

琵琶湖における難分解性有機物生成に及ぼす植物プランクトンの影響

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター
環境監視部門 一瀬 諭

1. はじめに

日本の多くの湖沼では、様々な水質保全対策の実施により、BODは徐々に減少傾向にあるもののCODは減少せず、水質改善の兆しがみえない現状がある。琵琶湖においても、流入河川からのCOD負荷量やBODについては、年々減少傾向を示しているものの、CODの環境基準値である1 mg/Lが達成できていないことを岡本らが（2011）報告している（図1）。

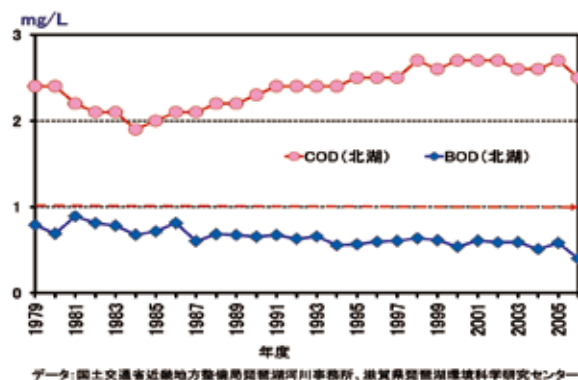


図1 琵琶湖北湖今津沖中央（0.5m層）におけるCOD、BODの長期変遷（1979-2005）

このような現象は、琵琶湖にとどまらず秋田県八郎湖などでも同様の傾向が認められ、さらに、霞ヶ浦や印旛沼、十和田湖、野尻湖など多くの湖沼においても有機物の環境基準項目であるCODが減少しない傾向を今井ら（2001）が報告している。したがって、有機汚濁に関する研究がさらに必要と考えられるが、有機物の負荷量調査に関しては流入負荷量に比べ、内部負荷量に関する研究が進んでいないのが現状である。そこで、本研究では、このCODとBODの乖離現象に起因する難分解性有機物の増加現象が、植物プランクトン群集構造の変化と質の変化にあると考え、理化学的な有機物指標の長期的変動と、生物学的な植物プランクトンの長期変動との関係について明らかにするとともに、琵琶湖で認められたChl-a量が低

下しても純生産量が減少しない原因の解明と難分解性有機物の動態に及ぼす植物プランクトンの影響を明らかにすることを目的として実施した（図2）。



図2 全体概要

2. 方法と評価手法の開発

本研究では各種の方法や手法の開発を行った。植物プランクトンの体積を推定する手法や、粘質鞘と呼ばれている細胞外に産生する無色・透明の寒天質物質の体積を推定する手法については、一瀬ら（2013）がスライドグラスとシリコンシートを用い粘質鞘専用プレートを開発することにより実施した。さらに、細胞体積から炭素量を推定する換算式は、海産植物プランクトンを用いて求めた換算式であるため、淡水産の植物プランクトンを用いて体積と炭素量の関係式の構築を試み、従来から使用されているStrathmannの換算式が琵琶湖産の植物プランクトンにも適応できることが明らかになった。

さらに、粘質鞘の体積からみた炭素量を推定する手法についても、これまで測定法やその評価法の既往研究が存在しないことから、本研究の中で評価手法の開発についても行った。

次に、定点データから琵琶湖全体の植物プラン

クトン量を推定する手法については、Chl-aの実測値と水温実測値の鉛直分布および、実測の植物プランクトン計測結果から、琵琶湖全体の植物プランクトン量の推定手法についても確立を行った。

3. 有機物生産に及ぼす植物プランクトンサイズの影響および産生有機物の分解特性評価

室内実験結果や理化学分析結果を中心にまとめた。粘質鞘の糖類分析やプランクトンサイズの変化による生産量の影響、さらに、植物プランクトンと難分解性有機物との関係を明らかにするための分解試験を実施した。その結果、粘質鞘は比較的分解されやすい多糖類で構成されていたが、種類によっては粘質鞘の一部に分解され難いタンパク質の存在も確認され、分解速度も種類間で大きく相違することが明らかとなった。さらに、各植物プランクトンの一次生産速度を評価した結果では、細胞体積が大きくなるほど小さくなる関係が明らかとなり、図3に示したように、1985年以降、琵琶湖では細胞サイズの小さな種類の占める割合

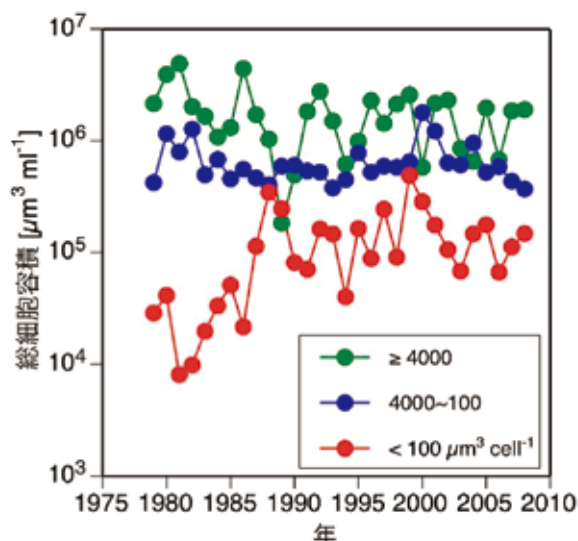


図3 琵琶湖今津沖中央表層におけるサイズ別総細胞容積の経年変化（1978-2008）

が高まっており、植物プランクトンの現存量は減少していても、小型の種類は比生産速度や分解速度も速く、期待されるほどには純生産量は減少していない可能性があることをNaoyuki (2013) が報告している。

次に、琵琶湖に分布する主要な植物プランクト

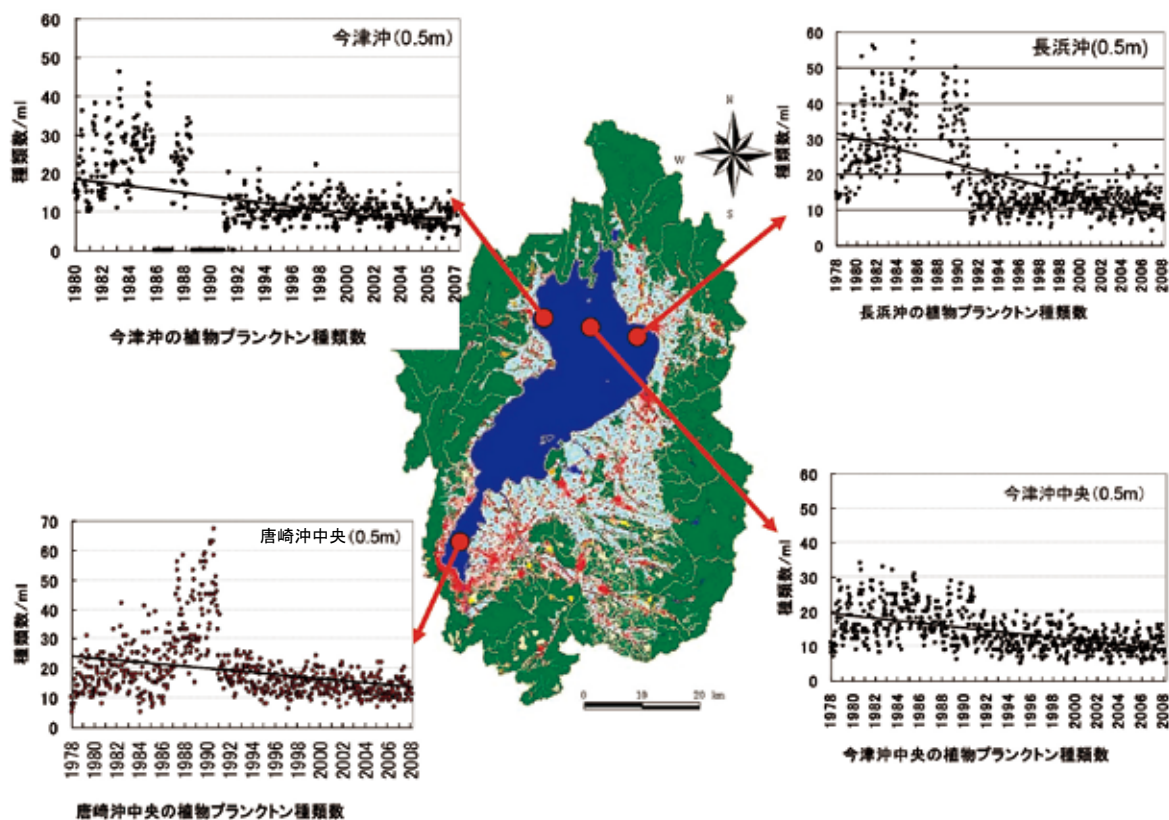


図4 植物プランクトン種類数の長期変化（湖水1ml中の種類数、1978-2008）

ンの分解実験の結果から、分解後のCOD値は、単純平均値で約36.6%が残存することを瀬・古田・馬場ら(2011)が報告しており、多くの植物プランクトン起源有機物が湖水中に残存できると考えられた。

このことは春季から秋季にかけて増殖した植物プランクトンの多くは沈降するが、その一部は、秋季から冬季まで十分に分解されずに溶存有機物として残存している可能性が示唆された。また、この残存した有機物についてGPC-TC分析を行ったところ、有機物の一部が難分解性有機物またはその前駆物質と考えられる有機物であることを確認したことから、植物プランクトン起源の有機物の一部は難分解性有機物の生成に関与していることを瀬・古田・馬場ら(2011)によって明らかにされ、さらに、糖類を添加した琵琶湖水での細菌培養実験からも、分解細菌の増殖にともない新たな溶存態有機物が生成され、その有機物は、分解されにくい低分子の有機物であることも確認された。

これらのことから、琵琶湖で産生された多くの植物プランクトンや粘質鞘は、分解細菌の増殖によって分解・消費され、最終的には細菌では代謝できないような難分解性の溶存有機物として残存している可能性が示唆された。

4. 琵琶湖の植物プランクトンの長期変動および有機物動態の解析

ここでは、植物プランクトンの長期的なモニタリング結果に焦点を当て、そこから導き出せる種類数の変化や総細胞体積の変化、総細胞炭素量の変化などの長期変動を中心にまとめ、さらに、これらの調査結果から琵琶湖全体の有機物収支の解析を5年毎に実施される湖沼水質保全計画の資料をもとに実施した。植物プランクトンの種類数の長期変化は図4に示したように1980年代に比べ2000年代には種類数が半減し、植物プランクトン種の多様性が失われてきていることが明らかとなり、また、植物プランクトン量の長期変動につい

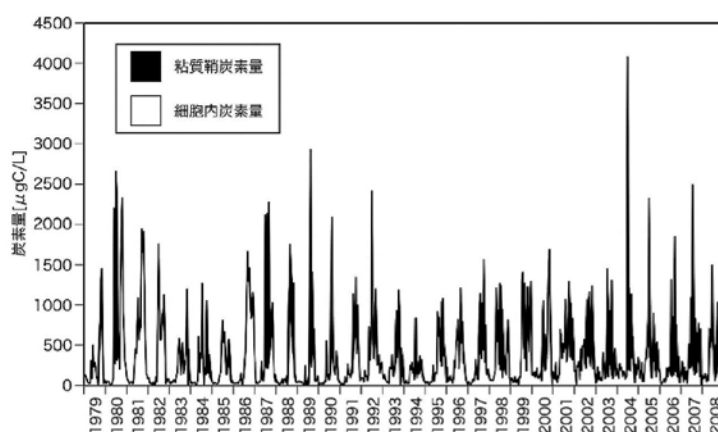


図5 琵琶湖北湖今津沖中央（表層）における総細胞炭素量と粘質鞘炭素量の経時変化（1978–2008）

てみると、1980年代から総細胞体積の増加のピークが徐々に小さくなり、BODやChl-a量の減少時期と同様の傾向を示した。しかし、1980年代後半からの植物プランクトンサイズが小型化する傾向が認められ、特に粘質鞘を有する微細な細胞が群体を形成する種類の増加が明らかとなった。また、植物プランクトンの総細胞体積量と総粘質鞘体積量の比率をみた結果、1980年代に比べ2000年代では100倍以上の顕著な粘質鞘の増加が認められ、総粘質鞘量そのものも1980年代に比べて2000年代は2倍以上に増加していることも瀬ら(2013)によって明らかとなった。一方、図5に示したように植物プランクトン細胞炭素量長期変動からも、粘質鞘を考慮した炭素量の変動をみると1994年以降、徐々に増加傾向が認められ、植物プランクトンが産生する粘質鞘の増加傾向により、2000年以降の7月以降では、総細胞炭素量よりも総粘質鞘体積の炭素量が多くなっていることが推察された。

次に、長期的なモニタリング結果からPOCとChl-a量と植物プランクトンについてみると、Chl-a量当たりのPOCの比は、図6に示したように粘質鞘を大量に有する藍藻が増加すると、Chl-a量では反映されないようなPOCやDOCが同時にピークを示すことが明らかとなり、その増加時には、*Aphanothece clathrata*や*Gomphosphaeria lacustris*などがその水域に多く分布しており、Chl-a量のみでは評価できない植物プランクトン起源の有機物の増加が明らかとなった。

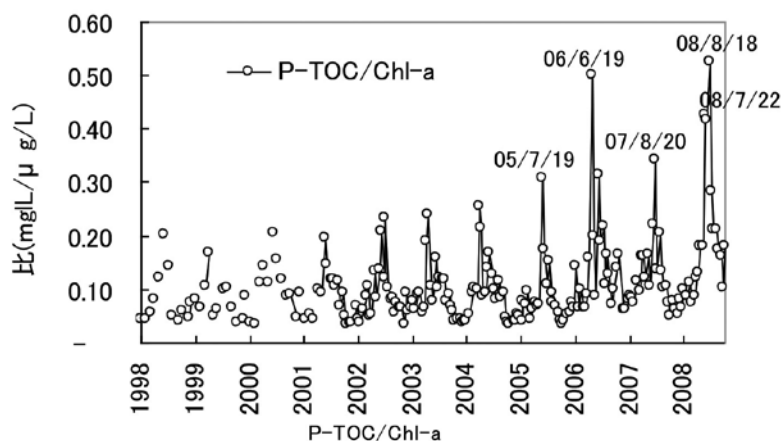


図6 琵琶湖北湖今津沖中央（表層）におけるクロロフィルa量当たりの粒子態有機炭素量（POC/Chl-a）の経年変化（1998-2008）

さらに、表1に示したように植物プランクトンの総炭素量と水質項目との相関をみた結果では、Chl-a量と植物プランクトン総炭素量の間に高い相関が認められたものの10年間隔での比較では、北湖今津沖中央の1980年代では0.86と高かったが、1990年代は0.56、2000年代には0.52と徐々に低くなりChl-a量のみでは評価できない植物プランクトン起源の有機物の増加が明らかとなった。

特に本研究の中で最も重要でキーワードとなったことは、Chl-a濃度が減少したにもかかわらず純生産量がそれほど減少しなかった理由についてである。その理由は今回の研究の結果により2つ

が考えられた。

1つ目は、細胞サイズの低下に伴う比生産力の増加である。琵琶湖北湖では、植物プランクトンの平均細胞体積の小型化が観測され、植物プランクトンの平均細胞体積が1980年代に比べ、2000年代には約5分の1に低下していた。つまり、植物プランクトン群集がより小型種に移行した結果、少ないプランクトン現存量でも高い生産力を維持できるようになったということが

Chl-a濃度低下から期待されるほどに生産量が低下しない理由の一つであると考えられた。

2つ目は、Chl-a濃度の低下に伴う透明度の増加の効果である。Chl-aの低下によって、琵琶湖の透明度は上昇し生産層が増大することにより、湖水濃度としては低くても生産層の拡大により全体の純生産量が増加することである。

以上のように、一つ目の小型種の増加による理由に加え、透明度の上昇による生産層の拡大も、Chl-a量は低下しても純生産量が減少しない原因となっていると考えられた。

最後に、琵琶湖全体の純生物量の推定を行うた

表1 植物プランクトン総細胞炭素量と水質との相関解析結果（1979-2009）

水質項目	調査期間	沖合水域	沿岸水域	沿岸水域
		北湖今津沖中央	北湖東岸長浜沖	北湖西岸今津沖
有機態リン	1979年度～1989年度	0.39	0.15	0.38
	1990年度～1999年度	0.12	0.07	0.18
	2000年度～2009年度	0.35	0.11	0.16
有機態窒素	1979年度～1989年度	0.38	0.46	0.4
	1990年度～1999年度	0.46	0.48	0.47
	2000年度～2009年度	0.39	0.23	0.61
SS	1979年度～1989年度	0.48	0.16	0.44
	1990年度～1999年度	0.36	0.1	0.26
	2000年度～2009年度	0.33	0.08	0.53
Chl.a	1979年度～1989年度	0.86	0.7	0.8
	1990年度～1999年度	0.56	0.55	0.53
	2000年度～2009年度	0.52	0.35	0.72

め、1995年と2000年および2005年の純生産量を比較した結果、2000年および2005年の純生産量はそれぞれ1.6倍、1.7倍に増加していることが推計された。また、2000年以降、初夏の藍藻の純生産量に占める割合は*A.clathrata*と*G.lacustris*で純生産量の大部分を占めており、これらの種類はいずれも粘質鞘を有する群体性の小型藍藻であり、小型細胞が大量に増加することで純生産量を増大させている可能性が示唆された。さらに、この*A.clathrata*のような種類は、より深い水深にも分布していることから、純生産に大きく関与できるようになった可能性も推察された。

琵琶湖全体の有機物収支解析結果では、図7に示したように内部生産有機物には易分解性有機物が含まれ、沈降や捕食による損失もあるが、単純に試算すると琵琶湖内の植物プランクトンによる純生産量は琵琶湖への流入負荷の6～16倍に相当していると評価された。

5. まとめ

今回の研究から、小型の植物プランクトンは高い生産力を持ち、大型種に比べ有機物を多く生産するが、分解速度も速いことから生産と分解のサイクルが大型種に比較して早いと考えられる。このことから、分解過程で生じる難分解性有機物も小型化することにより多く生産していることが示唆された。さらに、琵琶湖で認められたChl-a量

が低下しても純生産量が減少しない原因については、大型の緑藻主体の群集構造から小型の粘質鞘を多く有する藍藻主体の群集構造へと植物プランクトン群集構造が変化したことにより、その分解過程における質の変化が溶存性の難分解性有機物の生成に大きく関わっていることが今回の研究結果から明らかになった。

今後は、これら難分解性有機物の生成にかかわっていると考えられる藍藻主体の群集構造から緑藻や珪藻主体の群集構造へと戻していく必要がある。しかし、湖内で生産されたこれらの植物プランクトンは、生産から終息過程で捕食されなかったものは分解細菌によって分解を受け、冬季にはシストやアキネートと言った形で沈降し越冬すると考えられる。特に水深が比較的浅く光が底質にまで届く沿岸帯が植物プランクトン種の休眠・越冬の場として好条件の場所であると考えられ、この沿岸帯で越冬した休眠細胞などが春季に底泥から回帰し、湖内の内部生産にも大きく影響を及ぼしている可能性を考えると、沿岸帯の機能評価が重要であると考えられた。そこで、一瀬ら(2013)は沿岸帯の機能評価のため、水質や底質との関係や沿岸帯の藍藻や緑藻および珪藻を中心としたシードバンク機能の評価法を確立し、以下の3点の解明が必要であるとする。①沖帯の生物生産を担う藍藻群集の維持メカニズムの機能と評価。②沖帯における藍藻群集の維持に果たす、

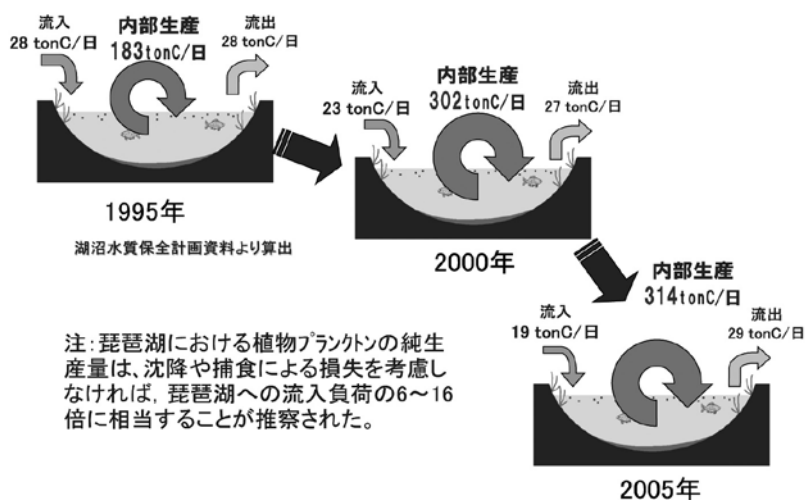


図7 琵琶湖における有機物収支解析結果（一瀬・岸本ら、2011）

沿岸帯の役割の機能評価。③沿岸帯から沖帯への有機物やN、Pの供給源としての役割の機能評価。これらの項目を評価することによって藍藻の抑制対策に向かっての新しい知見が得られると考えている。今後、微細な細胞が集積し群体を形成する藍藻発生抑制のためにも沿岸帯のシードの保存性や回帰性が湖沼水質形成に与える影響について解析を進める必要があると考える。

謝 辞

本研究は環境省環境研究総合推進費「B-0805琵琶湖における湖内生産および分解の変化と難分解性有機物を考慮した有機汚濁メカニズムの解明（平成20-22年度）」による助成を受けて実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 岡本高弘・早川和秀：琵琶湖における溶存有機物の現状と課題。水環境学会誌、35(5)、151-157 (2011)
- 今井章雄・松重一夫・木幡邦夫・高村典子・井上隆信・野原精一・佐野友春・相崎守弘・福島武彦・小澤秀明・滝和夫・細見正明：湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究－特別研究－平成9年度－平成11年度、国立環境研究所特別研究報告書、36.(2001)
- 一瀬諭・池谷仁里・古田世子・藤原直樹・池田将平・岸本直之・西村修：琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析、日本水処理生物学会誌、49(2)、66-74 (2013)
- Naoyuki, K., Satoshi, I., Kei S. and Chihiro Y.: Analysis of long-term variation in phytoplankton biovolume in the northern basin of Lake Biwa, Limnology, vol.14, No.1, 117-128 (2013)
- 一瀬諭・古田世子・馬場大哉・竹本邦子・岸本直之：湖内生産および分解の変化と難分解性有機物を考慮した有機汚濁メカニズムの解明に関する研究（B-0805）、環境省環境研究総合推進費終了研究成果報告書（2011）
- 一瀬諭：琵琶湖の水環境の現状と沿岸帯の機能評価に向けて、用水と廃水、55(4)、300-307 (2013)