短 報 [Note]

印旛沼において浮葉植物オニビシの繁茂が水質に与える影響

赤堀由佳・高木 俊・西廣 淳・鏡味麻衣子

Effects of floating-leaved plant, *Trapa natans*, on the water qualities in Lake Inba

Yuka AKABORI, Shun TAKAGI, Jun NISHIHIRO and Maiko KAGAMI

Abstract

Recently, the floating-leaved plants, especially *Trapa* spp., have been increased in many shallow and eutrophic lakes in Japan. In this study, we investigated the seasonal changes in water qualities in relation to the presence / absence of *Trapa natans* in the eutrophic Lake Inba. In the *Trapa* growing seasons (from July to September), the percentage of dissolved oxygen and turbidity were lower in the *Trapa* beds than the open water without *Trapa*. Dissolved oxygen significantly decreased near the bottom especially at night. Turbidity was significantly lower both at the surface and bottom layer in the *Trapa* beds only in the *Trapa* growing seasons. Low oxygen and turbidity in the beds might be due to the reduced water currents and the suppression of photosynthesis by phytoplankton under the low light conditions. There were no significant differences in nutrient concentrations between *Trapa* beds and the open water, though high concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the *Trapa* beds were observed in August and September. Decay and decomposition of *Trapa* and anoxic condition near the sediment might have caused the release of inorganic nitrogen into water. While in the non-growing seasons, there were no significant differences on water qualities between the stations. Differences in water qualities were more remarkable between seasons that total phosphorus concentration was high from July to September, while $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ were high in other months. Since those seasonal changes in nutrient concentrations were common in Lake Inba, the effects of *Trapa* spp. on nutrient concentrations were much smaller than the other factors affecting seasonal variations.

Keywords: eutrophic lake, aquatic macrophyte, dissolved oxygen, phosphorus, nitrogen

摘 要

近年国内の浅い富栄養湖のいくつかでヒシ属植物の増加が報告されている。本研究では、オニビシの繁茂が水質に与える影響を明らかにするために、印旛沼においてオニビシが繁茂する地点（オニビシ帯）としない地点（開放水面）の水質を比較した。繁茂期（7月から9月）のオニビシ帯は、開放水面に比べ溶存酸素濃度および濁度が有意に低かった。溶存酸素濃度の低下は夜間と底層で顕著であり、無酸素状態になることもあった。濁度はオニビシが繁茂している時期にオニビシ帯の表層と底層両方で低くなった。オニビシ帯では、浮葉が水面を覆うことにより、水の流動は減少し、遮光により水中での光合成量

は低下するため、溶存酸素濃度や濁度が低くなったと考えられる。栄養塩濃度に関してはいずれもオニビシ帯と開放水面の間で有意な差は認められなかったが、8月と9月に、アンモニア態窒素濃度が高くなった。オニビシの枯死分解に伴い無機態窒素が放出されるとともに、貧酸素により底泥から溶出した可能性がある。一方、オニビシが繁茂しない時期には、地点間でこれらの水質項目に明瞭な差は見られなかった。栄養塩濃度の差は、地点間の差よりもむしろ季節による差のほうが顕著で、オニビシ帯と開放水面共に、7月から9月は全リン濃度が高く、それ以外の時期は亜硝酸態窒素及び硝酸態窒素濃度が高かった。印旛沼では、このような栄養塩濃度の季節変動は毎年確認されており、栄養塩濃度の季節変動に与える複数の効果に比べオニビシの効果は小さいと考えられる。

キーワード：富栄養湖、水草、溶存酸素濃度、リン、窒素

2014年10月15日受付：2015年12月10日受理

はじめに

浅い湖では、水生植物は主要な基礎生産者のひとつであり、その繁茂は水質に影響を与える。水生植物の中でも、特に沈水植物群落が発達すると、「水が澄んだ状態」が維持されやすくなることが知られている (Scheffer, 1998)。富栄養化や土地利用の変化に伴い、世界各地の湖沼において、1960年頃から沈水植物が消失している (Blindow et al., 1993; Sand-Jensen et al., 2000)。一方、日本のいくつかの湖沼では、沈水植物とは対称的に浮葉植物の増加が報告されている。浮葉植物のなかでもヒシ属植物の増加が顕著である。北海道の達古武沼では、1990年代から2000年代にかけてヒシ帯が拡大し、他の浮葉植物群落が衰退した (角野, 2007)。長野県の諏訪湖では、2005年から2009年の調査で、ヒシ (*Trapa japonica*) の増加及び沈水植物の減少が確認されている (豊田ら, 2011)。福井県の三方湖でも、2000年代に入ってからヒシの増加が認められ、2008年以降は湖面の半分以上の面積を高密度な群落が覆うほどに繁茂するようになった (Nishihiro et al., 2014)。千葉県印旛沼では、1984年からオニビシ (*Trapa natans*) が繁茂域を急激に拡大し始めた (印旛沼環境基金, 2012)。

浮葉植物が水質に与える影響は、沈水植物とは異なることが予想される。沈水植物は植物体全体が水中に存在し、直接ガス交換を行う (角野, 1996)。一方、浮葉植物は水面に浮く葉 (浮葉) および水中根によりガス交換が行われる (角野, 1996)。浮葉植物自身が光合成により作り出した酸素は主に大気中に放出されるため、水中への酸素供給は少なく、呼吸による酸素消費を含めると水中の酸素を減少させることが報告されている (Caraco et al., 2006)。植物体の存在により大気とのガス交換が妨

げられ、さらに水流が軽減するため、開放水面中の酸素を含んだ水との交換が起こりにくく、酸素濃度が低下する (Caraco et al., 2006)。また、浮葉が太陽光の透過を遮ることで、水中における浮葉植物および植物プランクトンによる光合成量が抑えられ、溶存酸素濃度を減少させる (Goodwin et al., 2008)。ハドソン川では、沈水植物帯 (*Vallisneria spiralis*) では夏の成長期に溶存酸素濃度が 5.0 mg L^{-1} を下回ることがなかったが、浮葉植物帯 (*Trapa natans*) では調査期間中の4割にわたり溶存酸素濃度が 2.5 mg L^{-1} を下回る様子が観察されている (Caraco and Cole, 2002)。さらに、これらの影響は水生植物の密度や生物量によっても異なると予想される。酸素濃度は群落規模が大きいオニビシ帯のほうが顕著に低下することが明らかになっている (Hummel and Findlay, 2006)。また群落の密度が高い程、消波効果が高く、群落内の流速は低くなり、濁度上昇が抑制される可能性が指摘されている (天野・時岡, 2006)。

ヒシ属植物が水中の栄養塩濃度を上昇させるか、減少させるかは定かではない。実際、オニビシと栄養塩濃度との間に有意な関係が見られない場合もある (Hummel and Findlay, 2006)。ヒシ属植物は、生育時に栄養塩を吸収するため (岩熊・土谷, 1986; 小林ら, 1995; 渡辺ら, 2010)、水のフィルターとして効果的に機能すると指摘されている (Tsuchiya and Iwakuma, 1993; Chandra et al., 2013)。底泥の巻き上げは栄養塩の回帰量にも影響するため、ヒシ属植物の存在は底泥の安定化を介して、リンの回帰量を減少させる方向にも働く可能性があるとも報告されている (Huang et al., 2007)。一方で、枯死時には体内に蓄積した栄養塩を水中に放出する。また、オニビシ帯では、溶存酸素濃度が低下することで、脱窒反応や底泥からのリンの溶出、メタンの放出が促進される可能

性もある (Barko and James, 1998 ; Caraco and Cole, 2002 ; Pierobon et al., 2010)。

本研究では、オニビシの繁茂が水質に与える影響を明らかにするために、西印旛沼及び北印旛沼において調査を行い、オニビシ繁茂域と開放水域との間で水質を比較した。

方 法

調査地

本研究の調査地である印旛沼は、千葉県北西部に位置し、西印旛沼（以下、西沼）と北印旛沼（以下、北沼）の2沼が捷水路によってつながれている。印旛沼は面積11.55 km²、最大水深2.5 m、平均水深1.7 mの浅い沼である（虫明ら, 2010）。流域面積は541.1 km²であり、流域人口の76.8万人は日本3位と、流域面積あたりの人口が多い。

試料採取

調査は、西沼のオニビシ帯（St.1）と開放水面（St.2）、北沼のオニビシ帯（St.3）と開放水面（St.4）の、計4地点にて行った（Fig. 1）。オニビシ帯については、開放水

面との際から岸に向けて70 m以上入り込んだ場所を調査地点とした。調査は9時から12時にかけて、St.1から順に行った。2011年6月から2012年10月にかけて毎月1回、ただし冬季の11月から翌年5月は2月に1回の、計14回行った。

各調査地点で多項目水質計（堀場製作所U-50シリーズ）を用いて、表層（水面下約10 cm）と底層（湖底上約10 cm、深度約90 cm）の溶存酸素濃度・溶存酸素飽和度・水温・pH・濁度を測定した。同じ深度で小型バンドン採水器（1.5 L）を用いて採水を行った。試料はクーラーボックスに入れて研究室に持ち帰った。

オニビシの密度は、1 m × 1 mのコドラートを船上からランダムに3か所設置し、ロゼット数を計数した。オニビシの乾燥重量を測定するために、西沼・北沼それぞれよりオニビシのロゼットを5個、典型的なサイズのものを選び採取し、クーラーボックスに入れて研究室に持ち帰った。

溶存酸素の連続測定

溶存酸素ロガー（ワイエスアイ・ナノテック YSI600XLM）を設置し、オニビシ帯及び開放水面で溶存酸素の連続測定を行った。センサー部が深度約70 cm

Fig. 1. Lake Inba and sampling sites. Black areas are *Trapa* beds and gray represents open water areas.

図1. 印旛沼の調査地点。オニビシ帯を黒く塗りつぶし、調査地点を星印で示した。水は通常時は西印旛沼から北印旛沼に流れるが、増水時には逆になることもある。

(湖底上20～30 cm)にくるよう設置し、測定項目として水温及び溶存酸素飽和度を設定した。St.1とSt.2に、それぞれ1本ずつロガーを設置した。2011年8月18日から2012年9月25日までの約13カ月間、一定間隔(30分又は60分)で溶存酸素飽和度の連続測定を行った。なおSt.1に設置したロガーの周囲のオニビシが2012年7月下旬に刈り取られたため、7月30日に50 mほど岸寄りの刈り残されたオニビシ帯内に移動した。

水質(有機態・無機態栄養塩及びクロロフィル a 濃度)の分析

研究室に持ち帰った湖水は、一部を試験管に分注し、全窒素・全リン分析用に熱分解した。栄養塩の分析用に、湖水をGF/Fフィルター(Whatman)で濾過し、分析するまで冷凍保存した。フィルターはクロロフィル分析用に冷凍保存した。全窒素はアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム分解-紫外線吸光光度法、全リンはペルオキシ二硫酸カリウム分解-モリブデン青法により比色定量した(日本分析化学会北海道支部, 2005)。無機態の窒素として、アンモニア態窒素はインドフェノール法、亜硝酸態窒素はBR法、硝酸態窒素は硫酸ヒドラジニウム法により比色定量した(西條・三田村, 2009)。リン酸態リンはモリブデン青法により比色定量した(西條・三田村, 2009)。クロロフィル a 濃度の分析については、ロレンツェン法により行った。なお、クロロフィル a 濃度はフエオ色素を含めた値とした。

オニビシ生物量

採取したオニビシは水洗いをして、泥や付着生物を取り除き、冷凍保存した。分析時には解凍後、ロゼット当たりの葉数を計数し、葉身を切り分け、乾燥器で45℃、48時間乾燥させ、電子天秤で葉身の乾燥重量を一枚ずつ、0.01 mg単位で測定した。1ロゼットあたりの葉の総重量に1 m²中のロゼット数をかけ1 m²中の葉の総重量を求めた。葉の乾燥重量は、根や茎などを含めたオニビシ全体の生物量の約3分の1を占めていると仮定し(Tsuchiya et al., 1987)、求めた葉の乾燥重量を3倍してオニビシ全体の生物量を推定した。

統計解析

オニビシの繁茂する地点としない地点の間で水質が異なるのかを明らかにするために、「水温(℃)」、「pH」、「濁度(NTU)」、「クロロフィル a 濃度($\mu\text{g L}^{-1}$)」、「溶存酸素飽和度(%)」、「各種栄養塩濃度(mg L^{-1})」を応答変

数に、「場所(オニビシ帯・開放水面)」、「時期(オニビシ繁茂期・非繁茂期)」及びそれらの交互作用を説明変数として、混合要因分散分析を行った。調査デザインを考慮し、時期の効果の検定に対しては各調査日(14反復)を、場所(オニビシ帯・開放水面)に対しては各調査地点(4反復)を誤差要因(ランダム要因)として扱った。なお解析には、2011年6月から2012年10月のデータを用い、オニビシの被度が100%に達した各年の7月から9月までを「オニビシ繁茂期」、それ以外を「オニビシ非繁茂期」とした。また西沼と北沼は一緒に解析し、表層と底層は別々に解析を行った。

オニビシ帯の水質の特徴を把握するために、水質データ10変数(「水温(℃)」、「pH」、「濁度(NTU)」、「クロロフィル a 濃度($\mu\text{g L}^{-1}$)」、「溶存酸素飽和度(%)」、「全窒素濃度(mg L^{-1})」、「アンモニア態窒素濃度(mg L^{-1})」、「硝酸態+亜硝酸態窒素濃度(mg L^{-1})」、「全リン濃度(mg L^{-1})」、「リン酸態リン濃度(mg L^{-1})」、および「オニビシの生物量(g m^{-2})」を用いて主成分分析(PCA)を行った。西沼と北沼は一緒に解析し、表層と底層は別々に解析を行った。pHは高村ら(2006)を参考に水酸化物イオン濃度に変換した。硝酸態窒素と亜硝酸態窒素は変動が同様であったため、合計した値を変数として用いた。変数はそれぞれ平均0、標準偏差1になるように標準化した。固有値が1より大きい主成分に関して、軸の解釈を容易にするためにバリマックス法による軸の直交回転を行った。主成分負荷量の絶対値が0.6以上の変数に関して、各主成分と相関が高いと判断した。

全ての統計解析はR 3.0.2(R Core Team 2013)によって行い、主成分分析はpsychパッケージ内のprincipal関数を用いた。有意水準は5%とした。

結 果

オニビシ生物量

2011年・2012年共に、印旛沼のオニビシは5月頃葉が水面に届き、6～9月にかけて繁茂し、10月中旬には消失した。オニビシ生物量は、西沼では2011年・2012年共に5～9月にかけて増加し、9月に最大の549 g m⁻²となった。北沼は、2012年に西沼と同様であったが、2011年は9月には減少し始めていた(Fig. 2)。

溶存酸素の連続測定

オニビシが無い時期(10月以降、翌年4月まで)は、オニビシ帯と開放水面における溶存酸素飽和度は、ほぼ

印旛沼において浮葉植物オニビシの繁茂が水質に与える影響

Fig. 2. Biomass of *Trapa natans* in the north and west basin of Lake Inba.

図2. 西および北印旛沼の調査地点におけるオニビシ生物量。

Fig. 3. Measurements of diurnal variation in percentage of dissolved oxygen at 60-minute intervals throughout the day from 12th July to 12th August 2012 in the west basin of Lake Inba. Two sites are represented, a site in *Trapa* bed of west basin (St.1 : gray line) and open water of west basin (St.2 : black line), thick line represents data at night and dotted line represents data in day time.

図3. 西印旛沼2地点における2012年7月12日から8月12日の溶存酸素飽和度の連続測定結果。St.1（オニビシ帯）における測定結果を灰色、St.2（開放水面）の結果を黒色で示した。60分間隔で測定し、日没後から日の出までの夜間の測定値は実線で、日中は破線で示した。

同じ値をとったが、繁茂期はオニビシ帯で低くなった。特にオニビシの繁茂が最盛期を迎える7月以降から9月までは、オニビシ帯で無酸素状態になることもあった (Fig. 3)。溶存酸素飽和度はオニビシ帯・開放水面共に日変動が認められ、昼間に高く夜間に低くなる傾向が見られた。変動幅は特にオニビシ帯で大きかった。2012年は、7月下旬に調査地点付近のオニビシ帯で刈り取りが行われたが、同時期に溶存酸素飽和度の上昇がみられ、開放水面とオニビシ帯の間での溶存酸素飽和度の差がみられなくなった。7月30日にローダーを岸寄りのオニビシが繁茂している地点に移動したところ、再びオニビシ帯のほうが開放水面に比べ溶存酸素飽和度が低くなった。

水質

水質のうち、溶存酸素は季節を通じてオニビシ帯と開放水面の間で有意に差があり、底層・表層ともに開放水面に比べオニビシ帯で低かった (Fig. 4, Table 1)。溶存酸素飽和度の低下は特にオニビシの繁茂している時期の底層で顕著であり、西沼では2012年9月に0.5 %、北沼では2011年8月に0.8 %と、ほぼ無酸素状態になることもあった。濁度および底層のpHもオニビシの繁茂している時期に、開放水面に比べオニビシ帯で有意に低かった。水温は、表層ではオニビシ帯と開放水面の間で差はなかったが、底層では差が見られ、特にオニビシの繁茂している時期に、開放水面に比べオニビシ帯で低かった。また、水温は時期による差 (オニビシの繁茂期と非繁茂期) が有意であった。2011年8月には、両沼でアオコが発生

Fig. 4. Seasonal changes in (A) water temperature, (B) pH, (C) percentage of dissolved oxygen, (D) turbidity and (E) chlorophyll *a* concentrations at the surface and bottom layers in *Trapa* beds (filled) and open water (open) in the west (circles) and north (triangles) basins of Lake Inba.

図4. 印旛沼西沼および北沼の表層と底層における (A) 水温, (B) pH, (C) 溶存酸素飽和度, (D) 濁度, 及び (E) クロロフィル*a*濃度の季節変化. 西沼は丸, 北沼は三角で示し, オニビシ帯は黒塗り実線で, 開放水面は白抜き点線で示した.

し, クロロフィル*a*濃度は表層で特に高かったが, 表層・底層共にオニビシの有無による差は認められなかった.

窒素及びリン濃度については, 6項目全てについて (全窒素, アンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素, 硝酸態窒素, 全リン, リン酸態リン), オニビシ帯と開放水面の間での差はなかった (Fig. 5, Table 1). ただし, 時期による差 (オニビシの繁茂期と非繁茂期) が硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, 全リンについては認められ, 硝酸態窒素と亜

硝酸態窒素はいずれの地点においても, オニビシの繁茂期よりも非繁茂期に濃度が高かった. 一方, 全リン濃度はいずれの地点においても, 繁茂期の方が非繁茂期よりも高かった. アンモニア態窒素は, オニビシ有無で有意な差はなかったが, オニビシが繁茂する8月や9月に高い値をとる傾向であった (Fig. 5). 特に, 北沼ではオニビシ帯で高い値をとった.

11変数を用いて主成分分析を行った結果, 表層につ

Fig. 5. Seasonal changes in the concentrations of (A) total nitrogen (TN), (B) ammonium nitrogen, (C) nitrite nitrogen, (D) nitrate nitrogen, (E) total phosphorus (TP) and (F) phosphate phosphorus ($\text{PO}_4\text{-P}$) at the surface and bottom layers in *Trapa* beds (filled) and open water (open) in the west (circles) and north (triangles) basins of Lake Inba.

図5. 印旛沼西沼および北沼の表層と底層における (A) 全窒素, (B) アンモニア態窒素, (C) 亜硝酸態窒素, (D) 硝酸態窒素, (E) 全リン, (F) リン酸態リンの季節変化. 西沼は丸, 北沼は三角で示し, オニビシ帯は黒塗り実線で, 開放水面は白抜き点線で示した.

Table 1. Mixed model analysis of variance (ANOVA) for testing the differences in water quality parameters between seasons (*Trapa* growing vs. non-growing) and zone (*Trapa* beds vs. open water). Results for 11 parameters of water quality in the surface and bottom layers were shown.

表 1. 混合要因分散分析による、水質に対する季節（オニビシ繁茂期および非繁茂期）と場所（オニビシ帯および開放水面）の効果の検定結果。表層および底層における 11 項目の水質に対する結果を示した。各固定要因に対する誤差要因は括弧内に示した。

Source of variation (Error)		Water temperature			pH			Dissolved oxygen			Turbidity		
		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>
Surface													
Season	(Dates)	13.4	1.12	0.003	1.63	1.12	0.23	2.64	1.12	0.13	7.63	1.12	0.017
Zone	(Sites)	0.037	1.2	0.86	5.42	1.2	0.15	259	1.2	0.004	0.98	1.2	0.43
Season × Zone	(Residuals)	0.12	1.38	0.74	1.82	1.38	0.19	18.6	1.38	< 0.001	11.6	1.38	0.002
Bottom													
Season	(Dates)	14.8	1.12	0.002	3.59	1.12	0.083	18.3	1.12	0.001	2.09	1.12	0.17
Zone	(Sites)	27.1	1.2	0.035	17.9	1.2	0.052	269	1.2	0.004	3.21	1.2	0.21
Season × Zone	(Residuals)	9.46	1.38	0.004	28.4	1.38	< 0.001	44.5	1.38	< 0.001	30.4	1.38	< 0.001

Source of variation (Error)		Chlorophyll <i>a</i>			Total nitrogen			NH ₄ -N			NO ₂ -N		
		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>
Surface													
Season	(Dates)	1.10	1.12	0.31	0.85	1.12	0.37	2.13	1.12	0.17	20.5	1.12	< 0.001
Zone	(Sites)	0.28	1.2	0.65	0.26	1.2	0.66	2.48	1.2	0.26	0.51	1.2	0.55
Season × Zone	(Residuals)	0.19	1.38	0.66	1.02	1.38	0.32	0.98	1.38	0.33	0.33	1.38	0.57
Bottom													
Season	(Dates)	0.067	1.12	0.80	0.77	1.12	0.40	2.29	1.12	0.16	20.7	1.12	< 0.001
Zone	(Sites)	9.48	1.2	0.091	0.078	1.2	0.81	1.96	1.2	0.30	0.52	1.2	0.55
Season × Zone	(Residuals)	3.19	1.38	0.082	1.01	1.38	0.32	1.41	1.38	0.24	0.32	1.38	0.58

Source of variation (Error)		NO ₃ -N			Total phosphorus			PO ₄ -P		
		<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>
Surface										
Season	(Dates)	21.5	1.12	< 0.001	11.3	1.12	0.006	0.002	1.12	0.96
Zone	(Sites)	0.38	1.2	0.60	0.60	1.2	0.52	0.73	1.2	0.48
Season × Zone	(Residuals)	0.78	1.38	0.38	0.26	1.38	0.61	0.000	1.38	1.00
Bottom										
Season	(Dates)	23.4	1.12	< 0.001	8.45	1.12	0.013	0.56	1.12	0.47
Zone	(Sites)	0.18	1.2	0.72	0.16	1.2	0.73	0.000	1.2	1.00
Season × Zone	(Residuals)	0.64	1.38	0.43	0.042	1.38	0.84	0.089	1.38	0.77

いては固有値が 1 より大きい値を示した第 4 主成分までで全変動の 70.2 % が説明され、第 1 主成分の寄与率は 25.7 % であった。主成分負荷量の絶対値が 0.6 以上の 4 変数のうち、水温、濁度、クロロフィル *a* 濃度および全リン濃度が正の値を示した (Table 2, Fig. 6)。第 2 主成分は全変動の 21.6 % を説明した。主成分負荷量が 0.6 以上の値を示した 3 変数のうち、オニビシ生物量およびアン

モニア態窒素濃度が正の、溶存酸素飽和度が負の値を示した (Table 2)。底層については固有値が 1 より大きい値を示した第 4 主成分までで全変動の 73.0 % が説明され、第 1 主成分の寄与率は 25.6 % であった。主成分負荷量の絶対値が 0.6 以上の 3 変数のうち、水温および全リン濃度が正の、硝酸＋亜硝酸態窒素濃度が負の値を示した (Table 2, Fig. 6)。第 2 主成分は全変動の 25.0 % を説明した。

Fig. 6. Plots of data at the surface (a) and bottom (b) layers against values for the first two principal components, PC1 and PC2. Black circles are *Trapa* beds (St.1 and St.3) and gray triangles are open water (St.2 and St.4) in the period of maximum *Trapa* biomass in the lake (July to September). White circles are *Trapa* beds and white triangles are open water in the period of small or no *Trapa* biomass (October to June). WT: water temperature, Chl.a: chlorophyll *a* concentration, DO: percentages of dissolved oxygen, TN: total nitrogen, $\text{NH}_4\text{-N}$: ammonium nitrogen, $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$: nitrite and nitrate nitrogen, TP: total phosphorus, $\text{PO}_4\text{-P}$: phosphate phosphorus.

図6. 表層(a)および底層(b)の11変数を用いた主成分分析について、軸のバリマックス回転後の第1主成分と第2主成分の各地点、調査日ごとのスコアを2次元座標に示した図。繁茂期(7~9月)のオニビシ帯のプロットを黒丸、開放水面のプロットをグレーの三角で示した。また非繁茂期のオニビシ帯のプロットを白丸、開放水面のプロットを白抜きの三角で示した。WT: 水温, pH: 水酸化物イオン濃度, Turbidity: 濁度, Chl-a: クロロフィルa濃度, DO: 溶存酸素飽和度, TN: 全窒素濃度, $\text{NH}_4\text{-N}$: アンモニア態窒素濃度, $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$: 硝酸態+亜硝酸態窒素濃度, TP: 全リン濃度, $\text{PO}_4\text{-P}$: リン酸態リン濃度。

Table 2. Factor loadings of principal components, eigenvalues, and variance explained (%) after a varimax rotation for 10 parameters of water quality and *Trapa* biomass.

表2. 水質10項目およびオニビシ生物量を用いた主成分分析におけるバリマックス回転後の各主成分の主成分負荷量と各成分の固有値及び全変動に対する寄与率。

(a) Surface

Contents	PC1	PC2	PC3	PC4
Water temperature(WT)	0.78*	0.08	-0.29	0.06
Biomass of <i>Trapa</i>	0.20	0.80*	-0.15	0.21
pH (OH^-)	0.20	0.05	0.82*	-0.02
Dissolved oxygen (DO)	0.09	-0.87*	0.09	-0.23
Turbidity	0.82*	-0.20	-0.16	-0.06
Chlorophyll <i>a</i>	0.79*	0.02	0.21	-0.09
Total nitrogen (TN)	0.32	-0.07	0.10	-0.02
$\text{NH}_4\text{-N}$	-0.21	0.75*	0.04	-0.24
$\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$	-0.36	-0.38	0.70*	0.06
Total phosphorus (TP)	0.75*	0.44	-0.01	0.27
$\text{PO}_4\text{-P}$	-0.04	0.12	0.02	0.95*
Eigenvalue	2.83	2.37	1.36	1.16
% explained variance	25.7%	21.6%	12.4%	10.5%

(b) Bottom

Contents	PC1	PC2	PC3	PC4
Water temperature(WT)	0.85*	-0.06	0.00	-0.14
Biomass of <i>Trapa</i>	0.35	-0.80*	-0.10	-0.02
pH (OH^-)	0.13	0.66*	-0.29	0.05
Dissolved oxygen (DO)	-0.47	0.78*	-0.02	0.12
Turbidity	0.59	0.63*	0.03	0.05
Chlorophyll <i>a</i>	0.57	0.47	-0.15	0.43
Total nitrogen (TN)	-0.07	-0.05	0.07	0.87*
$\text{NH}_4\text{-N}$	-0.04	-0.61*	-0.36	0.21
$\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$	-0.60*	0.22	0.37	0.44
Total phosphorus (TP)	0.82*	-0.15	0.18	0.05
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.08	-0.02	0.91*	0.09
Eigenvalue	2.82	2.75	1.24	1.23
% explained variance	25.6%	25.0%	11.3%	11.2%

主成分負荷量が0.6以上の変数は5つで、溶存酸素飽和度とpH、濁度は正の値を、オニビシ生物量およびアンモニア態窒素は負の値を示した。

考 察

印旛沼においては、オニビシの被度が100%を超える7月から9月の間(オニビシ繁茂期)は、オニビシ帯と開放水面との間で水質に差があり、オニビシ帯では溶存酸素飽和度と濁度が有意に低かった(Table 1, Fig. 4)。オニビシが繁茂している時期の溶存酸素飽和度の低下は、特に底層において顕著であり、時として0%になることもあった(Fig. 4)。主成分分析の結果から、表層と底層ともに第1-第2主成分平面状でオニビシの生物量と溶

存酸素飽和度のベクトルが逆向きとなったことから、オニビシの生物量が高い程、溶存酸素飽和度が低下するという関係性の強さが示唆される (Fig. 6)。オニビシの浮葉は水面に広がるが、それにより光が遮られ、水中での植物プランクトンなどの光合成量が低下したためと考えられる。また、オニビシや植物プランクトン及び動物などの呼吸による酸素消費が水中における植物全般による光合成量を上回ったことが推察できる。実際、溶存酸素飽和度の連続測定の結果から、溶存酸素飽和度は特に夜間に減少している (Fig. 3)。さらに、オニビシの繁茂に伴い水の流動が減少し、開放水面からの酸素流入が減少したため、一旦低下した酸素濃度は回復しにくかった可能性もある。今回、オニビシ帯の中央付近で調査を行ったが、7月末に行われたオニビシの刈り取り時に酸素濃度が一旦上昇したのは、調査地点においても水が流入したためと推察される (Fig. 3)。8月にはローガーをオニビシ帯の中へ移動したことにより開放水面とオニビシ帯の間で酸素濃度の差が再び顕著になった。ただし、オニビシ帯においても昼間は酸素濃度が上昇する傾向にあった。刈り取りによりオニビシの幅と密度が減少したことで、光がオニビシ帯の中にも差し込み植物プランクトンやオニビシの光合成によって酸素濃度が上昇した可能性がある。夏期の溶存酸素濃度の著しい減少は、オニビシが広域に繁茂しているハドソン川においても確認されている (Caraco and Cole, 2002 ; Goodwin et al., 2008)。諏訪湖も同様に、沈水植物帯に比べて浮葉植物帯で、溶存酸素濃度の低下及び底層での貧酸素化が観察されている (宮原ら, 2007)。ヒシ属植物が過剰に繁茂し、浮葉が水面を完全に覆うと、遮光や水の流動の減少により溶存酸素の低下をもたらすと考えられる。

栄養塩濃度の差は、地点間の差よりもむしろ季節による差のほうが目立った。オニビシ帯と開放水面共に、オニビシ繁茂期 (7月から9月) は全リン濃度が高く、非繁茂期は亜硝酸態窒素及び硝酸態窒素濃度が高かった (Fig. 5, Table 1)。印旛沼では、このような栄養塩濃度の季節変動は毎年確認されており、河川からの流入量や湖内でのプランクトンによる消費や分解、回帰、底泥からの溶出など複数のプロセスによって決まると考えられている (天野, 2010)。主成分分析の結果、水温の主成分負荷量の値が大きく季節変化を示すと考えられる第1主成分において、全リンの負荷量は表層と底層ともに正の値を取り、硝酸+亜硝酸態窒素濃度は負の値を示したことから、水中の栄養塩濃度の変動に与えるオニビシの効果は、これら複数のプロセスの効果に比べ小さい可能

性がある。

ただし、オニビシが繁茂する8月や9月に、オニビシ帯でアンモニア態窒素濃度が高くなった (Fig. 5)。主成分分析の結果、オニビシ生物量の主成分負荷量の絶対値が大きく、オニビシ帯と開放水面の環境傾度を示していると考えられる第2主成分において、アンモニア態窒素濃度の主成分負荷量はオニビシ生物量と同様に正の値 (底層では負の値) を示した (Fig. 6)。オニビシ帯は繁茂期にアンモニア態窒素濃度が高くなる特徴があると考えられる。オニビシ群落が窒素濃度の上昇をもたらすことは、霞ヶ浦でも確認されている (土谷, 1983)。オニビシ体中の栄養塩が分解され水中に放出された可能性がある。また酸素濃度の低下に伴い底泥からアンモニア態窒素が溶出したことも考えられる。回帰または溶出する栄養塩には窒素だけでなくリンもある。リン酸態リン濃度は9月の西沼のオニビシ帯表層を除き、常に低かった。リンが植物プランクトンの成長を制限する印旛沼では (Kagami et al., 2013)、リンよりも窒素のほうが多く残存し、顕著に結果に現れた可能性がある。

濁度は、オニビシが繁茂する時期に、開放水面に比べてオニビシ帯で低かった (Fig. 4, Table 1)。その差は表層に比べて底層においてより顕著であった。濁度とクロロフィル *a* 濃度とは関連性が強かったが (Fig. 6)、クロロフィル *a* 濃度は繁茂期にオニビシ帯で有意に低くなる事はなかったため、オニビシ帯における濁度の低下は植物プランクトンの量だけでは説明できないと考えられる。実際、主成分分析の結果から、濁度の主成分負荷量は表層では季節変化を示すと考えられる第1主成分で値が大きかったのに対し、底層ではオニビシの繁茂を示していると考えられる第2主成分で大きな値をとった (Fig. 6)。これらのことから、オニビシ帯での繁茂期における濁度の低下は底層における底質の巻き上げ抑制が効いていると考えられ、それはオニビシの繁茂がもたらす消波効果や底泥の安定化によるものと考えられる (天野・時岡, 2006; Huang et al., 2007)。同様に、pHは底層において開放水面よりもオニビシ帯で低く (Table 1, Fig. 4)、濁度とクロロフィル *a* 濃度と関連が見られた (Fig. 6)。植物プランクトンなどの光合成の抑制および有機物の分解により、pHが低下したのと考えられる。

印旛沼では、オニビシの繁茂は漁船運航の妨げになるため、1987年から刈り取り船を用いた刈り取りが行われるようになった (小林ら, 1995)。刈り取りはオニビシが減少した1995年に中止されたが、2010年から再開されている。広範囲にわたる刈り取りにより、アオ

コが発生が促される可能性が指摘されている（小林ら，1995）。本研究においては，オニビシ帯では濁度は有意に低かったが，クロロフィル a 濃度はオニビシ帯で必ずしも有意に低くなるわけではなかった。オニビシの繁茂とアオコ発生に関連性については，湖全体の広域スケールで検討する必要があると考えられる。オニビシが繁茂する事による低酸素化とともに，植物プランクトンの成長抑制効果，オニビシの栄養塩吸収量や枯死時の放出量，オニビシの規模による効果の違いも考慮にいれ，刈り取りの範囲や時期を工夫する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり千葉県ならびに印旛沼漁業協同組合にご協力をいただいた。東京大学の瀧本岳准教授，吉田丈人准教授には研究への有益なご助言を頂いた。本研究は河川整備基金およびJSPS科研費（基盤研究(B)25281052）の助成を受け行われた。

文 献

天野邦彦(2010)：湖沼への流入時期で分画した栄養塩類の動態解析モデルの開発と試算．水工学論文集，54: 1459-1464.

天野邦彦・時岡利和(2006)：印旛沼における底泥巻き上げ，湖底の光環境と水生植物との相互関係．水工学論文集，50: 1321-1326.

Barko, J. W. and W. F. James (1998): Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation, and resuspension. In *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*, E. Jeppesen, M. Søndergaard, M. Søndergaard and K. Christoffersen (eds): 197-214. Springer, New York.

Blindow, I., G. Andersson, A. Hargeby and S. Johansson (1993): Long-term pattern of alternative stable states in two shallow eutrophic lakes. *Freshwater Biology*, 30: 159-167.

Caraco, N. and J. Cole (2002): Contrasting impacts of native and alien macrophyte on dissolved oxygen in a large river. *Ecological Application*, 12: 1496-1509.

Caraco, N., J. Cole, S. Findlay and C. Wigand (2006): Vascular plants as engineers of oxygen in aquatic systems. *BioScience*, 56: 219-225.

Chandra, S., S. K. Rawat, S. K. Garg and R. P. Singh (2013): Responses of *Trapa natans* against the soaring concentrations

of nitrate and phosphate in a tropical river Gomti in Lucknow city, India. *Journal of Recent Advances in Applied Sciences*, 28: 78-81.

Goodwin, K., N. Caraco and J. Cole (2008): Temporal dynamics of oxygen in a floating-leaved macrophyte bed. *Freshwater Biology*, 53: 1632-1641.

Huang, P., B. Han and Z. Liu (2007): Floating-leaved macrophyte (*Trapa quadrispinosa* Roxb) beds have significant effects on sediment resuspension in Lake Taihu, China. In *Eutrophication of Shallow Lakes with Special Reference to Lake Taihu, China*, B. Qin, Z. Liu and K. Havens (eds.): 189-193. Springer, Netherlands.

Hummel, M. and S. Findlay (2006): Effects of water chestnut (*Trapa natans*) beds on water chemistry in the tidal freshwater Hudson River. *Hydrobiologia*, 559: 169-181.

印旛沼環境基金(2012)：いんば沼のはなし．財団法人印旛沼環境基金，千葉県．

岩熊敏夫・土谷岳令(1986)：生育期のヒシによる湖水からの栄養塩除去の実験的研究．国立公害研究所研究報告，96: 101-125.

角野康郎(1996)：日本水草図鑑．文一総合出版，東京．

角野康郎(2007)：達古武沼における過去30年間の水生植物相の変遷．陸水学会誌，68: 105-108.

Kagami, M., Y. Hirose, Y. and H. Ogura (2013): Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in eutrophic Lake Inba, Japan. *Limnology*, 14: 51-58.

小林節子・木内浩一・平間幸雄(1995)：印旛沼のオニビシ刈り取りによる水質影響調査．千葉県水質保全研究所年報：135-140.

宮原裕一・犬塚良平・池中良徳(2007)：諏訪湖水草帯における水質の不均一性．信州大学環境科学年報，29: 24-28.

虫明功臣・白鳥孝治・本橋敬之助(2010)：印旛沼流域情報マップー治水・利水編一．印旛地域整備センター成田整備事務所．

日本分析化学会北海道支部(2005)：水の分析（第5版）．化学同人，京都．

Nishihiro, J., Y. Kato, T. Yoshida and I. Washitani (2014): Heterogeneous distribution of a floating-leaved plant, *Trapa japonica*, in Lake Mikata, Japan, is determined by limitations on seed dispersal and harmful salinity levels. *Ecological Research*, 29: 981-989.

Pierobon, E., R. Bolpagni, M. Bartoli and P. Viaroli, (2010): Net primary production and seasonal CO₂ and CH₄ fluxes in

- a *Trapa natans* L. meadow. Journal of Limnology, 69: 225-234.
- R Development Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 西條八束・三田村緒佐武 (2009): 新編 湖沼調査法. 講談社, 東京.
- Sand-Jensen, K., T. Riis, O. Vestergaard and S. E. Larsen (2000): Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years. Journal of Ecology, 88, 1030-1040.
- Scheffer, M. (1998): Ecology of Shallow Lakes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 高村典子・中川恵・若菜勇・五十嵐聖貴・辻ねむ (2007): 達古武沼の水質特性および水質分布に影響する要因について. 陸水学雑誌, 68: 81-95.
- 豊田政史・加藤宏章・今井晶子・宮原裕一 (2011): 諏訪湖におけるヒシの試験刈り取りが水塊構造に及ぼす影響. 土木学会論文集B (水工学), 67: I 1465-I 1470.
- 土谷岳令 (1983): 霞ヶ浦・高浜入の物質収支におけるヒシ群落の役割. 水草研究会会報, 13: 6-8.
- Tsuchiya, T. and T. Iwakuma (1993): Growth and leaf life-span of a floating-leaved plant, *Trapa natans* L., as influenced by nitrogen flux. Aquatic botany, 46, 317-324.
- Tsuchiya, T., S. Nohara and H. Iwaki (1987): Annual and seasonal variations in biomass of floating-leaved plant, *Trapa natans* L., in Takahamairi Bay of Lake Kasumigaura, Japan. Japanese Journal of Limnology, 48, S39-S44.
- 渡辺正弘・小山孝昭・佐々木久雄 (2010): 伊豆沼のヒシの栄養塩吸収・溶脱特性を利用した栄養塩濃度制御方法の提案. 水環境学会誌, 33: 57-61.