らなくなった反面、用水使用量が増え、農業

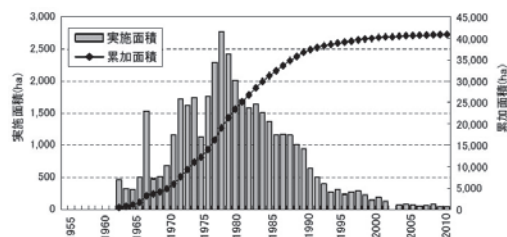


図11 滋賀県における圃場整備実施面積の変化

濁水が激しくなった原因として指摘されている²⁴⁾。また、圃場整備によって排水路と田面の段差が大きくなり、魚が遡上できなくなったこと、また、水路がコンクリート化され、生物が生息しにくくなったことが指摘されている^{25, 26)}。圃場整備による乾田化によって、非灌漑期には土壌が乾いてしまうようになったことも生物を減らす原因になっている可能性がある。その他、圃場整備の生物への影響については、最近徐々に明らかにされており、それを改善するための取り組みが農業関係の研究機関等で検討されている²⁷⁾。

6.3 湖岸環境の変化

湖岸はホンモロコ、ニゴロブナ等の産卵場所として重要であるが、琵琶湖総合開発事業により1975年から1991年にかけて南湖東岸、野洲～近江八幡地先、びわ町～湖北町地先、新旭町地先など約50kmの湖岸で琵琶湖水位上昇による浸水を防ぐために湖岸堤が建設された²⁸⁾。この湖岸堤建設による水質、生物への影響については、水資源機構がモニタリング調査を行っている²⁹⁾が、明確な影響はみられていないようである。しかし、湖岸にあった自然のヨシ帯の面積が減少し、水辺移行帯が分断されたことは、魚類への影響が大きいことが指摘されており²⁶⁾、今後も多面的な視点から影響調査が必要と思われる。また、湖岸環境の変化に関しては、琵琶湖総合開発事業の完成に伴い1992年から始まった瀬田川洗堰操作規則による人為的な水位操作が、ホンモロコ、フナ、コイ等の繁殖に大きな影響を及ぼしていることが指摘されている^{26, 30, 31)}。瀬田川洗堰操作規則では、洪水期の6月16日から10月15日の間、あらかじめ湖水位をB.S.L.-0.2～-0.3に低下させておき、洪水時の湖水位の上昇を抑制するとともに、上昇した湖水位の速やかな低下を図ることを目的

に水位操作が行われている。1992年以降の実際の水位変化をみると³²⁾、代かき・田植えに農業用水が必要な5月中旬をピークとして、6月16日の水位目標値B.S.L.-0.2に向けて急激に水位を低下させるような変化となっている。この5月中旬から6月中旬の急激な水位低下の時期は、ホンモロコ、フナ、コイの産卵時期であり、水際に産卵された卵が水位低下によって干出してしまう、また、孵化した稚魚も遊泳力がないため干出してしまうといった問題が発生する^{30, 31)}。このような指摘を受けて、国土交通省琵琶湖河川事務所では、魚類への悪影響を小さくする水位操作方法を検討中である。

6.4 森林環境の変化

森林は琵琶湖の集水域面積（琵琶湖を除く）の約6割を占めるため、その環境変化は、直接あるいは間接的に琵琶湖の水質や生態系に影響を及ぼしている可能性がある。物質循環の視点で見ると、窒素について森林では大気から降下した窒素を樹木、下草、微生物等が吸収・保持し、一部は微生物が除去（脱窒）している³³⁾。そのため森林から流出する渓流水の窒素濃度は、森林に降る降水の窒素濃度に比べ低くなっている^{34, 35)}。しかし、木を伐採した場合は、樹木による吸収がなくなり、有機物の分解が進むため、窒素は流出してくる³⁶⁾。現在、琵琶湖集水域の森林環境として問題なのは、①シカによる下草の食害が進行していること、②伐採、間伐等による森林の維持管理が行き届かず放置状態にあること、である。

シカの食害の水質への影響については、シカの下層植生の過採食によって窒素の流出量が増加すると報告した研究報告がある^{37, 38)}が、まだ、研究例が少なく今後のデータの蓄積が必要である。また、食害が進んだ地域では、土壤侵食量が多くなることが報告されている^{39, 40)}。

滋賀県南部の山は、石炭、石油によるエネルギー改革以前は、建築材や薪等の燃料として木材の需要が大きかったため、はげ山が多かったことがわかっており、このようなはげ山の土砂生産量は、植栽、山腹工等の砂防工事によって、1/100~1/10,000 程度小さくなることが報告されている⁴¹⁾。アユやセタシジミなど一部の魚介類にとって、礫や砂の底質が産卵や生息にとって重要であることがわかっている^{42,43)}。その観点からみると現在の樹木で覆われた琵琶湖周辺の山は土砂生産量が低下しており、アユやセタシジミなどの魚介類にとって望ましい環境とは言えない。

6.5 河川環境の変化

琵琶湖の水質や生態系の変化を考える上で考慮すべき集水域の環境変化として、上記で述べたことの他に流入河川の次のような変化がある。

- ①野洲川、草津川における放水路の建設
- ②河口部における拡幅・浚渫工事
- ③河道における堰堤の建設

①の野洲川放水路は1971年に工事が開始され1979年に完成した⁴⁴⁾。野洲川は、以前は河口から8 km 程度上流で北流と南流の2つに分かれ、その下流の川幅は北流、南流ともに狭く、曲がりくねり、河床の高い天井川であった(図12左)。そのため、洪水時には堤防が決壊しやすく、大水害が約10年に1回の頻度で発生していた。そのような水害を解消するために、北流と南流の分岐地点からほぼ直線的に琵琶湖まで幅約330 m、距離約8 kmの新しい放水路が建設された(図12右)。しかし、この放水路の建設によって、以前は琵琶湖に供給されていた土砂が放水路の河床に堆積してしまい琵琶湖沿岸部まで供給されにくくなったと考えられる。これは、砂地を好むセタシジミ等の魚介類の生息場所を狭めることになった可能性がある。草

津川の放水路建設についても同様の現象が起きている可能性がある。また、河口部が広がることは水害防止の面ではよいが、流速が遅くなるため、アユなどの遡上性の魚は遡上しにくくなった可能性がある。また、河口部にあった浅く、流速が速く、底質が砂・礫という環境は、アユ等の産卵場として好適な場所である⁴⁵⁾が、そのような環境を持つ河口が放水路の建設で減少したと考えられる。②の河口部における拡幅・浚渫工事についても、放水路建設とほぼ同様の環境変化が起きていると考えられる。

③については、中下流では農業用水取水を目的とした堰堤、上流では砂防を目的とした堰堤が数多く建設されてきた。堰堤の段差が大きくなると、アユやビワマスの遡上を阻害するが、それが琵琶湖全体のアユやビワマスの再生産に対してどの程度の影響を与えるのかは不明である。また、ダムや規模の大きい堰堤は、土砂の動きを抑制するため、下流の河床粒径に影響を及ぼし^{46,47,48)}、それが底生動物や魚類の分布に影響を及ぼすことがわかっている^{49,50,51)}。また、農業用のダムや取水堰では、灌漑期に農業用水が取水されるため、堰の下流で流量が減少し、場所によっては瀬涸れが発生している。瀬涸れが発生すると干出した区間で魚介類は死滅し、

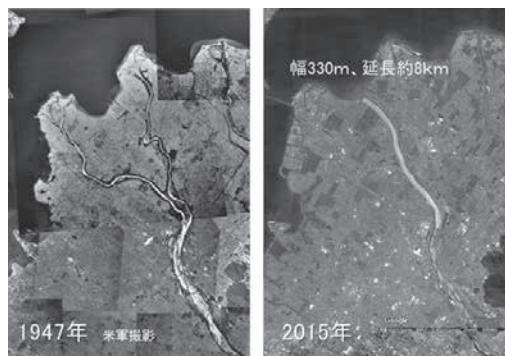


図12 野洲川放水路の建設(1971~1979年)
(出典)左図:米軍撮影写真を元に東善広
が合成。右図:google マップから引用。

下流では水があったとしても流速が弱まるためアユの遡上を阻害することわかっている⁵²⁾。

7. 現在の琵琶湖の環境問題

先に示したように琵琶湖では下水道整備等の対策によって栄養塩負荷量が減少し、その結果、植物プランクトンの現存量が減少し、富栄養化による赤潮の発生や水道水の異臭等の問題は解消されつつある。しかし、現在、琵琶湖では新たな環境問題が生じている。それは、①在来魚介類の減少（漁獲量の減少）、②南湖における水草の大量繁茂、③外来魚、外来植物の侵入、などの問題である。また、環境基準の一指標であるCODが環境基準を達成していないことも、環境行政の視点では問題となっている。しかし、CODは測定対象となっている有機物の中身が曖昧であり⁵³⁾、琵琶湖のように有機物濃度が低い湖沼では環境基準指標として適当でないこと、琵琶湖のCOD濃度は指定湖沼の中では低いレベルにあり、それによって健康被害や生態系への悪影響が生じる可能性は小さいと考えられることから、筆者は琵琶湖の環境問題としての重要性は低いと考えている。

琵琶湖の漁獲量の減少については、漁業者の生計が成り立たない状態になってきており、深刻な状態である。漁獲量の変化をみると（図13）、総漁獲量は統計を取り始めた時期から一貫して減少しており、特にシジミ等の貝類の減少が顕著である。一方、魚類の総漁獲量は1980年前後をピークにその後急激に減少している。アユは1990年頃にピークにその後減少傾向にある。漁獲量減少の原因としては、様々な要因が指摘されているが整理すると下記のような要因が挙げられる⁵⁵⁾。しかし、科学的に因果関係が証明されている要因はごく一部であり、大部分は「仮説」の状態である。

- ①外来魚による在来魚（卵、稚仔魚を含む）の捕食
- ②内湖干拓による産卵場、生息場の消失
- ③圃場整備による水田への遡上阻害、水路のコンクリート化による産卵場、生息場の減少
- ④河川・湖岸の護岸工事による産卵場、生息場の消失
- ⑤堰堤の建設（ダム、取水堰、砂防堰堤）による魚類の移動阻害、土砂の移動阻害
- ⑥水質保全対策による栄養塩、有機物の減少による魚介類のえさの減少
- ⑦河川での取水等による瀬涸れによる生息場の消失、魚類の移動阻害
- ⑧琵琶湖水位の人為操作による産卵、孵化、稚仔魚成長への悪影響

⑥については、先に示したように下水道整備等の富栄養化防止対策によって琵琶湖に流入する栄養塩負荷量が減少しており、それによって植物プランクトンや付着藻類の生産量（一次生産量）が減少している可能性が高い。そのため、それを餌とする動物プランクトンや貝類、さらに高次消費者である魚類の減少を招いている可能性がある。

南湖における水草の大量繁茂についても、漁業への悪影響（漁船の航行障害、底層の溶存酸

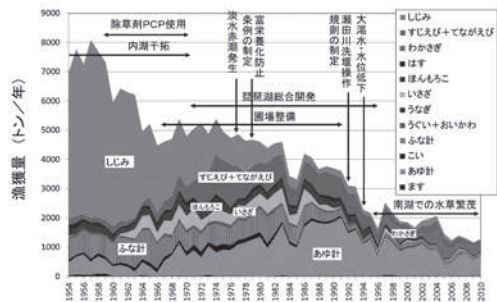


図13 琵琶湖における魚類の漁獲量の長期変化（滋賀県農林水産統計⁵⁴⁾から作図）

素低下)⁵⁶⁾、枯れた水草の悪臭や景観の問題があり、現実的な社会問題になっている。水草の大量繁茂の原因については、(a) 水位低下による沈水植物による光利用性の向上⁵⁷⁾、(b) 南湖の透明度の増加に伴う光環境の改善^{58, 59)}などが挙げられる。(a) については、1994年の大渇水による水位低下(9月15日にB.S.L.-123 cm)の影響が指摘されているが、芳賀ら⁵⁹⁾はその可能性を否定している。(b)の南湖の透明度の増加には、先に述べたように下水道整備と湖南中部下水道によるダイバージョンの効果が大きいと考えられる。

このような新たな琵琶湖の環境問題は、琵琶湖総合開発事業などの人為的な開発、自然改変の影響もあるが、これまで実施して行ってきた富栄養化防止対策の影響という面もある。漁業生産にとって栄養塩は不可欠であり、栄養塩流入量を減らせば、魚類生産量が減少することは理論的、経験的に自明と考えられる。また、底泥に栄養塩が蓄積された状態で透明度が良くなれば沈水植物が繁茂してくることも自明と考えられる。ヨーロッパの湖沼における研究でも、栄養塩負荷量の削減によって漁獲量が減少していることが報告されている⁶⁰⁾。今後は、魚類生産を考慮した栄養塩管理が必要である。また、水草管理の面では、これまでの富栄養化によって底泥に蓄積した栄養塩を除去することが必要であり、湖底耕耘などによって、湖底に蓄積した有機物の分解を促進させ、栄養塩を水中に回帰させる方法を検討する必要がある。

8. まとめ

ウログレナの赤潮が発生した1977年頃から今日までの琵琶湖水質の長期変化と気象条件変化、集水域環境の変化とそれらの関連性を検討した。富栄養化問題は下水道整備を中心とした

対策によって解消されつつあるが、その一方で、漁獲量の減少や南湖における水草の大量繁茂といった問題が起こっている。これらは、相互に関係した表裏一体の現象であり、両者を同時に解決することは難しいと考えられる。水道水源、漁業の場、観光の場、多様な生物の生息の場といった多面的利用がある中で、琵琶湖の水質、水環境の「目標」の再検討、目標を実現していくための「指標」、「方法・プロセス」の再検討が必要である。富栄養化の原因として悪者扱いされていた窒素、リン等の栄養塩は、文字通り生物にとっての栄養であり、悪者扱いするのではなく資源として有効利用、循環利用するシステムづくりが今後必要と思われる。

謝辞

68周年秋季講演会(2014年11月)では、海洋化学研究所所長の中西正巳先生のご配慮により、講演の機会を与えていただきました。琵琶湖の長期変化を考えるには「季節性の変化」を考慮しないといけないと中西先生から示唆をいただきながら、まだ十分な解析ができておらず、この点は宿題として残っています。また、今回の総合論文については宗林由樹先生にお世話になりました。ここに記して関係の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 滋賀県琵琶湖研究所(1986) 滋賀県地域環境アトラス。
- 2) 海老瀬潜一(2000) 流入河川, 宗宮功編著「琵琶湖その環境と水質形成」, p53-65。
- 3) 国土数値情報をもとに東善広が計算。
- 4) 農林水産省(2008)「販売」を軸とした米システムのあり方に関する検討会 第15回検討会(平成20年7月25日)資料5, 滋

- 賀県における生産調整の取組みについて。
- 5) 滋賀県（各年度）環境白書資料編。
 - 6) 滋賀県琵琶湖環境部（2016）平成 27 年度 滋賀県の下水道事業。
 - 7) 古米弘明, 川上智規, 酒井憲司（2012）森林の窒素飽和と流域管理, 技報堂出版。
 - 8) 手塚泰彦（1985）C: N: P ratios of seston in Lake Biwa as indicators of nutrient deficiency in phytoplankton and decomposition process of hypolimnetic particulate matter, 陸水学雑誌, 46（4）, 239-246.
 - 9) 滋賀県（各年度）滋賀県水産試験場研究報告。
 - 10) 滋賀県（2001）平成 12 年度環境省委託業務報告書 難分解性有機物浄化対策調査。
 - 11) 藤原直樹, 一瀬諭, 若林徹哉, 水嶋清嗣, 野村潔（1999）琵琶湖における COD の上昇と藍藻 *Aphanothece clathrata* の増殖について（1998 年 7 月～9 月）, 滋賀県立衛生環境センター所報, 34, 40-46.
 - 12) 焦春萌, 石川可奈子, 桐山徳也, 田中稔, 岡本高弘, 七里将一, 青木眞一, 井上栄壮, 永田貴丸（2015）強風など物理要因による琵琶湖深湖底における溶存酸素濃度の短期変化に関する研究, 陸水研究 (Limnological Study) 2, 17-25.
 - 13) 大久保卓也, 藤井滋穂, 今井章雄（2007）琵琶湖における水質動向と水環境保全の新たな方向性, 用水と廃水, 49（7）, 582-592.
 - 14) 佐藤祐一, 大久保卓也, 東善広, 水野敏明, 井上栄壮, 永田貴丸, 岡本高弘, 金再奎, 木村道徳, 石崎大介, 亀甲武志, 小松英司, 上原浩（2014）滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 10, 27-51.
 - 15) 大久保卓也, 東善広, 佐藤祐一, 辻村茂男, 金子有子, 森田尚, 大前信輔（2012）面源負荷とその削減対策に関する政策課題研究 - 面源負荷量の定量的把握と今後の面源負荷対策の方向性の検討 -, 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 7, 70-86.
 - 16) 滋賀県・京都府（2012）琵琶湖に係る湖沼水質保全計画, 第 6 期.
 - 17) 大久保卓也（1999）琵琶湖, 日本水環境学会編「日本の水環境行政」, 192-217, ぎょうせい.
 - 18) 滋賀県（2016）環境こだわり農産物認証制度のあらまし.
 - 19) 大久保卓也, 川寄悦子, 辻村茂男, 須戸幹, 柴原藤善（2009）降雨時等の非定常流入負荷の定量的把握とその琵琶湖水質への影響把握, 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告, 4, 50-64.
 - 20) 平成 26 年度（2014 年度）滋賀県統計書.
 - 21) 大久保卓也, 吉川明宏, 岡田光正, 村上昭彦（1988）下水道整備に伴う都市河川の水質・水量の変化 - 野川における事例研究 -, 下水道協会誌, 25（293）, 42-47.
 - 22) 滋賀県（2011）平成 23 年度 しがの農林水産業.
 - 23) 宇土顕彦, 竺文彦, 大久保卓也, 中村正久（2000）灌がい期の水田における水量収支と栄養塩収支. 水環境学会誌 23（5）, 298-304.
 - 24) 谷内茂雄, 田中拓弥, 中野孝教, 陀安一郎, 脇田健一, 原雄一, 和田英太郎.（2007）. 総合地球環境学研究所の琵琶湖 - 淀川水系への取り組み: 農業濁水問題を事例として. 環境科学会誌, 20（3）, 207-214.
 - 25) 中川昭一郎（2000）圃場整備と生態系保全,

- 自然環境復元協会編, 「農村ビオトープ」, 信山社サイテック.
- 26) 藤岡康弘 (2013) 琵琶湖固有 (亜) 種ホンモロコおよびニゴロブナ・ゲンゴロウブナ激減の現状と回復への課題, 魚類学雑誌, 60 (1), 57-63.
- 27) 森 淳 (2007) 水田生態系の変質と保全のための研究・技術開発, 水環境学会誌, 30, 556-560.
- 28) 琵琶湖総合開発協議会 (1997) 琵琶湖総合開発事業 25 年のあゆみ, じんのう, 大阪.
- 29) 水資源機構琵琶湖開発総合管理所ホームページ, http://www.water.go.jp/kansai/biwako/html/report/report_03.html
- 30) 山本敏哉 (2001) 琵琶湖の水位が魚類に与える影響, 京都女子大学, 自然科学論叢, 33, 7-13.
- 31) 山本敏哉 (2002) 水位調整がコイ科魚類に及ぼす影響, 遺伝, 56 (6), 42-46.
- 32) 西野麻知子編著 (2009) とりもどせ琵琶湖・淀川の原風景, サンライズ出版.
- 33) 森林立地学会編 (2012) 森のバランス 植物と土壌の相互作用, 東海大学出版会.
- 34) 岩坪五郎, 徳地直子, 仲川泰則 (1997) 降水と森林流出水の水質: 降水と流出水にともなう溶存元素収支と森林流出水質の広域の変動 (講演会特集) 森林流域における水質研究の展望), 森林立地, 39 (2), 63-71.
- 35) 藍川昌秀, 平木隆年, 駒井幸雄, 梅本諭, 徳地直子 (2009) 集水域における無機態窒素成分の流入化学形態及び流入流出の収支バランス, 大気環境学会誌, 44 (4), 202-210.
- 36) 福島慶太郎, 徳地直子 (2008) 皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響—集水域単位で林齢の異なるスギ人工林を用いて—, 日本森林学会誌, 90 (1), 6-16.
- 37) 東直子, 智和正明, 熊谷朝臣, 大槻恭一 (2008) シカ害のある流域における土壌の性質と渓流水質, 九大演報, 89, 29-38.
- 38) 福島慶太郎, 阪口翔太, 井上みずき, 藤木大介, 徳地直子, 西岡裕平, 高柳敦 (2013) 特集「シカの採食圧による植生被害防除と回復」, 日本緑化工学会誌, 39 (3), 360-367.
- 39) 古澤仁美, 宮西裕美, 金子真司, 日野輝明 (2003) ニホンジカの採食によって林床植生の劣化した針広混交林でのリターおよび土壌の移動, 日本林學會誌, 85 (4), 318-325.
- 40) 若原妙子, 石川芳治, 白木克繁, 戸田浩人, 宮貴大, 片岡史子, 内山佳美 (2008) ブナ林の林床植生衰退地におけるリター堆積量と土壌侵食量の季節変化—丹沢山地堂平地区のシカによる影響—, 日本森林学会誌, 90 (6), 378-385.
- 41) 安田勇次 (2010) 田上山における山腹工の施工による植生の復元と土砂流出抑制, 砂防学会誌, 63 (4), 44-50.
- 42) 鈴木崇正, 角哲也, 竹門康弘, 中島佳奈 (2011) 土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測, 京都大学防災研究所年報, 54, B, 711-718.
- 43) 林一正 (1962) 瀬田川におけるセタシジミの生息環境, 滋賀大学学芸学部紀要, 自然科学, 12, 51-56.
- 44) 国土交通省琵琶湖河川事務所ホームページ <http://www.kkr.mlit.go.jp/biwako/>
- 45) 西田睦 (1978) びわ湖のコアユの産卵生態, 日水誌, 44, 577-585.
- 46) 小林草平, 中西哲, 藤原正季, 矢島良紀,

- 赤松史一, 天野邦彦 (2009) 山地河道のダム下流における河床露盤化と河床材料特性, 河川技術論文集, 15, 453-458.
- 47) 坊野聡子, 清水康行, 黒木幹男, 藤田睦博, 吉田義一 (2000) ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究, 土木学会論文集, (656), 61-72.
- 48) 吉良八郎 (1972) ダム築造に伴う河床変動と河床砂れき特性の変化について, 新砂防, 24 (3), 14-23.
- 49) 小林草平, 竹門康弘 (2011) 土砂量と河床材粒径に着目した生息場評価, 京都大学防災研究所年報, 55, 537-545.
- 50) 谷田一三, 竹門康弘 (1999) ダムが河川の底生動物へ与える影響, 応用生態工学, 2 (2), 153-164.
- 51) 森誠一 (1999) ダム構造物の影響 ダム構造物と魚類の生活, 応用生態工学, 2 (2), 165-177.
- 52) 大久保卓也, 未発表資料.
- 53) 大森正男 (1979) COD 測定に関する 2, 3 の考察, 環境技術, 8 (6), 27-40.
- 54) 近畿農政局滋賀農政事務所 (各年) 滋賀県農林水産統計.
- 55) 大久保卓也 (2015) 琵琶湖の水質変化と漁獲量の変動, 花里孝幸, 山本民次編著, 「海と湖の貧栄養化問題」, 29-49, 地人書院, 東京.
- 56) 芳賀裕樹, 芦谷美奈子, 大塚泰介, 松田征也, 辻彰洋, 馬場浩一, 山根猛 (2006) 琵琶湖南湖における湖底直上の溶存酸素濃度と沈水植物群落現存量の関係について, 陸水学雑誌, 67 (1), 23-27.
- 57) 今本博臣, 及川拓治, 大村朋広, 尾田昌紀, 鷺谷いづみ (2006) 琵琶湖に生育する沈水植物の1997年から2003年まで6年間の変化, 応用生態工学, 8 (2), 121-132.
- 58) 芳賀裕樹, 大塚泰介, 松田征也, 芦谷美奈子 (2006) 2002年夏の琵琶湖南湖における沈水植物の現存量と種組成の場所による違い, 陸水学雑誌, 67 (2), 69-79.
- 59) 芳賀裕樹, 大塚泰介. (2008) 琵琶湖南湖の沈水植物の分布拡大はカタストロフィックシフトで説明可能か?, 陸水学雑誌, 69 (2), 133-141.
- 60) Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J. P., Havens, K. E., Anneville, O., Carvalho, L., ... & Gerdeaux, D. (2005) Lake responses to reduced nutrient loading—an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies, *Freshwater Biology*, 50 (10), 1747-1771.