

# 宍道湖および神西湖における光合成色素分析による植物プランクトン組成

谷 幸則（静岡県立大学）

## 背景

ヤマトシジミは、島根県宍道湖や神西湖において重要な水産対象種である。2006年夏季のヤマトシジミの斃死が認められ、その資源量が大きく減少し、2009年までに緩やかな回復を見せた。2010年以降、再び減少傾向に転じ、2012年の春季には、1997年の資源量調査開始以降、資源量全体として2万トンを下回り、最低の資源量を記録し、2013年の春季まで低資源量が継続した。一方、2013年秋季における資源量調査では、ヤマトシジミの急激な回復が報告され、それ以降は2016年秋季まで高い資源量（資源量全体で6万トン前後）が維持されている。しかしながら、ヤマトシジミの資源加入量は、2013～2014年の高水準に比較して、2015年～2016年は低水準であることが示唆されており、今後の漁獲対象ヤマトシジミ資源量の減少が心配されていた。2017年の春季には、シジミ資源量は一時的に4万トンまで落ち込み、その後、6万トン以上まで回復した。このように宍道湖におけるシジミ資源量の変化が大きく、その要因ははっきりしてない。

このようなヤマトシジミ資源量増減の要因の一つとして、餌となる植物プランクトン組成の量的、質的な変動が考えられる。ヤマトシジミは、主として植物プランクトンなどを含む懸濁態を捕食している。一般的に、植物プランクトンによって一次生産された有機物に対する高次捕食者の利用効率は、その「餌の質」によって規定されることが示されている。例えば、珪藻などの多価不飽和脂肪酸（特に $3\omega$ 系）やフィトステロールの含有量が高い植物プランクトンは、高次捕食者にとって利用効率が高い（餌として高い質）(Arts, M.T. et al. 2009)。一方、高等生物に一般的に必須な成分である $3\omega$ 不飽和脂肪酸やステロール類を藍藻類はほとんど含有しないため、食物連鎖を通じた高次捕食者へのエネルギー移動効率が低いことが知られており、水圏生態系への食物連鎖に重要な影響を及ぼすことが報告されている(国土交通省 2015)。実際に、宍道湖で単離された *Synechocystis* sp. をヤマトシジミに採餌させた場合、珪藻採餌に比較して成長率の低下や稚貝生存率の大幅な低下が認められた(向井ほか 2016)。これらの結果から、ヤマトシジミの資源量に対し、植物プランクトン種の相対比やその存在量（特に藍藻の優占割合）が大きな影響を与えていることが示唆されている。よって宍道湖における植物プランクトン組成の網羅できる定量的なデータの集積すること、また、それに対する宍道湖のヤマトシジミ資源量の増減の対応性を調べる必要がある。神西湖は、島根県内において宍道湖に次ぐヤマトシジミ産地である。神西湖におけるヤマトシジミの成長速度は、宍道湖に比較して2～3倍速いことが示されており、この差は、植物プランクトンの質や量によって説明されている(三室ほか 2006)。

植物プランクトンにおいてカロテノイド類は、主に細胞内の葉緑体あるいは葉緑体様の器官に存在しており、主として光合成における集光補助色素として機能している。植物プランクトンが有するカロテノイド種類は藻類系統的（綱レベル）に分類でき、ある種の構造を有するカロテノイドは特定植物プランクトン綱に特有である(三室ほか 2006, Bellinger, E.G. et al. 2010, Jeffrey, S.W. et al. 1997)。このような背景から、カロテノイドの相対濃度は、植物プランクトン綱の相対量を示す化学指標に利用できる。また、Chlorophyll *a*濃度は、酸素発生型光合成をおこなう植物プランク

トンの全体を示す指標として利用することができる。

本研究では、島根県宍道湖を対象湖沼としヤマトシジミ資源量が大幅に減少した2012年春季から、資源量の回復（2012年夏季以降）、高い資源量維持期間（2012年秋季～2017年春季）までの期間における植物プランクトン組成と総量をカロテノイド組成とChlorophyll *a*濃度を指標として見積もった。また、宍道湖湖心表層については、島根県保健環境科学研究所から以前に提供を受けた試料（2008年～2010年）及び島根県保健環境科学研究所で採取後に冷凍保存されていた試料（2011～2012）について分析し、2008年から2017年3月までの9年にわたる連続した植物プランクトン組成を調べ、シジミ資源量の経年変化と比較した。

### 実験方法

本研究では、汽水湖である島根県宍道湖・大橋川及び神西湖内の島根県水産技術センターが設定したヤマトシジミ生育条件調査定点（宍道湖5か所、大橋川1か所、神西湖2か所、図1, 2）において2012年5月から2017年3月までに月1回湖水を採取した。宍道湖は湖心を除き、2m台の沿岸部において表層水および底層水を採水した。神西湖は水深が50～100cmの沿岸部で、底上30cmの湖水を採水した。採水した湖水の規定量をGF/Fガラス繊維フィルターで吸引ろ過し、植物プランクトンを含む懸濁物を捕集した。捕集した懸濁物からアセトンでクロロフィル色素及びカロテノイドを抽出し、フォトダイオードアレイ検出器付の高速液体クロマトグラフィーで分析した。

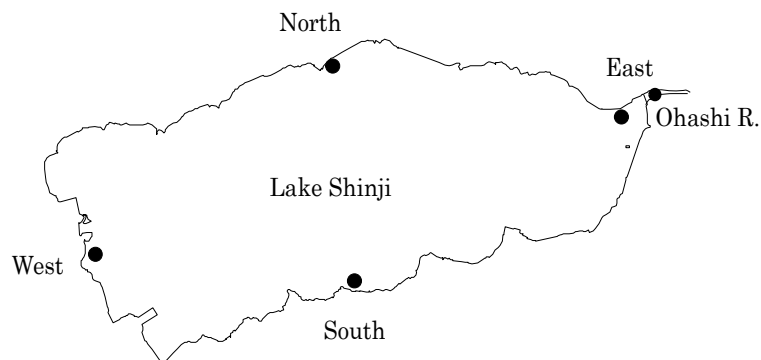


図1 宍道湖における試料採取地点（West, North, East, South, Ohashi R.）

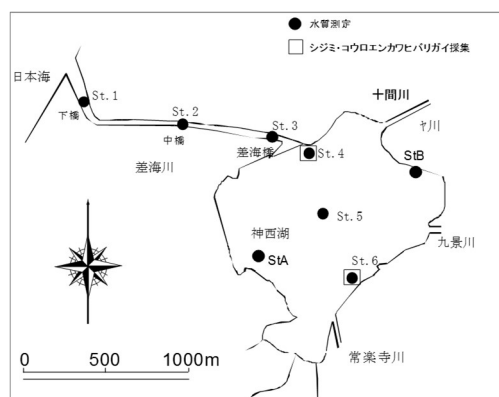


図2 神西湖における試料採取地点（St.4, St.6）

## 結果と考察

図3には神西湖 (St.4, St.6) における総Chlorophyll *a*濃度, 総カロテノイド濃度及びカロテノイド相対濃度の経月変化を示す. 宍道湖西岸(West), 東岸(East), 北岸(North), 南岸(South), において2012年5月から2017年3月までに月1回で採取した表層水および底層水についての塩分濃度, 総Chlorophyll *a*濃度, 総カロテノイド濃度及びカロテノイド相対濃度の経月変化を図4-7に示し, 大橋川における結果を図8に示す.

### 3.1 宍道湖における光合成色素

宍道湖から検出されたカロテノイドとして, 藍藻に由来するzeaxanthin, echinenone,  $\beta$  - carotene, 主として珪藻に由来するfucoxanthin, 19' - hexanoyloxyfucoxanthin, diadinoxanthin, 緑藻に由来するlutein, violaxanthin, クリプト藻に由来するalloxanthin, 渦鞭毛藻クリプト藻に由来するperidinineがカロテノイドとして検出され(三室ほか 2006, Bellinger, E.G. et al. 2010, Jeffrey, S.W. et al. 1997), 宍道湖における多様な植物プランクトンによる一次生産が示された.

### 3.2 神西湖における色素濃度とカロテノイド組成 (図3)

ヤマトシジミ資源量が豊富である神西湖 (図2) では, 2012年の調査開始以降, 周年, 珪藻由来色素が主であった. 神西湖は, 塩分が8~15‰内にコントロールされており, この塩分濃度が夏季でも珪藻の優占をもたらす一要因であると考えられた. 総クロロフィル濃度, 総カロテノイド濃度(後述)ともに, 宍道湖よりも高い傾向にあり, 夏季でもある程度の植物プランクトン密度が保たれている. 向井ほか(2016)によると, 神西湖のヤマトシジミの成長速度は, 宍道湖に比較して2~3倍速いことが示され, 餌としての植物プランクトンの質と量がヤマトシジミ成長速度に適していることが示された. また, 同報告によると, 神西湖は, 生息密度, 漁場面積当たりの漁獲量が, 宍道湖に比較して, 2.1倍, 5.8倍と見積もられている. 神西湖における餌として有用な珪藻主体の植物プランクトン組成とヤマトシジミによる採餌速度をわずかに上回る一次生産速度(光合成)による植物プランクトン密度の維持が, ヤマトシジミの高い資源量維持に重要な役割を果たしていることが推察できる.

### 3.3 宍道湖地点別の色素濃度の経月変化

西岸 (West) (図4) は, 宍道湖への最大流入河川である斐伊川の流入河口にもっとも近い地点である. 本研究をおこなった地点の中で, 流入する淡水の影響を最も受けやすく, 塩分濃度も他の地点よりも低い傾向にある. 2016年において総カロテノイド濃度, 総クロロフィル *a*濃度は, 年間通して10 $\mu$ g/l以下と低く推移した. これは, ヤマトシジミ資源量が回復した2013年以降のレベルが継続している状況であると考えられた. カロテノイド相対比では, 2016年1月に緑藻由来のカロテノイドが約50%, 7月, 11月は, 渦鞭毛藻由来のperidinineが高い傾向にある他は, 珪藻由来のカロテノイドが主であった. 長期的にみると, 2012年夏季に藍藻による優占(アオコとして観測)が認められたが, 2012年10月以降では, 藍藻由来のカロテノイドは, ほとんど検出されず, 夏季においても珪藻主体の植物プランクトン組成が維持されていた.

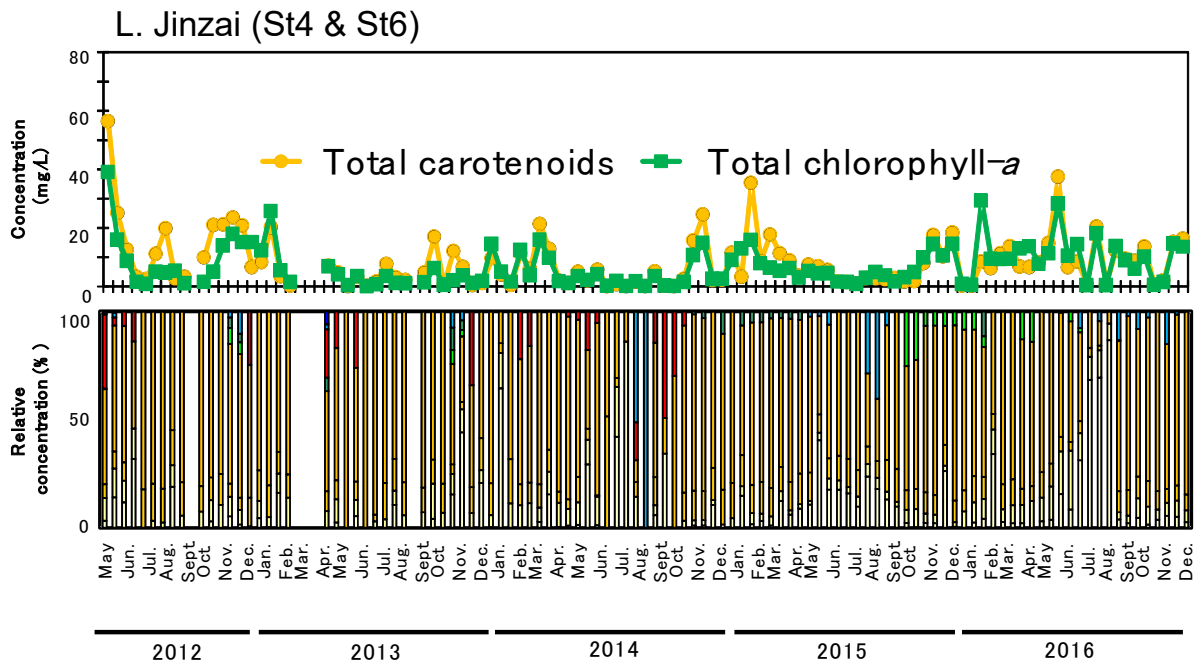


図3 神西湖における総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度（上段），カロテノイド相対濃度の季節変動（下段）。

北岸（North）（図5）における長期的な変化として、2012年10月以降、珪藻を主体とした植物プランクトン組成が維持されていることは、他の地点と共通する。2016年の総カロテノイド濃度、総クロロフィルa濃度は、ヤマトシジミ資源量が回復した2013～2015年に比較して高い濃度で推移した。特に2016年9月は、高い色素濃度を示した。2016年9月、11月、12月は、peridininの相対濃度が高く渦鞭毛藻が優占していることが示された。

東岸（East）（図6）は大橋川の流出口に近く、2012年10月や2013年4月など突出して高い塩分濃度がしばしば観測され、大橋川を遡上した塩分の高い中海湖水が流入したことを反映していると推察された。それに対して、全湖的に塩分濃度の低い2014～2016年春季は、低い塩分濃度を示しており、大橋川経由での高塩分水の遡上が生じていないことが示唆された。長期的な植物プランクトン組成変化は、他の地点と同様であった。特に、2016年は、Peridinin濃度が高い傾向にあり、渦鞭毛藻が珪藻とともに主たる優占植物プランクトンであった。

南岸（South）（図7）は、宍道湖南岸の来待地域であり、同じ南岸の宍道地区、玉湯地区と共に、ヤマトシジミ密度が宍道湖沿岸の中でも最も高い地点の一つである。島根県水産技術センターの調査によると、ヤマトシジミ重量密度は、資源量回復前の2013年春で約1000 g/m<sup>2</sup>、資源量が回復した2013年秋季には、5000 g/m<sup>2</sup>を超え、その資源回復率は500%に及んだ。カロテノイドの相対組成は、他の地点と同様であり、植物プランクトン組成の全湖的な同時性を示していた。2013年、2014年、2015年ともに春季から秋季における総カロテノイド濃度、総クロロフィルa濃度は低く、本地点の高いヤマトシジミ資源量を反映していると考えられた。2016年7月、11月、12月は、peridinin相対濃度が高く、渦鞭毛藻が主体であった。



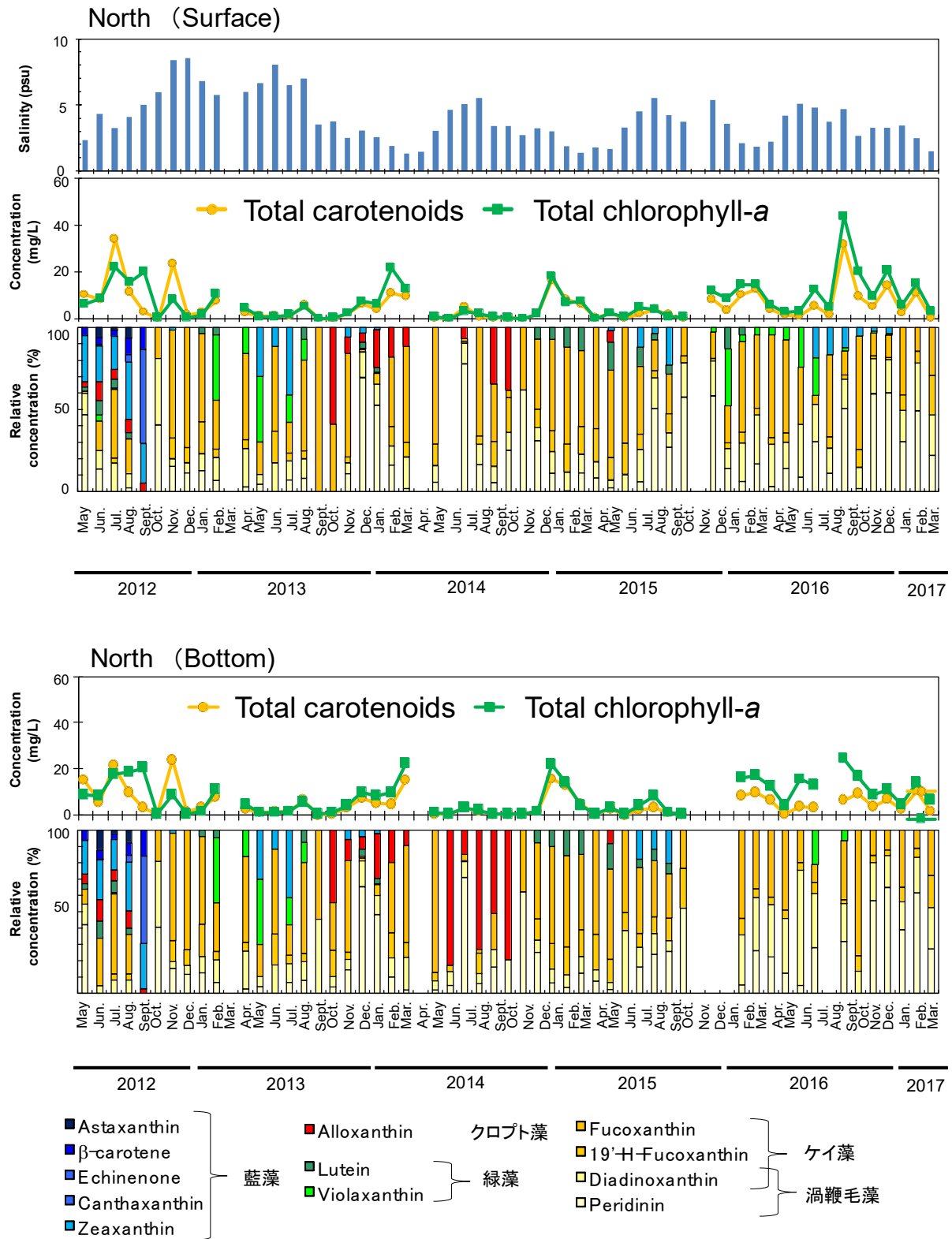


図5 宍道湖 (North) における表層水 (上段) の塩分濃度, 総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度, カロテノイド相対濃度の季節変動と底層水 (下段) の総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度, カロテノイド相対濃度の季節変動.



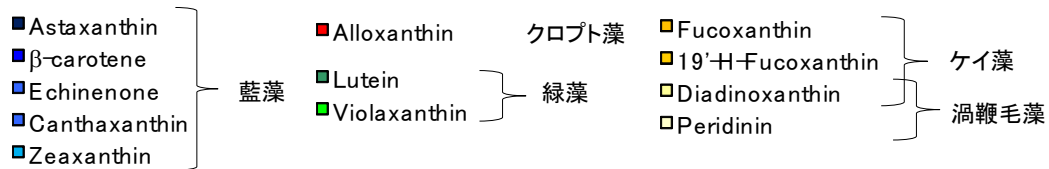
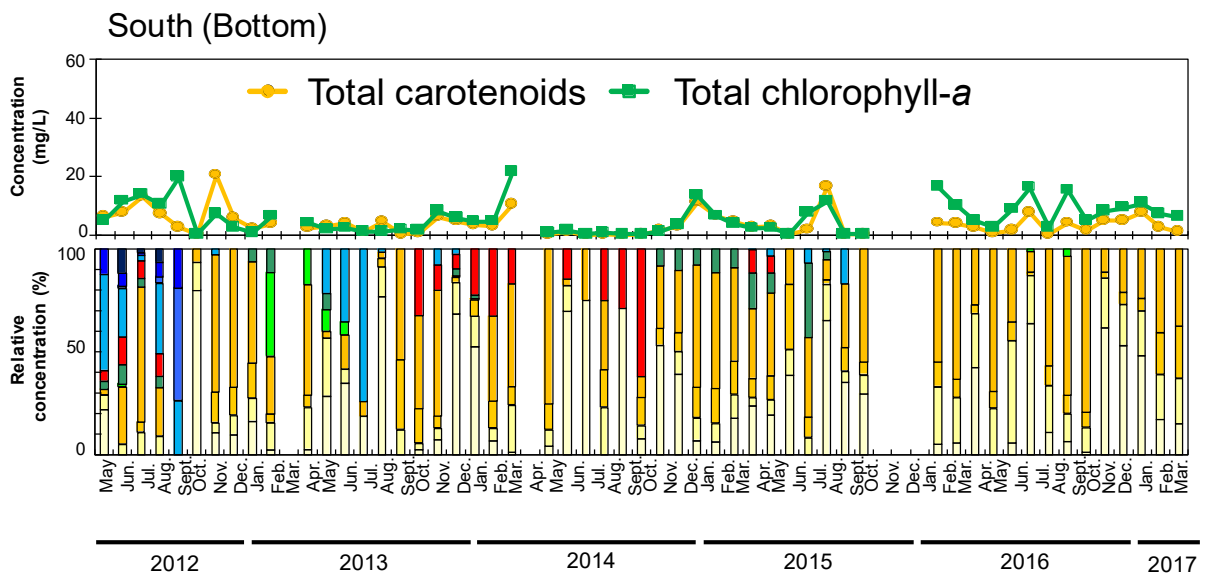
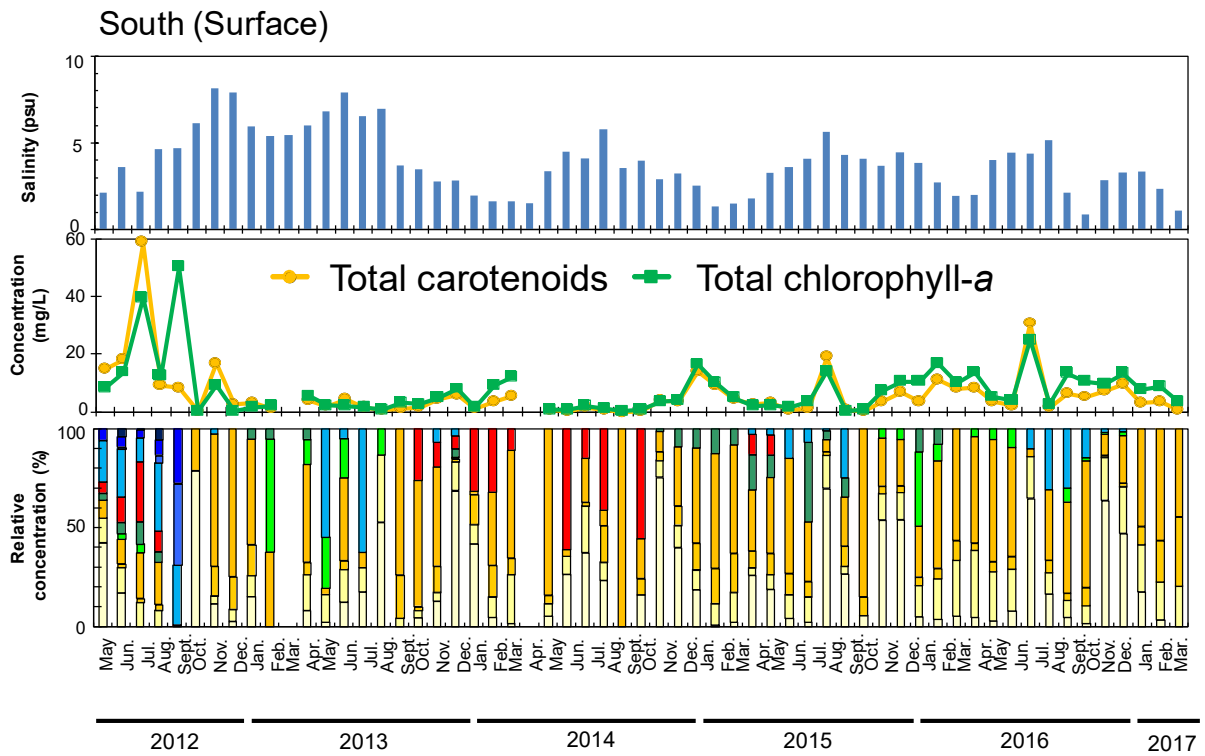


図7 宍道湖 (South) における表層水 (上段) の塩分濃度, 総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度, カロテノイド相対濃度の季節変動と底層水 (下段) の総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度, カロテノイド相対濃度の季節変動。



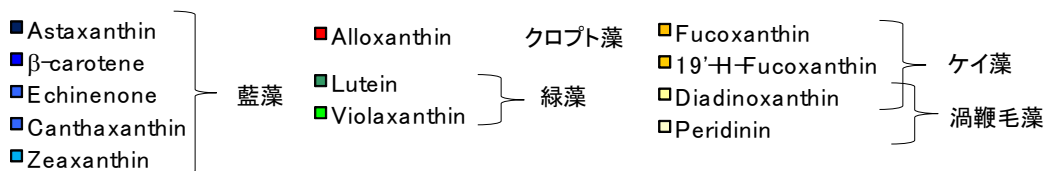
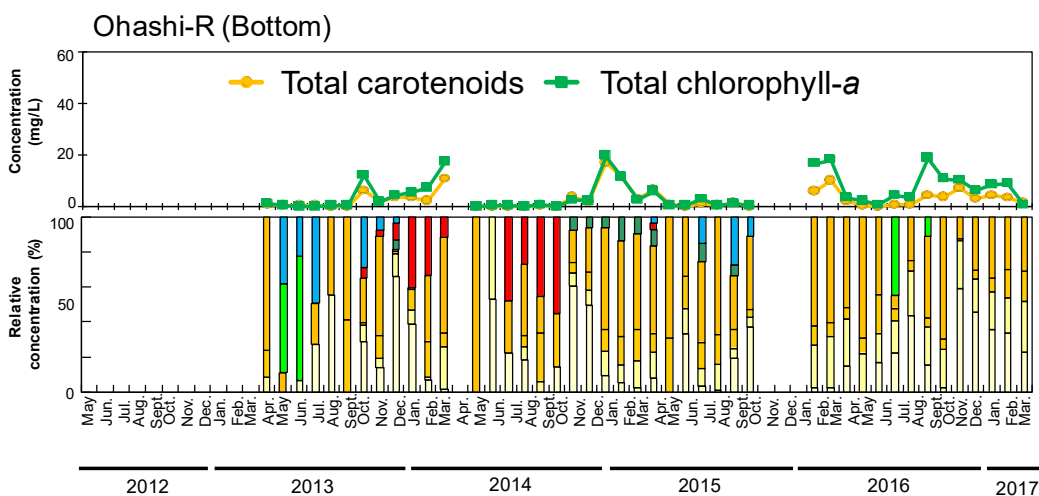
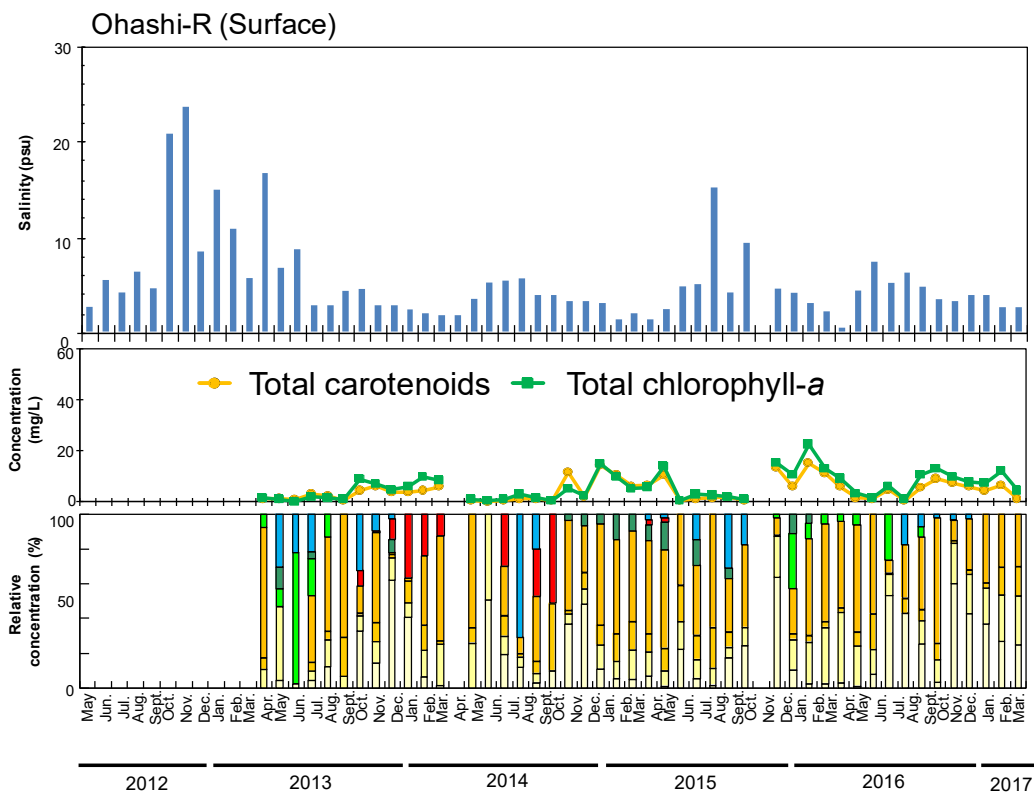


図8 大橋川における表層水（上段）の塩分濃度，総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度，カロテノイド相対濃度の季節変動と底層水（下段）の総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度，カロテノイド相対濃度の季節変動. 塩分濃度（上段），総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度（中段），カロテノイド相対濃度の季節変動（下段）.

大橋川（松江大橋下）（図8）では、2102年においては、20‰を超える高い塩分濃度がしばしば観測され、大橋川を經由した高塩分水の遡上が認められた。しかしながら、2103年夏以降は、一部を除いて、すべての月で低い塩分濃度を示しており、大橋川經由の高塩分水の遡上が減少していることが示唆された。長期的に見た植物プランクトン組成は、宍道湖内とほぼ同様であった。

宍道湖湖心（図9）は水深があり、底質も泥であるためヤマトシジミは生息していない。しかしながら、植物プランクトン組成の長期的な変動は、前述の沿岸部地点ほぼ同様であるため、湖心における植物プランクトン組成は、宍道湖内の植物プランクトン組成を代表していると考えられる。宍道湖におけるヤマトシジミ資源量の長期的変動をみると、2005年秋季に高かった資源量（資源量全体7万トン以上）が、2007年春季までに急激に落ち込んだ（資源量全体5万トン以上）。その後、2009年秋季までに資源量全体9万トンまで回復した。しかしながら、その後、2013年春季までに資源量全体2万トンまで急激に低下し、漁獲対象貝の資源量は、壊滅的に低下した。一方、2013年春季から、2013年秋季にかけて資源量の急激な回復（資源量全体で7万トン程度）が認められ、その後は、高止まりしている状況にある。これらのヤマトシジミと植物プランクトン組成の長期的な変動の関係性を調べるため、2008年から宍道湖湖心表層で測定した色素データの再解析と冷凍保存した試料の測定を行い、2008年6月から2016年12月までの月データを得た（一部試料の欠測有）。2008年及び2009年は、藍藻由来のzeaxanthinが主たるカロテノイドとして検出される月があった（2008年6、10、11月、2009年7,8,9月）。しかしながら、2008年、2009年とも、いわゆるアオコの発生は認められていない。大谷ら(2008)による顕鏡観察から、2008年6月～12月において、ピコ藍藻である*Synechocystis* sp.の優占が報告されている。また、同様に、2009年7～10月の間も*Synechocystis* sp.の優占が確認されている(崎ほか 2009)。よって、色素分析による藍藻由来カロテノイドは、アオコを形成しない*Synechocystis* sp.によると判断される。2008年～2009年は、藍藻が優占している夏季でも、珪藻の存在が認められ、藍藻が単独的に優占することはなかった。

一方、2010年9月、2011年9月、2012年9、10月は、藍藻由来の色素がほぼ単独的に優占する期間が存在した。2010年8月中旬以降に*Microcystis* cf. *ichthyoblabe*によるアオコが大発生し、翌3月下旬までアオコの存在が認められた(崎ほか 2010)。この結果と色素組成から、2010年の9月には、アオコ形成藍藻による単独的な優占であったと推察され、この期間は珪藻他の植物プランクトンはほとんど存在していなかった。同様に、2011年8～12月まで(野尻ほか 2011)、2012年9月(野尻ほか 2012,野尻ほか 2014)において、*Microcystis* sp.もしくは、*Microcystis* cf. *ichthyoblabe*によるアオコの形成が認められており、これらのアオコ形成藍藻により他の植物プランクトン種はほとんど存在できなかったと推察された。ヤマトシジミの消長が、植物プランクトン組成を主原因と仮定すると、アオコ形成種*Microcystis* spp.の場合、単独的に優占する場合があり、これがヤマトシジミ資源量の減少に関与していると推察された。一方、アオコを形成しないピコ藍藻の場合には、珪藻等の他の植物プランクトンもある程度の割合で共存できるため、ヤマトシジミ資源量の減少には、それほど関与しないと考えられた。2012年冬季以降は、2013年8月に藍藻色素の優占はあるもの(顕鏡観察では、この時期は*Synechococcus* sp.と*Synechocystis* sp.の優占(中島ほか 2013,野尻ほか 2014))、アオコ形成種の藍藻の単独的な優占は認められていない。宍道湖の他の地点と同様に、夏季でも珪藻を主体とした植物プランクトン組成が維持されている。

*Microcystis* 属は、底層中で越冬し、翌年再度湖水へと回帰する現象が知られている(Preston et al. 1980, Reynolds, C. 2006)。宍道湖で *Microcystis* 属が優占した 2010～2012 年までと、それ以降の冬季

の塩分濃度に注目すると、2012年から2013年にまたがる冬季において、全湖的に塩分が高い傾向にあった。測定期間中、この期間のみ冬季の塩分濃度が優位に高い。この高い塩分濃度が、底質中における *Microcystis* 生細胞の残存率を低下させ、2013年における湖水への回帰を大幅に減少させたのかもしれない。

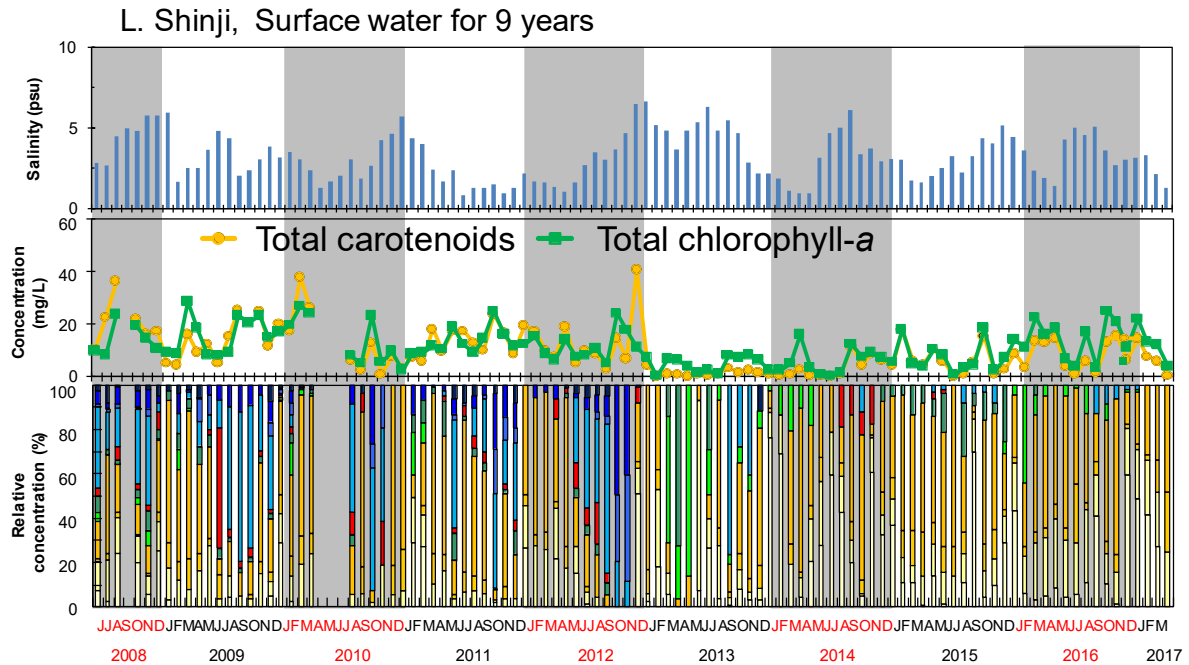


図9 宍道湖湖心における表層水の塩分濃度，総カロテノイド濃度・総 Chlorophyll-a 濃度，カロテノイド相対濃度の季節変動。

## まとめ

宍道湖における光合成色素であるカロテノイド濃度を指標として植物プランクトン量を種別ごと複数年にわたって見積もることによって、その季節変動を明らかにした。特に今回は、2008年からの湖心表層における植物プランクトン組成変化を明らかにし、ヤマトシジミ資源量の消長との関連性を議論した。宍道湖では、アオコを形成しないピコ藍藻 (*Synechiosystis* spp.) (2008~2009年)とアオコ形成藍藻 (特に *Microcystis* spp.) では、共存植物プランクトン種に対する影響 (栄養競争, 光競争) の度合いが異なる可能性が考えられ、特に後者は、他の共存植物プランクトン種の共存を完全に排除している可能性が示唆された。これらの影響により、ヤマトシジミ資源量が大きく変動しているのかもしれない。2012年から2013年にまたがる冬季は、塩分濃度が全湖的に高く、底質で越冬する *Microcystis* spp. の生細胞の残存率を下げ、2013年春季から夏季期間の湖水への回帰を防いだ可能性が示唆された。