

# 琵琶湖里湖循環プロジェクト： 未利用バイオマス資源の利活用を通して循環型社会をつくる

伴 修平  
環境生態学科

水辺や水中に繁茂する植物（専門的には維管束植物という）を一般には「水草」と総称する。これが異常繁茂することによる環境被害（漁船や遊覧船の航行障害、溶存酸素の低下、悪臭や景観悪化など）は、日本だけでなく世界各地で見られるようになって久しい<sup>(1)(2)</sup>。本学が隣接する琵琶湖も例外ではなく、1990年代後半から増えだした水草（これは沈水植物の仲間）は、特に南湖で著しく増加し、今では夏になると湖面のほとんどを覆い尽くすほどに繁茂する<sup>(2)</sup>。近年は、オオバナミズキンバイやナガエツルノゲイトウといった新種の外来水生植物が繁茂するようになり、環境被害だけでなく在来水生植物の生息を脅かすまでになっている。

一方で、これら水草は本来水域生態系にはなくてはならない存在であり、適量の水草繁茂は、水質浄化に寄与し、あるいは魚介類の隠れ場所や産卵場所を提供し、仔稚魚の生育場所となってきた。また、過去には肥料として農地に施用されていた歴史のあることが知られており、琵琶湖周辺でも、ほんの60年程前までは盛んに刈り取られ高値で取引されていたことが資料として残っている<sup>(1)(3)</sup>。つまり、水草は陸域から流入する栄養によって生長し、水域での役目を終えた後は刈り取られ、農地に肥料として施用され、農作物として人間社会に還元されていたのだ。これを里山と農地の関係になぞらえて「里湖循環型社会（さとうみじゅんかんがたしゃかい）」と呼んだ人がいる<sup>(3)</sup>。

滋賀県では、毎年数億円の公費を投じてこの増えすぎた水草を刈り取って処分しているが、それは琵琶湖南湖に繁茂する水草量のほんの5%程度に過ぎない<sup>(1)</sup>。刈り取られた水草は3年かけて堆肥にされるが、水草処理にかかる費用を補填するには到底足りない。我々は、過去6年間、刈り取った水草をメタン発酵で処理し、水草バイオマスをメタンガスに還元することでエネルギーに変換し（メタンは燃えるため）、さらに発酵液分残渣（消化液と呼ぶ）を使ってクロレラなどの微細

藻類を培養、あるいは野菜を栽培することで有価物として人間社会へ還元するための技術開発を行ってきた。2014年からの3年間は、環境省の環境研究総合推進費による研究プロジェクト「水草バイオマスの持続可能な収穫と利活用による湖沼生態系保全技術の確立（4-1406）」を行った<sup>(4)</sup>。本プロジェクトは、水草を利活用することによって水草の異常繁茂がもたらす問題を解決するものであり、伝統的知恵と近代科学技術を融合した現代版「里湖循環型社会」を構築するための基礎的知見を集積することに大いに貢献した。以下にその概要を説明する。

水草は元来水域生態系になくてはならない要素の一つである。しかし、どの程度の存在量が適量なのか検討した研究はほとんど見当たらない。そこで、我々は水草に付着する生物の多様性と湖底付近の溶存酸素量(DO)を指標に琵琶湖南湖における適正な水草生物量の評価を試みた。琵琶湖南湖に設定した52地点における水草生物量、これらに付着する生物種の多様性、そして湖底直上のDOについて調べた<sup>(5)</sup>。湖底直上のDOは水草が水柱に占める割合が60%を上回ると2mg/L程度まで低下したのに対して、水草に付着していた微小動物の種数は水草割合が30%を下回ると急激に低下することが分かった(図1)。つまり、DOと付着生物種数を指標にすると、水柱に水草が占める割合は30~60%程度が適当と評価することができた。

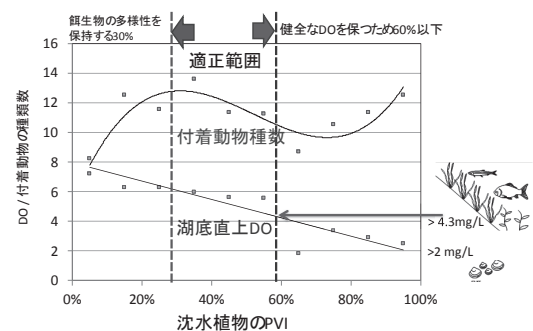


図1：水柱に水草が占める容積割合（PVI）と湖底直上溶存酸素量（DO：□）および付着動物種数（△）の関係

刈り取った水草は水分を多く含んでいるため、焼却処理には不向きであり、多くの夾雑物（ルアー針や釣り糸など）が混入して農地への施用も難しい。我々は、これをメタン発酵処理することでエネルギー変換する方法を採用することにした。ところが、水草をメタン発酵処理すると水草の種によってメタン生成量に差が生じることが分かった<sup>(6)</sup>。これは水草に含まれるリグニン量に依存することが明らかになり、適切な前処理の必要性が見えてきた。ここでは、熱アルカリ処理が有効であることが分かり、本学湖沼環境実験施設に設置した200Lのベンチスケールリアクターを用いた実験では、60%以上の高いメタン変換率を達成し、安定的な運転を確認することができた。

次に、メタン発酵の結果得られる消化液を用いて、クロレラ (*Chlorella sorokiniana*) の大量培養に関する技術開発を行った。消化液には、多量の窒素やリンあるいは微量金属類などが含まれており、クロレラなど微細藻類の培養にはうってつけである。しかし、実際に培養試験を行うと消化液のみでは上手く培養できないことが分かった。微量金属のうち、マグネシウム (Mg) が不足して十分な収量を得られないのである<sup>(7)</sup>。裏を返せば、Mgさえ必要量添加すれば、一般に使用される藻類培養液と同等かそれ以上のクロレラ収量を得ることができるということが分かった。実は、消化液に含まれるMgの含有量自体はそれほど低くはなく、溶存有機物 (DOM) がMgを吸着することで微細藻が使えなくなっていることが後日明らかになる。さらに、Mgを直接添加しなくても、培養液のpHを若干低下させることによって、MgがDOMから離れて微細藻が利用可能になることで十分な収量を得ることができることも分かった。10Lのフラットパネルリアクターを用いたベンチスケールでのクロレラ連続培養では、毎日乾重量で0.6~0.8 g/Lのクロレラを収穫することができた(図2)<sup>(8)</sup>。消化液は10倍に希釈してあるので、結果として水草1kgから乾燥重量で6~8gのクロレラを生産できる計算になる。

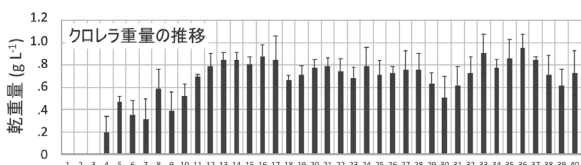


図2：10-Lのフラットパネルリアクターを用いた40日間のクロレラ連続培養。

本研究プロジェクトによって、琵琶湖南湖に過剰繁殖する水草（沈水植物）は、多様性とDOで適正量に管理することができ、一方で、刈り取られた水草は効率的にメタン発酵処理、エネルギー変換され、消化液はクロレラの大量培養に利用可能であることが明らかになった。2017~2018年には、草津市からの研究助成を受けて1トンのメタン発酵槽を用い、草津市内のハウス栽培農家から多量に排出される廃野菜（野菜は可食部以外の部分は廃棄物となる）を材料にして、これと水草と一緒にメタン発酵することで処理し、この発酵消化液を用いて再び野菜栽培に循環利用する方法について研究した。ここでも、いくつかの問題点が見出されたが、市販の肥料を用いた場合と同程度の収穫の期待できることが分かった<sup>(9)</sup>。直近の3年間には、本学の特別研究助成をいただき、オオバナミズキンバイを用いたメタン発酵とその消化液を使った微細藻類培養および野菜栽培についても研究を行い、成果を上げつつあるところである。

いまや現代版「里湖循環型社会」の実現は目の前である。水草も廃野菜も今は未利用の有機廃棄物だが、我々の方法で処理することで循環利用が可能となる(図3)。これらはもはやゴミではなくエネルギーや有価物を生み出すための資源とみなすことができるのだ。21世紀は使い捨てとそれが生み出すゴミの集積が終わりを告げる時代になるだろう。多くのゴミが資源とみなされ、循環利用される社会は、もうすぐそこまで来ている。

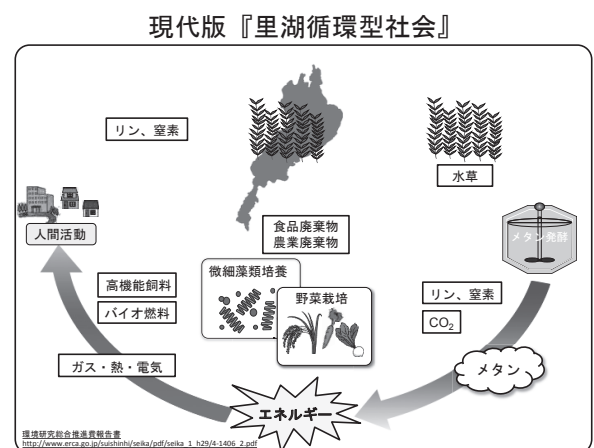


図3 未利用バイオマス資源（水草、廃野菜など）をメタン発酵処理と微細藻類培養・野菜栽培によって循環利用する現代版「里湖循環型社会」構想

参考文献

- 1) 伴修平・戸田龍樹・石川可奈子・高津文人, 2016. 水草バイオマスの持続的利用を通じた里湖循環型社会の可能性. 環境技術, 45: 30-35.
- 2) Ban, S., T. Toda, M. Koyama, K. Ishikawa, A. Kohzu and A. Imai, 2018. Modern lake ecosystem management by sustainable harvesting and effective utilization of aquatic macrophytes. *Limnology*, 20: 93-100. <https://doi.org/10.1007/s10201-018-0557-z>.
- 3) 平塚純一・山室真澄・石飛裕, 2006. 里湖モク採り物語. 50年前の水面下の世界. 生物研究社, 東京, 141p.
- 4) 伴修平・戸田龍樹・石川可奈子・今井章雄, 2016. 水草バイオマスの持続可能な収穫と利活用による湖沼生態系保全技術の確立 (4-1406). 環境省環境研究総合推進費, [https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika\\_1\\_h29/4-1406\\_2.pdf](https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_1_h29/4-1406_2.pdf), 2020年4月1日.
- 5) Ishikawa, K., H. Haga, E. Inoue and S. Ban, 2018. 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s10201-018-0566-y>.
- 6) Koyama, M., S. Yamamoto, K. Ishikawa, S. Ban and T. Toda, 2017. Inhibition of anaerobic digestion by dissolved lignin derived from alkaline pre-treatment of an aquatic macrophyte. *Chemical Engineering Journal*, 311: 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.076>
- 7) Kimura, S., T. Yamada, S. Ban, M. Koyama and T. Toda, 2019. Nutrient removal from anaerobic digestion effluents of aquatic macrophytes with the green alga, *Chlorella sorokiniana*. *Biochemical Engineering Journal*, 142: 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.001>
- 8) Liu, X., M. Fujiwara, T. Kodera, K. Watanabe, S. Akizuki, M. Kishi, M. Koyama, T. Toda and S. Ban, 2020. Conditions for continuous cultivation of *Chlorella sorokiniana* for algal harvest and nutrient removal from anaerobic digestion effluent of aquatic macrophytes. *International Biodegradation & Biodegradation*, 149: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104923>.
- 9) 畑直樹・刘鑫・田口夏帆・金本良成・吉田弦・瀬山智博・戸田龍樹・伴修平, 2019. 琵琶湖南湖で過剰繁茂する水草を原料としたメタン発酵消化液の水耕栽培における培養液としての利用可能性. 水資源・環境研究, 32: 65-74.