

## 5. 政策課題研究 4

# 内部負荷による湖内水質変動の解析および生態系保全に向けた水質管理に関する政策課題研究

## —琵琶湖水中のリンと窒素の長期変動解析—

早川和秀・辻村茂男<sup>1)</sup>・石川俊之<sup>2)</sup>・石川可奈子・焦 春萌

### 要約

琵琶湖の富栄養化をリンや窒素のデータで俯瞰することを目的として、過去 40 年間の複数の定期水質調査データをまとめて統合して解析を行った。その結果、琵琶湖では 1970 年代に全リン濃度のピークがあり、全リンの濃度変動が富栄養化の進行と衰退を示すものと考えられた。また、琵琶湖水質定期調査データにおける沖帯と沿岸帯の区別を試みたところ、北湖では湖底深 20 m 付近がいわゆる沿岸域と沖帯の境目と考えられた。沿岸帯では、懸濁粒子が多く存在することが特徴であったが、沿岸帯が長期で富栄養化しているというデータは得られなかった。

沈水植物ならびに糸状藻類に含まれる生元素量を測定し、水草現存量や刈り取り量に含まれる窒素・リンについて明らかにした。

### 1. はじめに

「内部負荷による湖内水質変動の解析および生態系保全に向けた水質管理に関する政策課題研究」では、琵琶湖およびその集水域の水質やプランクトン、底質その他のデータを集め、琵琶湖環境の長期変遷や生態系構造の解析を通じて、湖の水質や内部負荷にかかわる課題の整理を行ってきた。本稿では、有用な知見が得られたいくつかの解析結果を報告する。第 2 章ではリンと窒素の長期変遷について報告する。過去の変遷を振り返り、富栄養化の前の水準を知ることで将来の水質予測に役立つものと思われる。第 3 章では沖帯と沿岸帯の視点からこれまでの琵琶湖水質定期調査を見直す解析結果を報告する。水質定期調査データの新たな視点を提案している。第 4 章では、生態系構造の解析の関連で検討した水草の生元素量について報告する。今後の水草刈り取り等で役立つことを期待する。本稿での報告は紙面の都合上、概略的な部分もあり、詳細には本年度に作成される総合報告書や他の報告（早川ら、2011）を参照されたい。

### 2. 琵琶湖のリンと窒素の長期変遷解析

#### 2.1 章のはじめに

琵琶湖の水質で過去 30 年間に最も課題とされていたのは富栄養化の問題であった。琵琶湖の富栄養化は、1970 年頃より研究者に指摘されるようになった（例え

ば、根来、1969）が、その後、淡水赤潮やアオコの発生によって決定付けられた。以来、琵琶湖における富栄養化を抑制するため、条例の施行をはじめ様々な対策がとられてきた。したがって、琵琶湖の富栄養化の変遷を振り返ることは、琵琶湖の歴史を振り返るに等しい重要な作業である。

変遷の解析の前に、富栄養化について確認しておく。富栄養化は水域内の栄養塩増加を起点として起こる植物生産の増加と水域生態系の変化である（日本水質汚濁研究協会、1982）。したがって、迷惑なプランクトンの発生を抑えるために、栄養塩を減らすことやモニタリングが行われてきた。ただし、話がややこしいのは、富栄養化という言葉が水域内の植物生産の増加と水域生態系の変化を示すものでありながら、富栄養化によって起こる水域の水質や底質の変化をも包含している（日本水質汚濁研究協会、1982）点にある。富栄養化の対策とは、水域内の迷惑なプランクトンの発生を減らすとともに、水質の改善も含むと認識されてきた。

近年、琵琶湖水中のリンや窒素濃度の減少が指摘されるようになり（例えば、津田、2006）、富栄養化が抑制されつつあると認識されている（琵琶湖総合保全学術委員会、2010）。しかし一方で、改善が一部の水質項目に限られることから富栄養化の抑制を疑問視する声もある。そうした声は、富栄養化の改善には各水質

1) 京都学園大学バイオ環境学部 2) 滋賀大学教育学部

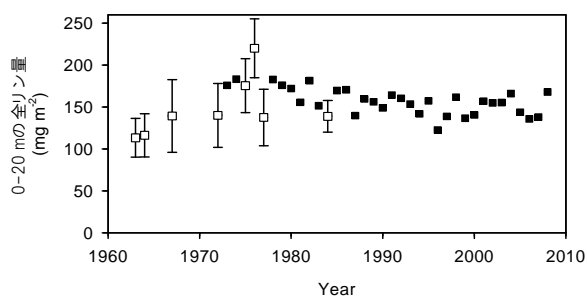


図1 1960年代から2000年代前半にかけて北湖の安曇川-彦根ラインから南比良沖中央における全リンの0-20m積算年平均値または年平均推定値

項目の改善も含まれることを前提としているためといえる。富栄養化の定義に立ちかえれば、富栄養化の動静は水域内の迷惑な生物や植物プランクトンの現存量の増減と原因となるリンや窒素の増減で推し量るべきである。その上で、他の水質項目と照らし合わせて、水質汚濁を議論すべきであろう。

本稿では琵琶湖の富栄養化の変遷を考えるにあたり、リンや窒素に着目した。湖水のリンや窒素の環境基準は、富栄養化の状態を把握するのによい指標である。しかし、環境基準のもととなった湖沼の富栄養化度の類型化は富栄養化段階の異なる湖沼におけるリンや窒素とクロロフィル a 量との比較により求められた比例関係に基づいている（日本水質汚濁研究協会、1982）。指数的に濃度の異なる湖沼間で見出された比例関係が、各々の湖沼内の濃度変化ではまるかば検討の余地がある。琵琶湖をはじめ多くの湖沼で見られる富栄養化は、リンや窒素濃度が10倍も変化した事例はあまりない。また、湖沼やその流域での地域特性、例えば湖の深さや流域の面積、土地利用性によって、富栄養化が収束する水準も異なってくると思われる。環境基準や類型あてはめのリンや窒素の基準だけでなく、各々の湖沼の地域的な特性も考慮した上で富栄養化の改善判断を行う必要がある（Peterson et al, 1995）。それゆえ、それぞれの湖沼における富栄養化以前や以後のリンや窒素濃度の水準を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、様々な定期水質調査データを集約して統合してリンや窒素の過去約40年間の長期変遷について解析することを試みた。詳細については、別に報告するとして、本報告では解析結果の概要を紹介する。

## 2.2 資料と方法

解析に用いた定期観測資料には、滋賀県・国土交通省（以前は建設省）・（独）水資源機構（以前は水資源

開発公団）（以下「滋賀県・国交省」という）による琵琶湖水質定期観測（滋賀県ほか、1972-2009）、滋賀県水産試験場の琵琶湖定期観測（滋賀県水産試験場、1933-2010, 1950-2010）を用いた。さらに、過去の水質調査結果として、1962~1964年の琵琶湖生物資源調査以降で断続的に1982年まで水質調査を行った京都大学理学部藤永研究室の調査結果（藤永・堀、1982）と、1970年から1980年頃にかけて断続的に琵琶湖の水質調査を実施して大学紀要に報告した滋賀大学教育学部堀研究室の調査結果（板坂ら、1971, 1972, 1973, 1974, 1975）（川嶋、976, 1977）も用いた。

データは、全リン、硝酸態窒素、プランクトン沈殿量を用いた。測定頻度はそれぞれの定期観測によるが、月1回ないし2回の調査を行い、水質項目は各水深で採取された試料より測定がなされた。

リンの解析には、全リンを用いた。各調査における全リンの測定方法は、ろ過前の試料を酸加熱分解してからリン酸イオンを測定する点と、リン酸イオンの測定法には水中のリン酸をリンモリブデン酸錯体にして発色定量するモリブデン青法を用いる点で共通するが、使う試薬や抽出などの点では異なっていた。しかし、解析の結果、長期変遷の概要を知る程度には、各調査での系統的な誤差はないと判断された。

北湖における全リンの経年的な変動解析には、鉛直の偏在分布を避けるため0~20m深の間で、数点の深度観測値があるものを積算した。過去の測定で深度方向にかけ離れた値を報告している場合は、測定誤差が大きいとしてデータを棄却した。また、長期変遷における季節による増減を相殺するため4月~3月の年度平均値を求めることとして、年間10か月以上の観測値がある場合を年度平均値として算出した。1973年以前および10か月未満の観測値の年度では、実測値より年度平均値を推定した。推定方法は1979~1996年にお

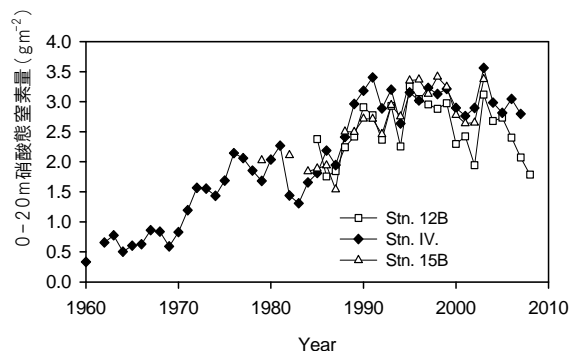


図2 1960-2008年にかけて北湖のStn. IV（水産試験場観測）、Stn. 12B, 15B（滋賀県・国交省観測）における硝酸態窒素の0-20m積算年平均値 または年平均推定値

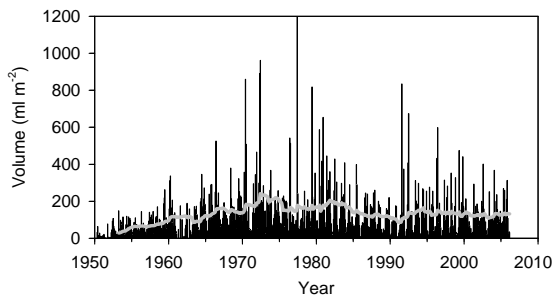


図3 北湖 Stn. III, IVにおけるプランクトン沈殿量平均値の推移。滋賀県水産試験場データより作成。灰色線は3か年移動平均。

る滋賀県・国交省の12B, 15B, 17B地点の全リンデータより、年度平均値と10か月未満(3~8か月)の平均値との比例関係を求めておき、その比例関係を過去のデータにおいて観測のある月にあてはめることで過去の年度平均値を推定した。年度平均値と10か月未満(3~8か月)平均値の間の回帰分析は、決定係数  $r^2$  で0.61~0.96 ( $n=40$ )であり、信頼係数95%以上の統計的有意な場合のみを取り扱った。

窒素の解析には、古くから多くの機関で測定値がある硝酸態窒素を用いた。硝酸イオンの測定は、各機関で測定方法が異なっていたが、分散分析の結果、京都大学のデータは他の機関と系統的な誤差が見られたので、解析からはずした。

硝酸態窒素は、滋賀県水産試験場と滋賀県・国交省の観測には月毎のデータが揃っている。解析にはそれらのデータを用い、0~20 m深間の観測値を鉛直に積算した値を計算し、さらに年度平均値を求めた。

プランクトン沈殿量は、水産試験場で月1回、95  $\mu\text{m}$ メッシュサイズのプランクトンネットを用いて0~10 mと10~20 mを鉛直引きして採取された粒子態を、10%ホルマリンで固定して24時間静沈させた後の沈殿量が測定された(滋賀県水産試験場、1950~2010)。

## 2.3 結果と考察

北湖における全リンの各機関で測定した値を並べると、1960年代は実測値が少なく、1970年代は実測値が多くなったがデータにばらつきが見られる。データのばらつきが測定誤差か季節的な変動かは特定できない。年度平均値を推定した結果、長期変遷が明確になった(図1)。1963年は  $113 \pm 23 \text{ mgm}^{-2}$  (0~20 m積算値、濃度  $5.7 \pm 1.2 \mu\text{g l}^{-1}$ )と推定され、最も高い推定値は1976年の  $220 \pm 35 \text{ mgm}^{-2}$  (0~20 m積算値、濃度  $11.0 \pm 1.8 \mu\text{g l}^{-1}$ )であり、1963年のほぼ2倍の濃度になった。1970年代は、複数の測定機関で全リンが  $300 \text{ mgm}^{-2}$ を越える報告が数回あったが、1980年以降で  $300 \text{ mgm}^{-2}$

$\text{mgm}^{-2}$ を越えることは、1984年に今津沖中央において1回のみであった。よって1970年代に全リン濃度が高かったことに疑いの余地はない。最近では2005年で  $135 \text{ mgm}^{-2}$ で、1960年代の1.2倍程度まで濃度が下がってきた。

1960年代より観測が継続されている北湖の硝酸態窒素濃度は、1970、1980年代に増加がみられ、最近の値は1960年代の5倍近くになっていた(図2)。ただし、観測点(観測機関)により変動傾向は似ているものの絶対値にはばらつきも見られた。最近の滋賀県・国交省の定期調査12B地点では減少傾向も見られ、1980年代の水準にまで下がっていた。

推定されたリンの長期変遷と他の富栄養化にかかるデータとの整合性を検討した。1979年以降の滋賀県・国交省の琵琶湖水質定期調査においては、クロロフィルaと全リン濃度は経年的に減少傾向にあり(例えば、(津田、2006))、琵琶湖の植物プランクトンの生長がリン律速であることを示している。クロロフィルa濃度の測定がない古い時代の湖内生産を検討するため、滋賀県水産試験場の琵琶湖定期観測で観測されたプランクトン沈殿量の値を引用した(図3)。95  $\mu\text{m}$ のメッシュサイズで得られるプランクトン沈殿量は、動物プランクトンや大型の植物プランクトンが捕獲され、網目を抜けるナノプランクトンやピコプランクトンが含まれない大型のプランクトンサイズのみである問題点を抱えるが、プランクトンの現存量を見る上では参考となる。プランクトン沈殿量では、1975年頃に最大となる変動が見られた。これは全リン濃度の経年変動に類似している。北湖の富栄養化が表面化したのは1977年の淡水赤潮の大発生だが、1972年頃から局所的に淡水赤潮がみられたなどの報告があった(中、1980)。1962~1964年のびわ湖生物資源調査団中間報告では、北湖第二湖盆においてプランクトン群集に藍藻類 *Microcystis*や *Oscillatoria*を認め、富栄養化の懸念を示していた(根来ら、1966)。それらの報告とプランクトン沈殿量や全リンの変動は調和的であり、富栄養化の進行に当てはまっていると推定される。

本研究の結果、全リン濃度の増減が植物プランクトンの増減と対応しており、富栄養化の変遷を示すものであることがわかったことは、琵琶湖水質の解析では進歩である。過去に報告された琵琶湖水質の長期解析では、全リンの変動が横ばいから減少傾向とするだけで、植物プランクトンとの関係性がはっきり示されたことはなかった(Tezuka, 1992; 野村ら, 1993; 津田ら, 2006)。それは、それぞれが報告する解析データの期間が短く、琵琶湖北湖で起こった長期の変動を概観

することができなかつたためと思われる。本研究で示された全リンの長期変動では、1970年代にみられたリンの最大値が1960年代前半の2倍程度であり、長期の全リンの変化傾向は小さく緩やかであったことが、短期間での変動の識別を難しくしたともいえる。

全窒素および硝酸態窒素の濃度増加は、北湖の水質長期変遷の先行報告に共通している（津田、2006；大久保ら、2007；岡村、2008）。流入河川水での硝酸態窒素の増加と同じ傾向にあり（大久保ら、2007）、湖内の硝酸態窒素の増加は、外部からの負荷による増加と考えられる。津田ら（2006）は、滋賀県・国交省の定期観測結果では2000年以降の窒素濃度の減少があるとしている。確かに、滋賀県・国交省データでは2000, 01, 02, 06, 07, 08年は年度平均値がそれまでの値より低くなっているが、滋賀県水産試験場のデータではその傾向は明瞭でない。今後の推移に注視する必要がある。

本研究では、琵琶湖で測定されてきた個々の水質定期調査の結果を統合して、富栄養化前からのリンや窒素の変遷について検討した。全リンの長期変遷は富栄養化の変遷をよく表しており、1970年代に濃度が増加したが1980年代以降は減少してきた。現状では、昭和30年代の水準より1.5倍ほど高いけれども、北湖の全リンは環境基準を達成しており、環境の劇的な変化がない限りは今後もその傾向にあると予測される。南湖では全リン濃度が環境基準を満たしていない状況（滋賀県、2010）では、富栄養化の抑制努力を続けるべきで、今後の水質や湖内の経過を見守ることが大切である。窒素については、減少傾向にあるという見方があるが、環境基準やマザーレイク21計画の目標に従うなら、さらに濃度の低下をめざして削減を行うべきであり、削減努力を維持しつつ、今後の湖内の推移を注意深く見守るべきである。

### 3. 琵琶湖水質定期調査における沖帯と沿岸帯の評価

#### 3.1 章のはじめに

琵琶湖の水質は、近年、改善の方向にあるという見方がある一方で、県民の実感として水質の改善が見られていないという指摘がある（琵琶湖総合保全学術委員会、2010）。この背景には、県民の水質対象が水草やゴミなどであり水質項目と異なる、環境教育の結果、琵琶湖が汚れているという先入観を持っている、漁獲量の減少＝水質悪化と考える、県民の目線は湖岸からの限られた範囲の水質でしかなく全体を見ていないなど、多くの点で認識のずれ違いがある。水質をどう捉えるかという問題は、学術的な研究のみならず、行政、

県民を含めて議論されるべきであるが、県民に目にふれやすい沿岸の水域の水質がどのような長期変遷にあるかは、行政資料や学術論文としてもあまり触れられていない。環境行政が定期調査している琵琶湖の観測点である北湖28点、南湖19点は、沖帯と東西の沿岸帯に近い地点を含み、各地点の算術平均から琵琶湖の水質を判断している。しかし、各地点が示す水質に関して議論された例はほとんどない。定期調査の地点は湖岸から数百m離れているため、沿岸帯にあっても沖帯に近い水質を示しているといわれる。しかし、沿岸帯は湖岸からの距離で定義されるべきでなく、水深や水の滞留を含めて考えるべきであり、そのような観点から水質データをみるとどのように解釈されるのか、県民の目線で見える沿岸帯の水質は、沖帯の水質と本当に異なるのかという視点での評価が必要である。ま

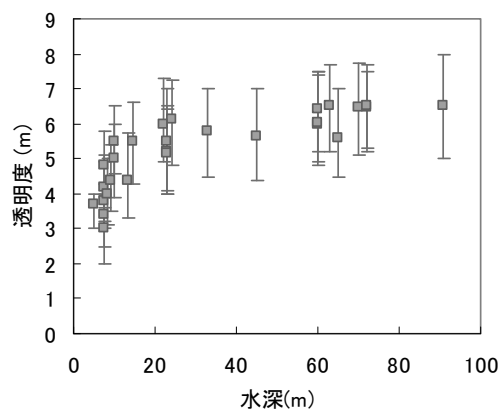


図4 北湖における水深と透明度の関係  
シンボルは1979年から2006年までの各28地点の中央値、誤差線上部は75%値、下部は25%値

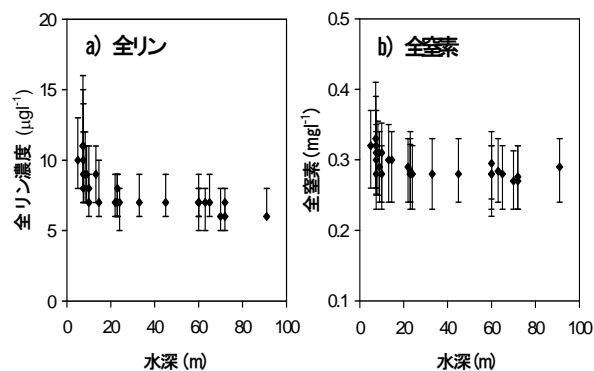


図5 北湖における水深と全リン、全窒素の関係  
シンボルは1979年から2006年までの各28地点の中央値、誤差線上部は75%値、下部は25%値

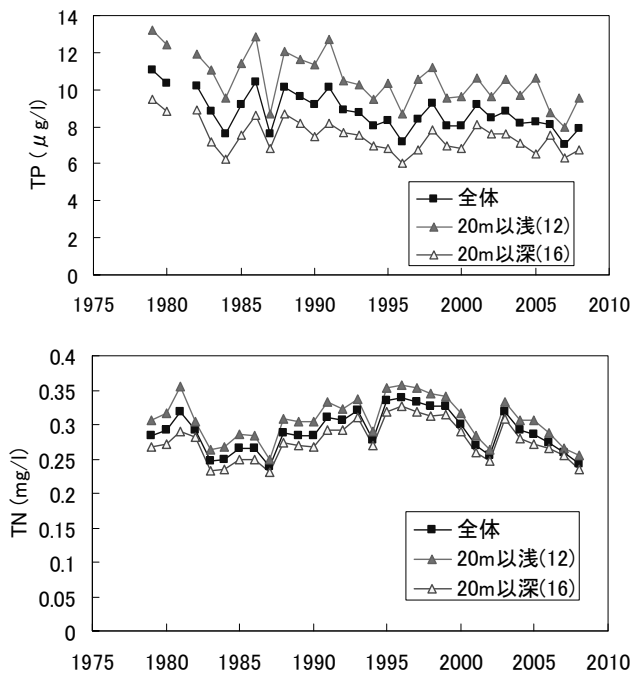


図 6 滋賀県ほか水質定期調査による北湖 28 地点表層 0.5m 深における全リンと全窒素の経年変動（全体は 28 地点平均を示す。）

た近年、沿岸の水域では、水草や付着藻類が多い、湖底が泥質化しているなどの意見もあり、そのような現象が水質に現れているかという観点からも沿岸帯での水質評価が必要である。そこで本研究では、琵琶湖における沖帯と沿岸帯を区別しながら、定期調査水質データの評価を試みた。

### 3.2 資料と方法

解析に用いた定期観測資料には、滋賀県・国交省による琵琶湖水質定期観測（滋賀県ほか、1972-2009）を用いた。また、以下の議論は、北湖と南湖で水深等が異なることから両者を分けて議論した。

### 3.3 北湖における沖帯と沿岸帯の違い

北湖においてその分布を特徴づけるものは水深である。北湖 28 地点の水深（湖底深）と透明度の関係を見ると、水深が 20 m を境に以浅の地点では透明度が低くなり、以深の地点では透明度が変わらない傾向が見られた（図 4）。これは、水深が浅いほど湖岸に近く、流入河川の影響を受けやすいこともあるが、水深が 20 m 以浅では、光環境や物理環境が異なることによると考えられる。琵琶湖は春から秋にかけて成層が発達し、水温躍層は 10~20 m 付近にある。躍層以浅の地点では、鉛直的によく混合する構造にあり、湖底まで届く可視光や湖底からの栄養塩供給により一次生産が活発とな

るだけでなく、湖底からの巻き上げ粒子も透明度の低下に寄与する。一方、躍層より深い地点では表層と深層が成層構造をもつことによって、湖底から表層への栄養塩供給なども制限されるだけでなく、巻き上げ粒子の供給も絶たれる。したがって、水質から見れば水深 20 m 付近がいわゆる沿岸域と沖帯の境目と考えられる。

また、全リンと全窒素についても水深の関係を見ると（図 5）、全リン濃度が水深に対して 20m 以浅で高くなるという分布が顕著である一方、全窒素はその傾向が明確でなかった。その違いは、懸濁態と溶存態の差であると考えられ、懸濁態の成分が多い全リンやクロロフィル a は、20 m 以浅で特に多く、植物プランクトンなどで存在するだけでなく、湖底からの巻き上がりなどによっても懸濁粒子が多く存在すると考えられる。一方、全窒素は、その 4 割が硝酸態窒素で溶存態の占める割合が高い。全窒素が沿岸帯と沖帯であり差がみられなかったことは、溶存態の物質は水平方向にも比較的よく混合することを示していると考えられる。

次に 20 m 深を境に区分して、北湖の定期水質調査の経年変動を眺めた（図 6）。全リンの経年変動では、20 m 以浅と以深で年度平均値に明らかな差がみられた。しかし、経年変動パターンは 20 m 以浅と以深で同様であった。このことは、20 m 以浅と以深では、懸濁粒子を中心に濃度分布が異なることを示す。滋賀県環境白書で取り扱われる北湖 28 地点の平均値とは、沖帯と沿岸帯の地点の平均的な値であることがわかる。その経年変化は沖帯でも沿岸帯でも同様であったことは、経年変動に現れる藻類の活発な増殖や降水量の増減は沖帯と沿岸帯の区別なく起こることを意味する。全窒素では 20 m 以浅と以深に違いがほとんどない。溶存態は沖帯と沿岸帯の水平方向によく混ざっているといえる。

近年、北湖沿岸域の一部で湖底質の泥質化が指摘されている。泥質化の情報は報告書に詳しい（滋賀県琵琶湖環境部、2003）。早崎港沖、長浜沖、長命寺港沖の

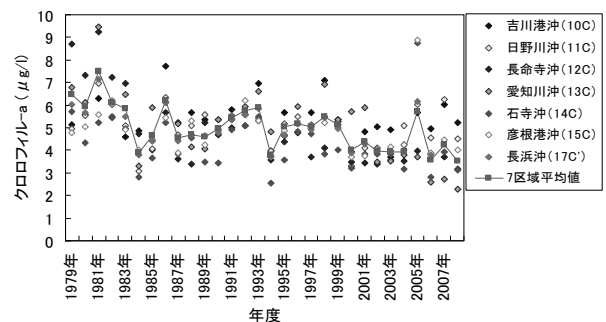


図 7 北湖東岸の水深 10 m 以浅の定期調査地点におけるクロロフィル a 濃度の経年変化

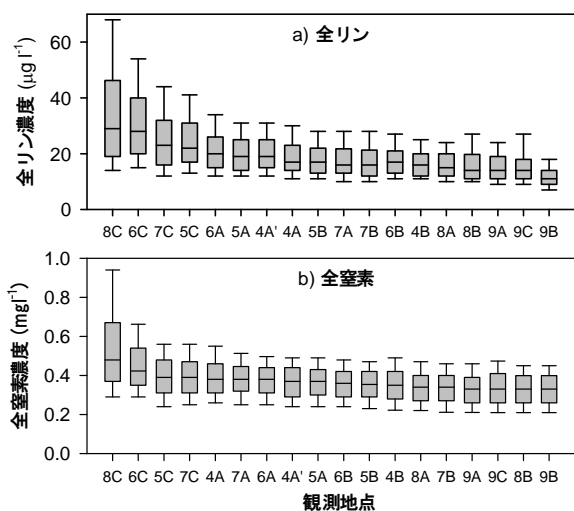


図8 滋賀県ほか水質定期調査による南湖18地点の分布（箱中央線は中央値、下部は25%値、上部は75%、誤差線の上下はそれぞれ10%値と90%値を示す。）

沿岸では、堆積物中の有機物含量が多く、泥質化が進んでいるといわれる。北湖東岸の水深10m以浅の定期調査地点のクロロフィルa濃度を図示した(図7)が、長浜沖、長命寺港沖を含む各点でクロロフィルa濃度が長期で増加する傾向はみられなかった。したがって、泥質化が起っていたとしても、それらは富栄養化につながるような影響はみられなかった。

### 3.4 南湖における水平分布と水質の違い

南湖では、水域による分布の違いを地点間の比較で検討した。

滋賀県・国交省の琵琶湖定期観測の1979～2008年間の南湖の各地点における全リンと全窒素濃度を箱ヒゲ図で比較した(図8)。全リン濃度には、近接する地点間で濃度に類似性が見られつつも、全体からみると地点間の濃度にばらつきがあった(図8)。全窒素濃度は季節により増減することから、地点内の濃度変動が大きく地点間の差は分かりにくかった(図8)。9A, 9B, 9C地点での全リン濃度が比較的低いが、これらの地点は北湖水の流入口にあたるため、北湖の濃度の影響下にあると思われる。5C, 6C, 7C, 8C地点でのクロロフィルa、全リン濃度が比較的高いのは、これらの水域は東岸にあたり、水深が浅く、東岸河川からの都市排水の流入も関係しているものと思われる。さらに、南湖の水の流動では北湖の水が中央から西岸側を主に通っていることが知られる(平山ら, 1992)。すなわち、中央から西岸にかけては水が混合しやすい状況にあり、よって、東岸の水質は他と区別されると判断される。以上より、南湖の水質は北湖流入付近、東岸側、その

他(中央から西岸)に区別されると判断された。そこで、①北湖寄り(8B, 9A, 9B, 9C,)、②東岸(3, 5C, 6C, 7C, 8C, 8C)、③その他(中央と西岸)(4A, 4A', 4B, 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B, 8A)に区分した。このような区分は、過去の研究における南湖の水平分布解析(藤井・宗宮, 1984)と不整合はなかった。

南湖においても、滋賀県・国交省の琵琶湖定期水質調査の結果を、区分した水域毎に経年変動を解析した。3つの区分で経年変動を眺めると年度平均値とその経年変動に差が現れた(図9)。①北湖寄り、②東岸と③その他(中央と西岸)に比べ、平均値が小さく、経年変動も小さかった。一方、②は全リン、全窒素ともに平均値がその他に比べて大きく、変動も経年的な減少が顕著であった。③はその中間的な値と変動であった。これらの変動を見ると、滋賀県環境白書で取り扱われる南湖平均値(全体)は、③の値に近いものであるが、東岸の値に平均が引きずられていることがわかる。南湖水の流動が主に北湖から水が流れ瀬田川へ流出することから、北湖では低濃度であった全リン、全窒素は南湖での流下において負荷され、瀬田川へ流出されていることがわかる。特に東岸では、その負荷が大きい。また、過去30年間に行われてきたリンや窒素の負荷削減が東岸側でのその効果が大きいこともわかる。全リン濃度の経年的な変動は、①でも②の水域でも減少傾向にあるが、全窒素濃度は、①では1980年代から1990年代にかけて微増傾向にある一方で②では減少傾向にあるなど、水域によって変動の違いがある。北湖においても全リン濃度は過去30年間で減少傾向にある(図6)が、北湖の全窒素濃度は南湖の②、③の水域と同様、微増と減少が混在する変動になっている。窒素の経年変動が注意を要することは第2章での硝酸態窒素の長期変遷解析と同じである。

本章の研究から、北湖における沖帯と沿岸帯を分けてとらえることができた。北湖では湖底深20mを境に区分され、沿岸帯は沖帯に比べ懸濁物が多い傾向が見られたが、全リンや全窒素の経年変動では沖帯と沿岸帯に差異はなかった。南湖でも、全リンなど懸濁物の違いで北湖寄り、東岸とそれ以外で水域を区分できたが、経年的な変動パターンの違いは、懸濁物の少ない全窒素でも見られた。今後の水環境行政で対策水域を限定することや湖岸から見られる水質の対策など、きめ細やかな対応が望まれる場合には、本研究のような解析が役に立つものと期待する。

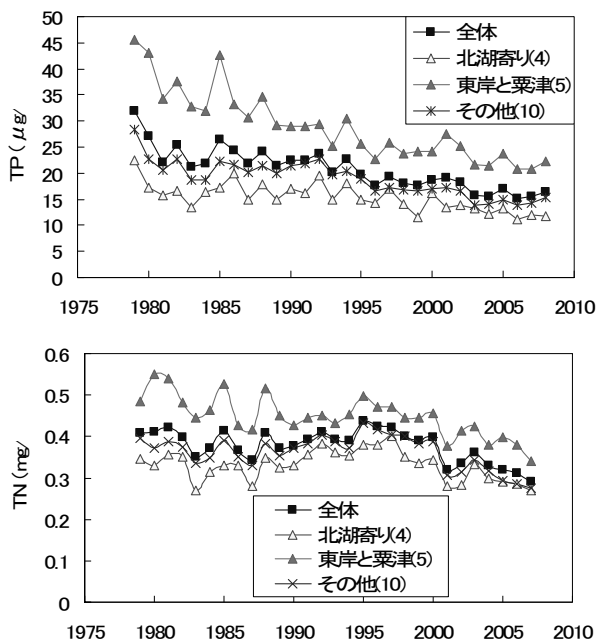


図9 滋賀県ほか水質定期調査による南湖19地点表層0.5m深における全リンと全窒素の経年変動(全体は28地点平均を示す。)

## 4. 水草の生元素量とその比

### 4.1 章のはじめに

近年、琵琶湖の沿岸域において水草の繁茂が大きな問題となっている。特に南湖においては、ほぼ全域において水草が繁茂しており、航路障害や湖岸に打ち寄せられた水草の切れ藻が腐って悪臭問題が発生している。また水草が高密度で発生している水域においては、湖底直上において溶存酸素の低下が生じており(芳賀ら 2006a)、底生生物への悪影響も懸念されている。

このような現状を受けて、県においては水草除去に多大な労力が注がれており、例えば琵琶湖環境部自然環境保全課による機械刈り取りの水草は湿重量で1年あたり約2,000トンに達している。また河港課、下水道課、水産課においても水草除去が行われており、合計の除去量は年間3,000トン(湿重量)を上回っている。琵琶湖南湖における夏季の水草現存量は、乾重量で1万トン程度であることから(芳賀・石川、2011)、水分含量が90%程度であるとすると、3%程度の水草がこれらの刈り取り事業により除去されていることとなる。

夏季を中心に南湖全域で繁茂し、毎年その一部が刈り取りなどで除去されていることから、琵琶湖の物質循環や水質形成を解析する上で、水草に含まれる生元素量の定量的把握は必要不可欠であろう。しかし、水草に含まれる生元素量については、桜井(1975)や岡

本ら(2004)など限られた報告しかならされておらず、これらの報告において分析に供された試料数も少数であることから、十分な調査が行われてきたとはいえない。

本研究では、2007年夏期に芳賀らによって実施された琵琶湖南湖全域の水草種組成・現存量調査で得られた沈水植物ならびに糸状藻類に含まれる生元素量を測定することにより、これまで報告されている水草現存量や刈り取り量に含まれるリン・窒素について定量的に把握できるようにすることを目的とした。

### 4.2 方法

生元素量の分析には、2007年9月18日から9月21日にかけて琵琶湖南湖全域52地点から潜水作業により採集され、地点毎に種毎に分別・風乾された8種の沈水植物(センニンモ、オオカナダモ、クロモ、マツモ、コカナダモ、ホザキノフサモ、ササバモ、コウガイモ)と糸状藻類の509試料を用いた(芳賀・石川、2011)。糸状藻類にはアオミドロ、サヤミドロなど数種の緑藻類を含んでいるが種レベルでの分別はされていない。試料中の炭素と窒素は、元素分析器Flash EA1112(ThermoFinnigan社製)を用いて分析した。試料中のリンは、過塩素酸と硝酸による酸化分解を行った後、ペルオキシ二硫酸カリウムによる湿式分解を行い、モリブデン青法により分光光度計U-2001(日立製作所製)を用いて測定した。

### 4.3 結果と考察

沈水植物8種ならびに糸状藻類の炭素、リン・窒素含有量の測定結果を表1に示す。芳賀・石川(2011)によって明らかにされた種毎の現存量に基づいて重み付けをした南湖水草の平均生元素含有率は、炭素37.8%(2002年)・38.1%(2007年)、リン0.29%(2002年)・0.30%(2007年)、窒素3.1%(2002年)・3.2%(2007年)となり、生元素比(モル)は、炭素/窒素14.4(2002年)・14.1(2007年)、炭素/リン339(2002年)・331(2007年)、窒素/リン23.5(2002年)・23.6(2007年)となった。また、南湖全体の水草に含まれる生元素量は、炭素4,547トン(2002年)・3,803トン(2007年)、窒素345トン(2002年)・316トン(2007年)、リン32トン(2002年)・30トン(2007年)であることが明らかとなった。

表1 琵琶湖南湖の水草の生元素含有率とそれらの比

水草(試料数)	炭素 窒素 リン			炭素:窒素 炭素:リン 窒素:リン		
	(% 乾重量)			(モル比)		
センニンモ (109)						
平均値	39.6	3.1	0.29	15.2	404.7	26.4
標準偏差	2.2	0.4	0.09	2.3	61.6	9.7
オオカナダモ (84)						
平均値	35.4	3.1	0.32	13.7	324.0	23.9
標準偏差	1.7	0.4	0.12	2.3	139.7	10.5
クロモ (92)						
平均値	36.6	3.0	0.29	14.7	350.1	24.2
標準偏差	1.6	0.4	0.08	2.6	92.7	6.9
マツモ (91)						
平均値	36.0	3.3	0.28	13.0	365.1	28.2
標準偏差	2.3	0.4	0.09	2.3	121.7	8.5
コカナダモ (50)						
平均値	37.4	2.9	0.32	16.6	352.7	21.9
標準偏差	1.4	0.8	0.12	6.1	146.9	7.3
糸状藻類 (37)						
平均値	36.5	4.0	0.31	11.4	345.7	32.4
標準偏差	3.6	1.1	0.13	3.2	136.0	14.1
ホザキノフサモ (14)						
平均値	38.4	2.3	0.19	21.3	587.1	28.5
標準偏差	2.0	0.5	0.06	6.6	194.7	8.7
ササバモ (12)						
平均値	39.4	2.5	0.28	19.6	413.6	20.2
標準偏差	0.9	0.4	0.08	5.9	245.2	4.5
コウガイモ (8)						
平均値	37.6	4.0	0.35	11.0	284.4	25.8
標準偏差	2.3	0.3	0.07	0.6	46.8	4.1
シャジクモ (1)						
平均値	34.5	2.8	0.10	14.2	923.2	64.9
標準偏差	-	-	-	-	-	-
オトリゲモ (1)						
平均値	34.4	2.2	0.18	17.9	488.5	27.3
標準偏差	-	-	-	-	-	-

れていると計算できる。この量は、水草が保持しているリン、窒素量の1/9~1/5に過ぎない。また、原単位法による琵琶湖南湖へのリンならびに窒素の年間負荷量(2005年)は、それぞれ45トン、1,146トンである。したがって、夏期の水草に含まれるリンと窒素は、年間負荷量のそれぞれ28~30%、66~71%に相当する量となる。水草に利用される栄養塩の大部分は底泥中から取り込まれていると考えられるが、水中へ回帰する栄養塩も相当量になることが想定されることから、南湖における物質循環を検討する上では、水草現存量の季節的な変動を考慮することが欠かせない。

自然環境保全課など滋賀県による水草除去量が年間3,000t(湿重量)で、その水分含量が90%と仮定すると、除去された水草に含まれる炭素、リン、窒素量は、今回明らかにされた2007年の種組成に基づく平均生元素含有率を用いると、それぞれ114、0.89、9.5トンと推定することができる。

2002年夏と2007年夏の琵琶湖南湖における沈水植物の現存量分布の比較結果からは、総現存量はほとんど変わらなかったのに対し、空間的変動が起こっていることが明らかにされている。すなわち、沈水植物現存量は、南湖の西岸沿いと中央部で増加し、南部と北部で減少した(芳賀・石川, 2011)。その原因として、底泥中の栄養塩の枯渇の可能性が指摘されている。本

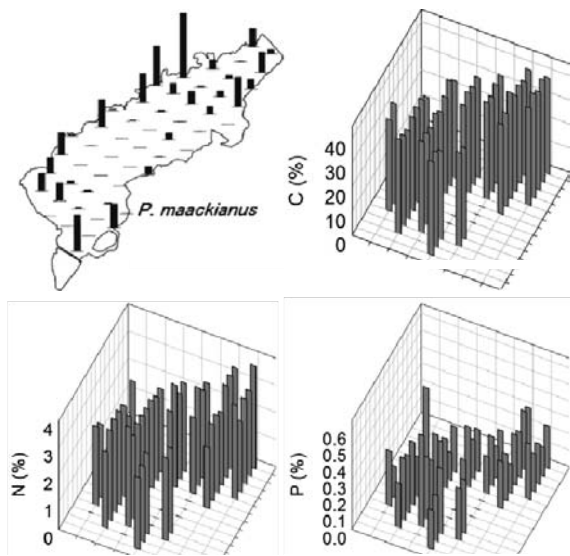


図10 2002年の琵琶湖南湖におけるセンニンモの現存量分布と炭素・窒素・リン含有量。現存量分布図は(芳賀ら, 2006b)より引用。

2010年度の南湖の全リンと全窒素濃度は、それぞれ0.018 mg/L、0.30 mg/Lであったことから、南湖の水中にはリン、窒素がそれぞれ3.6トン、60トン含ま

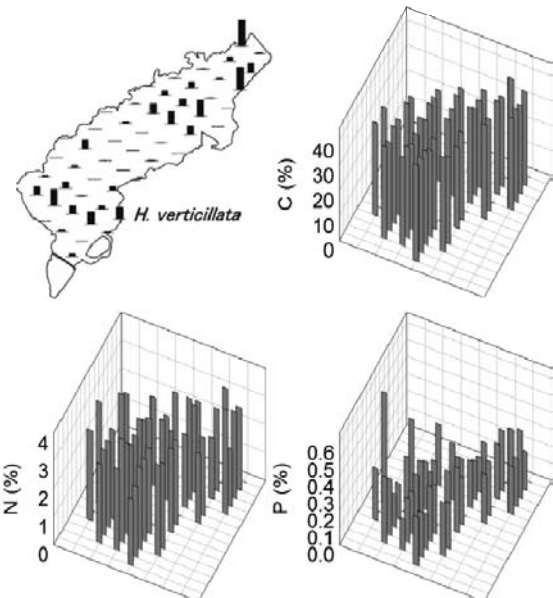


図11 2002年の琵琶湖南湖におけるクロモの現存量分布と炭素・窒素・リン含有量。現存量分布図は(芳賀ら 2006b)より引用。

研究では、底泥中の栄養塩についての分析を行っていないが、沈水植物の繁茂状況と地点毎の炭素・リン・窒素含有量について関係がみられるか検討した。ここ



では、圧倒的な優占種であったセンニンモと、2002年から2007年に現存量の減少が明らかとなったクロモについて図10、図11に示す。地点によって、沈水植物のリン・窒素含有量に違いはみられるが、その含有量に空間的な傾向はみられなかった。このことは、底泥中の栄養塩濃度にかかわらず、沈水植物が体内に取り込む生元素量が比較的安定していることを示唆している。しかし、今回の分析では各地点の試料数は最大で3であるため、地点毎で生元素含有量に違いがあるかどうかについて正確に検証するためには、もっと多くの試料の分析が必要である。また、今後の水草の現存量や分布の変動を考察するためには、底泥中の栄養塩分析の実施が欠かせない。

## 5. 謝辞

本研究でのデータや情報の収集にあたり、以下の方々にご協力をいただいたことについて深く謝意を表す。東レテクノ株式会社、滋賀県琵琶湖環境部琵琶湖政策課、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター環境監視部門、国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所、淀川水質汚濁防止連絡協議会 鶴川昌弘氏。本研究の遂行にあたり、以下の方々には有意義な討論と情報をいただいたことに謝意を表す。総合地球環境学研究所と京都大学 中西正己名誉教授、京都大学大学院地球環境学堂 藤井滋穂教授、滋賀県立大学環境科学部 三田村緒佐武教授、滋賀大学教育学部 川嶋宗継元教授、滋賀県立琵琶湖博物館 芳賀裕樹専門学芸員、その他滋賀県琵琶湖環境科学研究センター職員、堀正倫氏、中西健也氏、蒲原美樹氏、小島敏忠氏、日野憲一氏。

## 6. 引用文献

琵琶湖総合保全学術委員会 (2010)：マザーレイク21計画（琵琶湖総合保全整備計画），第1期の評価と第2期以後の計画改訂の提言。115。滋賀県。  
藤井滋穂，宗宮功 (1984)：琵琶湖南湖の富栄養化解析 (2) 水質の分布特性。環境技術，13(10)：720-726。  
藤永太郎，堀智孝 (1982)：琵琶湖の環境化学：230。日本学術振興会。  
芳賀裕樹・石川可奈子 (2011)：2007年夏の琵琶湖南湖における沈水植物の現存量分布および2002年との比較。陸水学雑誌，72：81-88。  
芳賀裕樹・芦谷美奈子・大塚泰介・松田征也・辻彰洋・馬場浩一・沼畑里美・山根猛 (2006a)：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，67：23-27。  
芳賀裕樹・大塚泰介・松田征也・芦谷美奈子 (2006b)：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，67：69-79。  
早川和秀・辻村茂男・石川俊之・石川可奈子・焦春萌 (2011)：政策課題研究4 内部負荷による湖内水質変動の解析および生態系保全に向けた水質管理に関する政策課題研究 湖内水質変動の解析および生態系保全に向けた琵琶湖の生態構造と栄養バランスの把握。滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書 平成21年度版，6：58-69。  
平山彰彦・中西正己・宮島利宏・中野伸一・熊谷道夫 (1992)：短期的水質モデルパラメータのキャリブレーション。海岸工学論文集，39：976-980。  
板坂修・杉田陸海・奥村ゆ里子・堀太郎 (1971)：びわ湖の水質および瀬田川におけるセタシジミの分布状態，滋賀大学教育学部紀要 自然科学，20：18-23。  
板坂修，奥村ゆ里子，堀太郎，橋本喜義，大山泰博 (1972)：びわ湖・瀬田川・大津市の河川ならびに観光施設の水質と湖底泥の重金属について。滋賀大学教育学部紀要 自然科学，21：12-23。  
板坂修，大山泰博，川崎睦男，堀太郎 (1973)：びわ湖ならびに大津市の河川の水質について。滋賀大学教育学部紀要 自然科学，22：16-26。  
板坂修，大山泰博，大西利和，堀太郎 (1974)：びわ湖の水質と湖底泥の重金属。滋賀大学教育学部紀要 自然科学，23：25-36。  
板坂修，大山泰博，桑原芳夫，堀太郎 (1975)：びわ湖の水質について，滋賀大学教育学部紀要 自然科学，24：23-29。  
川嶋宗継，黄瀬金司，芳井悦雄，板坂修，堀太郎 (1976)：びわ湖ならびに高島郡（滋賀県）の河川の水質について。滋賀大学教育学部紀要 自然科学，25：42-52。  
川嶋宗継，小西吉治郎，奥田久男，黄瀬金司，板坂修，堀太郎 (1977)：びわ湖の水質について 特に，クロロフィルaと栄養塩ならびにCODの関係について。滋賀大学教育学部紀要 自然科学，26：18-25。  
中賢治 (1980)：西の湖および琵琶湖における赤潮現象の発生例(1972年～1977年)について。滋賀県水産試験場研究報告，33：23-45。  
日本水質汚濁研究協会編 (1982)：湖沼環境調査指針：257。公害対策技術同友会。  
根来健一郎 (1969)：琵琶湖の水質汚濁とプランクト

- ン相の変遷(後篇), 水, 11(5): 24-29.
- 根来健一郎, 岩井寿夫, 渡辺仁治 (1966): 植物プランクトン班中間報告, びわ湖生物資源調査団中間報告 (近畿地方建設局編): 271-312. 近畿地方建設局.
- 野村潔・矢田稔・山中直・内藤幹滋・川部浩市・前畑佳代・園正 (1993): 鉛直方向からみた琵琶湖 [北湖] 水質の現況について. 全国公害研会誌, 18(3): 25-32.
- 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: 582-592.
- 岡村貴志 (2008) 琵琶湖の水質および水象の長期変動. 滋賀県水産試験場研究報告, 52: 33-40.
- 岡本高弘・一瀬諭・藤原直樹・津田泰三・若林徹哉・土肥誠・加賀爪敏明・山中直・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. 滋賀県立衛生環境センター所報, 39: 82-87.
- Peterson, S. A., Hughes, R. M., Larsen, D. P., Paulsen, S. G., Omernik, J. M. (1995): Regional lake quality patterns: Their relationship to lake conservation and management decisions. *Lake & Reservoirs: Research and Management*, 1: 163-167.
- 桜井善雄 (1975): 水草類が琵琶湖の水質に及ぼす影響について. 琵琶湖水生植物実態調査報告書, p. 33-44.
- 滋賀県 (2010): 滋賀の環境2010. 滋賀県.
- 滋賀県・建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・水資源開発公団・滋賀県立衛生環境センター (1972-2009): 琵琶湖水質調査報告書 昭和41年度～平成20年度. 滋賀県.
- 滋賀県水産試験場 (1933-2010): 滋賀県水産試験場事業報告 昭和6年度～平成18年度. 滋賀県水産試験場.
- 滋賀県水産試験場 (1950-2010): 滋賀県水産試験場研究報告 昭和25年度～平成18年度. 滋賀県水産試験場.
- 滋賀県琵琶湖環境部 (2003): 北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査 平成14年度. 滋賀県.
- Tezuka, Y. (1992) Recent trend in the eutrophication of the north basin of Lake Biwa. *Japan Journal of Limnology*, 53(2): 139-144.
- 津田泰三・岡本高弘・藤原直樹・中村忠貴・矢田稔・佐貫典子・土肥誠・面田美樹・一瀬諭・若林徹哉・
- 青木茂・原良平 (2006): 琵琶湖北湖における鉛直方向の長期水質モニタリング. 水環境学会誌, 29(9): 565-568.