

水草管理による生態系再生に向けた研究

酒井陽一郎・石川可奈子・佐藤祐一・井上栄社・芳賀裕樹¹⁾

要約

① 水草の生育を制限する可能性がある底質に含まれるリン量とその変化を明らかにするため、琵琶湖南湖の底質と水草に含まれるリン量の測定を行った。その結果、現在の底質に含まれるリン量は、水草の季節消長に伴う季節変動をしないこと、1990 年以降の水草の大量繁茂によって減少していないこと、湖底から 0·5cm の底質に限ったとしても、大繁茂とされた 2014 年の水草生育量を十二分に支えられることが明らかとなった。これらのことから、南湖の水草は、リン以外の条件が良ければ、今後も長期間に渡って生え続けるポテンシャルがあると考えられた。

② 2011 年以降、大規模に行ってきました水草の根こそぎ除去による水草量の変動と、水草の大量繁茂による悪影響の軽減を評価するため、様々な指標を検討し、2011 年以降の長期的な変動を調べた。その結果、根こそぎ除去では水草量の減少やコントロールは難しいことがわかった。また、多くの項目において明瞭な変化は見られなかつたが、湖底の貧酸素、低酸素水塊の形成は回復の傾向がみられ、船舶の航行障害は沿岸域で増加していることが伺われた。水草を順応的に管理するために、事業の評価手法の開発は今後の課題である。また、底生糸状藻類は、水草除去後や水草が少ない地点に目立ってきたが、増加し続けている状況ではないため、経過観察が必要と考えられた。

③ 水草の季節的、経年的な消長を計算できるモデルを構築し、現況や過去の様々な年度における再現計算を行うとともに、本モデルを用いてシナリオ解析を行った。2010 年代における計算を行ったところ、適切にパラメータを調整することにより、水草の季節的な消長をほぼ再現することが可能となった。一方で一部水域においては繁茂の多寡を必ずしも再現できなかつた。続いて本モデルを用いて 1980 年代の再現を行ったところ、沿岸部のみに繁茂が見られることを再現できたが、繁茂箇所は観測とは必ずしも一致しなかつた。沿岸部のみに繁茂するのは、当時の水質が 2010 年代よりも悪かつたためと考えられた。また 1930 年代の再現を行ったところ、観測と同様に 2010 年代よりも繁茂量が少なくなつた。この要因を探るために特定の環境条件について 1930 年代としたシナリオ計算を行ったところ、①水位が高かつた、②水温が低かつた、③刈取量が多かつた、の順に影響が大きかつたと想定された。また水草刈取量に関するシナリオ計算を行ったところ、刈取だけで南湖全体の水草現存量を大きく減少させることは困難と考えられた。

1. はじめに

1994 年の大渴水以降、琵琶湖南湖では、沈水植物（以下「水草」という）の繁茂面積・量が増加し、2014 年には南湖のほぼ全域となる 49.6km² で繁茂、その乾燥重量は 18173 トンと報告されている（芳賀・石川 2016）。水中を埋め尽くした水草は湖水を滞留させ、湖底の溶存酸素濃度を低下させる（石川・岡本 2015）。また、水面まで繁茂し、流出した水草は、“水草の島”となって船舶の航行や漁業操業を阻害している（図 1-1）。さらに、流れ出した水草が夏期から秋期にかけて湖岸に漂着して腐敗することで、景観の悪化や猛烈な悪臭を引き起こす。このように、大量に繁茂した水草は、複合的な環境問題を引き起こしている（滋賀県 2009）。



図 1-1 烏丸半島沖の“水草の島”と、その上のコサギ

1) 滋賀県立琵琶湖博物館

このような問題へ対応するため、滋賀県では「水産資源が豊富で、漁業活動に支障がなく、琵琶湖の環境も良好に維持され、人間生活にも影響はなかったと考えられている1930年代の水草繁茂面積・種組成・現存量」を目標とし、水草刈取り船を用いた沿岸部の表層刈取りに加え、2011年からは改良した貝引き漁具を用いた沖縄部の根こそぎ除去など、大規模な水草対策事業を行ってきた（川崎2015, Ishikawa et al, 2020）。また、刈取り・除去をした水草については、そのほぼ全量を堆肥化すると共に、市町や住民組織が行う水草除去の支援や、企業などへの水草対策技術開発支援など、住民の力や民間の知見も取り入れた、総合的な対策を行っている。

しかしながら、今まで続けられている水草対策事業の長期化とそれに伴う予算の増大が問題となっている。このため、これまでの水草対策事業による影響の整理や、今後の繁茂の見通しといった、長期的視野に立った政策立案を行うための情報が必要とされている。さらには近年、水草を除去したエリア周辺の湖底において、糸状藻類がマット状に繁茂していることが確認されており、糸状藻類の繁茂による湖底生物・生態系への影響が指摘されている（芳賀ら 2019、図1-2）。



図1-2 下阪本沖付近の湖底における糸状藻類の繁茂状況

そこで、本研究では、これまでの水草対策事業施策の評価と今後の水草の生育予測を目的とし、3名の研究者が異なる視点で調査研究を行った。2章では、湖底の底質に含まれる栄養塩に着目し、今後の水草の繁茂ポテンシャルについて検討した（担当：酒井）。3章では、水草対策事業が開始された以後の生物群集や生態系の変化を整理とともに、糸状藻類の現状把握と生態特性の解明を行った（主担当：石川）。4章では、水草の成長量・枯死量などから水草の消長を予測できるモデルを構築し、水草量の再現計算とシナリオ解析を行った（担当：佐藤）。なお、本研究成果は琵琶湖博物館の芳賀裕樹博士との共同研究によって行っているが、特に、2章の底質栄養塩の空間変動、および、4章の水草消長モデルの作成については、琵琶湖博物館共同研究「琵琶湖南湖において沈水植物の量を適正

化するための条件の探索」（研究代表者：芳賀裕樹）により行った。

2. 沈水植物と湖底泥に含まれる栄養塩量の把握および水草の繁茂予測

2.1. はじめに

リンや窒素、カリウムなどの栄養塩類は、水草の生育に必須な要素の1つである。水草の栄養塩利用については様々な研究がなされているが、特にリンについてはその大部分を湖底の底質中に張った根から吸収し、成育すると考えられている（Carignan and Kalff 1980, Barko and Smart 1981, Takayanagi et al. 2012）。このため、底質に含まれるリン量の把握は、今後の水草繁茂予測に重要な情報となる可能性があるものの、琵琶湖南湖における底質のリン量については、地点・季節・年代が限られた、断片的な知見しか存在しない。底質のリン量とその変動、さらには、底質と水草に含有するリン量の関係を明らかにすることで、今後の水草の生育予測に用いることができる基礎資料が得られると考えられた。

そこで、本研究では、琵琶湖南湖において複数地点・季節の底質に含まれるリン量を測定し、底質のリン量の季節的・空間的・長期的な変動を明らかにする。さらに、得られた底質に含まれるリン量と、同じ地点で生育する水草に含まれるリン量とを比較することで、底質に含まれるリン量から見た水草の生育ポテンシャルの予測を行った。

2.2. 方法

2.2.1. 季節的な底質と環境条件の変化

底質と水草に含まれるリン量を明らかにするため、2017年4月、6月、9月、12月、2018年2月に南湖の15地点で底質と水草の採集を行った（図2-1）。琵琶湖南湖は、芳賀らによる精力的な調査によって、過去15年以上の水草量の変動が報告されている（芳賀ら 2006, Haga et al. 2007、芳賀・石川 2011、芳賀・石川 2014、芳賀・石川 2016、芳賀ら 2019）。本研究で調査地点とした15地点は、水草が多量に生育する地点、あまり生育しない地点、さらに、水草除去が過去に何度も行われた地点（図2-2）など、様々な条件の地点が含まれるように設定した。また、2017年度は15地点のうち図2-1の地点40（以下、St.40などと表記）でしか水草の増加が見られなかつたため、水草が多く生育する地点のデータとして、2018年5月、6月、9月、2019年2月にSt.40と新たに設定した3地点の計4地点の追加サンプリングを行った（図2-1）。



図 2-1 2017 年度および 2018 年度に底質と水草に含まれるリン量を調査した地点

各地点での底質の採集は、重力式コアサンプラーにアクリル製カラム（内径 52mm、長さ 515mm、図 2-3）を接続し、琵琶湖博物館の調査船「うみんど」を用いて採集した。採集した底質は、カラムの両端をゴム栓で密栓し、遮光・保冷して実験室に持ち帰った。持ち帰った底質試料は、底質上の浮泥を巻き上げないように、静かに下方から

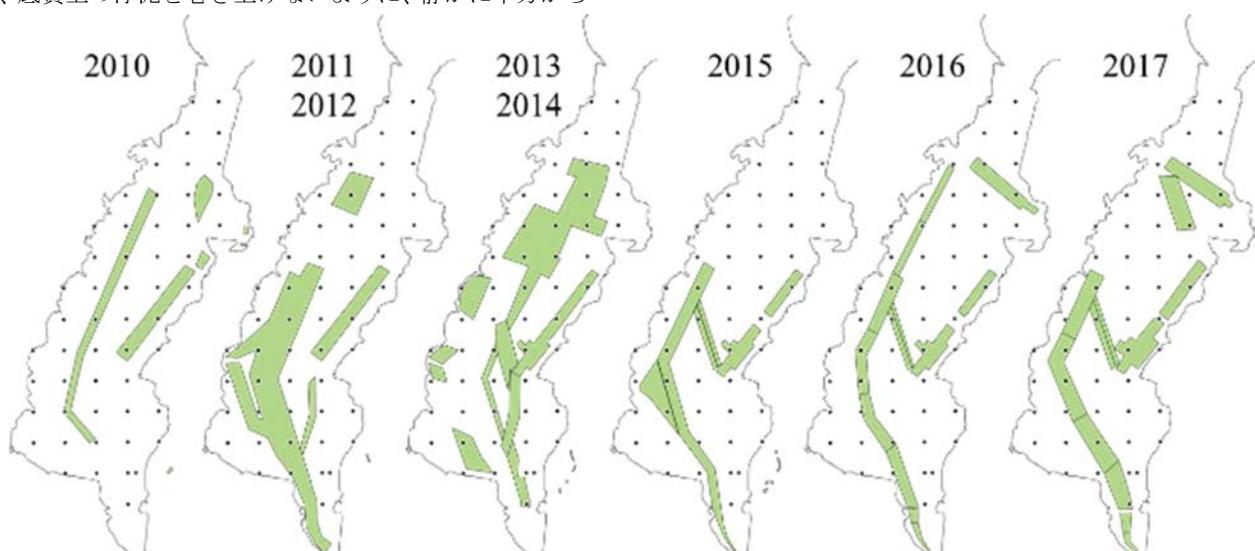


図 2-2 全調査地と、研究開始時までの各年の水草根こそぎ除去エリアの関係。データは（公財）淡海環境保全財団

泥を押し上げることで直上水を廃棄した後、3 層（0-5cm、5-10cm、10-15cm）もしくは 4 層（0-5cm、5-10cm、10-15cm、15-20cm）に切り分けた。切り分けた底質は、目視確認できる貝殻などの大きな夾杂物を取り除いた後、チャック付きポリ袋に入れて空気を抜いて密閉し、底泥の湿潤重量を測定した。これらの底質は、ポリ袋のまま遠心分離（3000rpm、30 分）を行い、分離した液体をシリングで静かに抜き取ることで、底質間隙水と底泥とに分離した。この間の作業は、できる限り空気に触れないよう行った。



図 2-3 重力式コアサンプラーとアクリル製カラムによる採泥の様子

間隙水については、GF/F フィルター(Whatman, 47mm, 孔径 $0.7\mu\text{m}$)を用いて懸濁物を取り除き、0.1M HCl で酸性にして冷凍保存をした。底泥については、60°Cで恒量になるまで乾燥し、ポリ袋に入れて保存した。底泥試料の一部は計量、105°Cで乾燥させた後に、再度重量を測定し、これらのデータを用いて底泥の乾燥重量を算出した。さらに、上記によって測定した底泥の湿潤重量から乾燥重量を引いた値を、間隙水量とした。

各地点・季節の水草量を推定するため、魚群探知機(Biosonics 社製、MX Aquatic Habitat Echosounder)を用いて水草の群落高を測定した。各調査地での群落高は、調査船を約 7 ノットで東西に通過する間に測定したデータのうち、調査基準点との最近傍地点とその前後の 30ping、合計 61ping(約 50m)の平均値とした。さらに、魚群探知機によって得られた平均群落高を水草現存量に変換するため、2017 年 9 月に南湖 52 地点(図 2-1)で魚群探知機により測定した各地点の平均群落高と、芳賀ら(2019)によって報告された同地点の水草の乾燥重量の回帰式を用いて、各地点・季節の水草量を推定した。

2.2.2. 底質リン量の空間異質性の評価

南湖底質の空間的な変動を明らかにするため、2017 年 9 月に南湖 52 地点で底質の採集を行った(図 2-1)。各地点の底質は、前項と同様の手法を用いて採集し、間隙水と底泥を分離して保存した。

2.2.3. 底質と水草の含有リン量の分析

底質に含まれる無機リンは様々な金属酸化物やイオンと結合しており、その形態によって、比較的容易に溶出して生物が利用しやすい形態の無機リン(以下、生物利用可能態リン)と、自然環境下では溶出しにくい生物が利用不可能な形態のリンが存在する。これらは化学的に分画して抽出する方法が数多く提案されている(例えば、SEDEX 法: Ruttenberg 1992)が、本研究では、環境省の底質調査法(2012)に従って抽出・分画した CDB-P(Citrate-Dithionite-Bicarbonate- Phosphorus)および間隙水に含まれる溶存無機リン酸態リン(PO₄-P)の合計を、生物利用可能態のリン量として扱った。CDB-P の測定は、底泥の乾燥試料を用いて、底質調査法に従って抽出し、連続流れ分析装置(QuAAstro、ビーエルテック社製)を用いたモリブデン青ーアスコルビン酸吸光度法で測定した。また、間隙水に含まれる PO₄-P についても、同様の装置と手法により分析を行った。得られた CDB-P と間隙水の PO₄-P を足し合わせることで、底質中の生物利用可能態リンとした。底質と水草に含まれる全リン量については、底質調査法(2012)に従い、モリブデン青ーアスコルビン酸吸光

光度法で測定した。さらに、各調査地で生育している水草に含まれる全リン量については、水草の乾燥重量あたりの平均全リン量($\mu\text{g/g}$)に、前項で算出した各地点の水草量($\mu\text{g/m}^2$)を積算することで算出した。

測定した各リン量については、各調査地の水柱に生育する水草量と比較をするため、底泥表層から深さ 5cm までのリン量を表面積あたりのリン量として表示した。また、過去のデータと比較する際には、当時の値と揃えるために、単位重量あたりのリン量($\mu\text{g/g}$)とした。ただし、解析で用いた底泥は、0-5cm までの深さのサンプルのみを用いている。

2.2.4. 統計解析

生物利用可能態リン量の季節変動については、Tukey 法を用いた多重比較により、季節間の差を検討した。統計解析は R 3.10.10(R Core Teams, 2019)を用いた。

2.3. 結果・考察

2.3.1. 生物利用可能態リンの時空間変異と鉛直的な変化

南湖の底質に含まれる生物利用可能態リンは大きな空間変動を示し、最大値は $1431.6\mu\text{g/cm}^2$ 、最小値は $84.2\mu\text{g/cm}^2$ だった(図 2-4)。一方、2017 年度の 15 地点および、2018 年度の 4 地点で採集された生物利用可能態リン量は、明確な季節変動がみられなかった(図 2-5)。底質中の鉛直的な生物利用可能態リン量の分布は、地点によって違いは見られたものの、少なくとも 15-20cm の深さまでは、0-5cm と同程度の量が存在していた(図 2-6)。

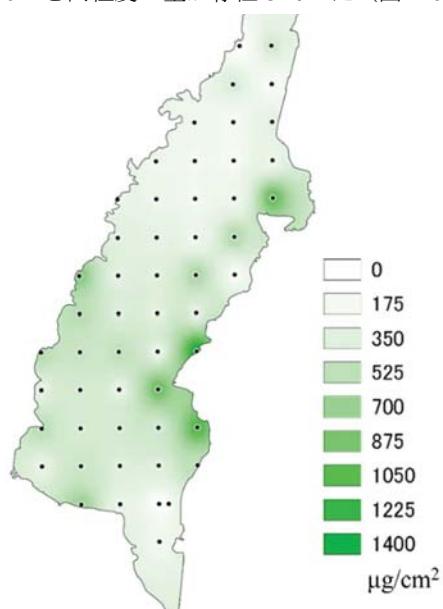


図 2-4 2017 年 9 月における表層 0-5cm の生物利用可能態リンの空間分布。各調査地(黒点)で得られた値について、IDW 法により空間補間を行った。

南湖には、センニンモやオオカナダモのように葉をつけたまま越冬して春から成長する種や、クロモのよう殖芽の状態で越冬し初夏に急激に成長する種など、様々な生活史を持つ水草が存在するが、その総体量の季節消長を南湖全体でみると、春から夏にかけて成長し、秋に最大、その後冬に向けて減少する。しかしながら、底質の生物利用可能態リン量は水草量の季節消長に伴った変化を示さず、また、年間での蓄積・減少といった変化も見られなかった。これらのこととは、①底質に含まれる生物利用可能態のリンは、水草が年間に利用するリン量よりも相対的に多いため、底質のリン量の季節変動を検出できない、②底質には水草が成長に用いたリンを補う量のリンが供給され続けている、という二つの可能性が考えられた。

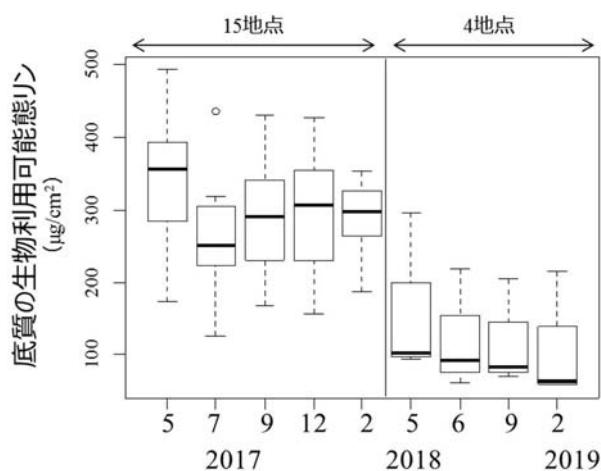


図 2-5 南湖の底質（0-5cm）に含まれる水草が利用可能なリンの量とその季節変化。ただし、2017年4月～2018年2月は15地点、2018年5月～2019年2月は4地点と、調査地点と地点数が異なることに注意。

明確な変動が認められなかつ季節変化と比較し、空間的な底質の生物利用可能態のリン量は大きな異質性を示し、その変動幅は最大で17倍もあつた。琵琶湖において過去にCDB-Pの測定を行つた結果は存在しないが、比較的容易に溶出し、生物利用可能態と考えられるニトリロ三酢酸二ナトリウム溶液抽出のリン（NTA-P）について、南湖22地点で測定した結果が存在する（滋賀県 1990）。この結果を見ると、NTA-Pの最大は $311\text{ }\mu\text{g/g dry}$ 、最小は $58\text{ }\mu\text{g/g dry}$ とされており、過去の文献値でも5倍以上の違いが確認できた。これらのこととは、底質に含まれるリン量は空間的な異質性が高く、その傾向は少なくとも1987年から変化していないと考えられる。これらのリンの空間的な異質性が何によって決定されているかについては、本研究では明らかでは無い。南湖は砂利底や泥底など、底質

の物理環境は変化に富んでいる。また、集水域の土地利用パターンが異なるため、流入する河川近くの底質は陸域の影響を強く受けている（Sakai et al. 2013）。底質に含まれる生物利用可能態のリン量の多寡を決定する要因を明らかにするには、粒径などの各地点の物理環境データと共に、河川からの距離や集水域の状況、北湖からの湖流などを含めた詳細な検討が必要だろう。

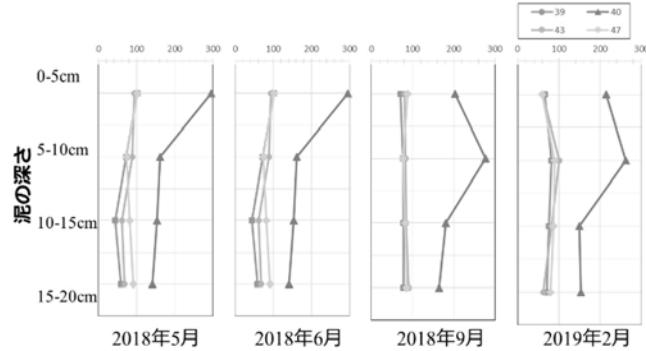


図 2-6 4地点における底泥から抽出した水草が利用可能なリン量 ($\mu\text{g/cm}^2$) の鉛直分布

2.3.2. 底質リン量の長期変動

水草が繁茂する以前の底質に含まれる生物利用可能態リン量として、琵琶湖底質調査報告書（昭和61年度～63年度）（滋賀県 1990）より南湖22地点のNTA-Pの値を抽出し、本調査で得られたCDB-Pの値と比較したところ、水草繁茂前と現在とでは南湖の底質に含まれる生物利用可能なリン量は大きな変化が認められなかつ（図2-7）。

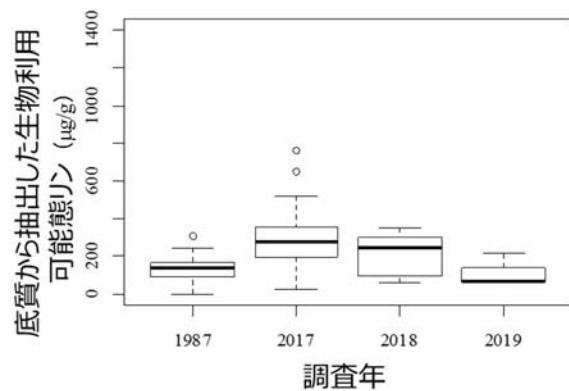


図 2-7 南湖の表層底泥から抽出された生物利用可能態のリンの長期変動。1987年の値は琵琶湖底質調査報告書（昭和61年度～63年度）のNTA-Pより。ただし、各調査年で調査地点、地点数が異なることに注意。

前項で述べた通り、南湖の底質に含まれる生物利用可能態のリンは大きな空間異質性を示すことが知られている。このため、調査地点が異なるこれらのデータを直接的に比較し、その変動の詳細を議論することは難しい。しかしながら、南湖のリン量の平均値としてみると、1989年の調査と本調査の間には、南湖全域での水草大量繁茂、10年以上に及ぶ水草根こそぎ除去事業の継続など、大きな環境の変化や人為的な操作が行われている。また、前項のように底質の生物利用可能態リンが毎年蓄積、もしくは減少することが無いことも加味すると、少なくとも、現在の南湖底泥に含まれる生物が利用可能なリンは、1994年以降の水草の大量繁茂によって減少していないこと、今後長期間に渡って水草の大量繁茂や人為的な水草対策事業が行われたとしても、大幅な増加や減少は起こらないことが示唆された。

2.3.3. 底質と水草に含まれるリン量の比較と今後の生育予測

本調査で得られた全てのサンプルを用いて、底質0-5cmに含まれる生物利用可能態リン量と、各調査地に生育していた水草に含まれるリン量を比較したところ、1ケースを除いた全ての地点・季節において、底質に含まれる生物利用可能態リン量の方が多かった(図2-8)。これらの量的関係は地点・時期により大きくばらつきがあるものの、底質に含まれる生物利用可能態リンの方が水草に含まれるリン量よりも数倍~10000倍以上(中央値:約66倍)

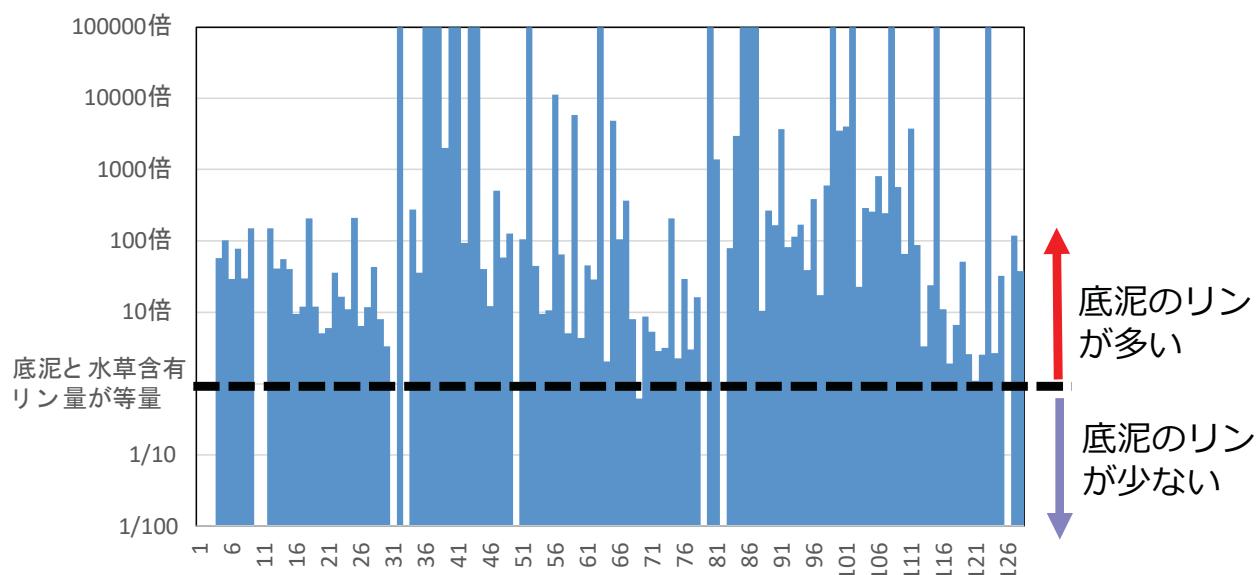


図2-8 0-5cmの底質に含有する生物利用可能態リン量と水草に含有するリン量の関係。横軸は各データ、縦軸は底質を基準とした水草含有リン量を示しており、点線(等量)よりも上方では、底質含有リン量が、水草の含有するリンよりも10倍、100倍、1000倍…と多い状態。点線より下方は底質のリン量が水草に含有するリン量よりも少ない状態を示す。白抜きの地点は、どちらかのデータが欠測であることを示す。

大きな値であった。さらに、少ない繁茂量とされた2017年9月の水草量ではなく、大繁茂とされた2014年9月の水草量に置き換えたとしても、底質0-5cmに含まれる生物利用可能態リンの方が多いという結論は変わらなかつた。

これまでの研究で、水草が生育に利用するリンについては、主に根を通じて底質中から利用しているとされている。底泥に含まれる生物利用可能態リンの挙動と水草による利用の間には未解明な部分が多いが、生物利用可能態リンの全量を水草が使えると仮定すると、最も水草が繁茂する9月頃でも、底質中には水草が利用可能なリンが残存していることになる。また、これまで述べてきたように、底質に含有するリンは水草の大量繁茂や水草対策事業によって減少していないこと、その量は水草成長による減少や堆積による増加傾向を示さないこと、表層と同程度の生物利用可能態リンが底質の少なくとも15-20cm層まで存在していることを合わせて考慮すると、今後長期間に渡って水草が大繁茂し続けたとしても、底質の生物利用可能態リンの枯渇や、それによる水草生育の制限が起こることは考えづらい。水草の繁茂量は年によって大きく異なるが、底質の栄養塩以外の環境条件によっては、これまで以上の密度で、長期間に渡って繁茂するポテンシャルがあることが示唆された。

2.4. まとめ

本研究では、南湖湖底の底質に含まれるリン量の時空間動態を明らかにし、生育している水草に含まれるリン量との比較を行うことで、今後の長期的な生育予測を試みた。その結果、現在の底質に含まれるリン量は、1990 年以降の水草の大量繁茂によって減少していないこと、湖底から 0-5cm の底泥に限ったとしても、大繁茂とされた 2014 年に生育した量の水草を十二分に支えられる量が存在することが明らかとなった。これらのことから、現在の南湖底泥の生物利用可能態リンは、水草が大繁茂と呼ばれる量まで生育するのに十分な量が存在し、リン以外の条件が良ければ、今後も長期間に渡って水草が生え続けるポテンシャルがあると考えられた。

現在、琵琶湖南湖では、1930 年代の水草繁茂面積・種組成・現存量を目標とし、船舶の航行障害や漂着した水草の除去を目的とした表層刈取りと、潮流の阻害や底層 DO の改善、枯死水草の堆積による湖底の泥化防止を目的とした根こそぎ除去が行われている。これらの施策については、住民生活の維持や南湖環境の改善に有用な施策と考えられるが、湖底の底質に含まれるリン量から見ると、今後の水草の生育を抑える効果は極めて小さいと考えられる。今後、琵琶湖南湖では潜在的には水草が生育し続けることを前提に、長期的視野に立って、水草管理目標の設定や刈取り・除去を計画していくことが重要である。

3. 水草刈取り・除去による生物・生態系への影響評価

3.1. はじめに

琵琶湖南湖では水草が大量繁茂することで、湖水が停滞するため、湖底の貧酸素化等が生じ、生態系への悪影響が問題となっている（琵琶湖環境科学研究所センター 2015; Ishikawa et al. 2019）。県はハーベスターを用いた水草刈取りに加え、2011 年から貝曳き漁具（マンガン）を用いた水草根こそぎ除去等の大規模な対策事業を行ってきた。水草除去の効果の検証については、これまで一部行われてきたが、その多くが水草量を減らすことに注目しており、それ以外の視点からの効果や生態系に対する影響評価はあまり行われていなかった。そこで、本研究では、2017 年度に滋賀県琵琶湖環境部琵琶湖政策課（現：琵琶湖保全再生課）とのマッチング会議を行い、水草除去事業を開始した 2011 年以降、水草大量繁茂によって生じていた障害が軽減しているかについて検討した。しかし、本件については、評価手法も十分確立しておらず、データセットにならない項目がほとんどであったため、それらの精査と評価に向けた課題の検討状況について報告する。一方、近年、水草を除去した湖底に、マット状の糸状藻類が繁茂している

状況が確認されている。これらの増加により、湖底環境の悪化や生物種の減少といった悪影響が懸念されるため、2017 年～2018 年に多地点での生物群集、環境要因の野外調査を行うとともに、2018 年～2019 年に、この底生糸状藻類の生態特性に関する情報を既存文献や室内実験により収集した。

3.2. 方法

水草除去の効果の評価検討

水草除去の効果は、水草量を減らすことだけとは限らない。ただし、水草量の減少以外の効果があるかの検証には、評価できるデータや指標が必要である。そして厳密に効果を評価するには、対照区との比較が必要である。しかし、本研究では大規模な野外実験を行うことができなかつたため、まず、既存の関連しそうな調査データの有無を調べ、評価への活用の可能性を検討した。そして、県での水草除去は水草大量繁茂の悪影響の改善を目指し実施していることから、平成 20 年の水草繁茂に係る要因分析等検討会検討のまとめ（水草繁茂の要因分析等検討会 2009）で示された水草大量繁茂による悪影響（表 3-1）を参考に、いくつかの環境・生態系にかかる項目について指標を考案し、2011 年以降、悪影響の軽減或いは改善傾向がみられるかを調べた。

表 3-1 水草繁茂の悪影響

（水草繁茂の要因分析検討会 2009 より）

1. 漁業障害

- a. 漁業操業への障害
- b. 渔場の減少
- c. 渔場環境の悪化

2. 船舶の航行障害

3. 生活への悪影響

- a. 臭気の発生
- b. 景観の悪化
- c. 琵琶湖疎水・取水施設の機能障害
- d. レクリエーション的価値の低下

4. 湖沼環境への悪影響

- a. 湖底直上の溶存酸素濃度の低下
- b. 湖底の泥化の進行
- c. 栄養塩の回帰
- d. 湖内水の流通障害
- e. 生態系への影響

3.2.1. 水草量の簡易推定

南湖の水草量については、2007年以降、5年に1回の頻度で、9月にダイバーによるコドラート刈取を用いた南湖52地点でのバイオマス測定データを保有している（芳賀・石川 2011；芳賀・石川 2014；芳賀・石川 2016；芳賀ほか 2019）。しかし、労力的にも毎年調査を行うことが不可能であったため、琵琶湖博物館が所有する調査船「うみんど」に搭載された魚探を用いて測定した（Haga et al. 2007）水草高のデータとの単回帰式から、各年の9月の南湖水草量（以下、水草量）を簡易推定した。

3.2.2. 船舶の航行障害の評価のための指標（表3-1-2）

琵琶湖南湖を航行する船舶では、水草の吸入や、スクリューへの絡まりなどで、エンジン温度の上昇やエンジンの停止などの問題が発生していることから、湖面から1mにスクリューがあると仮定し、水草高が水面下1mまでの間に入っている割合を水草に接触する率（危険率）として表し、0～100%までを5段階（0 安全です、>0～25 大丈夫でしょう、25～50 気をつけてください、50～75 かなり危険です、75～90 ほぼ航行不能、90>航行不能）に分

けて検討した。そして、75%以上を航行障害とした。データは、2007～2016年の9月に魚探を用いて計測した水中音響反射の映像データから、各調査あたり南湖全体を1798～1957の区画に分けて、区画ごとに危険率を計算した。

3.2.3. 水草悪臭の評価のための指標（表3-1-3a）

漂着した水草の腐敗により悪臭が発生する。水草悪臭を目的とした調査は存在しないが、2015年に県に寄せられた苦情内容を見ると、悪臭で刈取を要望するものが多いことから苦情件数を指標として検討した。

3.2.4. 水道水の悪臭評価のための指標（表3-1-3a）

水道事業者は、水道水の異臭味測定を行っている。水草の草体からカビ臭物質等は検出されていないが、水草に付着する微生物から発生する可能性も考えられ、9月の2-MIB、ジオスミンの検出量のデータを京都市上下水道局から入手した。

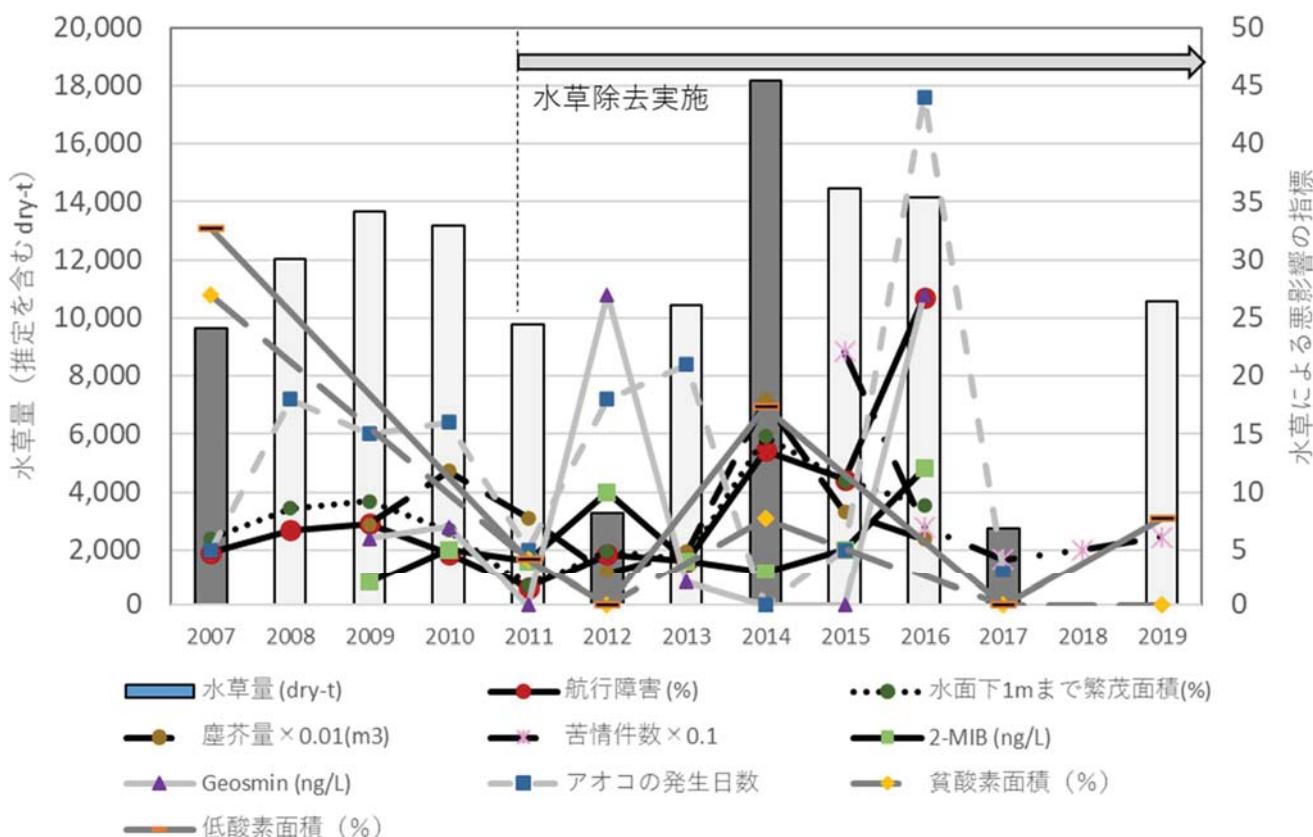


図3-1 南湖の水草量（推定を含む）の変化（左軸）と貧酸素面積と水草による悪影響指標の変化（右軸）
濃色は実測値、薄色バーは水草簡易推定値を示す。2018年は水草高が低く上手く推定できなかった。

3.2.5. 景観・レクリエーション的価値の評価のための指標（表 3-1-3b, 3d）

生長した水草が湖面を広く覆うことで景観悪化・レクリエーション価値を損ねているとの考えから、水草高の分布データを用いて水面下 1m まで水草が繁茂している面積を指標として検討した。

3.2.6. 取水障害の評価のための指標（表 3-1-3c）

琵琶湖疎水の藻よけ柵に水草（切れ藻・流れ藻）が付着して取水機能が低下することから、京都市上下水道局が琵琶湖疎水を通り流れてきた塵芥物の処理を行っている。年度別塵芥量の変化を指標として検討した。

3.2.7. 湖底直上の溶存酸素濃度低下の評価のための指標（表 3-1-4a）

南湖 52 地点において 2007 年、2011 年、2012 年、2014 年、2017 年、2019 年の 9 月の昼間に実施した湖底-30cm における溶存酸素濃度の分布調査の結果から（e.g. 石川・岡本 2015; Ishikawa et al. 2019）、溶存酸素濃度が 4mg L^{-1} を低酸素、 2mg L^{-1} 未満を貧酸素として、南湖全体の調査地点から割合を示した。

3.2.8. 湖内水の流通障害の評価のための指標（表 3-1-4d）

水草の繁茂により湖水が停滞することでアオコが発生する事例がみられていたことから（琵琶湖環境科学センター 2015）、各年度のアオコの発生日数を指標として検討した。

3.2.9. 生態系への悪影響の評価のための指標（表 3-1-4e）

水草量が多いとき、底泥中に生息する底生生物（ミミズやユスリカ）が少ないと関係がこれまでの研究からわかつてきたため（琵琶湖環境科学センター 2015）、政策課題研究 1 において南湖 9 地点で実施している底生生物調査から主な生物分類群のデータを生物指標として検討した。底生生物平均生息密度のデータは 2011 年～2019 年 8 月にエクマン採泥器を用いて採取し、 $250\mu\text{m}$ のメッシュで洗浄した後、計数された。

3.2.10. 底生糸状藻類の増減の評価

湖底の糸状藻類は、2012 年、2014 年、2017 年の琵琶湖南湖 52 地点におけるコドラート（ $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ）を用いた水草採取（芳賀・石川 2014; 芳賀・石川 2016; 芳賀ほか 2019）のうち、糸状藻類のみを分別して湿重量を測定したデータから評価を検討した。

3.2.11. 底生糸状藻類の生態特性調査

底生糸状藻類の現存量の季節変化を調べるため、琵琶湖南湖の 15 定点において、2017 年 4 月、6 月、9 月、12 月、2018 年 2 月にエクマン採泥器 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ を 2 回投下し、底生糸状藻類を採取した。実験室に持ち帰り、 $250\mu\text{m}$ のメッシュ上で洗浄し、糸状藻類の湿重量を測定し、一部のサンプルについては、底生生物の計数を行った。

また、増殖しやすい時期、環境についての知見を得るために、琵琶湖南湖の下阪本沖の湖底から糸状藻類を採取し、ラン藻用 CT 培地で温度勾配、光勾配による粗培養を行った。

3.3. 結果・考察

3.3.1. 水草量の簡易推定

実測した水草量と水草高から算出した水草量の推定結果を図 3-1 に示した。水草量は 2007 年～2011 年までは $10,000\sim14,000\text{ dry-t}$ の範囲で安定的に多い状態が続いていた。南湖の沖側で大規模な水草除去を開始した 2011 年以後の水草量は $3,000\text{ dry-t}\sim18,000\text{ dry-t}$ と年により大きな変動が見られるようになったが、長期的にみて年々減少に向ってきたとは言いにくい状態である。

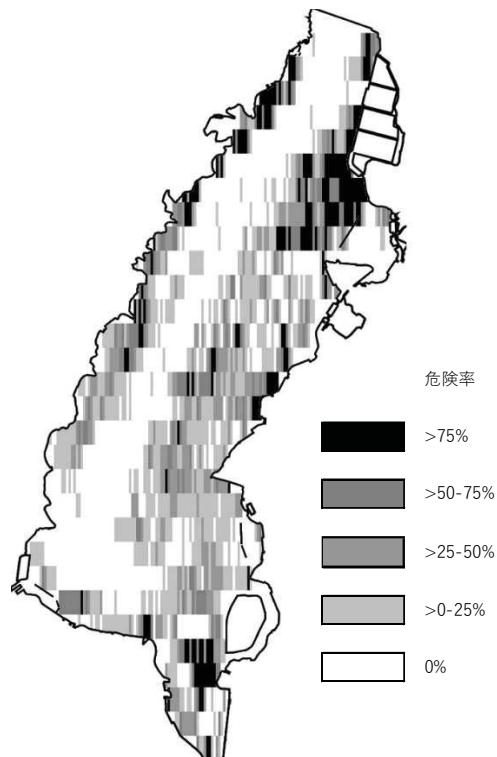


図 3-2 船のスクリューが水草に接触する危険率 (0% 安全です, >0~25% 大丈夫でしょう, >25~50% 気をつけてください, >50~75% かなり危険です, >75~100% ほぼ航行不可能)

3.3.2. 船舶の航行障害の評価のための指標

航行障害については、75%より大きい危険率を示す区画を航行障害とし、調査区画総数に対する割合の変化を図3-1に示した。すると、2014年以降、南湖全体に対する航行障害になっているエリアの割合が高い結果となった。最も航行障害になっているエリアの割合が多い2016年9月のスクリューが水草に接触する危険率の分布を図3-2に示した。この場合、南湖の27%の水域は航行障害になっているといえるが、航行障害が生じているのは、根こそぎ水草除去を頻繁に行っている沖側よりも、沿岸域の方で多かった。水草除去は、漁船を使った作業であるが、沿岸の浅瀬で航行障害が起きていると、水草を除去するために船が入ることすらできないため、ますます航行障害はひどくなる。一方、沖側の水草除去を頻繁に行っているところは、航行障害が生じていないため、水草除去の効果が示唆された。沿岸の航行障害への対策は、引き続き検討する必要があるだろう。

3.3.3. 水草悪臭の評価のための指標

水草の悪臭は、県に寄せられた苦情および刈取要望件数を指標にし、件数変化を図3-1に示した。水草量が少ない2017年、2018年は苦情や刈取要望も少なかったが、流れ藻の発生と沿岸への集積状況にも依存すると考えられ、2015年、2016年のように同程度の水草量であっても、苦情の件数に差がみられた。まだ、調査年数が少ないので、変化の傾向はよくわからない。そして、苦情件数は、人の感覚や感情に依存するため、生活影響への指標の1つとして、長期的に変化を見て検討する必要があると考えられた。

3.3.4. 水道水の悪臭評価のための指標

水道水のカビ臭物質2-MIBやジオスミンは、アオコの発生日数が多い時に、ピークが見られた（図3-1）。水草量との関係は図3-1からはよくわからない。水草から直接発生しているのではなく、水草に付着する藻類・菌類等の生物が関係しているかもしれないが、原因生物は未だ突き止められていない。長期的な減少傾向は見られていない。

3.3.5. 景観・リクリエーション的価値の評価のための指標

景観・リクリエーション的価値の指標として、南湖全体に対する水面下1mまで水草が繁茂している面積割合の変化を図3-1に示した。水草量が多い2014年に最も大きな値を示し、南湖全体の15%が水草による景観悪化が見込まれる状態であったことがわかった。長期的に水面下1mまで水草繁茂する面積が減少している傾向はみられない。しかし、広域的に水草が湖面を被覆する状態を測定し

ているデータがなかったことから、今回は、景観悪化の指標を水面下1mまでの繁茂面積としていたが、現場で観察してきた状況から実感が得られない結果であった。今後は、衛星やドローンを使ったリモートセンシングや、完全に表面を覆っている面積を検出できる手法を開発する等、景観悪化を測定する指標を再検討する必要があると考えられた。

3.3.6. 取水障害の評価のための指標

取水障害は、琵琶湖疎水で行われている塵芥量を指標とし、図3-1に示した。水草量が少なかった2012年は塵芥量も少なく、水草量が最も多かった2014年は塵芥量が多くなり、水草量に影響を受けやすいことが推察された。したがって、水草量と同様に長期的に取水障害が改善されたという傾向はみられていない。

3.3.7. 湖底直上の溶存酸素濃度低下の評価のための指標

湖底直上の溶存酸素濃度は、湖底-30cmにおける酸素濃度の分布から貧酸素($\text{DO} < 2 \text{mg L}^{-1}$)、低酸素水塊($\text{DO} < 4 \text{mg L}^{-1}$)の占める割合の変化を図3-1に示した。水草量が多いと湖底直上の酸素濃度が低下するが、2007年は水草量が約9,600dry·tに対して、低酸素地点の割合は33%、貧酸素地点の割合は27%であったのに対し、2019年は水草量が多い年であるにもかかわらず、低酸素地点の割合は8%、貧酸素地点は0であった。したがって、長期的にみると、水草の根こそぎ除去を大規模はじめた2011年以降、水草繁茂に伴う貧酸素の状況は回復してきたと推察された。

3.3.8. 湖内水の流通障害の評価のための指標

湖内の流通障害が生じているところでアオコが発生しやすいため、アオコの発生日数を指標として、図3-1に示した。水草量と関係なく変動し、長期的に増加傾向も減少傾向もわからない。

3.3.9. 生態系への悪影響の評価のための指標

水草が大量繁茂したとき、底泥に生息する生物が少ないとから、主要な底生生物平均生息密度を生態系の指標とし、2011年以降の変化を図3-3に示した。水草量が少ない2012年、2017年、2018年にミミズ類が多くなる傾向がみられたが、その他の分類群に関係性は見られなかった。また、いずれの分類群も長期的に顕著な増加傾向はみられていない。

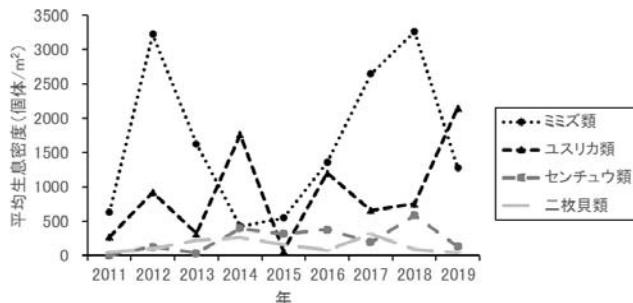


図 3-3 主な底生生物の 8 月の平均生息密度の変化

3.3.10. 底生糸状藻類の増減の評価

底生糸状藻類の分布変化を図 3-4 に示した。底生糸状藻類は、2007 年頃から水草に糸状藻類が大量に絡み付く状態が見られるようになり、その増加が懸念されるようになった。2012 年の南湖 52 地点における水草調査では糸状藻類の塊が採取され、南湖全体で 447dry·t となり優占第 4 位となった。水草量が最大 (18173 dry·t) となった 2014 年に糸状藻類も過去最大の 1547 dry·t となつたが、2017 年の水草調査によると、1,161dry·t であり前回調査より減少したもののが水草量が 2,761dry·t と多くないことから、湖底が底生糸状藻類にほぼ覆われた地点が目立っていた（芳賀ほか 2018）。そして、平面分布は沖側の南北方向の航路付近と旧草津川沖、大津港等の水草を頻繁に除去したエリアで多くなりやすいことがわかった。図 3-4 の分布図

でもわかるように、以前繁茂していた地点で消失した場合と以前繁茂していなかった地点に繁茂した場合がみられ、長期的に増加の一途ではないと推察された。

そして、底生糸状藻類への対応を検討するための知見を収集するため、本藻類の特性について調査した。顕微鏡観察および 16SrRNA 遺伝子による同定を行ったところ、湖底の糸状藻類は、藍藻（シアノバクテリア）の *Microcoleus wolfei* (Syn. *Lyngbya wolfei*) であることがわかった（写真 3-1）。

3.3.11. 底生糸状藻類の生態特性調査

本藻類の培養結果は、琵琶湖環境科学センター研究報告書（2019）で既に報告済みであるが、水中のリンが多い環境で増殖しやすい、光は弱くても増殖できる、水温 20°C 前後（春期と秋期）の温度で増殖しやすい特性傾向がみられた。

底生糸状藻類現存量の季節変化 は、琵琶湖環境科学センター研究報告書（2019）および図 3-5 で示したとおり、4 月～6 月の間と 9 月～12 月の間に水草除去をしていない地点で増加していることから、上記の培養結果と矛盾しない調査結果であった。また、近年、5 月、11 月に水草除去を行っており、底生糸状藻類も除去した際の現存量の減少はみられるが、再び増殖して除去効果が長く続かないという問題点もあることがわかった。

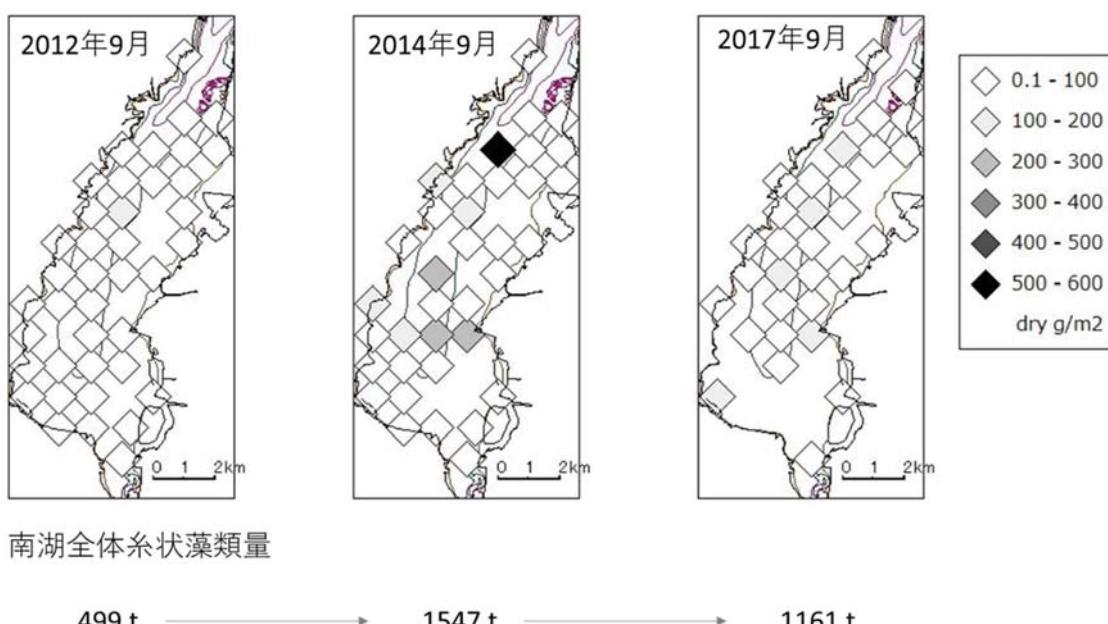


図 3-4 底生糸状藻類分布変化（ただし 2012 年、2017 年はそれぞれ芳賀・石川（2014）、芳賀ほか（2018）のデータより作図したため、*M. wolfei* 以外の糸状藻類も含まれる）



写真 3-1 南湖の底生糸状藻 *Microcoleus wolffii* (Syn. *Lyngbya wolffii*)
左：湖底の糸状藻類 右：顕微鏡写真

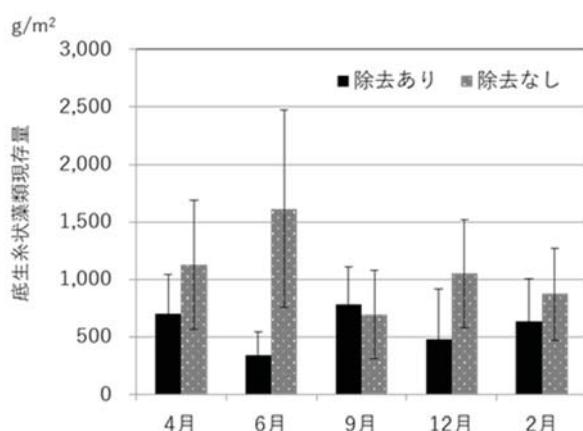


図 3-5 南湖 15 地点での底生糸状藻類の現存量季節変化
2017 年 4 月～2018 年 2 月

また、湖底に糸状藻類がマット状に広がったところの底生生物を調べたところ、主要な底生生物の水生ミミズ類がほとんど見られず、底生糸状藻類の繁茂は、底泥に生息する生物の生息環境を悪化させていると考えられた（琵琶湖環境科学センター研究報告書（2019）参照）。

本藻類について、海外では神経毒を生成するとの報告があるため（Hudon et al. 2014）、琵琶湖から採取された NIES-4236 株について国立環境研究所琵琶湖分室での遺伝子分析、琵琶湖から採取された藻からカビ臭物質の検査を京都市上水道局にて進めているが、現在のところ毒性およびカビ臭を生成するとの報告はない。

以上のことから、底生糸状藻類については、底生生物にとっての生息環境を悪化させるため、除去することが望ましいが、一部の地点で自然に消滅する場合も見られているため、第 6 期中期計画では、経過を観察することにする。

3.4. まとめ

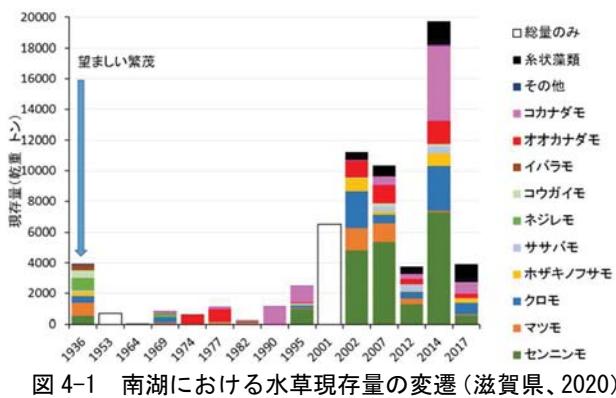
2011 年以降、水草の根こそぎ除去を大規模に行ってきただが、水草量の減少やコントロールは難しいことがわかつた。一方、水草量以外にも大量繁茂による悪影響が軽減されてきたかを評価するため、様々な指標を検討し、2011 年以降の長期的な変動を調べた。多くの項目において明瞭な変化は見られなかったが、湖底の貧酸素、低酸素水塊の形成は回復の傾向がみられ、船舶の航行障害は沿岸域で増加していることが伺われた。水草を順応的に管理するために、事業の評価手法の開発は今後の課題である。

また、底生糸状藻類は、水草除去後や水草が少ない地点に目立ってきたが、増加し続けている状況ではないため、経過観察が必要と考えられた。

4. 水草消長モデルを用いた現況・過去再現とシナリオ計算

4.1. はじめに

琵琶湖南湖では 2000 年代以降に沈水植物（以下「水草」という。）が大量繁茂しているが、繁茂の程度は年により異なっている。例えば、2014 年は観測された中では最も大量の繁茂が確認されたが、2012 年や 2017 年は少ない繁茂量で抑えられた（図 4-1）。「マザーレイク 21 計画（第 2 期）」（滋賀県、2011）では水草群落面積を 1930～50 年代に相当する 20～30km² にすることが目標とされているが、水質が比較的清澄であり光環境もよかつたと考えられる当時に繁茂量がそれほどまで抑えられていた原因は分かっていない。今後琵琶湖の水草繁茂を管理していく上で、水草繁茂量の多寡を規定する要因を明らかにすることができれば、適切な対策や目標設定に直結させることが可能となる。



以上より本研究では、水草の季節的、経年的な消長を計算できるモデルを構築し、様々な年度における再現計算を行うとともに、対策に関わるいくつかのシナリオ解析を行うことを目的とする。具体的には、まず 2010 年代の繁茂状況の再現を行い、観測値に適合するようにモデルのパラメータを調整する。続いて同モデルを用いて 1980 年代および 1930 年代の繁茂状況を再現する。最後にシナリオ計算として、2010 年代における特定条件を 1930 年代としたケース、および水草刈取量を増加させたケースの 2 種類の感度分析を行う。

4.2. 方法

4.2.1. モデルの概要

本研究で構築した水草消長モデルの概念図を図 4-2 に示す。南湖における水草茎葉部のバイオマスが、成長により増加し、呼吸や枯死、根部への移行、刈取によって減少すると考える。

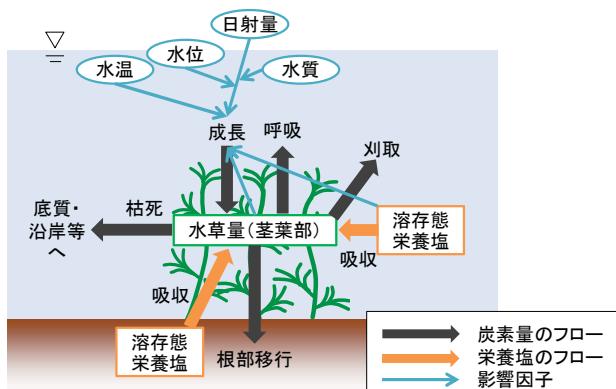


図 4-2 水草消長モデルの概念図

以下の式(1)により水草バイオマスの消長を計算する。

$$\frac{d(RPS)}{dt} = \{(1 - F_{psr})P - R - L\}RPS - RM \quad (1)$$

ここで、各変数は以下を意味する。

RPS : 水草量 (gC/m^2)

F_{psr} : 根部への移行係数

P : 生長率 ($1/\text{day}$)

R : 呼吸率 ($1/\text{day}$)

L : 枯死率 ($1/\text{day}$)

RM : 刈取量 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$)

このうち成長量を表す P は以下の式で表す。

$$P = P_{\max} f_1(N) f_2(I) f_3(T) f_4(RPS) \quad (2)$$

$$f_1(N) = 0.5 + 0.5 \frac{DIN}{K_{DN} + DIN} \quad (3)$$

$$f_2(I) = \frac{2.718}{\varepsilon H_{rps}} (\exp(-\alpha) - \exp(-\beta)) \quad (4)$$

$$H_{rps} = K_{hl} RPS^{K_{hl}}$$

$$\alpha = \frac{I}{I_{opt}} \exp(-\varepsilon(H_{wat0} + H_{bsl}))$$

$$\beta = \frac{I}{I_{opt}} \exp(-\varepsilon(H_{wat0} + H_{bsl} - H_{rps}))$$

$$\varepsilon = K_\varepsilon + K_{Tri} SS$$

$$f_3(T) = \frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \quad (5)$$

$$f_4(RPS) = \exp(-K_{SH} RPS) \quad (6)$$

また呼吸量を表す R は以下の式で表す。

$$R = R_{\max} \exp(K_T(T - T_r)) \quad (7)$$

ここで、各変数は以下を意味する。

P_{\max} : 最大増殖率 ($1/\text{day}$)

$f(i)$: 成長にかかる影響関数 (0~1)

($i = N$: 栄養塩, I : 光量, T : 水温, RPS : 混雑)

ε : 光消散係数 ($1/\text{m}$)

H_{rps} : 群落高 (m)

t : 計算開始からの日数 (day)

I : 日射量 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)

I_{opt} : 最適日射量 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)

H_{wat0} : 基準水深 (m)

H_{bsl} : 水位 (B.S.L.m)

T : 水温 ($^\circ\text{C}$)

T_r : 呼吸にかかる参照水温 ($^\circ\text{C}$)

R_{\max} : 最大呼吸率 ($1/\text{day}$)

DIN, SS : 濃度 (mg/L)

K_j : 係数

本モデルにおいては、水草の種類は考慮せず、単一種を仮定する。よく知られているように、水草は種類により季

節的な消長や越冬の有無、栄養の要求性、成長時の群落高等多様な要素が異なるが、本研究の目的がデータの限られる過去の再現を含むことから、全種を統合した平均的な消長を表すモデルとした。成長量に大きな影響を与える光消散係数（式（4）の ϵ ）についても、1930年代において利用できる水質項目が極めて限られることから、SSのみを用いることとした。栄養塩のうちリンは土壤から、窒素は土壤と水中の双方から吸収すると考えられているが（Carignan et al., 1980 ; Takayanagi et al., 2012）、前段部で報告したように土壤中のリンは水草の成長に十分な量が存在することから、成長律速としては水中の窒素のみを考慮した。

空間的な分布について考慮するために、南湖全域を500mメッシュに区分し、各メッシュにおける水深および水質等を設定した上で計算を行った（図4-3）。ただしメッシュ間の水草の移流は考慮しておらず、各メッシュで独立して計算を実施した。メッシュごとに条件が異なるのは、①水深、②水質（DIN、SS）、③刈取量、④初期値、の4つである（日射量・水位・水温は全メッシュ共通）。水質については観測地点の観測値を全メッシュに広げるため、「逆二乗の法則」に基づき観測地点の重みを決定し、各メッシュの水質値を計算で求めた。

各メッシュにおける水草量の初期値について、最初に全メッシュで同一の水草量を与えて初年度の助走計算を実施し、終了時（12月末）のメッシュ別水草量を初期値として与えて再び初年度から始まる本計算を実施した。

モデルパラメータは既存の研究で用いられている範囲の中で、観測値に適合するように調整した。調整には観測値と計算値の相関係数と、RMSEの双方を参考にした。

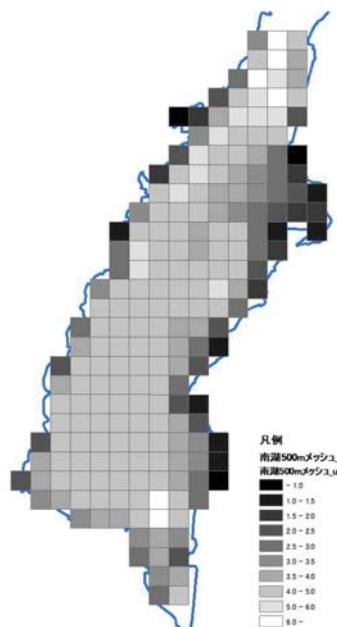


図4-3 南湖におけるメッシュ分割と水深

4.2.2. 現況再現と過去再現

現況再現は2011年1月～2018年3月を対象として行った。DINとSSは南湖の全観測地点（19地点）の観測値を、水温は唐崎沖中央（6B）における観測値を、日射量は彦根気象台の観測値を、水位は三保ヶ崎および堅田の平均値を用いた。水草刈取量は年間刈取量の実績値を4～11月の日数で割った日平均値を用いた。モデルの検証に用いる水草現存量については、5年に1回程度行われるSCUBAサンプリング調査の結果（芳賀ら、2014）と、1ヶ月に1回程度行われる魚群探知機を用いた調査結果（大塚ら、2004）の相関式を作成し、各月の値を推定した。

過去再現は、1981年1月～1988年3月と、1931年1月～1938年3月の2期間について実施した。1980年代の再現方法は基本的に2010年代と同様であるが、水草刈取量はゼロとした。1930年代の再現については、利用できるデータが限られることから、それぞれ以下のように設定した。DINは、京都市衛生試験所が南湖沿岸約10地点において年4回観測した結果を用いた。SSは、国土交通省が大宮川沖中央（7B）で観測している「濁度」と「SS」の回帰式を用いて、京都市衛生試験所が観測した「濁度」をSSに変換して用いた。水温は、彦根気象台の日平均気温と唐崎沖中央（6B）の水温の回帰式から計算した。日射量は、彦根気象台の日照時間と日射量の月別回帰式から計算した。水位は、三保ヶ崎・堅田の平均水位と鳥居川水位の回帰式から計算した。水草刈取量は、1930年代の「滋賀県統計全書」に掲載された藻類の漁獲量の平均値（28,452t/年）を、4～5月・8～11月に適用（6～7月は禁漁期のため）した。

4.2.3. シナリオ計算

2010年代で再現したモデルをベースとして、以下2種類のシナリオ計算を実施した。

「1930年代の条件設定」シナリオ：①水草刈取量を1930年代にした場合、②水位を1930年代にした場合、③水質（DIN・SS）を1930年代にした場合、④水温を1930年代にした場合、について計算。

「水草刈取量の増加」シナリオ：①水草刈取量を現況の2倍にした場合、②現況の5倍にした場合、③総量は変化させず、春季（4～6月）に集中させた場合、について計算。

4.3. 結果・考察

4.3.1. 現況再現と過去再現

2010年代について再現計算を行った結果のうち、南湖における平均水草量の経時変化を図4-4に示す。観測値と計算値の相関係数は0.854であり、良好な再現結果が得られた。特に2012年に水草量が激減したことや、2016年以

後に減少傾向にあることを再現できた。2012年は6月中旬から7月にかけて大型緑藻のスタウラストルムが大増殖したり、その後アオコ種が大増殖したりするなど、南湖の水質が非常に悪化した年であった。2016年から17年もアオコ種や大型緑藻が一時的に増加するなどして水質が悪化し、水草の光環境が悪化したことから成長量が減少したと考えられた。

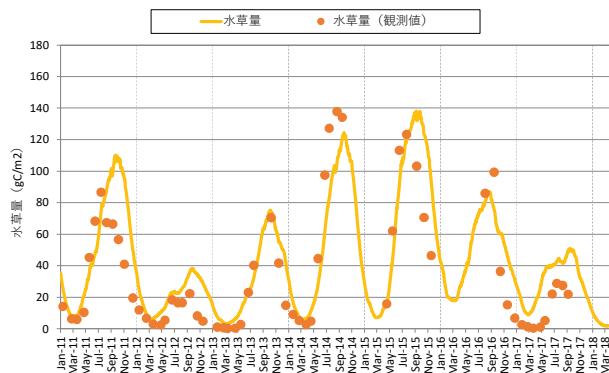


図4-4 南湖における平均水草量の計算結果(2010年代)

水草繁茂の分布形状について計算した結果の例を図4-5に示す。2012年は繁茂が沿岸部に限られるのに対して、2014年はほぼ全域で繁茂していることが分かるが、これは観測された事実と整合していた。一方で、モデルのメッシュサイズが500mであること、水草の種類を考慮していないこと、また限られた水質観測地点の結果を内挿補完して計算していることなどから、水域ごとの水草量を正確には再現できなかった。

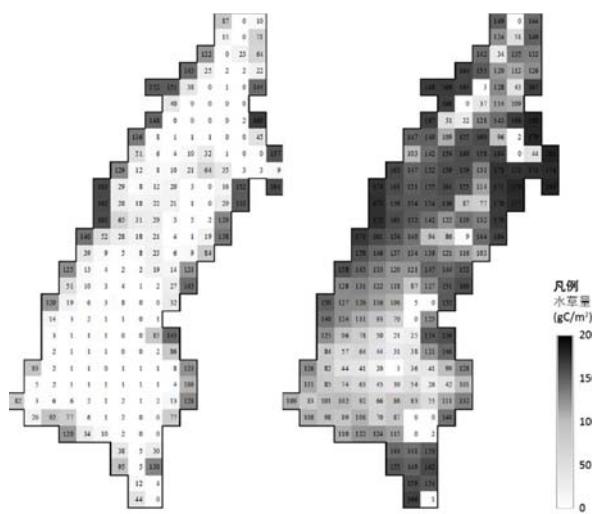


図4-5 水草量分布の計算結果例（左：2012年9月、右：2014年9月）（単位はgC/m²）

1980年代の平均水草量について再現計算を行った結果を図4-6に示す。2010年代よりも非常に少なく、全期間

平均で2010年代の18.2%の水草量であった。その原因是、1980年代のSS濃度が高かったためであり、2010年代の全観測地点・全期間における平均濃度が3.9mg/Lであるのに對して、1980年代では6.4mg/Lであった。1980年代は水草量が非常に少なかったことが分かつており（図4-1）、そのこととも整合した。一方で、計算では繁茂する水域は光環境のよい沿岸部に限定されたが、その場所は観測と必ずしも一致せず、モデルのメッシュサイズが大きく沿岸部の微地形を再現できていないことが原因と考えられた。

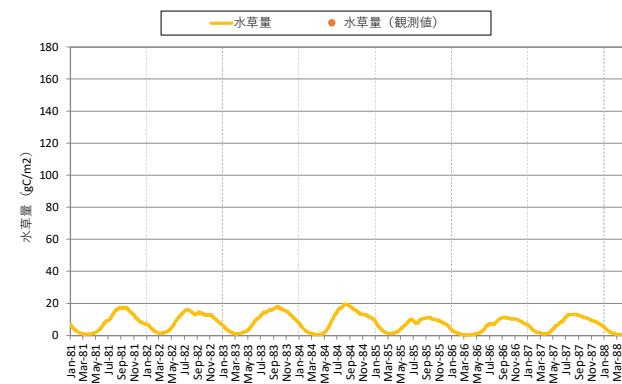


図4-6 南湖における平均水草量の計算結果(1980年代)

1930年代の平均水草量について再現計算を行った結果を図4-7に示す。1980年代より多く、2010年代より少ない水草量であり、全期間平均で2010年代の52.9%であった。図4-1では1936年の水草現存量が3,940トン（乾重量）となっており、換算すると約29gC/m²となる。図4-7では約20gC/m²となっており観測よりやや少ないものの、1930年代の繁茂傾向は捉えられていると考えられた。なお、計算において1936年の水草量が他年度に比べて少なくなっているのは、当該年度のSS濃度が高かったためである。ただし、当時の水質観測が1年間に4回しかなく、しかも沿岸部に限定されたものであったため、南湖全域でこのような傾向が見られたかについては定かではない。

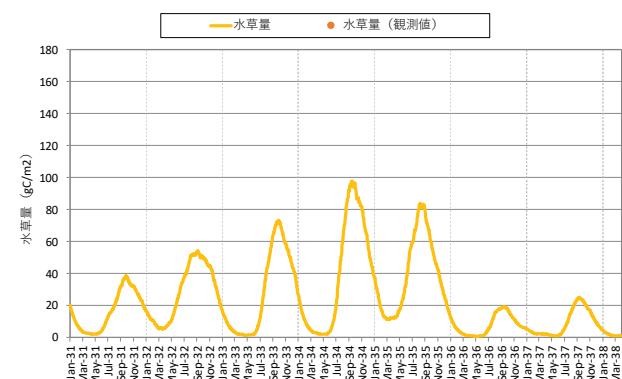


図4-7 南湖における平均水草量の計算結果(1930年代)

4.3.2. シナリオ計算

「1930 年代の条件設定」シナリオについて計算し、各ケースにおける全期間・平均水草量について示したのが図 4-8 である。「再現 2010」は 2010 年代について再現した結果を、また「＊1930」は要素＊＊を 1930 年代にした場合の計算結果を示している。「再現 1930」は 1930 年代について再現した結果を参考に示している。これより、2010 年代と 1930 年代の水草量の違いをもたらす原因是、影響の大きなものから順に①水位、②水温、③刈取量であることが分かった。水位については、2010 年代の全期間平均水位が -0.121 m B.S.L. であったのに対し、1930 年代は 0.374 m B.S.L. であり、1930 年代は近年より約 50cm も水位が高かった。SS や DIN といった水質については顕著な差は見られなかったものの、水位が非常に高かったために光が湖底まで十分に透過せず、繁茂量が抑えられたと考えられた。水温については 2010 年代の全期間平均水温が 16.9°C であったのに対し、1930 年代は 15.3°C であり、温暖化の影響で水草の繁茂しやすい条件になっていることが推察された。刈取量については今回は「滋賀県統計全書」に掲載された藻類の漁獲量を用いたが、それとは別に「自給肥料消費」として泥藻の量が 4~5 万トン程度あったことが分かっており、それを加えればより多量の刈取が実施されていたことになる。実際の採集量は公式統計よりも遙かに多いという報告もある（平塚ら、2006）。一方で統計全書に記載された刈取が特定の集落に偏っており不自然であるとする調査（久野、2019）もあり、実態は明らかではない。今後、当時の刈取実態が明らかになれば、刈取が 1930 年代の繁茂量抑制に与えた影響を推察することが可能となるだろう。

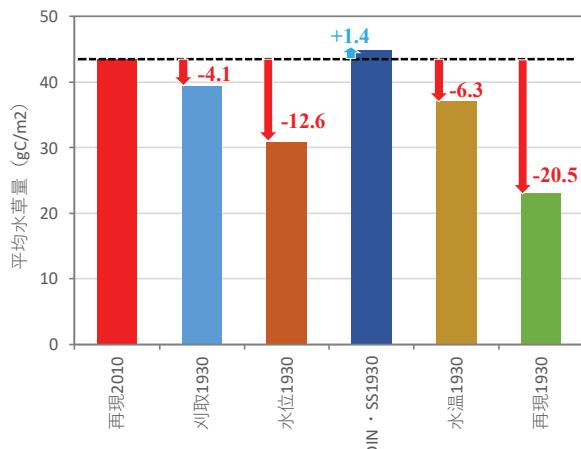


図 4-8 「1930 年代の条件設定」シナリオの計算結果

「水草刈取量の増加」シナリオについて計算し、各ケースにおける全期間・平均水草量について示したのが図 4-9 である。現在の水草刈取量を仮に 5 倍にしても水草量の

7.8%削減にとどまり、水草刈取の努力量により南湖全体の水草現存量を大きく減少させることは難しいと考えられた。一方で、沿岸部の悪臭対策や在来魚の回遊経路の確保、シジミ漁場における低酸素化の改善、航路の確保など、スポット的なコントロールには有効と考えられ、そうした取り組みを引き続きしていく必要がある。

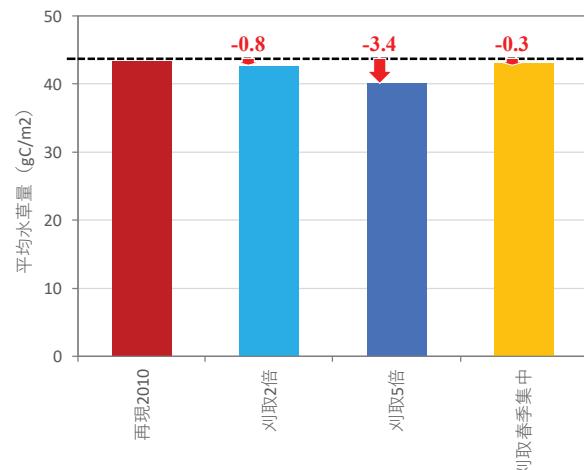


図 4-9 「水草刈取量の増加」シナリオの計算結果

4.4. まとめ

水草の季節的、経年的な消長を計算できるモデルを構築し、現況や過去の様々な年度における再現計算を行うとともに、本モデルを用いてシナリオ解析を行った。2010 年代における計算を行ったところ、適切にパラメータを調整することにより、水草の季節的な消長をほぼ再現することが可能となった。一方で一部水域においては繁茂の多寡を必ずしも再現できなかった。

続いて本モデルを用いて 1980 年代の再現を行ったところ、沿岸部のみに繁茂が見られることを再現できたが、繁茂箇所は観測とは必ずしも一致しなかった。沿岸部のみに繁茂するのは、当時の水質が 2010 年代よりも悪かったためと考えられた。また 1930 年代の再現を行ったところ、観測と同様に 2010 年代よりも繁茂量が少なくなった。

この要因を探るために特定の環境条件について 1930 年代としたシナリオ計算を行ったところ、①水位が高かった、②水温が低かった、③刈取量が多かった、の順に影響が大きかったと想定された。また水草刈取量に関するシナリオ計算を行ったところ、刈取だけで南湖全体の水草現存量を大きく減少させることは困難と考えられた。

現在、1930 年代の水草量が管理目標として掲げられており、直近 2 年ほどはそれに近い繁茂量となっているが、水質や気象といった環境条件に依存する部分が大きいと考えられる。今後は、観測を続けて水草繁茂の推移や要因

を把握すること、また水草の大量繁茂がもたらす悪影響を制限するための刈取については引き続き実施していくことと合わせて、条件が近年と大きく異なる1930年代を目標とすることについても再検討することが必要である。

5. 謝辞

第2章の研究を進めるにあたり、国立環境研究所琵琶湖分室の霜鳥孝一氏、高村健二氏には多大なる協力をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

第3章の研究は、琵琶湖政策課(現:琵琶湖保全再生課)の要請および協力に基づき実施された。琵琶湖環境科学センター環境監視部門、京都市上下水道局によるデータ提供、国立環境研究所琵琶湖分室による糸状藻類性状について情報提供をいただきましたので謝意を表します。

本研究成果のうち、2章の底質栄養塩の空間変動について、および4章の水草消長モデルの構築およびシナリオ計算については、琵琶湖博物館共同研究「琵琶湖南湖において沈水植物の量を適正化するための条件の探索」(研究代表者:芳賀裕樹)と共同で行った。

6. 引用文献

- Barko, J. W., & Smart, R. M. (1981): Sediment-based nutrition of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 10, 339–352.
- 琵琶湖環境科学センター(2015): 研究報告書別冊(平成23~25年度) 南湖生態系管理に関するサイエンスレポート3章 水草をめぐる南湖生態系の現況と課題 https://www.1beri.jp/app/webroot/files/03yomu/03-01kankoubutsu/03-01-03research_report/no1/files/dai3syou.pdf
- 琵琶湖環境科学センター(2019): 研究報告書(H30) 政策課題研究6 水草管理による生態系再生に向けた研究 https://www.1beri.jp/multidatabases/multidatabase_contents/detail/92/b430b86a87626ab1b0e1a8476fe928f7
- Carignan, R., and Kaliff, J. (1980): Phosphorus Sources for Aquatic Weeds: Water or Sediments? *Science*, 207, 987–989.
- 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.
- Hiroki, H., T. Ohtsuka, M. Matsuda, M. Asiya(2007): Echo sounding observations of coverage, height, PVI, and biomass of submerged macrophytes in southern basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology* 8:95–102.
- 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・石川可奈子(2014): 2012年夏の琵琶湖南湖における沈水植物の現存量分布ならびに2002, 2007年との比較 *陸水学雑誌* 75:107–112.
- 芳賀裕樹・石川可奈子(2016): 2014年夏の琵琶湖南湖における沈水植物の現存量分布ならびに2002, 2007, 2012年との比較 *陸水学雑誌* 75:107–112.
- 芳賀裕樹・酒井陽一郎・石川可奈子(2019): 琵琶湖南湖における2017年9月の沈水植物の現存量の平面分布 *陸水学雑誌* 80:13–21.
- 平塚純一・山室真澄・石飛裕(2006): 里海モク採り物語, 生物研究社.
- 久野実乃里(2019): 琵琶湖南湖における昭和10年代の藻採りの実態, 滋賀県立大学環境科学部卒業論文.
- Hudon, C., M. De Sève, A. Cattaneo (2014): Increasing occurrence of the benthic filamentous cyanobacterium *Lyngbya wollei*: a symptom of freshwater ecosystem degradation *Freshwater science* 33(2):606–618.
- 石川可奈子・岡本高広(2015): 水草繁茂と琵琶湖南湖の水質 *環境技術* 44:488–493.
- Ishikawa, K., Inoue, E., Hamabata, E., (2020) : Explosive Development and Control of Aquatic Weed, Lake Biwa: interactions between nature and people, Second Edition, Kawanabe, H., Nishino, M., Maehata, M., ed., 577–582, Springer Nature.
- Ishikawa, K., H. Haga, E. Inoue, S. Ban (2019) Determining suitable submerged macrophyte biomass in terms of dissolved oxygen concentration and biodiversity in the South Basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology* 20:69–82.
- 川崎竹志(2015): 琵琶湖の水草の順応的管理と有効利用への挑戦. *環境技術*, 44:500–505.
- 環境省水・大気環境局. (2012): 底質調査方法. 平成24年, 8, 226–229, http://www.env.go.jp/water/teishitsu-chousa/00_full.pdf.
- 水草繁茂の要因分析等検討会(2009) 水草繁茂の要因分析等検討会検討のまとめ <https://www-1.kkr.mlit.go.jp/biwako/others/disaster/pdf/090330data01.pdf>
- 大塚泰介・桑原靖典・芳賀裕樹(2004): 琵琶湖南湖における沈水植物群落の分布および現存量－魚群探知機を

用いた推定－，陸水学雑誌，65，13-20.

R Core Team (2019) : R: A language and environment for statistical computing. R, Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL, <https://www.R-project.org/>.

Ruttenberg, K. C. (1992) : Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. Limnology and oceanography, 37(7), 1460-1482.

Sakai, Y., Karube, Z., Takeyama, T., Kohzu, A., Yoshimizu, C., Nagata, T., Tayasu, I., and Okuda, N. (2013) : Seasonal and site-specific variability in terrigenous particulate organic carbon concentration in near-shore waters of Lake Biwa, Japan, Limnology, 14(2), 167-177.

滋賀県 (2011) : マザーレイク 21 計画(第2期改訂版) :

琵琶湖総合保全整備計画.

<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshiren/biwako/11350.html> (2020 年 10 月確認)

滋賀県 (2020) : びわ湖なう 2020.

<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshiren/biwako/13090.html> (2020 年 10 月確認)

滋賀県立衛生環境センター (1990) : 琵琶湖底質調査報告

書 (小差 61 年度～63 年度)、大津

Takayanagi, S., Takagi, Y., Shimizu, A., and Hasegawa, H. (2012) : The shoot is important for high-affinity nitrate uptake in *Egeria densa* a submerged vascular plant, Journal of Plant Research, 125, 669-678.