

4章 水質問題とプランクトンの変化が及ぼす生態系への影響

4-3 沈水植物の除去によるアオコ発生抑制効果調査

廣瀬佳則・七里将一・藤原直樹・一瀬諭・古田世子・田中稔・山中直

Abstract:

本研究では、沈水植物の除去による湖水の滞留の改善およびアオコの発生抑制効果について明らかにすることを目的として南湖沿岸の閉鎖性水域を対象とした現場実証実験を行った。2011年から2013年にかけて、沈水植物が繁茂し、閉鎖的となる水域をモデル水域とし、本水域の水質および植物プランクトンの変遷についてモニタリング調査を行った。その結果、閉鎖的水域において、沈水植物の除去による湖流の回復はアオコの発生抑制に関して、有効な手段であることが明らかとなった。

1. 研究の背景と目的

1-1 南湖における生態系保全への脅威と問題点

琵琶湖では、1983年9月に南湖湖岸で初めてアナベナ属による水の華（以下「アオコ」という）が確認（滋賀県立衛生環境センター、1988）されて以来、夏季から秋季にかけてほぼ毎年のようにアオコが発生している。アオコとは、アナベナ属やミクロキスティス属、オンラトリア属などの藍藻類の植物プランクトンが大量に増殖した際に、湖面が緑色のペンキを流したようになることをいい、富栄養化した湖沼でみられる現象である。このアオコの発生により、湖の景観が損なわれるだけでなく、悪臭の原因になることも多い。さらに悪いことに、アオコ形成種の中には、ミクロキスティンと呼ばれる毒性物質を生成する種類もあり、海外では家畜等の死亡被害が報告されている。また、取水源として琵琶湖を利用している水道事業所では、異臭障害や水処理障害の原因にもなっている。

1-2 既存研究から見た科学的な研究の重要性などについての位置づけ

滋賀県では、アオコが確認されて以来、アオコ発生状況把握のため、夏季から秋季にかけて県関係機関および関係市によるアオコ監視パトロールを実施している。この結果から、アオコの発生しやすい水域をモデル水域として、栄養素類や底質、動・植物プランクトン、沈水植物、流向流速、気象等の調査や河川からの流入負荷量調査等を実施し、アオコの発生には栄養塩濃度と滞留が大きく関係していることを明らかにした（一瀬ほか、2005）。また、隔離水塊を用いた湖水の混合実験では、湖水が日中の強い日差しのために水温成層シタ方から夜間にかけて鉛直混合する日成層がアオコ形成種の生長にとって重要であることを報告している（中野ほか、1997）。これらの結果からアオコの発生抑制には湖流の妨げとなる沈水植物の一部除去による水交換等の必要性が考えられた。

1-3 研究の目的

アオコは、2002年までは、赤野井湾内や大津港内の閉鎖的水域での発生がほとんどであったが、近年では、これまでアオコが発生しなかった湖岸部の入り江でも発生が確認されるようになってきている（一瀬ほか、2005）。これらの場所は、河川からの流入や底層からの溶出もあり、栄養塩濃度が比較的高い地点であるとともに、夏場には沈水植物の繁茂により一時的に閉鎖的な水域となっていることが報告されている（岡本ほか、2004、一瀬ほか、2005）。そのため、本研究では、水草除去による湖水の滞留の改善およびアオコの発生抑制について検討するためのモニタリング調査を実施した。

2. 研究の方法

2-1 アオコの発生調査

琵琶湖におけるアオコ発生調査は、滋賀県琵琶湖環境部琵琶湖政策課および当センターを中心に関係市が連携し、沿岸域のパトロールを定期的に行っているデータを活用した（一瀬ほか、2013）。

2-2 植物プランクトンの連続調査

(1) 調査地点および調査期間

調査地点は、2002年に初めてアオコが確認された南湖西岸部の湖岸にあたる大津市際川の棧橋とした（図1）。調査期間は2011年から2013年のアオコが確認される6月から10月であり、2011年と2012年に関しては、毎週調査を実施しそれぞれ14回、15回のサンプリングを行った。2013年に関しては隔週で調査を行い、計8回のサンプリングを行った。

(2) 調査方法

調査地点において、表層～水深10cmの湖水をバケツ等を使用して採取した。その後、検体1mLを界線入りプランクトン計数板に採り、生物顕微鏡を用いて植物プランクトンの同定および計数を実施した。ミクロキスティス属の種は直径100 μ mを1群体として計数し、アナベナ属は、群体が直線状のものは長さ約200 μ mを1群体、螺旋

状のものは1巻きを1群体として計数を行った。超大型種である *Oscillatoria kawamurae* は長さ1mmを1群体として計数し、それぞれの総細胞数および総体積数に換算した。各種プランクトンの体積を求める換算式および各種の総体積量については、一瀬らの方法に準拠した（一瀬ほか、1995）。

各年度の沈水植物の除去時期や場所は3-6節に示したとおりである。（2011年：7, 8月）（2012年：2, 4, 5, 6月, 8月下旬～9月上旬）（2013年：2月, 7月下旬～8月上旬）

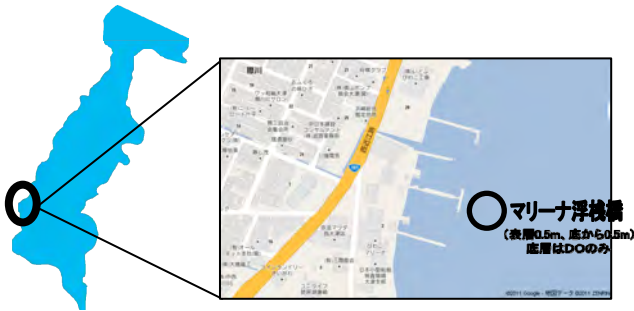


図1. 調査地点

2-3 水質の連続調査

本調査地点および流入河川について、植物プランクトンのサンプリング時に合わせて、表層から50cmの湖水を採水し、水質調査〔総リン(T-P)、総窒素(T-N)等〕を実施した。また、沖帯のデータとしては、琵琶湖の定期調査の結果を使用した（滋賀県、2012, 2013）。

3. 結果

3-1 アオコの発生調査

1983年から2013年までのアオコ発生の経年変化を図2に示した。2011年のアオコの発生は、5日間3水域の発生と比較的小規模であり、本調査地点である際川地先では、ミクロキスティス属を主体とする1日間（7月29日）のアオコが確認された。発見されたアオコからは、1mLあたり8,800群体のミクロキスティス属が計数された。

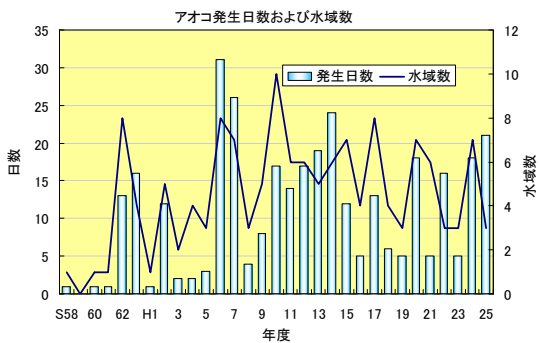


図2. 琵琶湖におけるアオコの発生日数および水域数

2012年のアオコは、18日間7水域で確認され、際川地先での発生は8月31日から9月3日にかけての4日間と9月7日の計5日間であった。発生したアオコはアナバネ属とミクロキスティス属が主体であった。特に、9月7日の調査ではアオコの密度が高く、16,000群体/mLのアナバネ属と4,500群体/mLのミクロキスティス属が計数された。

2013年のアオコ監視パトロールでは、21日間3水域のアオコが確認されたが、際川地先での発生は認められなかった。

3-2 植物プランクトンの連続調査

(1) 2011年の植物プランクトンの変動について

2011年度は棧橋部分で毎週1回の植物プランクトン連続調査を実施し、その結果を図3-A、4-Aに示した。6月中旬から7月中旬にかけて、*Scenedesmus* sp. や *Coelastrum cambricum* 等の緑藻類やアオコ形成種である *Aphanizomenon flos-aquae* 等の藍藻類が計数されたが、アオコの発生には至らなかった。しかし、7月下旬からはアオコ形成種である *Microcystis novacekii* や *Aphanizomenon flos-aquae* の増殖が確認されるようになり、際川地先で7月29日に、10m×50m幅でアオコが確認された。しかし、9月2日から4日にかけて通過した台風12号の影響により、アオコ形成種は減少し、緑藻類や珪藻類の増加が確認されるようになった。

(2) 2012年の植物プランクトンの変動について

2011年の結果を踏まえ、沈水植物の除去時期や除去量を変化させ、2011年と同様の植物プランクトン連続調査を行った。その結果を図3-B、4-Bに示した。6月から8月にかけて緑藻類の *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* や *Closterium aciculare* var. *subpronum*、珪藻類の *Aulacoseira granulata* などの種類が多く計数され、アオコ形成種はほとんど確認されなかった。しかし、8月中旬からアオコ形成種であるミクロキスティス属（主に *Microcystis aeruginosa*）やアナバネ属（主に *Anabaena affinis*, *Anabaena* sp.）の増殖が確認されはじめ、8月31日には際川地先で40m×10m幅のアオコが発生した。アオコ形成種は、その後も増加を続け、水温が下がり植物プランクトン全体の総数が少なくなるとともに減少が認められた。

(3) 2013年の植物プランクトンの変動について

2013年は、隔週で植物プランクトンの調査を実施し、その結果を図3-C、4-Cに示した。6月から9月にかけては、アオコ形成種である藍藻類と緑藻類を主体としたプランクトン相であったが、アオコ形成種が大幅に増殖す

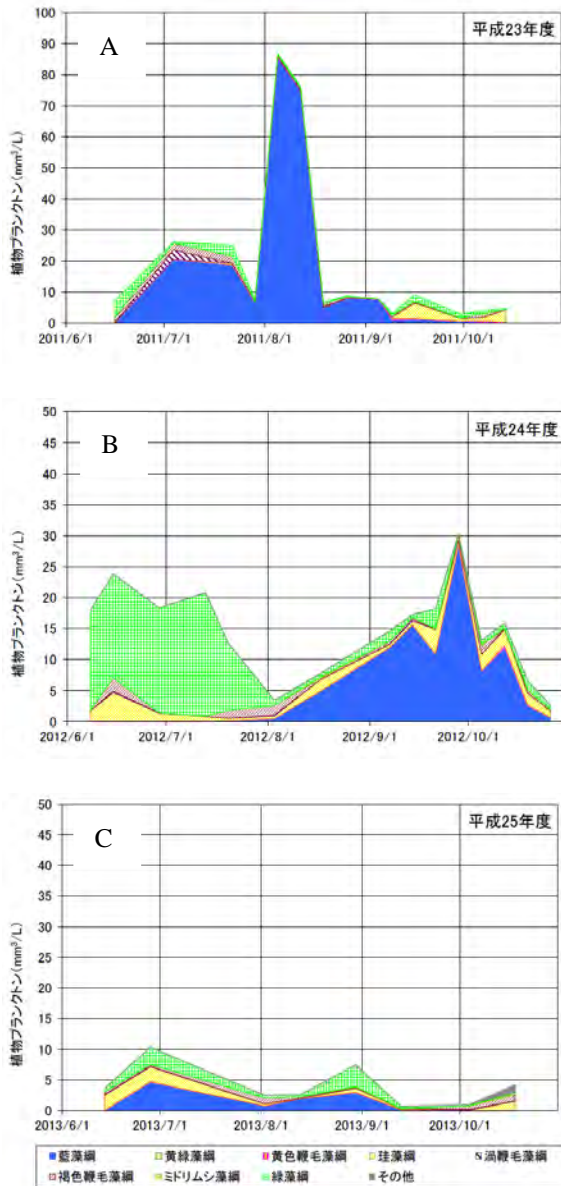


図3. 植物プランクトン総細胞容積量の変化

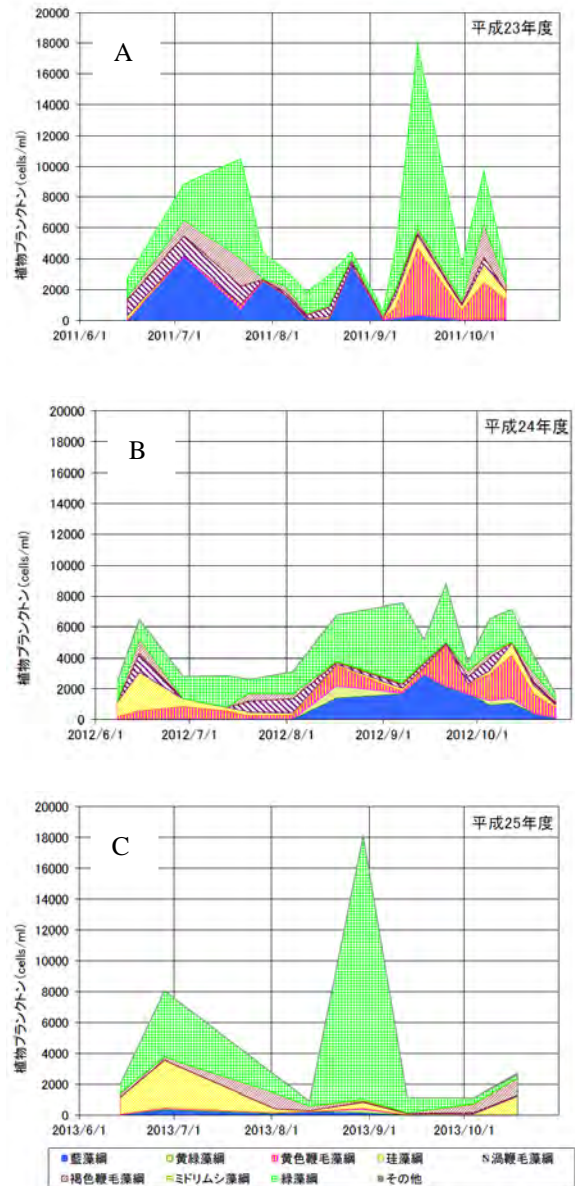


図4. 植物プランクトン各網の変化

ることもなく、アオコの発生も確認されなかった。その後、9月14日から15日にかけて風雨をともなった台風18号の通過があり、藍藻類は消滅し、緑藻類や渦鞭毛藻類、珪藻類が増加した。

4. 考察

4-1 科学的視点からの考察

(1) 2011年度の「アオコ」と水質ならびに気象の変動について

2011年度の沈水植物の除去は、夏場のみの実施であり、湾内部まで行うことができなかった(3-6節図4参照)。本調査地点および流入河川、沖帯の総リン(T-P)および総窒素(T-N)の濃度変動をそれぞれ図5、6に示した。

また、2011年度の流域降水量の日平均値の変動を図7-Aに示した。2011年の特徴的な現象として①7月下旬から8月中旬にかけてアオコ形成種が異常発生し、9月上旬に消滅したこと、②7月下旬から8月中旬にかけて栄養塩濃度が増加し、9月上旬に急激に減少したこと、③台風12号の影響により9月上旬の降水量(大津では90mm、流域では213mm)が多かったこと(彦根地方気象台, 2011)、④洗堰放流量の増加により9月上旬に沖帯からの湖流が回復したこと(3-6節)が挙げられた。栄養塩濃度の推移から7月、8月の沈水植物の除去では閉鎖性が改善されておらず、本調査地点は閉鎖性水域に河川から供給された栄養塩(底泥から供給された栄養塩も含まれる可能性)を維持したままであったことが認められた。

アオコ形成種が増加した時期と栄養塩の増加時期は一致し、高濃度の栄養塩類と湖水の停滞がアオコ形成種の増殖につながったと考えられた。

9月上旬に台風12号が通過した後、栄養塩濃度の急激な低下と、調査地点のプランクトン相の変化が確認された。これは、台風によって沖帯の湖水が本水域に大量に流入したためと考えられた。

2011年は、除去が十分ではなく、アオコが発生したが、今後、本閉鎖性水域周辺の水草を大規模に除去することで、沖帯からの湖水を導き入れることができれば、水質改善やアオコの発生抑制ができると考えられた。

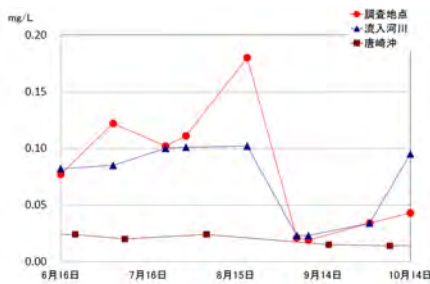


図5. 2011年の総リン(T-P)の濃度変化

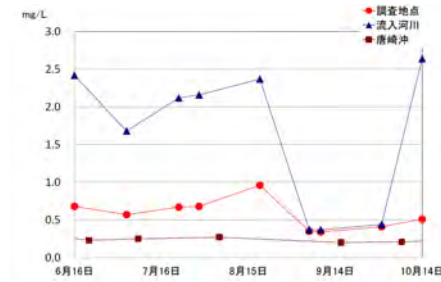


図6. 2011年の総窒素(T-N)の濃度変化

(2) 2012年のアオコと水質ならびに気象の変動について

2012年の沈水植物の除去は、除去を冬場から定期的に行うことで、湾内部まで実施することができた(3-6節 図4参照)。本調査地点および流入河川、沖帯の総リン(T-P)および総窒素(T-N)の濃度変動をそれぞれ図8、9に示した。また、2012年の流域降水量の日平均値の変動を図7-Bに示した。2012年の特徴的な現象として①8月中旬からアオコ形成種が急激に増加し、調査終了時まで消滅しなかったこと、②2月から5月の除去効果および沈水植物の全般的な生長不良により2011年より低濃度であった栄養塩濃度は8月中旬から急激に増加し、9月末にやや低下したこと、③7月中旬から8月上旬にかけて降雨が少なかったこと、④8月中旬に集中豪雨が見られたこと(8月13日から8月14日にかけて大津では99mm、流域では72.4mmを記録)(彦根地方气象台, 2012) ⑤8月までは停滞水域となっていたこと(3-6節)、⑥8

月下旬の沈水植物除去前後で流向が逆転したこと(3-6節)が挙げられた。2012年は8月上旬まで流入河川から供給される栄養塩が本調査水域に蓄積されておらず、沖帯からの湖水の流入のため、栄養塩濃度の上昇やアオコ形成種の増加が抑制されていたと考えられた。しかし、晴天が続いたこと等により8月から9月にかけて本水域内の湖水が停滞し、このことが栄養塩濃度の急激な増加およびアオコ発生を引き起こす結果につながったと考えられた。また、8月中旬にまとまった降雨があったにも関わらず、栄養塩濃度は低下せず、一度停滞水域となると湖水の交換は難しいことが示唆された。8月下旬の沈水植物除去前後で流向が逆転したことから本水域の湖水に動きがあったことが予想されたが、アオコ形成種の増加は続き、栄養塩濃度も高い状態を維持していた。

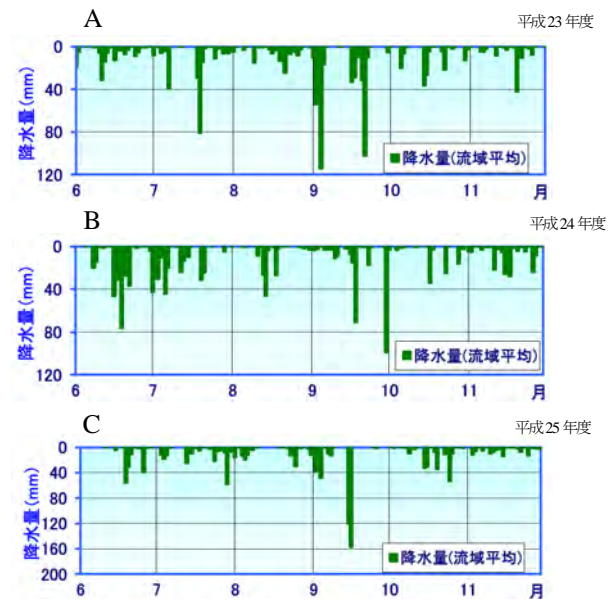


図7. 流域降水量の日平均値の変動 (国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所, 2011, 2012, 2013)

しかし、8月までアオコ形成種が確認されなかったことから沈水植物の除去による一定のアオコ発生抑制効果が認められた。8月中旬以降は、南湖全域で水塊が滞留し、沖帯でもアオコ形成種の増加が確認され、水草除去によって沖帯との水の交換を促すだけではアオコ発生を抑制できない場合があり、南湖全体でアオコが発生しないような水質管理方法を同時に検討していく必要があると考えられた。

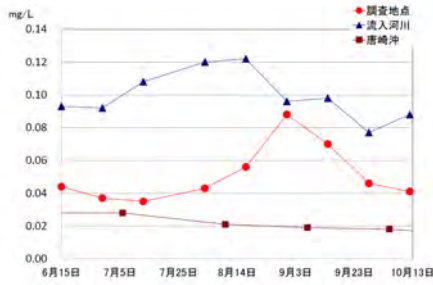


図 8. 2012 年の総リン(T-P)の濃度変化

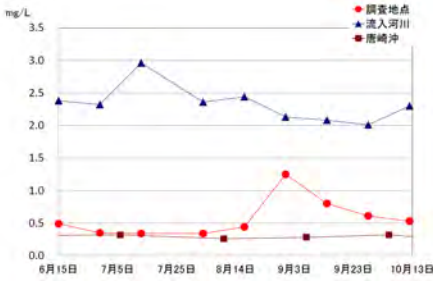


図 9. 2012 年の総窒素(T-N)の濃度変化

(3) 2013 年のアオコと水質ならびに気象の変動について

2013 年の沈水植物の除去は、2012 年と同様の場所で 2 月、7 月下旬から 8 月上旬に実施した。本調査地点および流入河川、沖帯の総リン (T-P) および総窒素 (T-N) の濃度変動をそれぞれ図 10、11 に示した。また、2013 年の流域降水量の日平均値の変動を図 7-C に示した。2013 年の特徴的な現象として①アオコ形成種が大幅に増殖することもなく、アオコの発生も確認されなかったこと、②調査開始時から T-P の濃度が増加し、9 月中旬に急激に減少したこと、③8 月下旬から 9 月上旬にかけて T-N の濃度が増加し、9 月中旬に急激に減少したこと、④台風 18 号の影響により 9 月中旬の降水量が多かったこと (彦根地方气象台, 2013) が挙げられた。2013 年は調査期間中、流入河川からの栄養塩供給が行われているにも関わらず 2011 年、2012 年でみられた本水域の栄養塩濃度が急激に増加する現象は確認されなかった。また、2011 年と 2012 年の調査では栄養塩の濃度変化とアオコ形成種の増殖に関係が見られたが、2013 年の調査では栄養塩の濃度が比較的高いにも関わらず、アオコ形成種の大幅な増加は認められなかった。これらのことから、2013 年に関しては、本水域は閉鎖的水域となることなく沖帯からの湖水の流入が継続的に行われていたことが示唆された。また、9 月上旬に見られたプランクトン相の変化および栄養塩濃度の急激な低下は台風 18 号によるものと考えられた。

2013 年は、沈水植物の除去により本水域の閉鎖性が解消され、日成層等アオコの増殖に優位とされる現象が起

こらなかったため、アオコ形成種が大幅に増加しなかったと考えられた。

(4) 沈水植物の除去によるアオコ発生抑制効果について

以上の調査結果から、沈水植物の除去によって沖帯との水の交換を促進すれば、閉鎖性水域でのアオコ発生を抑制できることが確認できた。また、アオコ形成種は夏季には短期間に増殖することも確認され、水草繁茂等によって流れが停滞し閉鎖的な水域が形成されるとアオコが短期間に発生する可能性が示唆された。



図 10. 2013 年の総リン(T-P)の濃度変化



図 11. 2013 年の総窒素(T-N)の濃度変化

4-2 政策的視点からの提言に向けて

閉鎖的水域における水質改善およびアオコの発生抑制に関して、沈水植物の除去による湖流の回復は有効な手段である。今後は、水草の大量繁茂によって閉鎖性水域を作らないように、継続的に水草や水質のモニタリングをしながら除去を実施していくことが望まれる。

引用文献

- 滋賀県立衛生環境センター (1988) 琵琶湖における「水の華」に関する調査報告書 (昭和 59 年～61 年) . 魚類学雑誌 60(1) :57-63
- 一瀬 諭・吉田美紀・若林徹哉・藤原直樹・津田泰三・岡本高弘・原 良平・芳賀裕樹 (2005) 琵琶湖沿岸帯水質形成機構調査報告 - 沈水植物がプランクトンや水質に及ぼす影響について - . 滋賀県琵琶湖環境科学センター試験研究報告 (平成 16 年度) :114-126
- 中野伸一・中島拓男・熊谷道夫・焦 春萌・早川和秀・Jean-Jaques Frenette・辻村茂男 (1997) アオコ発生機構解明に関連した隔離水塊実験. 滋賀県琵琶湖研究所所報(16) :12-18

- 一瀬 諭・面田美紀・若林徹哉・原 良平・藤原直樹・芳賀裕樹 (2005) 琵琶湖南湖沿岸帯におけるカビ臭アオコ発生機構の検討 - 生物調査 -. 日本陸水学会要旨(70):105
- 岡本高弘・一瀬 諭・藤原直樹・津田泰三・若林徹哉・土肥 誠・芳賀裕樹 (2004) 琵琶湖南湖沿岸帯沈水植物(水草)帯における水質形成機構に関する調査結果について. 滋賀県衛生環境センター所報(39):82-87
- 一瀬 諭・廣瀬佳則・古田世子・藤原直樹・池田将平・山中 直 (2013) 生物環境のモニタリング - 平成 23~24 年度(2011~2012) 琵琶湖におけるアオコ調査結果について -. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書(8):44-49
- 一瀬 諭・若林徹哉・松岡泰倫・山中 直・藤原直樹・田中勝美 (1995) 琵琶湖の植物プランクトンの形態に基づく生物量の簡易推定について. 滋賀県衛生環境センター所報(30):27-35
- 彦根地方気象台 (2011) 滋賀県の気象 平成23年 (2011年) 年報
- 彦根地方気象台 (2012) 滋賀県の気象 平成24年 (2012年) 年報
- 彦根地方気象台 (2013) 滋賀県の気象 平成25年 (2013年) 9月 月報
- 国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所 (2011年、2012年、2013年) 琵琶湖水位データ
- <http://www.biwakokasen.go.jp/graph2/csvlist.html>
- 滋賀県(2012)滋賀の環境 2012 (平成 24 年版環境白書) -資料編-
- 滋賀県(2013)滋賀の環境 2013 (平成 25 年版環境白書) -資料編-