

鳥取県湖山池の海水導入前後における 植物プランクトン群集の変化

岡本 将揮¹・宮本 康²

Changes in phytoplankton community after brackishing in Lake Koyama-ike in Tottori Prefecture, western Japan

Masaki Okamoto¹ and Yasushi Miyamoto²

Abstract: We compared community structure in phytoplankton and water variables in epilimnetic waters in Lake Koyama-ike located in western Japan, between before and after brackishing project in 2012. Monthly-monitored data, with three replicated years each (i.e., before: 2009~2011, after: 2012~2014), were analyzed statistically to detect changes in the flora and water variables. Whereas insignificant effects of the brackishing on total abundances of phytoplankton (i.e., chl-a, cell density), it modified the community structure from freshwater-inhabitants dominated (e.g., *Anabaena affinis*, *Cyclotella meneghiniana*, *Microcystis aeruginosa*, *Planktothrix agardhii*) to brackish water and seawater-species dominating community (e.g., *Cylindrotheca closterium*, *Heterocapsa rotundata*, *Skeletonema costatum*). Further, the brackishing resulted in an obviously increased salinity (1,800~8,000 mgCl⁻¹ l⁻¹) but limited changes in nutrient concentrations (i.e., decrease in ammonium (0.01~0.06 mgNH₄⁺ l⁻¹) and insignificant changes in other nutrients) in epilimnetic waters.

Key words: Lake Koyama-ike, brackishing, phytoplankton community, increased salinity

¹ 鳥取県衛生環境研究所 Environmental Sanitation Research Center, Tottori Prefecture, 526-1, Minamidani, Yurihama, Tohaku, Tottori, 682-0704, Japan.

² 福井県里山里海湖研究所 Fukui Prefectural Satoyama-Satoumi Research Institute, 122-31-1, Torihama, Wakasa, Mikatakaminaka, Fukui, 919-1331, Japan.

はじめに

植物プランクトン個体群の増殖速度は、光、栄養塩、水温に依存する(谷口, 1983)。これに加え、汽水域に生息する植物プランクトンでは塩分の影響が非常に重要となる。事実、宍道湖や中海のような汽水域では、植物プランクトンの種組成が決まるうえで、各環境要因の中で塩分が支配的な要因になっていることが野外調査により示されている(秋山, 1982; Kondo et al., 1990a; 大谷, 1997; 佐藤ほか, 2015)。同様の傾向は室内実験でも見出されており、多くの植物プランクトンの個体群増殖速度に種特有の最適塩分があることが示されている(南條ほか, 1998; 紫加田ほか, 2010; Shimura et al., 1979; Nagasoe et al., 2006)。したがって、水域生態系に塩分の変化が生じた場合、植物プランクトンの群集構造に少なからぬ変化が生じることが予想される。

鳥取県の東部に位置する湖山池は(図1)、ごく近年まで淡水~低塩分湖の状態にあった(南條, 2001)。本湖で初の塩分観測が行われた1929年以降2012年までは65~2,200 mg l⁻¹の範囲(100 mg Cl l⁻¹オーダーが大部分)の塩化物イオン濃度が記録されてきた(吉村, 1929; 湯原, 1957; 富川, 1962; 鳥取県, 1965; 南條, 2001)。そして、本湖が低塩分湖であった1981~2001年の期間に同定された植物プランクトンは藍藻8属、珪藻20属、緑藻16属、鞭毛藻9属であり、夏季には*Anabaena*属と*Microcystis*属を中心とするアオコが発生していた(南條, 2001)。また、夏~秋季には藍藻*Planktothrix raciborskii*に起因するカビ臭が水道法の水質基準を大きく上回り検出されていたうえ(永瀬ほか, 2008)、ヒシの繁茂とその後の腐敗が周辺住民を悩ませていた(森, 2010)。こうしたアオコやヒシの繁茂とカビ臭発生を抑制を目的として、湖山川水門の開放頻度を増やすことで海水導入を促し、湖山池を中塩分(2,000~5,000 mg Cl l⁻¹)の汽水湖とする取り組みが始まった(鳥取県・鳥取市, 2013)(以下、「汽水化」と呼ぶ)。この汽水化の後、湖心の塩化物イオン濃度は1,800~8,000 mg l⁻¹まで上昇し、これに伴い、それまで夏季に発生していた藍藻やヒシが見られなくなった反面、珪藻と渦鞭毛藻を主体とする赤潮が発生するようになった(岡本・宮本, 2014)。塩分の上昇に応じた植物プランクトン相の変化は宍道湖でも確認されていることから(秋山, 1982; 大谷, 1997)、近年の湖山池では、汽水化後の塩分上昇によって植物プランクトンの群集構造が著しく変化したことが予想される。事実、汽水化後の湖山池では塩化物イオン濃度

に著しい増加が見られた反面、水温や栄養塩濃度には明瞭な変化が見られなかった(岡本・宮本, 2014)。しかし、これらの変化は定量的に評価されていないのが現状である。

本湖は過去1世紀の間に二度の大きな人為改変を経験した。一度目は1989年における農業用水の確保のための淡水化であり、二度目が今回の環境改善を目的とした海水導入による汽水化である(鳥取県・鳥取市, 2013)。湖山池のように河川下流域に位置する水域は、人口密集地に位置するがゆえに人為改変を受けやすい宿命にある。こうした人為改変は、塩分や栄養塩濃度をはじめとする生息環境の変化を介して様々な変化を水域の生物相に与えるであろう(宮本, 2004)。したがって、このような事例を評価し、基礎的な知見を蓄積していくことは、人為的改変が生態系に及ぼす影響に関する理解を深め、将来の人為改変における影響の軽減に活かすうえで重要であると考えられる。

そこで、本研究は2012年に行われた湖山池の汽水化で生じた植物プランクトン群集の構造変化を明らかにすることを目的とした。はじめに、汽水化の前(2009~2011年度)と後(2012~2015年度)における水質と植物プランクトンの総現存量を比較した。次に、植物プランクトンの群集構造を汽水化の前後で比較した。最後に、塩分と優占種の現存量の関係を定量化し、塩分の変化が湖山池の植物プランクトン群集に与えた影響を考察した。

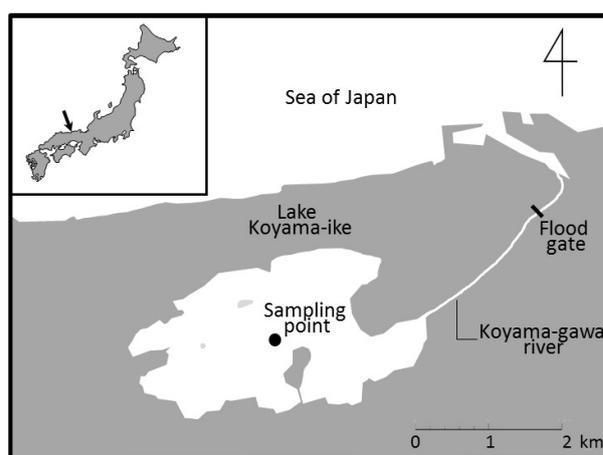


図1 調査地の地図.

Fig. 1 Map of study site.

方法

野外調査

植物プランクトンの群集構造を明らかにするために、汽水化の前（2009年4月～2012年3月）、および汽水化後（2012年4月～2015年3月）に湖山池の湖心で表層水を採水した。採水した湖水はすみやかに固定液（25% グルタルアルデヒド溶液 500ml にホルマリン 2.5ml と塩化カルシウム 6.25g を溶解させたもの）で固定した（湖水 1000ml につき固定液 10ml を添加した）。この採水は毎月行った。採水した湖水は実験室に持ち帰った後、日本水道協会（2001）の生物試験総則に従い、顕微鏡下で植物プランクトンを種レベルまで同定・計数し、細胞密度を計算した。種までの同定が困難なものについては、可能な限り下位の分類群まで同定した（2009年度のみ属レベルまで同定）。

さらに採水した湖水について水質分析を行った。硝酸態窒素（NO₃⁻）は JIS K0102 43.2、亜硝酸態窒素（NO₂⁻）は JIS K0102 43.1、リン酸態リン（PO₄³⁻）は JIS K0102 46.1、アンモニア態窒素（NH₄⁺）は JIS K0102 42.2、塩化物イオン（Cl⁻）は JIS K0102 35.1（日本規格協会, 2013）、クロロフィル a（Chl-a）は環境庁（1978）に従い、濃度を定量化した。

データ解析

水質と植物プランクトンの総量を汽水化の前（2009年4月～2012年3月）と後（2012年4月～2015年3月）で比較するため、汽水化を固定要因、調査月を変数要因、そして水質（水温、Cl⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、PO₄³⁻）と植物プランクトンの総量（Chl-a、総細胞数）を従属変数とする乱塊法による分散分析（Randomized-block ANOVA）を行った。解析に用いたこれらの水質データは、岡本・宮本（2014）でグラフ化したものと同一である。解析に先立ち、細胞密度のデータは対数変換（log (n+1)）を施した。

植物プランクトンの群集構造を汽水化の前後で比較するため、非計量的多次元尺度法（Non-metric Multidimensional Scaling, NMS）による解析を行った。各分類群の細胞密度から求めた Bray-Curtis の距離を調査月間の非類似度を示す指数として用い、50回の反復計算を行うことにより座標付けを行った。解析に先立ち、各分類群の細胞密度は調査月ごとに比率に変換した。なお、同定の解像度が調査年間、および分類群間で異なることから（特に2009年度は同定が属レベルで行われた）、解析結果が特定の年や分類群における変化のバイアスを受ける危険性を考慮し、本

解析は属レベルで行った。また、NMS で得られた座標軸が、どの分類群の細胞密度の変化を反映しているかを明らかにするために、各調査月の軸の値と細胞密度との間でケンドールの順位相関分析計数（ τ ）を求めた。分析対象にした分類群は、調査期間中の出現細胞数が上位 20 位までのものとした。さらに、座標軸が塩分の変化を反映しているかを明らかにするために、塩分と NMS で得られた座標軸の値の関係についてピアソンの相関分析を行った。

塩分の変化に応じた植物プランクトンの出現特性を明らかにするため、2010年4月～2015年3月の期間、種レベルで同定された優占的な植物プランクトン 10 種（藍藻：*Anabaena affinis*, *Microcystis aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *Planktothrix agardhii*, 渦鞭毛藻：*Heterocapsa rotundata*, 珪藻：*Ceratoceros subtile*, *Cyclotella meneghiniana*, *Cylindrotheca closterium*, *Skeletonema costatum*, *S. subsalsum*）を対象に、塩分を独立変数、細胞密度を従属変数とする回帰分析を行った。近年、これまで *S. costatum* と同定されてきた種が複数の種を含むことが指摘されているが（Sarno and Kooistra, 2005）、本研究では、*S. costatum* として扱った。全ての解析は統計解析ソフトウェア R ver 3.20 (<http://www.R-project.org/>) を使用した。

結果

汽水化後の水質と植物プランクトン現存量の変化

汽水化の後、一部の水質（Cl⁻・NH₄⁺）にのみ有意な変化が認められた（Cl⁻: F=140.9, P<0.001, NH₄⁺: F=5.80, P<0.05, 表 2）。Cl⁻ 濃度は汽水化後に著しく上昇した反面、NH₄⁺ 濃度は汽水化後に減少した（図 2）。一方で、植物プランクトンの総細胞数と Chl-a 濃度（図 3, 表 3）、および、その他の栄養塩濃度（NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、PO₄³⁻）と水温には（表 2）、汽水化の前後で有意な変化は見られなかった（全て P>0.05）。

汽水化後の植物プランクトン群集の変化

2010～2015年度の期間に出現した植物プランクトン群集の組成を表 1 に示す。藍藻類は *Anabaena* 属, *Aphanizomenon* 属, *Microcystis* 属, *Planktothrix* 属を中心に出現していたのに対して、汽水化後（2012～2015年度）では、姿を消した。同様に、緑藻類は *Scenedesmus* 属や *Oocystis* 属などを中心に出現していたが、汽水化後の現存量は明らかに減少した。一方、渦鞭毛藻類は、汽水化前にはほとんど優占することはなかったが、汽水化後では *Gymnodiniales*

表1 海水導入の前後における湖山池の植物プランクトン群集の経時変化 (2010~2015). グレーの背景は海水導入後の期間を示す. 調査期間中に細胞数が 10^5 cells/l を上回った種のみを示した.

Table 1 Temporal changes in phytoplankton assemblage in Lake Koyama-ike before and after brackishing (2010~2015). Gray scenery represents a period of brackishing. Only abundant species (cell density (l^{-1}) $> 10^5$) were listed.

Taxon	Sp	Su	Fa	Wi																
Cyanophyceae																				
<i>Anabaena affinis</i>	+	cc	-	-	c	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena crassa</i>	-	-	-	-	-	-	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena flos-aquae</i>	+	cc	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena oumiana</i>	-	-	-	-	c	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena smithii</i>	+	-	-	-	c	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena sp.</i>	-	-	-	-	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaena spiroides</i>	-	-	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Anabaenopsis circularis</i>	-	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	cc	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Aphanizomenon issatschenkoi</i>	-	c	-	-	-	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Aphanocapsa sp.</i>	-	-	-	-	cc	c	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Aphanocapsa spp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	cc	-	-	-	c	-	-	cc	c	-	-	
<i>Chroococcaceae</i>	-	-	-	-	-	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Coelosphaerium sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	c	-	-	
<i>Gomphosphaeria sp.</i>	-	-	-	-	c	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Lyngbya sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	-	
<i>Merismopedia sp.</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Microcystis aeruginosa</i>	c	cc	c	cc	cc	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Microcystis firma</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	c	cc	cc	c	-	cc	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Microcystis wesenbergii</i>	-	c	+	-	-	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Phormidium mucicola</i>	-	-	-	-	cc	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Phormidium sp.</i>	-	-	-	-	-	c	+	-	-	-	-	-	c	-	-	-	-	-	-	
<i>Planktothrix agardhii</i>	+	cc	-	-	+	cc	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Planktothrix raciborskii</i>	-	cc	+	-	+	cc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Snowella sp.</i>	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dinophyceae																				
<i>Alexandrium sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	c	-	+	-	-	+	-	
Gymnodiniales	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	c	-	+	cc	+	-	c	+	-	
<i>Gyrodinium instriatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	-	-	-	
<i>Heterocapsa rotundata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	c	cc	c	c	cc	c	+	+	cc	cc	+	
<i>Heterocapsa sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	c	+	+	-	-	-	-	+	-	
Peridinales	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	c	c	-	+	
<i>Prorocentrum minimum</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	c	-	-	+	-	-	-	
<i>Scrippsiella sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	-	
Chrysophyceae																				
<i>Chrysococcaceae</i>	-	-	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Chrysococcus sp.</i>	-	-	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chrysophyceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	+	-	+	c	c	-	-	-	
<i>Pedinellaceae</i>	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	c	-	+	-	+	-	+	
<i>Pseudopedinella pyriformis</i>	-	-	c	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cryptophyceae																				
<i>Chroomonas sp.</i>	-	-	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cryptomonadales	-	-	-	-	c	c	+	cc	c	cc	cc	c	cc	cc	cc	c	+	c	c	
Cryptophyceae	-	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chlorophyceae																				
<i>Amphikrinos namus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	cc	-	-	c	c	-	+	
<i>Chlamydomonadales</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	-	+	c	c	+	-	
<i>Chlamydomonas spp.</i>	+	+	+	c	-	-	-	-	+	c	-	+	c	-	-	c	-	+	-	
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	-	-	-	+	+	-	-	-	cc	-	-	-	-	-	-	-	cc	-	-	
<i>Dictyosphaerium sp.</i>	+	+	-	-	c	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Dictyosphaerium spp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cc	-	-	
<i>Eudorina elegans</i>	-	-	-	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Monoraphidium contortum</i>	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	c	+	+	
<i>Monoraphidium sp.</i>	-	c	-	-	+	+	+	c	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	
<i>Oocystis sp.</i>	c	+	+	+	c	+	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Oocystis spp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	c	c	-	-	-	-	-	c	+	-	+	
<i>Planctonema lauterbornii</i>	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Scenedesmus intermedius</i>	-	-	cc	+	c	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Scenedesmus spp.</i>	+	+	c	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	
<i>Westella botryoides</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	+	-	-	
Bacillariophyceae																				
<i>Amphiprora alata</i>	+	+	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Chaetoceros seiracanthum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cc	-	-	-	-	-	-	
<i>Chaetoceros sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	c	
<i>Chaetoceros spp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	cc	-	cc	c	+	c	cc	cc	c	+	
<i>Chaetoceros subtile</i>	-	-	cc	cc	+	+	cc	-	+	cc	-	+	+	+	+	c	+	+	-	
<i>Cyclotephanos sp.</i>	c	+	+	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Cyclotella atomus</i>	-	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Cyclotella caspia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	cc	c	cc	c	c	c	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Cyclotella pseudostelligera</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Cyclotella sp.</i>	cc	+	cc	c	+	+	c	c	+	cc	-	-	cc	+	+	+	+	c	+	
<i>Cyclotella striata</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	c	c	
<i>Cylindrotheca closterium</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	cc	+	-	+	cc	c	c	+	+	-	
<i>Entomoneis alata</i>	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	
<i>Entomoneis sp.</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	
<i>Fragilaria capiteolata</i>	-	-	-	-	-	-	-	c	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Nitzschia sp.</i>	c	+	c	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Nitzschia spp.</i>	c	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
<i>Skeletonema costatum</i>	-	-	-	-	-	-	cc	c	cc	+	+	+	c	+	+	+	c	c	+	
<i>Skeletonema potamos</i>	cc	c	cc	c	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Skeletonema sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	cc	-	-	
<i>Skeletonema subsalsum</i>	-	-	cc	c	cc	+	cc	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	c	-	c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Stephanodiscus sp.</i>	c	+	+	-	c	+	+	c	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	
<i>Stephanodiscus spp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	cc	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Thalassiosira spp.</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	c	+	-	-	-	-	
<i>Thalassiosira weissflogii</i>	-	c	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Thalassiosiraceae</i>	-	-	-	-	c	+	+	c	cc	c	+	-	+	cc	+	cc	cc	c	cc	
Others																				
PRASINOPHYCEAE	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	cc	c	+	-	c	cc	+	

cc: $>10^6$ cells/l c: 10^6-10^5 cells/l +: abundant -: absent
 Sp: spring (Apr.-Jun) Su: summer (Jul.-sep.) Fa: Fall (Oct.-Dec) Wi: Winter (Jan.-Mar.)

表 2 分散分析 (Randomized block ANOVA) による海水導入前後での水質値の比較. 調査月をブロック因子として解析を行った. 分散分析の統計量 (F 値) を示す. p: 有意水準.

Table 2 Randomized block ANOVAs (analyses of variance) of the effects of brackishing (fix factor) and month (blocking factor) on water qualities. F-statistics of ANOVA were shown. p: significant levels.

Dependent variables	Brackishing	Month
chrolinity	140.9***	1.07
temperture	0.016	183.1***
NO ₃ ⁻	0.9	4.84***
NO ₂ ⁻	0.14	0.92
NH ₄ ⁺	5.80*	2.54*
PO ₄ ³⁻	3.4	2.07*

*** P < 0.001, ** P < 0.01, * P < 0.05

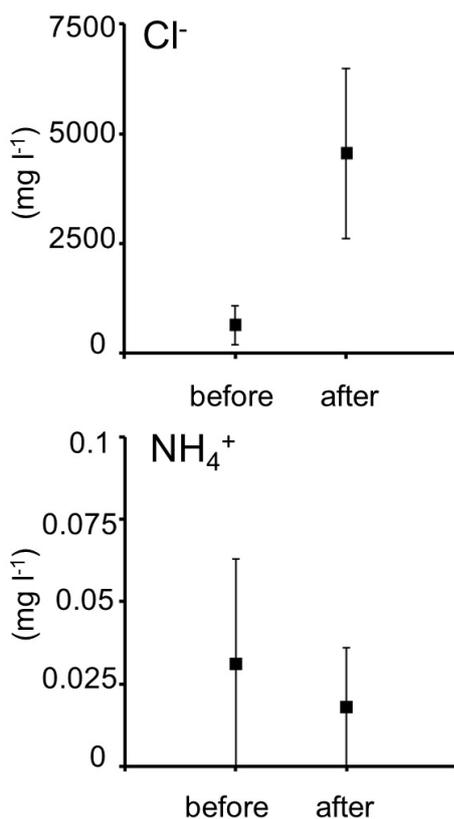


図 2 汽水化前後における水質の変化. エラーバーは標準偏差を示す.

Fig. 2 Changes in water qualities between before and after brackishing. Error bars show standard deviation.

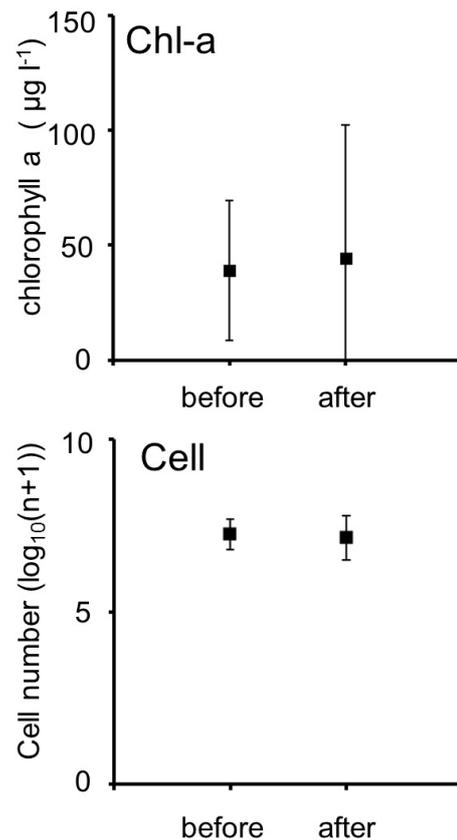


図 3 汽水化前後における植物プランクトン現存量の変化. エラーバーは標準偏差を示す.

Fig. 3 Change in phytoplankton abundance between before and after brackishing. Error bars show standard deviation.

表 3 分散分析 (Randomized block ANOVA) による海水導入前後での植物プランクトン現存量の比較. 調査月をブロック因子として解析を行った. 分散分析の統計量 (F 値) を示す. p : 有意水準.

Table 3 Randomized block ANOVAs (analyses of variance) of the effects of brackishing (fix factor) and month (blocking factor) on phytoplankton abundance. F-statistics of ANOVA were shown. p: significant levels.

Dependent variables	Brackishing	Month
Chl-a	0.25	1.42
Cell (log (n+1))	0.72	1.09

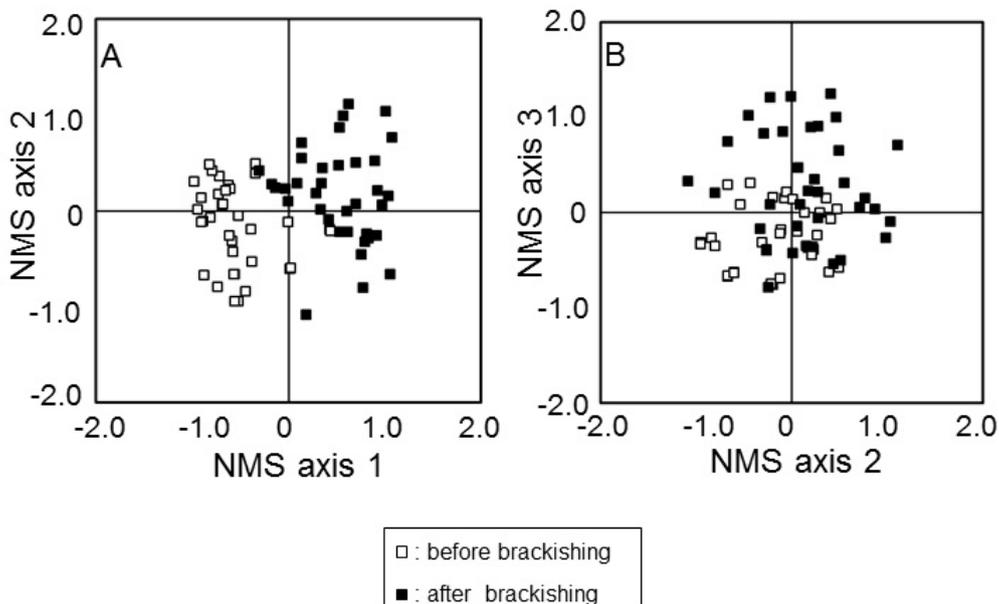


図 4 非計量的多次元尺度法 (NMS) の第 1 軸と第 2 軸 (A) 及び 2 軸と 3 軸 (B) の散布図.

Fig. 4 Plots of axis 1 versus axis 2 (A) and axis 2 versus axis 3 (B) for the Non-metric Multidimensional Scaling (NMS) on cell density of phytoplankton.

目, *Heterocapsa* 属が優占するようになった. 珪藻類も, その優占種は汽水化前後で異なっており, *Cyclotella meneghiniana*, *Nitzschia* 属, *S. subsalsum* から *Cylindrotheca closterium*, *S. costatum*, *Cheatoceros* 属, *Thalassiosiraseae* 科へ変化した (表 1).

2009 ~ 2015 年度の属レベルでの同定結果を対象として非計量的多次元尺度法 (NMS) による解析を行った結果, 3つの軸が得られ, 最終的なストレスは 16.15 であった. 得られた 3つの軸について 2次元プロットを作成した結果 (図 4), 汽水化前 (2009 ~ 2011 年度) の植物プランクトン群集は NMS 軸 1 と軸 3 の値が小

さい領域に, 汽水化後 (2012 ~ 2015 年度) は大きい値の領域に配置される傾向が見られた. これに対して, NMS 軸 2 では, 汽水化前後での分離が不明瞭であった. なお, NMS 軸 1 は, 渦鞭毛藻の *Heterocapsa* 属, クリプト藻の *Cryptomonas* 属, *Cryptomonadales* 目, 珪藻の *Cheatoceros* 属, *Cylindrotheca* 属, *Thalassiosiraseae* 科と正の相関がみられた反面, 藍藻の *Anabaena* 属, *Aphanizomenon* 属, *Microcystis* 属, *Oscillatoria* 属, *Planktothrix* 属と緑藻の *Scenedesmus* 属, 珪藻の *Cyclotella* 属, *Nitzschia* 属と負の相関がみられた (表 4). NMS 軸 3 も軸 1 とおおむね同様の相

表 4 植物プランクトンの細胞密度と非計量多次元尺度法 (NMS) の座標軸の相関 (Kendall's τ) .Table 4 Correlation coefficients (Kendall's τ) between phytoplankton density and axes of Non-metric Multidimensional Scaling (NMS).

TAXON	NMS1	NMS2	NMS3
CYANOPHYCEAE			
<i>Anabaena</i>	-0.38	-0.36	-0.22
<i>Aphanizomenon</i>	-0.51	-0.27	
<i>Aphanocapsa</i>			-0.28
<i>Microcystis</i>	-0.35	-0.43	-0.37
<i>Oscillatoria</i>	-0.24		
<i>Planktothrix</i>	-0.37	-0.30	-0.20
BACILLARIOPHYCEAE			
<i>Cheatoceros</i>	0.47		-0.19
<i>Cyclotella</i>	-0.60		-0.24
<i>Cylindrotheca</i>	0.38		0.25
<i>Nitzschia</i>	-0.50		-0.27
<i>Skeletonema</i>			-0.38
Thalassiosiraseae	0.44	0.32	
CHLOROPHYCEAE			
<i>Dictyosphaerium</i>		-0.22	
<i>Scenedesmus</i>	-0.45		-0.18
DINOPHYCEAE			
<i>Heterocapsa</i>	0.39		0.48
CRYPTOPHYCEAE			
Cryptomonadales	0.35	0.24	0.22
<i>Cryptomonas</i>	0.19	-0.24	
PRASINOPHYCEAE			
Prasinophyceae	0.23	0.19	0.41

関関係を有していた (表 4)。また、座標軸 1、軸 3 は塩分とも有意な相関を有し、共に正の相関を有していた。軸 2 は有意な相関を有していなかった (図 5)。

塩分に応じた優占種の細胞数の変化

藍藻類 (*P. agardhii*, *M. ichthyoblabe*, *M. aeruginosa*, *A. affinis*) の細胞数は、いずれも塩分の上昇に応じて有意に減少し、出現が確認されたのはほとんどが汽水化の前であった (図 6)。一方、渦鞭毛藻 (*H. rotundata*) は塩分の上昇に応じて細胞数が増

加し、汽水化後にのみ出現が限られた (図 6)。珪藻類は塩分の上昇に応じて細胞数が増加した種 (*S. costatum*, *C. closterium*) と減少した種 (*S. subsalsum*, *C. meneghiniana*)、さらに変化が見られなかった種 (*S. subtile*) があり、*S. subsalsum*, *C. meneghiniana* は汽水化前に出現が限られた反面、*S. costatum*, *C. closterium* は汽水化後に出現が偏っていた (各優占種の出現した塩分濃度の範囲を表 5 に示した)。

表 5 植物プランクトンの優占種が出現した塩化物イオン濃度の範囲.
 Table 5 Cl⁻ ranges in which dominant phytoplankton appeared.

Spices	Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	
	Min	Max
<i>Planktothrix agardhii</i>	190	2100
<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	280	1100
<i>Microcystis aeruginosa</i>	190	1100
<i>Skeletonema costatum</i>	760	8000
<i>Heterocapsa rotundata</i>	2100	7800
<i>Chaetoceros subtilis</i>	320	8000
<i>Skeletonema subsalsum</i>	190	2200
<i>Cylindrotheca closterium</i>	780	7700
<i>Anabaena affinis</i>	270	780
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	190	2200

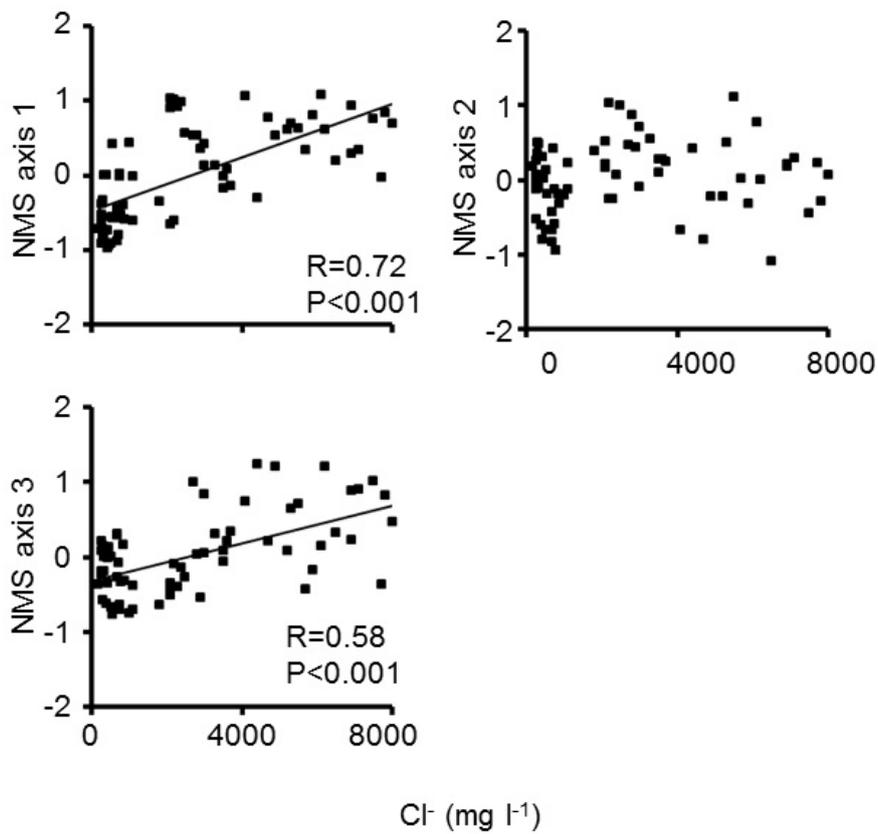


図 5 NMS の座標軸と環境要因 (塩分) の関係 . R : 相関係数, p : 有意水準.

Fig. 5 Relationship of axis 1-3 for NMS and environmental factor. R: Coefficient coefficient , P : significance level.

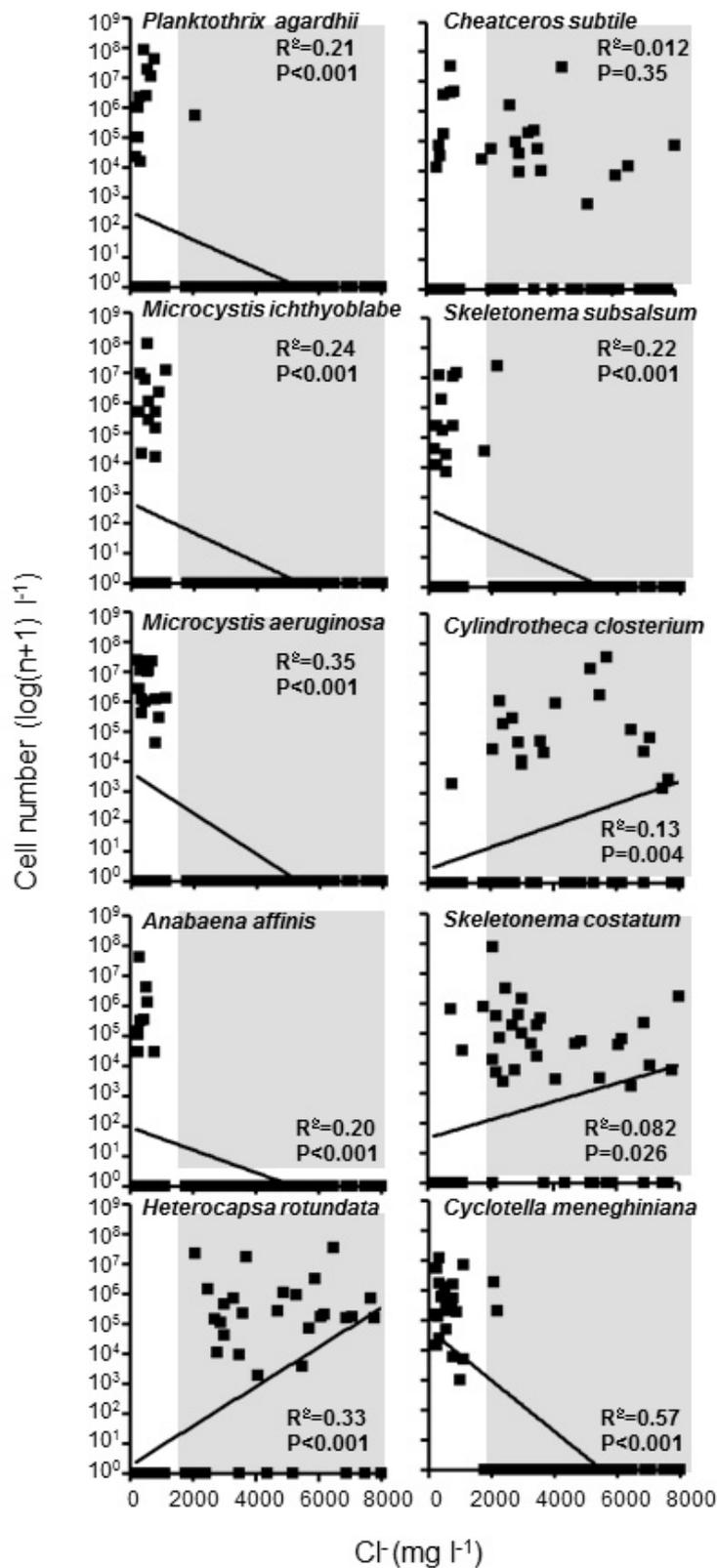


図6 植物プランクトンの細胞密度と塩化物イオン濃度との相関。グレーの背景は汽水化後の塩化物イオン濃度の範囲を示す (Cl^- 1800 ~ 8000 $mg\ l^{-1}$)。 R^2 : 決定係数, p : 有意水準。

Fig. 6 Correlations between Cl^- concentration and dominant phytoplankton density. Gray sceneries represent range in Cl^- fluctuations after brackishing. R^2 : coefficient of determination, P : significance level.

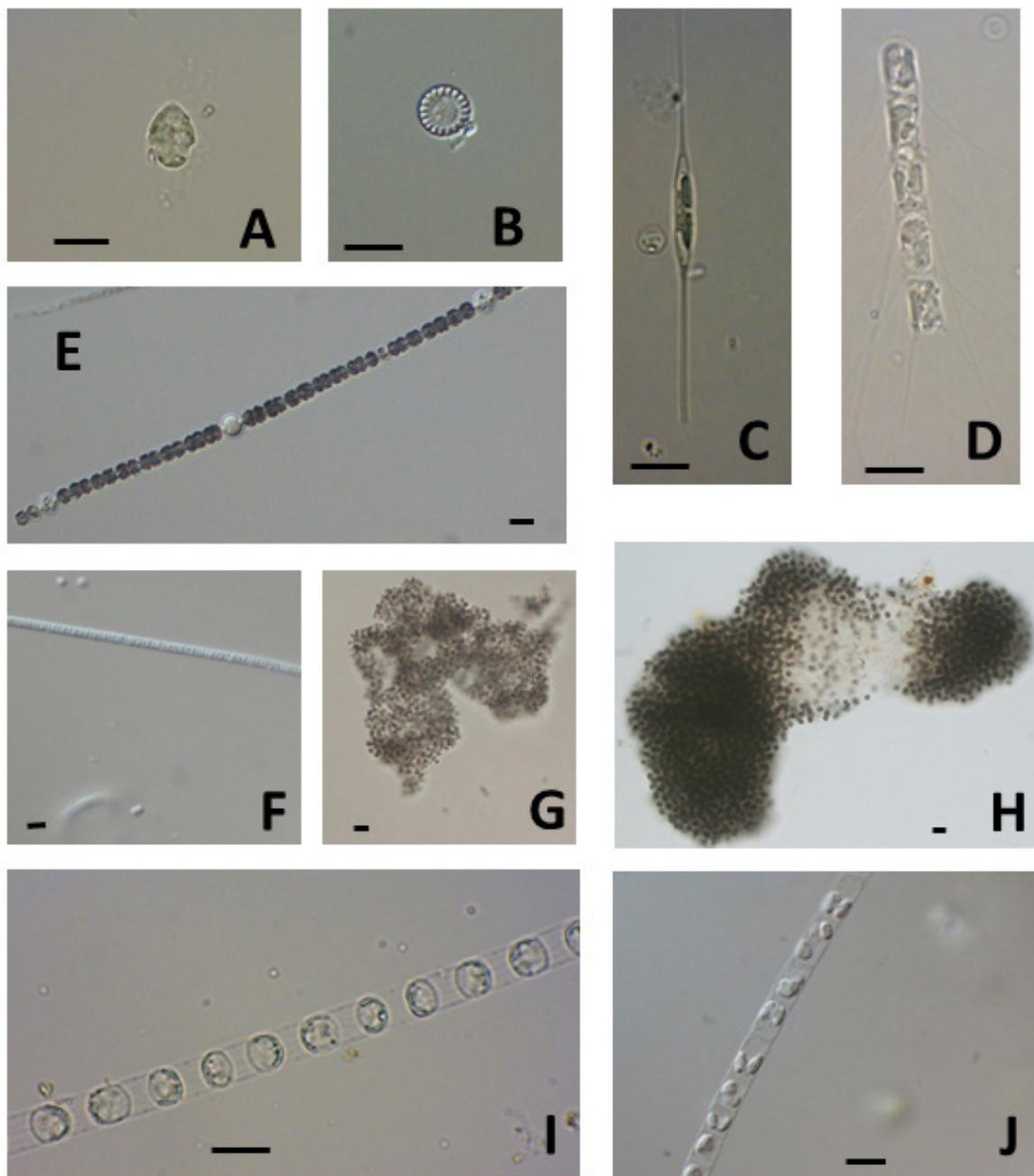


図7 植物プランクトンの優占種. スケールバーは10 μ mを示す.

Fig. 7 Dominant species of phytoplankton.

A: *Heterocapsa rotundata*, B: *Cyclotella meneghiniana*, C: *Cylindrotheca closterium*, D: *Chaetoceros subtile*, E: *Anabaena affinis*, F: *Planktothrix agardhii*, G: *Microcystis ichthyoblabe*, H: *Microcystis aeruginosa*, I: *Skeletonema costatum*, J: *Skeletonema subsalsum*, Scale bar 10 μ m for all figure.

考 察

汽水化による水質の変化

2012年に湖山池で実施された汽水化は、上層水に対して、一部の水質にのみ有意な変化を与えたことが本研究により明らかになった。汽水化により最も変化したのは塩分であり、汽水化後には月平均で約7倍に増加した(図2)。一方で、栄養塩の濃度では NH_4^+ に減少傾向が見られたのみで(月平均で約0.57倍に減少)(図2)、水温とChl-a、その他の栄養塩類には汽水化による有意な変化が認められなかった(表2, 3)。以上の結果は、2012年に湖山池で行われた汽水化が、上層水に対しては塩分以外の水質に大きな変化を与えなかったことを示している。

汽水化による植物プランクトンの群集構造の変化

植物プランクトンの総現存量の指標(Chl-a、全細胞数)には汽水化による有意な変化が認められなかった(表3)。これに対し、種組成には汽水化後に変化が生じたことがNMSにより示された(図4;表4)。汽水化後に減少した属の中で、藍藻の*Anabaena*属、*Aphanizomenon*属、*Microcystis*属、*Planktothrix*属は淡水域でよくみられる属である(Takamura et al., 1987; 南條ほか, 1998; 中川ほか, 2007)。反対に、汽水化により増加した渦鞭毛藻の*Heterocapsa*属は汽水・海水域で報告されている属である(小島, 2004; Kondo et al., 1990a; Trigueros and Orive., 2000)。したがって、2012年の汽水化は、植物プランクトン群集を淡水産から汽水・海産の種群が優占する構造に変化させたことが明らかである。塩分の増加に応じて淡水性の種群(緑藻・藍藻)が減少し、一方で海産性の種群(渦鞭毛藻)が増加した事例は、島根県の宍道湖においても報告がある(秋山, 1982; 大谷, 1997)。

植物プランクトンの群集構造は、塩化物イオン濃度が2,500~3,000 mg l⁻¹を上回ると淡水種から汽水・内湾型のフロラに変化する(秋山, 1982)。海水導入前(2009~2011年度)の湖山池では、上層水の塩化物イオン濃度が190~2,200 mg l⁻¹の範囲で変化していた反面、海水導入後(2012~2015年度)は1,800~8,000 mg l⁻¹まで上昇、冬季(12~3月)を除く期間は、ほぼ2,500 mg l⁻¹以上の範囲で変化した(岡本・宮本, 2014)。これらに加え、汽水化後の湖山池で栄養塩類の濃度に明瞭な変化が見られなかった点を考慮すると(表2, 3)、海水導入後に湖山池で生じた植物プランクトンの群集構造の変化は、塩分の増加に起因すると考えるのが妥当であろう。

汽水化による植物プランクトンの優占種の変化

汽水化は植物プランクトンの優占種の現存量を変化させた。汽水化後に減少した種のうち、藍藻の*M. aeruginosa*, *A. affinis*, *P. agardhii*と珪藻の*C. meneghiniana*は淡水域で確認されている種である(南條ほか, 1998; 吉田・沖野, 1996; 中川ほか, 2007)。反対に、汽水化後に増加した渦鞭毛藻の*H. rotundata*と珪藻の*S. costatum*, *C. closterium*は汽水・海産種であった(小島, 2004; Kondo et al., 1990a; Trigueros and Orive., 2000; Shimura et al., 1979; 植田ほか, 2004)。こうした汽水化後に生じた種レベルでの変化の傾向は、NMSで確認された属レベルでの変化の傾向と符合していた。したがって、多変量解析で示された汽水化後の属レベルでの群集構造の変化は、種レベルで生じた変化を反映しているものと考えられる。

結 論

2012年に湖山池で実施された海水導入は、上層の植物プランクトンの総現存量に変化を与えなかった反面、群集構造に変化を与えたことが明らかになった。そして、その群集は淡水の種群から汽水・海産の種群が優占する構造に変化したことも併せて明らかになった。また海水導入により、上層の水質は各栄養塩の濃度には明瞭な変化が見られず、塩分のみが著しく変化したことが明らかになった。しかし、海水導入による湖山池の汽水化から3年しか経過していないうえ、水門の運用方法の見直しや水門の改造などの塩分管理手法の改良に伴う湖内塩分の低下傾向も見られることから、植物プランクトンの群集構造は今後も変化する可能性が否定できない。こうした変化を把握するために今後も植物プランクトンに対する継続的な調査が必要だろう。

謝 辞

本研究のとりまとめにあたり、鳥取県衛生環境研究所水環境対策チームの皆様と鳥取県栽培漁業センターの野々村卓美博士には数多くの助言をいただいた。また、鳥取県衛生環境研究所の南條吉之博士(現サンイン技術コンサルタント株式会社)には初稿の修正に際して貴重なご意見をいただいた。最後に、査読者2名の方々には本稿に対する数々の建設的な助言をいただいた。記してお礼申し上げます。

引用文献

- 秋山 優 (1982) 中海・宍道湖の藻類. 遺伝, 36: 90-94.
- 環境庁 (1978) 環境測定分析参考資料. 環境庁企画調整局研究調整課, pp.300.
- 小島夏彦 (2004) 中海産渦鞭毛藻群集の出現特徴. LAGUNA (汽水域研究), 11: 87-96.
- Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y. (1990a) Relationships between Phytoplankton Occurrence and Salinity or Water Temperature in Brackish Lake Nakanoumi, 1979-1986. Japanese Journal of Limnology, 51:173-184.
- 宮本 康 (2004) 汽水湖の生物相: 塩分による直接・間接的な生物相の維持. LAGUNA (汽水域研究), 11: 97-107.
- 森 明寛 (2010) 湖山池に生育するヒシの発芽特性と生育環境. 鳥取県衛生環境研究所報, 51: 33-36.
- Nagaoe, S., Kim, D., Shimasaki, Y., Oshima, Y., Yamaguchi, M. and Honjo, T (2006) Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the red tide dinoflagellate *Gyrodinium instriatum* Freudenthal et Lee. Harmful Algae, 5: 20-25.
- 中川 恵・高村典子・金 白虎・辻 ねむ・五十嵐聖貴・若菜 勇 (2007) 達古武沼における植物プランクトンの季節変化と水平変化. 陸水学雑誌, 68: 109-121.
- 永瀬知美・奥田益算・若林健二 (2008) 湖山池のカビ臭原因プランクトンに関する研究. 鳥取県衛生環境研究所報, 49: 24-29.
- 南條吉之 (2001) 富栄養湖におけるキレート物質による藻類増殖促進作用に関する研究 —湖山池を例として—. 博士学位論文, 鳥取大学, pp. 124.
- 南條吉之・福田明彦・矢木修身・細井由彦 (1998) 汽水湖沼におけるアオコおよび赤潮発生の制御に関する基礎的研究. 水環境学会誌, 21: 530-535.
- 日本規格協会 (2013) 工場排水試験方法 JIS K0102. 日本工業規格協会, pp. 368.
- 日本水道協会 (2001) 上水試験方法. 日本水道協会, pp. 827.
- 大谷修司 (1997) 宍道湖・中海水系の植物プランクトンの種類組成と経年変化. 沿岸海洋研究, 35: 35-47.
- 岡本将揮・宮本 康 (2014) 湖山池汽水湖化前後における植物プランクトン群集の変化. 鳥取県衛生環境研究所報, 55: 17-19.
- Sarno, D. and Kooistra, W. H. C. F. (2005) Diversity in The Genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae). II. an Assessment of the Taxonomy of *S. costatum*-like species with the Description of four new species. Journal of Phycology, 41: 151-176.
- 佐藤紗知子・大城 等・馬庭 章・菅原庄吾・神谷 宏・大谷修司 (2015) 宍道湖におけるアオコ発生の環境要因とその事前判別. 陸水学雑誌, 76: 217-223.
- 紫加田知幸・櫻田清成・城本祐助・生地 暢・吉田 誠・大和田紘一 (2010) 八代海における植物プランクトンの増殖に与える水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌, 76: 34-45.
- Shimura, S., Shibuya, H. and Ichimura, S. (1979) Growth and photosynthesis properties of some planktonic marine diatoms at various salinity regimes. La mer, 17: 149-155.
- Takamura, N., Iwakuma, T. and Yasuno, M. (1987) Primary Production in Lake Kasumigaura, 1981-1985. Japanese Journal of Limnology, 48: 13-38.
- 谷口 旭 (1983) 植物プランクトンの生産特性. 化学と生物, 21: 602-606.
- Trigueros, J. M. and Orive, E. (2000) Tidally driven distribution of phytoplankton blooms in a shallow, macrotidal estuary. Journal of Plankton Research, 22: 969-986.
- 鳥取県 (1965) 湖山池・東郷池地域振興計画調査報告書. 鳥取県, pp. 81.
- 富川哲夫 (1962) 鳥取県, 湖山池の陸水学的観察. 水産増殖, 10: 243-250.
- 鳥取県・鳥取市 (2013) 湖山池将来ビジョン推進計画 (第3期 湖山池水質管理計画).
- 植田真司・近藤邦男・築地由貴・清家 泰・三田村緒佐武 (2004) 汽水湖尾駁沼における植物プランクトンの出現特性. 陸水学雑誌, 65: 27-35.
- 吉田陽一・沖野外輝夫 (1996) 諏訪湖におけるアオコの発生とDON:DIN比等との関係. 日本水産学会誌, 62: 631-637.
- 吉村信吉 (1929) 鳥取県多鯰ヶ池の湖沼学的予察研究附湖山池及東郷池. 地理学評論, 5: 961-984.
- 湯原浩三 (1957) 鳥取県海岸湖沼の比電気伝導度分布. 陸水学雑誌, 19: 29-37.