

琵琶湖南湖において水草刈り取りが沈水植物群落に与える影響

丸野慎也*・浜端悦治

滋賀県立大学環境科学部 〒522-8533 彦根市八坂町 2500

E-mail macroosd9@gmail.com

*責任著者

キーワード: 刈り取り 水草 水質 透明度

2015 年 12 月 12 日受付 2016 年 2 月 26 日受理

要旨 浅い湖沼では、沈水植物群落(以下、水草群落と呼ぶ)が植物プランクトン量の増加を抑えることで水質が改善される。1994 年に大渇水が起こり、琵琶湖南湖の水深が大きく低下した。この水位低下が湖底付近の光環境を改善し、水草の生長を促した。水草が増えたことで透明度が上昇し、さらに水草の生長を促し、過剰繁茂を引き起こした。過剰に繁茂した水草は水面を漂い、湖岸に漂着して腐敗し悪臭を放ったことや、船が航行障害を起こすなどの問題が発生した。滋賀県は 2011 年から水草刈り取り事業を本格的に開始した。我々はこの事業が水草群落に及ぼす影響を明らかにするために魚群探知機を用いて航行調査を行なった。

調査は 2010 年(水草刈り取り事業前)と 2012 年、2013 年に行なった。南湖に 10 本の測線を 1,600 m 間隔で東西方向に設定し、魚群探知機を搭載した船で測線上を航行した。魚群探知機で得られた映像に基づいて、水草群落を 40 m ごとにクロモ *Hydrilla verticillata* 群落、センニンモ *Potamogeton maackianus* 群落、2 種の混合群落の 3 タイプに分けた。同時に群落高と水深も記録した。群落タイプと群落高に基づいて、それぞれの地点における現存量の推定値を算出した後、800 m ごとに平均値を求めた。そして得られた 800 m ごとの平均値から、南湖の現存量および PVI(%) (水草が水塊に占める割合を 100 分率で表したもの)の分布図を GIS を用いて作成した。

南湖の現存量と PVI(%) は、2010 年が $12,757 \pm 1,513$ t および 32.8%, 2012 年が $4,236 \pm 1,255$ t および 17.1%, 2013 年が $7,836 \pm 1,553$ t および 25.7% であった。これらの結果から、現存量と PVI(%) は 2010 年から 2012 年にかけて大きく低下したが、2013 年には回復したことがわかった。この結果には、刈り取り面積と南湖の水質が関係していると考えられる。2012 年の南湖の水質を調べたところ、透明度は 2010 年、2013 年と比較して有意に低く、植物プランクトン量の指標である Chl-a は 2013 年、2010 年と比較して有意に高かった。今回の調査では水質が根こそぎ除去の効果を決める要因とは結論付けられなかった。しかし、水草の現存量の変動には除去面積と植物プランクトン量関わっていることが示唆された。

はじめに

琵琶湖では過去に大規模な渇水が起こった。昭和 48 年から平成 14 年まで長期間琵琶湖の水位が低下し(淀川水系流域委員会 2015), 1994 年の夏期には琵琶湖基準水位から最低で-1.23 m まで水位が低下した(山中ほか 1995)。この水位は、琵琶湖開発総合管理所が琵琶湖の水位の観測を開始して以来、最低の記録である(淀川水系流域委員会 2015)。

一方、夏季の水位低下は湖底の沈水植物の生育を促進したとして浜端(2002)は水位低下による沈水植物の繁茂を以下の 3 つの過程によって説明した: 1) 水位の低下により光は深い水域にまで到達し、湖底付近の光環境は改善した。2) 光環境の改善により沈水植物が成長可能な水域が拡大し、沈水植物の成長を促した。3) その結果、沈水植物は特に琵琶湖南湖(以下、南湖と呼ぶ)で短期間のうちに著しく生育域を拡大した。

沈水植物は、動物プランクトンと魚の相互作用および沈水植物と植物プランクトンの資源競争という 2 つの経路を介して水質を改善すると考えられている(Scheffer et al. 2001)。沈水植物群落は動物プランクトンに捕食者からの隠れ場所を提供する(Timm & Moss 1984)ので、動物プランクトンへの捕食圧が低下して動物プランクトンは増殖する(Matias et al. 2012)。その結果、植物プランクトンに対する捕食圧が増加し、植物プランクトンの増加は抑制される(Wetzel 2001)。それに加えて、沈水植物は植物プランクトンが利用可能な栄養塩の量を減少させるので、水質は改善される(Wetzel 2001)。

しかし、水草繁茂に係る要因分析等検討会(2009)は沈水植物の過剰な繁茂は南湖の水質を改善した一方で、様々な問題を引き起こしたと報告している。そのなかでも船舶の航行障害と沈水植物の腐敗は大きな問題となった。船舶の航行障害の問題は、水面付近の沈水植物が船のスクリューに巻きつき、エンジンを停止させたことが原因である。沈水植物の腐敗の問題は過剰に繁茂した水草が波や風、船のスクリューなどによって切断され、流れ藻となることで起こった。流れ藻は風や波によって大量に湖岸まで漂着し、そこで腐敗し、悪臭を放ったことで問題になった。

そこで、滋賀県は琵琶湖南湖の沈水植物を除去し、沈水植物の現存量を減少させる根こそぎ除去事業を開始した。根こそぎ除去とは沈水植物を根から除去方法である。この方法は沈水植物が再成長しづらく、長期間現存量を低く維持できる可能性が高いと考えられている。一方で沈水植物の表層だけを刈り取る表層刈り取りという方法もある。この方法は一時的に現存量を減少させる事ができるが、沈水植物が再成長しやすく、短期間で現存量が元に戻ると考えられている。この予測に基づいて、滋賀県は 2011 年度から根こそぎ除去を本格的に行なっている。

しかし、刈り取りが沈水植物群落に及ぼす影響を定量的に評価した研究はない。そこで我々は刈り取りが本格的に始まる前の 2010 年、刈り取り開始後の 2012 年と 2013 年に魚群探知機を用いて沈水植物群落の群落高調査を行ない、年ごとに南湖全体の沈水植物の現存量を推定した。この結果を各年の南湖で行なわれた根こそぎ除去面積の推定値と比較することで、刈り取り面積が現存量に与える影響を評価した。

方法

1. 調査地

琵琶湖南湖(以下, 南湖と呼ぶ)であり, 琵琶湖全体のうち琵琶湖大橋以南の範囲を指している. 南湖の平均水深は 3.5 m, 面積は 54.5 km², 貯水量は 2 億 m³ である(滋賀県琵琶湖科学研究センター).

2. 群落高調査

南湖に生育する水草の群落高, 種, 水深の調査を魚群探知機(Lowrance HDS-8, ストラクチャスキャン)を用いて行なった. 魚群探知機の振動子は L 字パイプに取り付け, L 字パイプを振動子が水面下 50 cm の位置になるように調査船の側面に設置した.

南湖北端の琵琶湖大橋から近江大橋の間に等間隔に北から 8 測線, 近江大橋から国道 1 号線の間に等間隔に北から 2 測線, 合計 10 測線を設けた(図 1)この測線を使用して 2010 年, 2012 年, 2013 年に調査を行なった.

魚群探知機のモニターに映し出された振動子下の水中構造の映像を SD カードに保存した.

調査は 2010 年 10 月 22 日~11 月 6 日, 2012 年 10 月 6 日, 10 月 13 日, 2013 年 11 月 23 日に行なった. なお, 2013 年の調査は天候不良のため調査時期が 2010 年, 2012 年に比べて遅れている. 船が測線上を航行するように GPS で常に位置を確認しながら, 10 km/h 以下で航行して調査を行なった.

3. 魚探映像の解析方法

映像の解析には, 株式会社ジムクオーツのホームページ(<http://www.kt.rim.or.jp/~jim/index.html>)よりダウンロードした Sonar Viewer Version 2.1.2 を使用した. 解析対象チャンネルは Structure downscan とし, 解析環境は Chart Options の Color Mode を”Color Blue Background”, Surface Clarity を”Medium”, Advanced Signal Processing (ASP) を”Normal”, Auto Sensitivity を”off”に設定した. また, Sensitivity の値を”50”, Color Line の値を”40”に設定した. マウスカースルを映像に合わせて Bottom Depth(水深), Cursor Depth(マウスカースルを合わせたポイントの水深), 緯度, 経度を表示させ, これらの情報を測線に沿って 40 m ごとに読み取り, 記録した. また, 南湖の優占種であるクロモの単一群落とセンニンモの単一群落の映像から, 2 種の特徴を読み取った. クロモ群落は粗で草丈が高い

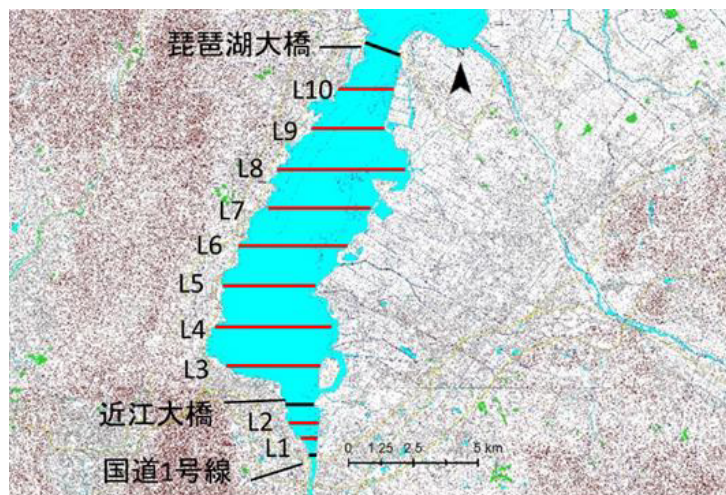


図 1. 琵琶湖南湖に設定した測線を示す. 測線は東西方向に, 等間隔に計 10 本設置した. なお, 近江大橋以北は測線(L10~L3)の間隔が 1,500 m であるが, L2 と L1 は近江大橋と国道 1 号線があるため, 測線の間隔が 500 m となっており, L2-3 の距離は 2,200 m となっている.

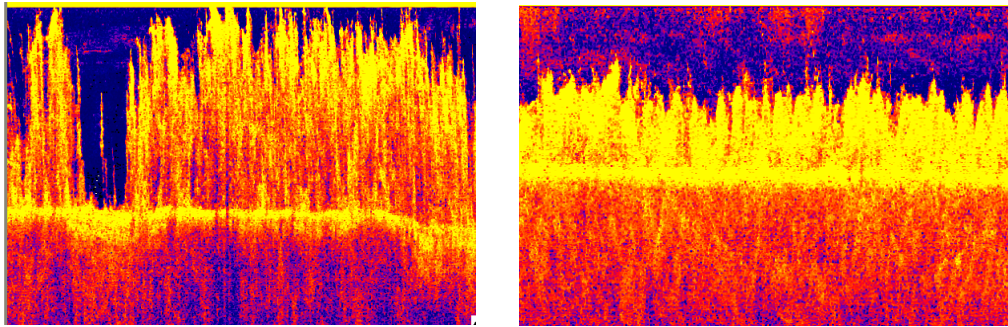


図 2.クロモ群落(左)とセンニンモ群落(右)の画像.

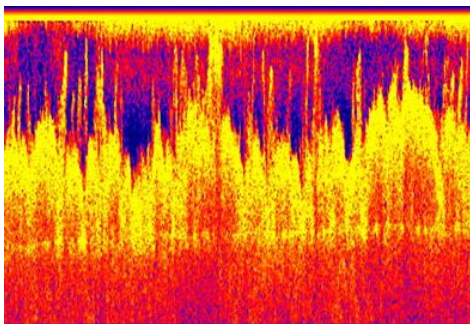


図 3.混合群落の画像.

のに対して、センニンモ群落は密で草丈が低いという特徴があった(図 2). その特徴を判断基準として沈水植物群落を、映像上でクロモ群落、センニンモ群落、および 2 種の混合群落(図 3)の 3 タイプに分けた.

4. 現存量及び PVI 加重平均値の推定

刈り取りによる優占種群落別の現存量測定値(芳賀ほか 2006)を用いて、沈水植物の現存量の推定を 40 m ごとに行なった. 次に現存量の平均値を 800 m ごとに求め、GIS 用いて現存量分布図を作成し、南湖全体の総現存量の推定を行なった. また、得られた水深と群落高のデータを用いて、水深に占める沈水植物の高さの割合を求め、これを沈水植物群落の体積が水塊に占める割合を表す PVI (Percent Volume Infestation)とした. 現存量と同様に、GIS を用いて南湖全体の PVI 分布図を作成し、PVI の加重平均値を求めた.

5. 琵琶湖南湖の水質及び刈り取り面積

調査を行なった 2010 年, 2012 年, 2013 年における南湖の水質(T-P: Total Phosphorus, T-N: Total Nitrogen, Chl-a: Chlorophyll a, 透明度)は滋賀県の環境白書から入手した. 各年の値は 7 月から 10 月までの平均値を用いた. なお、透明度については、水深が浅い場所では全透状態になり透明度を正しく測定することができないので、代わりに水深が深い南湖南端付近の唐橋流心の透明度を読み取って使用した. 沈水植物の刈り取り面積のデータは、2010 年, 2011 年, 2012 年については滋賀県琵琶湖環境科学部琵琶湖政策課から提供していただいた資料から得た. 2013 年の刈り取り面積は滋賀県の HP で公開されていた水草刈り取り予定を用いて刈り取り面積を求めた.

結果

1. GIS による南湖の現存量推定と PVI の分布図

南湖における沈水植物の総現存量は、2010 年が $12,757 \pm 1,513$ t, 2012 年が $4,236 \pm 1,255$ t, 2013 年が $7,836 \pm 1,553$ t と推定された。また、現存量分布図(図 4)から 2010 年には現存量が多い水域が多く、2012 年には現存量の少ない水域が多いことがわかった。その後 2013 年には現存量の多い水域が広がった。

PVI は、2010 年には 32.8%, 2012 年には 17.1%, 2013 年には 25.7%であった。PVI の分布図(図 5)を見ると、現存量の経年変化と似た傾向であり、2010 年には PVI の高い水域が多かった。2012 年には南湖全体で PVI の値が下がり、特に L3, 4, 5 で顕著に低下した。2013 年には 2011 年と比較して PVI の高い水域が広がった。

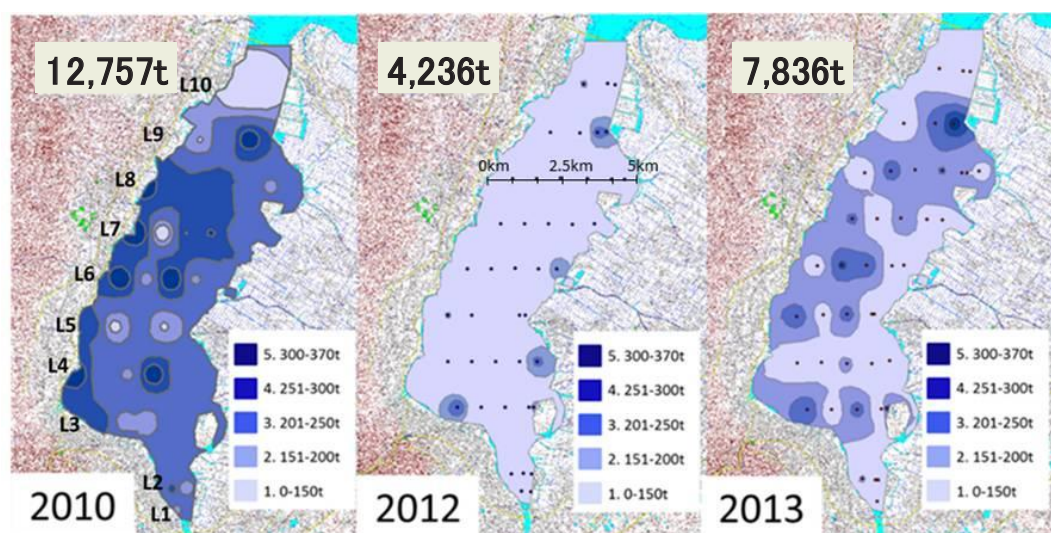


図 4.各年の水草現存量分布図.

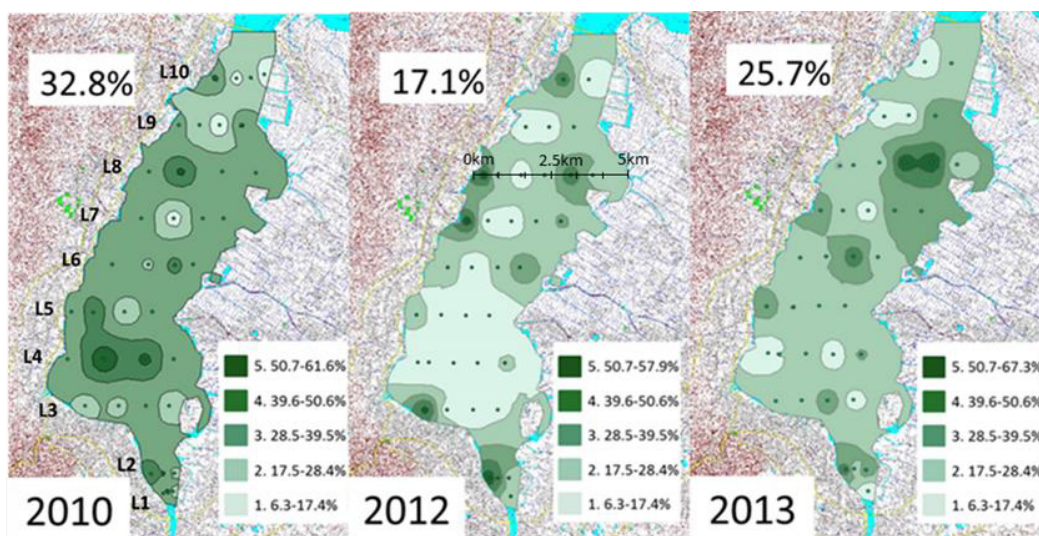


図 5. 各年の PVI 分布図.

2. 2010 年から 2013 年までの根こそぎ除去面積の推移

2010 年から 2013 年までに南湖で行なわれた根こそぎ除去の面積の推移を図 6 に示す。2010 年の刈り取り面積が 1.4 km²であったのに対し、2012 年には 16.2 km²と 10 倍以上に増加した。

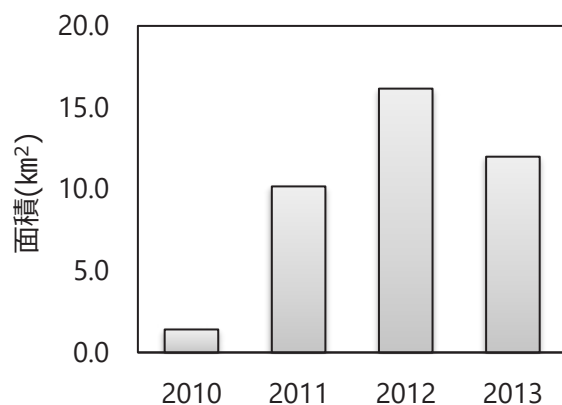


図 6. 根こそぎ除去面積の推移.

3. 各年の水質変動

2010 年から 2013 年までの T-P, T-N, Chl-a, 透明度の値を図 7 に示した。T-P は 2011 年には他の年に比べて低い傾向にあった。T-N は 2012 年には他の年に比べて高い傾向にあった。Chl-a 濃度

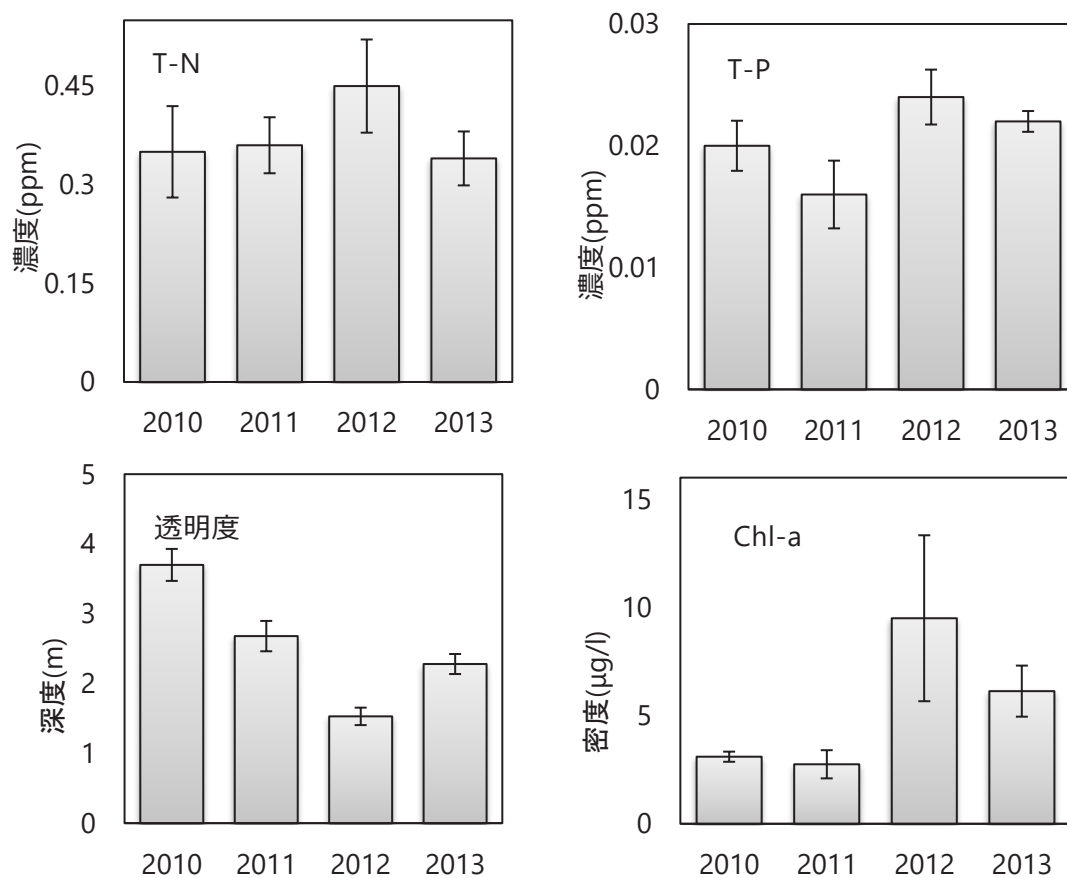


図 7. 各年の南湖の水質.

は、2010 年と 2011 年は 2012 年と 2013 年に比べて低いことが分かった。透明度は 2010 年が最も高い値を示したが、2012 年に大きく低下したことが分かった。

2012 年は Chl-a 濃度が高く、透明度が低い年であることが分かった。しかし、両項目ともに 2013 年に改善した。また、2010 年は他の年と比べて Chl-a 濃度が低く、透明度は最も高いため良好な水質であった。

次に 2010 年、2012 年、2013 年の推定現存量と夏季の Chl-a 値の相関図を図 8 に示す。この図から水草の現存量は Chl-a 値が高い年ほど減少しており、現存量と Chl-a 濃度は負の相関関係であることが分かった。

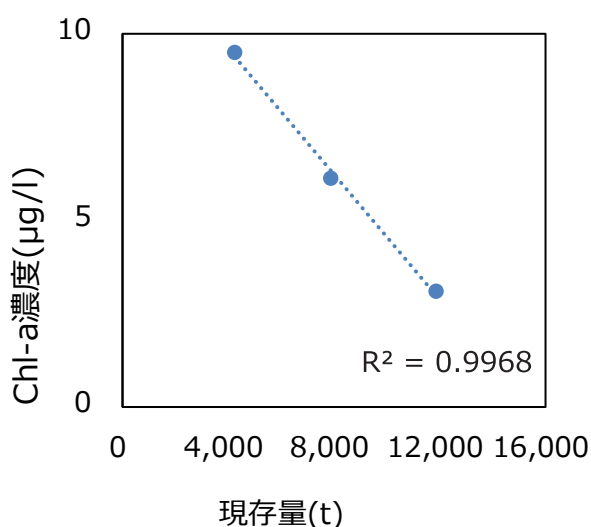


図 8. 現存量と Chl-a の相関関係。

考察

刈り取りによって現存量は減少したか

図 9 より、刈り取り以前の現存量と試験的に小規模の刈り取りが行なわれた 2010 年の現存量を比較すると、2002 年と 2007 年の現存量はそれぞれ $10,735 \pm 3,030$ t および $9,966 \pm 2,656$ t であり(芳賀 2011)、ほぼ同じ水準であることが分かった。したがって、2010 年の試験的な刈り取りは現存量にほとんど影響しなかったと推察される。刈り取りが本格的に始まった 2011 年からは、刈り取り量に応じて現存量が減少した(図 9)ことから判断して、本格的な刈り取りには現存量を減少させる効果があると考えられる。

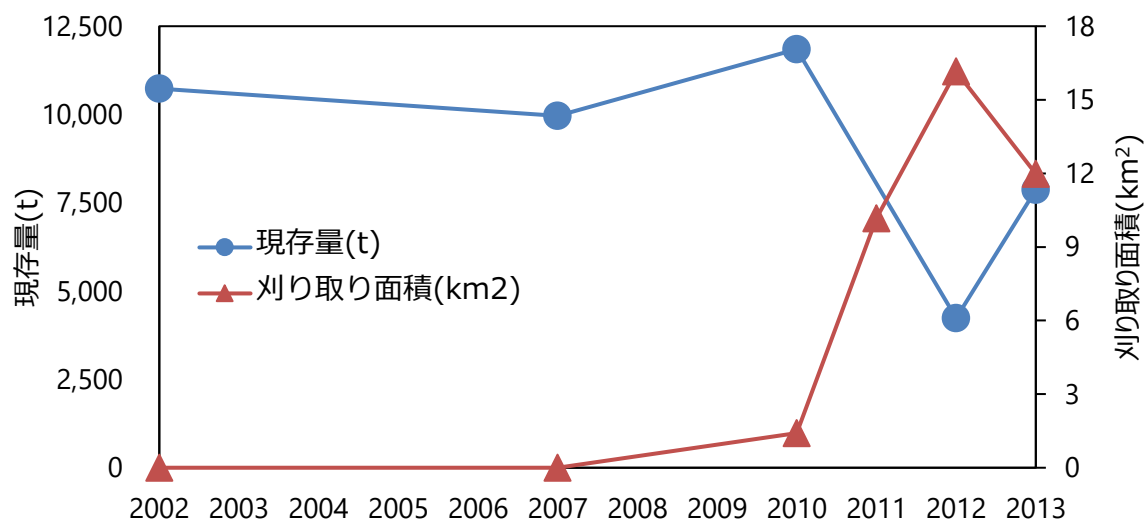


図 9. 南湖の推定現存量と刈り取り面積の推移。

水質と現存量の変動

水草の現存量は根こそぎ除去によって減少したが、減少の程度は水質に依存する可能性がある(図8)。今回の結果からでは根こそぎ除去と植物プランクトン量のどちらが影響を及ぼしているのか明らかにできない。しかし、現存量と植物プランクトン密度の間には負の相関関係があることが明らかであるため、水草の現存量の変動と刈り取り面積、植物プランクトンの密度との間には関連があることが示唆される。

南湖の沈水植物群落は水質浄化に寄与する量であるか

沈水植物の PVI が 15-20%を超えかつ魚類の密度が低い場合には、大型の動物プランクトンの現存量が大きくなり、植物プランクトンの現存量が小さくなることが報告されている(Schriver et al. 1995, Crowder & Cooper, 1979)。PVI が 15%未満の場合には、魚の捕食圧に対する動物プランクトンの感受性が下がらないので、動物プランクトンの生存率が減少すると考えられる。また、中村(2008)は PVI が増加するほど水質が改善され、PVI が 30%程度になると十分に水質が改善されると報告している。

2012 年の PVI は 17.1%と動物プランクトンの感受性が下がる閾値の下限に近い値であった。そのため、Chl-a の増加及び透明度の低下や、沈水植物群落が衰退する可能性があったが、2013 年の秋には PVI、現存量ともに増加し、Chl-a 及び透明度も改善傾向にあった。したがって、2012 年の沈水植物群落の減少は一過性のものであり、2013 年まで南湖の沈水植物群落は水質改善に寄与していたと考えられる。

南湖の水草刈り取り事業

湖沼には水生植物が存在している濁りの弱い状態と、水生植物が存在しない濁りの強い状態の 2 つの安定状態が存在する(Scheffer et al. 2001)。一方の安定状態からもう一方の安定状態に移ることをレジームシフトといい、濁りの閾値を越えると起こる現象であると考えられている(Scheffer et al. 2001)。例えば水生植物が繁茂している水系から水生植物を取り除くと、植物プランクトンが優占し、水生植物が存在しない濁りの強い水系へシフトすると考えられる。

1930 年代から 1950 年代の南湖は人為的な水質汚濁が少なく、透明度が高かったと考えられている(水草繁茂に係る要因分析等検討会 2009)。それに加えて、南湖で藻刈りが盛んに行なわれていたことから水草が繁茂していたと推察されている(水草繁茂に係る要因分析等検討会 2009)。

しかし、1960 年代から 1990 年代初期になると人為起源の水質汚濁が著しくなり南湖が富栄養化した結果、水草が衰退したと考えられる(水草繁茂に係る要因分析等検討会 2009)。この時期に南湖は水草が存在する湖から水草の存在しない水系へシフトしたと考えられる。

その後、1994 年以降、夏季に低水位になる年が続いた(淀川水系流域委員会 2004)。これにより、湖底付近の光環境が改善され、水草が再び生長できるようになった。この渇水を契機に南湖は、水草の存在しない湖から再び水草の存在する湖にシフトしたと推察される。

そして、現在は 1930 年代から 1950 年代と比較して湖底の泥質化が進んでいることによって水草の生育しやすい環境となっている。それに加えて、湖水の栄養状態も中栄養湖から富栄養湖へとシフトしたことも水草の生長を促していると考えられる。その結果、水草が過剰に繁茂し、人間生活へ悪影響を及ぼしていると考えられる。

今回の調査で、一定以上の規模で行なう水草の根こそぎ除去には、水草の現存量を減少させる効果があることが示唆された。また、水草の現存量の増減に関わる要因として、植物プランクトンの密度、すなわち湖水の透明度と、刈り取り面積が重要である事が示唆された。

しかし、水草の刈り取り規模は慎重に決定する必要がある。現在の南湖は水草が存在する安定状態にあるが、刈り取り規模が大きすぎると水草の存在しない安定状態へシフトする可能性がある。

謝辞

本論文を作成するにあたって添削、指導をしてくださった西田義隆先生と、研究計画や調査方法の指導をしてくださった(故)浜端悦治先生に深く感謝致します。

引用文献

- 琵琶湖・淀川水質保全機構. 2015. BYQ 水環境レポート-琵琶湖・淀川の水環境の現状-平成 25 年度 2013. pp. 1-9.
- Crowder, L.B. & Cooper, W.E. 1979. Structural complexity and fish-prey interactions in pond: appoint of view. Response of fish to habitat structure in standing water. Am. Fish. Soc., North Central Division, Special Publication 6: 2-10.
- 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: 69-79.
- 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.
- 浜端悦治. 2001. 琵琶湖における夏の渇水と湖岸植生面積の変化-2000 年の渇水調査から-. 滋賀県琵琶湖研究所所報 20: 134-145.
- 水草繁茂に係る要因分析等検討会. 2009. 水草繁茂に係る要因分析等検討会 検討のまとめ. 水草繁茂に関する要因の経年変化. pp. 5-13.
- Scheinin, M., Scyphers, S. B., Kauppi, L., Heck, K. L. Jr & Mattila, J. 2012. The relationship between vegetation density and its protective value depends on the densities and traits of prey and predators. Oikos 121: 1093-1102.
- Schrivier P., Bogestrand J., Jeppesen E., & Martin S. 1995. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton-phytoplankton interactions: large-scale enclosure experiments in shallow eutrophic lake. Freshwater Biol. 33: 255-270.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C. & Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature 413: 591-596
- 滋賀県琵琶湖科学研究センター. (オンライン) <http://www.pref.shiga.lg.jp/d/biwako-kankyo/lberi/>, 参照 2013-12.

- Timms, R. M. & Moss, B. 1984. Prevention of growth of potentially dense phytoplankton populations by zooplankton grazing, in the presence of zooplanktivorous fish, in a shallow wetland ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* 29: 472-486.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology*. 3rd ed. Academic press. San Diego.
- 山中 直・藤原直樹・佐貫典子・松岡泰倫・若林徹哉・一瀬 諭・田中勝美. 1995. 1994 年の渇水に伴う琵琶湖水質の変動. *環境システム研究* 23: 376-381.

Izunuma-Uchinuma Wetland Researches 10: 9-19, 2016

Effects of macrophyte reaping on macrophyte community at southern part of Lake Biwa

Shinya Maruno* & Etsuji Hamabata

Graduate School of Environmental Science, University of Shiga Prefecture. 2500 Hassaka, Hikone,
Shiga 522-8533, Japan

E-mail macroosd9@gmail.com

*Corresponding author

Abstract In shallow lakes, macrophytes may improve water quality by keeping phytoplankton at low densities. In the southern part of Lake Biwa, a rare occurrence of severe drought in 1994 dropped the water level maximally down to -123 cm below the standard level. This drought event improved transparency and light condition of lake water, resulting in the excessive flourish of macrophytes. Massive amount of floating macrophytes drifted against the lake shore and spoiled, giving off a bad smell and entangled boat screws. Since 2011 the local government started a macrophyte reaping project. To examine the efficacy of the project our research group tracked concentration of macrophytes using a fish finder in 2010 (before the reaping), 2012 and 2013 (after the reaping). We set 10 census lines, separated by 1,600 m across the southern part of Lake Biwa. We recorded the macrophyte community height, depth and type (*Hydrilla verticillata*, *Potamogeton maackianus* and mixed community) every 40 meters on the fish finder charts. We estimated the biomass for each point and calculated the biomass of an 800 meter area based on the average biomass of three types of dominant species and made a biomass map GIS. In addition, we calculated the PVI (percent volume infested by macrophytes) in the vertical water column by factoring in the water depth and community height. The estimated total biomass and the mean PVI were 11,850 t and 32.8%, 4,236 t and 17.1%, and 7,873 t and 25.7% in 2010, 2012 and 2013, respectively. These results showed that both biomass and PVI dropped greatly from 2010 to 2012, but

recovered to some extent by 2013. The big drop in biomass observed in 2012 and the resultant recovery in 2013 may be explained by the reaping treatment and phytoplankton density, the latter of which was high in 2012 and low in 2013 in terms of chlorophyll A concentration. This suggests that reaping is effective to suppress excessive macrophyte growth specifically when phytoplankton density is higher than a threshold value.

Keywords: macrophyte, reaping , transparency, water quality

Received: December 12, 2015/ Accepted: February 26, 2016