

オホーツク沿岸海跡湖能取湖における 一次生産特性

—サイズ別クロロフィル *a* と溶存態無機窒素の動態—

西野康人*・佐藤智希**・塩本明弘*・谷口 旭***

(平成 25 年 4 月 11 日受付/平成 25 年 12 月 6 日受理)

要約：オホーツク海と湖口部でつながり、潮汐変動により湖水交換が行われる能取湖にて 2007-2009 年、一次生産の特性を把握することを目的に調査研究を実施し、サイズ別クロロフィル *a* と溶存態無機窒素に着目し検討した。本研究の結果、能取湖のクロロフィル *a* は、基本的には 10 μm 以上の大型の画分により構成され、特に春季の底層で高い値を示した。しかし、春季に高濃度のクロロフィル *a* が観測された後 (5, 6 月) や冬季には小型の画分のクロロフィル *a* 濃度が高くなる現象もみられた。溶存態無機窒素は、調査期間中、アンモニア態窒素が優占し、特に成層期の底層で高濃度に分布していた。このことは、能取湖はアンモニア態窒素が硝酸態窒素へと酸化される前に植物プランクトンが利用する環境にあることが推察された。一方、冬季には外海水の影響と推察される硝酸態窒素が優占する現象も確認された。これらの変動は、湖口でつながるオホーツク海から流入する外海水の勢力による変動、気象の変化にともなう表面加熱・表面冷却による水柱の成層と対流による変動、そして半閉鎖的環境による集積効果、これらが複雑に組み合わせられることによりもたらされていることが示唆された。

キーワード：能取湖, オホーツク海, サイズ別クロロフィル *a*, アンモニア態窒素

緒 言

能取湖は北海道東部に位置するオホーツク海に面した周囲 35 km, 面積 58.4 km² の海跡湖である。1974 年に永久湖口化され、オホーツク海と幅 324 m, 深度 13 m の湖口で通水し、湖水は潮汐変動により外海との海水交換が行われている。また、大きな流入河川がなく陸水の影響が比較的小ないため、湖水の塩分は 33 psu 前後とオホーツク海と同程度である¹⁾。そのため、能取湖はオホーツク海からの外海水の影響が強くみられ、また半閉鎖的環境でもあることから、ホタテガイの浮游幼生を集積する効果もあり、ホタテガイの種苗生産基地としても知られる²⁾。

オホーツク海沿岸域は、サケやホタテガイ等を中心に漁業資源に恵まれた地域である。これら豊富な資源生物は、オホーツク海の豊かな低次生態系を反映した結果といえる。オホーツク海と湖口でつながる能取湖も、同様に漁業資源に恵まれた地であり、その背景にはオホーツク海の低次生態系の影響が強くあらわれていることが考えられる。しかし、能取湖における低次生態系に関する調査・研究例はすくないのが現状である。この豊かな漁業資源の恵を将来にわたり持続的に享受するためには、能取湖における低次生態系の把握は必要不可欠である。

そこで、本研究では、オホーツク海沿岸に位置する能取湖における低次生態系の動態を明らかにすることを目的に、能取湖におけるクロロフィル *a* 濃度と溶存態無機窒素の動態に着目し一次生産の生産特性について考察した。

方 法

能取湖の湖央に位置する最深部 (水深約 20 m) を観測定点として、2007 年から 2009 年の 3 ヶ年にわたり、4 月から 12 月に、月 2 回の頻度で実施した (Fig. 1)。能取湖では、湖口から流入した外海水は、湖の東側を南下し最深部に進入する。その後、中層部へと上昇し、湖西岸を流れ、湖口に向かい流出する時計回りに流れることが知られている^{3,4)}。したがって、本研究における観測定点は外海水が流れ込む位置にあり、その影響が強くみられる場所と言える。調査は東京農業大学オホーツク臨海研究センター所有の調査艇“かいよう 2”ならびに西網走漁業協同組合所属の漁船により実施した。調査項目は層別採水 (0, 5, 10, 15, 18 m), CTD 観測および水中光量の測定である。採水した試水はサイズ別 (>10 μm , 10-2 μm , <2 μm) クロロフィル *a* 濃度の測定ならびに栄養塩濃度の測定に供した。

クロロフィル *a* 濃度は、サイズ分画後、ジメチルホルムアミドにてクロロフィル *a* 色素を抽出し、蛍光光度計 (10-

* 東京農業大学生物産学学部アクアバイオ学科

** 独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所

*** 三洋テクノマリン株式会社

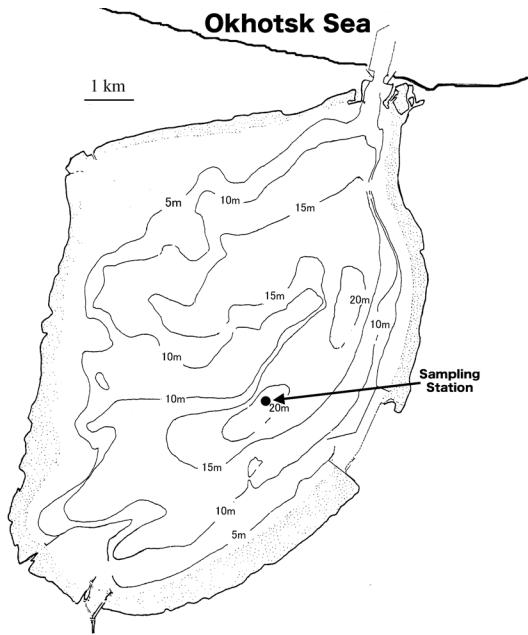


Fig. 1 能取湖の観測地点

AU, ターナーデザイン社製)を用いて, Welshmeyer 法により測定した。以降, $10\mu\text{m}$ 以上ならびに $10\mu\text{m}$ 以下のサイズ画分より抽出・測定されたクロロフィル a を, それぞれ $>10\text{-Chl}$, $<10\text{-Chl}$ とする。

栄養塩はオートアナライザー (swAAt, ビーエルテック社製) を用い分析を行ない, 5 項目 (硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, アンモニウム態窒素, リン酸態リン, ケイ酸態ケイ素) の濃度を算出した。

CTD 観測は小型水温塩分計 (compact CTD, JFE アレック社 (現 JFE アドバンテック) 製) により, 水温・塩分の鉛直プロファイル測定した。ただし, 2008 年 9 月 22 日は測器不調のため, 欠測となった。水中光量の測定は小型メモリー光量子計 (Compact LW JFE アドバンテック社製) を用い, 水中透過率の測定を行なった。

結 果

クロロフィル a 濃度の鉛直分布

サイズ別クロロフィル a 濃度の鉛直分布を Fig. 2 に示す。3 年間をとおして, 測定したサイズ別クロロフィル a 濃度の総和である総クロロフィル a 濃度は, $0.6\text{--}53.6\mu\text{g/L}$ の広範な範囲にあった。いずれの年も 4 月の最初の調査時, 底層でもっとも高い値を示した。特に 2007 年の 4 月 9 日は底層で $53.6\mu\text{g/L}$, 2008 年の 4 月 18 日は底層で $28.0\mu\text{g/L}$ ときわめて高い値を示した。

その後, 5 月, 6 月になると総クロロフィル a 濃度は急激に低下し, 6 月の表層ではいずれの年でも $2\mu\text{g/L}$ 以下であった (Fig. 2)。7 月では, 水深 $10\text{--}15\text{m}$ の中底層でクロロフィル a 極大が観測された。2007 年は 7 月 10 日の 15m では $15.8\mu\text{g/L}$ と非常に高い値を示した。一方, 8 月以降は年による違いがみられた。すなわち, 2007 年は 8 月 8 日の水深 15m でクロロフィル a 極大が観測されたものの, それ

以降は表層から底層まで数 $\mu\text{g/L}$ 程度と低い濃度を示し, 顕著なクロロフィル a 極大も見いだされなかった。2008 年では, 8 月 7 日には表層で低く ($0\text{m}:0.7\mu\text{g/L}$, $5\text{m}:0.8\mu\text{g/L}$), 中底層で高く ($15\text{m}:5.0\mu\text{g/L}$) なる傾向を示した。一方, 8 月 21 日には表層中層で高く ($0\text{m}:3.8\mu\text{g/L}$, $5\text{m}:4.0\mu\text{g/L}$, $10\text{m}:3.9\mu\text{g/L}$), 底層で低く ($18\text{m}:1.5\mu\text{g/L}$) なる傾向を示した。9 月 10 日には表層で低く ($0\text{m}:2.0\mu\text{g/L}$, $5\text{m}:2.0\mu\text{g/L}$), 底層で $5.7\mu\text{g/L}$ と高い値を示した。9 月 22 日以降は全層で同程度の総クロロフィル a 濃度を示し, クロロフィル a 極大は形成されなかった。このときの総クロロフィル a 濃度は, 9 月 22 日から 11 月 7 日までは $3.0\text{--}4.7\mu\text{g/L}$ であったが, 11 月 28 日には $6.0\text{--}7.3\mu\text{g/L}$, 12 月 12 日には $9.1\text{--}11.1\mu\text{g/L}$ と増加した。2009 年では, 8 月 6 日に水深 10m でクロロフィル a 極大 ($7.8\mu\text{g/L}$) を示した。8 月 26 日には顕著なクロロフィル a 極大は確認されなかったものの, $6.0\text{--}7.9\mu\text{g/L}$ と高い濃度であった。同様の傾向は 9 月 11 日でもみられた。9 月 30 日, 10 月 13 日には底層でクロロフィル a 極大 ($6.5\mu\text{g/L}$, $5.9\mu\text{g/L}$) が観測された。11 月 27 日, 12 月 15 日と冬季になると総クロロフィル a 濃度は全層で $2\mu\text{g/L}$ 以下と低い値となった。

調査期間 3 年間を通して総クロロフィル a 濃度の鉛直分布は 4 月に底層で極めて高いクロロフィル a 極大を示すことはいずれの年も確認されたが, それ以外の季節は年によりかなりの違いがあることが示された。

サイズ別クロロフィル a 濃度は, 3 年間の調査を通して $>10\text{-Chl}$ が優占することが多く (Fig. 2), 総クロロフィル a 濃度と $>10\text{-Chl}$ 濃度には有意に正の相関を示した (Fig. 3)。一方, $<10\text{-Chl}$ 濃度は, 値は大きくないが総クロロフィル a 濃度中に占める割合が 5 割以上を示した試料は約 20% であった。このうち, 2007 年 6 月 14 日に全層で $<10\text{-Chl}$ が優占し, 底層では $3.5\mu\text{g/L}$ の値を示した。2008 年 6 月の中底層でも $<10\text{-Chl}$ が優占し, 濃度は $1.5\text{--}2.2\mu\text{g/L}$ であった。また, 2007, 2009 年の 11, 12 月にも $<10\text{-Chl}$ は優占し, その濃度は $0.6\text{--}3.0\mu\text{g/L}$ であった。

水柱積算クロロフィル a 量

2007-2009 年の年ごとの水柱中のサイズ別積算クロロフィル a 量の変動を Fig. 4 に示す。いずれの年も 4 月にクロロフィル a 量が多くなる傾向にあったが, 5 月以降は年により季節変動の違いがみられた。すなわち 2007 年は, 6 月 14 日をのぞき, 5 月 11 日から 7 月 10 日の期間の積算クロロフィル a 量は $75\text{--}122\text{mg/m}^2$ の範囲にあった。その後, 季節とともに徐々に減少し, 冬季に低くなる春季一峰型の季節変動を示した。2008 年の積算クロロフィル a 量は春季に 100mg/m^2 以上の高い値を示し, 夏季から秋季には 50mg/m^2 前後の低い値, 冬季には 100mg/m^2 以上の高い値となる, 春・冬二峰型の季節変動を示した。2009 年では, 4 月 28 日以降 11 月 10 日まで, 50mg/m^2 を下回ることなく, 特に 8 月 28 日と 9 月 11 日にはそれぞれ 136 , 110mg/m^2 と高い値を示した。一方, 11 月 27 日と 12 月 15 日の積算クロロフィル a 量はそれぞれ 25 , 27mg/m^2 と低い値であった。2009 年の積算クロロフィル a 量は 4 月

Concentration of Chlorophyll a (µg/L)

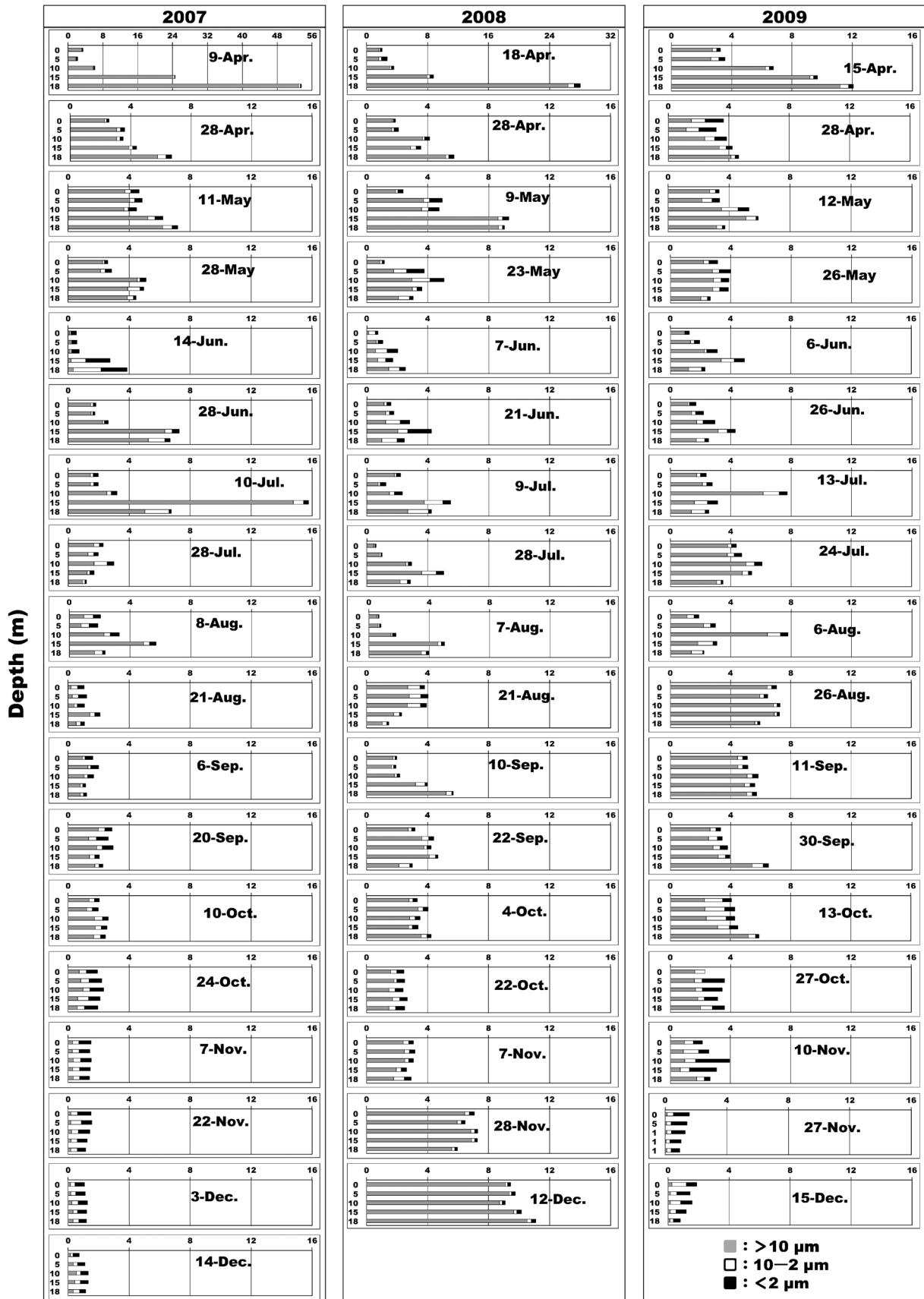


Fig. 2 2007-2009年におけるサイズ別クロロフィル a 濃度の鉛直分布の季節的変動

■ : >10 µm □ : 2-10 µm ■ : <2 µm *2007年4月9日と2008年4月18日は横軸スケールが異なる

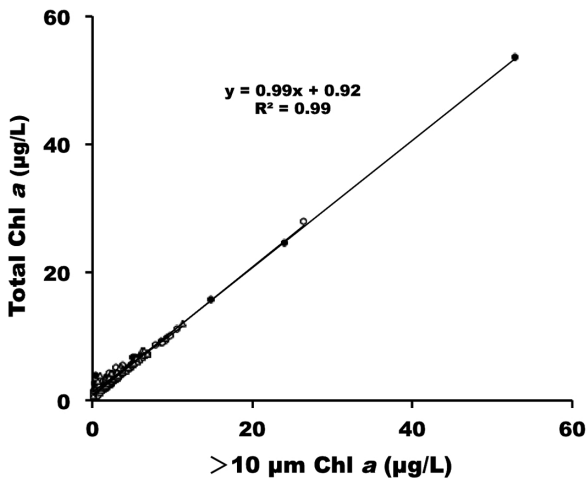


Fig. 3 総クロロフィル *a* 濃度と >10 µm クロロフィル *a* 濃度の相関図
● : 2007年 ○ : 2008年 △ : 2009年

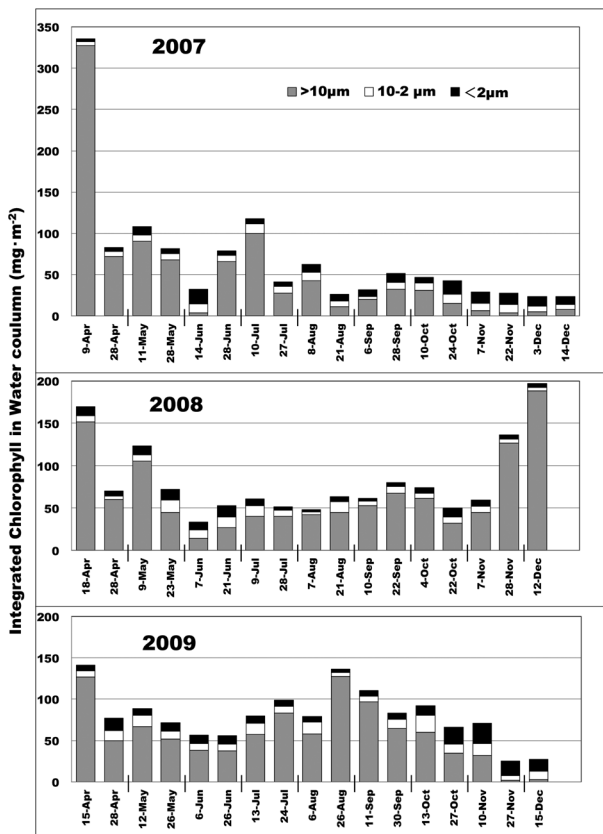


Fig. 4 サイズ別積算クロロフィル *a* 量の変動
■ : >10 µm □ : 10-2 µm ■ : <2 µm

から6月にかけての春季に減少傾向を示したが、7月13日から8月にかけて増加傾向を示し、9月11日以降冬季にかけて減少する春・秋二峰型の季節変動を示した。

溶存態無機窒素 (DIN)

溶存態無機窒素 DIN (硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素) の濃度分布の結果を Fig. 5 に示す。3年

間をとおして、DINのうち、多くの測点でアンモニア態窒素の占める割合がきわめて高かった。一方、硝酸態窒素は2007年4月9日の表層と12月、2009年11月27日、12月15日に優占したときと、2008年4月28日と5月9日の底層でそれぞれ1.7 µMと2.4 µMであった以外は、1 µM以下の低濃度であった。

DINの季節変動は、いずれの年も4月から5月にかけての春季には数 µM程度の低い値を示した。5月下旬から9月にかけては表層では数 µM程度の低濃度であったが、底層では多くの測点で10 µMを上回る高い値を示した。特に7月下旬から8月の盛夏にはいずれの年も底層で30 µM前後の極めて高い濃度のDINが観測された。夏季に観測された高濃度のDINは、いずれの年もアンモニア態窒素によるものであった。9月から11月の秋季には全層でDINは数 µM程度と低くなった(ただし、2008年は9月22日以降)。11月下旬から12月にかけての冬季は年による違いが顕著であった。すなわち、2007年と2009年では全層でDINの濃度が3.8-10.0 µMと高い値を示したのに対し、2008年では、0.7-3.7 µMと低い濃度であり、総クロロフィル *a* 濃度とは反対の傾向を示した。このときのDINの中身は、2007年と2009年では硝酸態窒素の占める割合が高く、2008年はアンモニア態窒素が優占していた。

水温・塩分

観測定点における水温は、4月には5°C以下(0.8-4.6°C)であったが、その後昇温し、表層の水温が10°Cに達したのは5月下旬から6月初旬にかけてであった(Fig. 6)。6月以降の表層水温はいずれの年も急激に上昇し、7月から9月にかけて20°C前後を示した。この夏季の昇温の経過には年による違いが見られた。すなわち、2007年には7月27日から9月6日にかけて継続的に20°C以上の表層水が存在し、最高水温は22°Cを超えた。また、9月6日には20°Cの層が15m付近まで拡大していた。これに対して2008年は表層水温が20°Cに達したのは8月7日と9月10日と断続的であり、その深さは5m以浅に限られていた。また、2009年は8月6日に表層2.5m以浅で一時的に20°Cに達したに過ぎなかった。

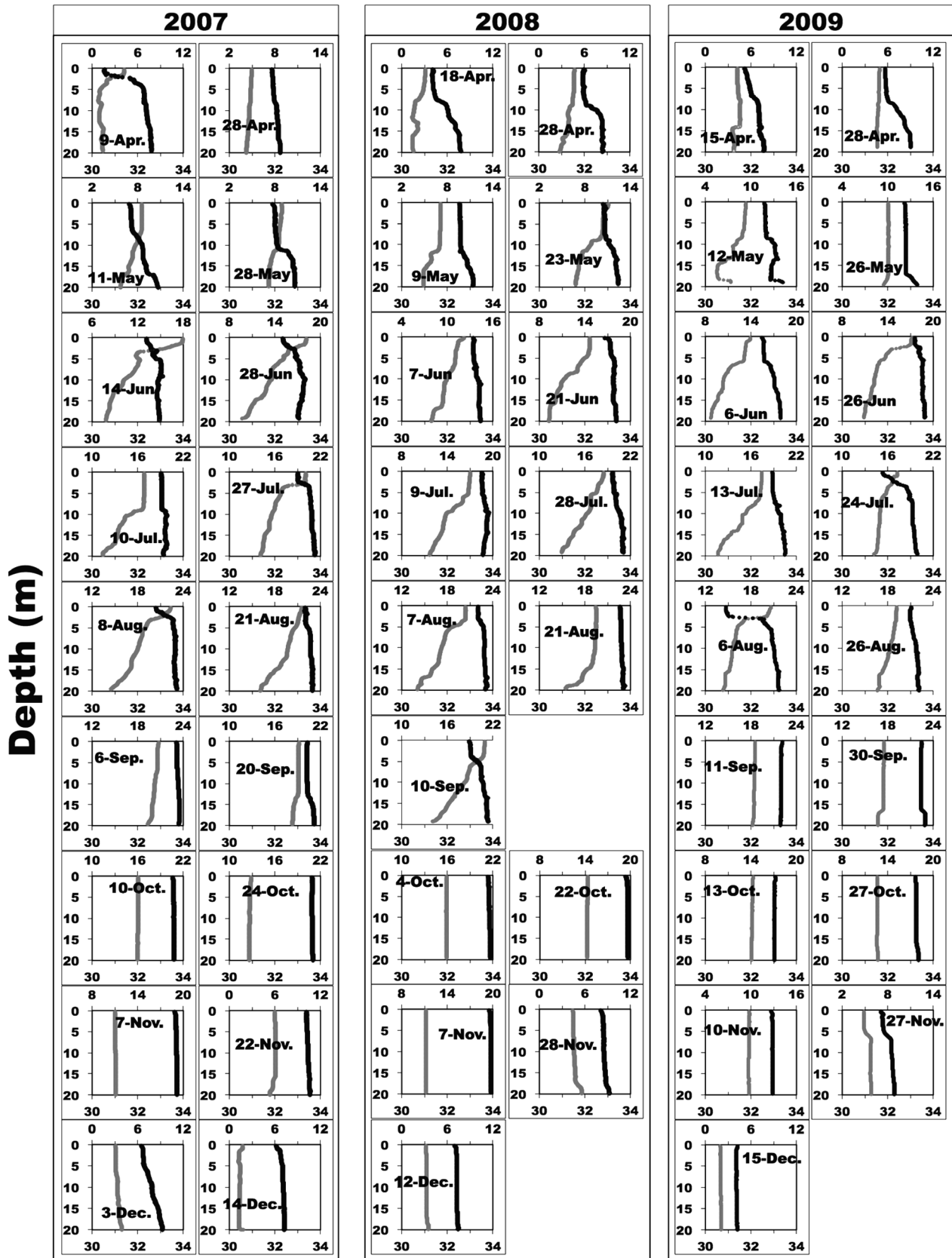
秋以降の冷却期には、9月から表層水温の下降が始まり、10月になると全層で低温化し、11月下旬から12月にかけて5°C以下まで降下した。

一方、塩分は各年とも4月に低く、時間とともに高くなった。この現象は表層で顕著にみられることから、海水の融解および周辺地域の融雪による影響があらわれたものと推察される。この時季の表層の塩分上昇は、2008年に早く2007年に遅く進行した。その結果、表層塩分が33psuに達したのは、2008年には6月7日であったのに対して、2007年には7月10日、2009年は6月26日であった。その後2007、2008年では9月末まで、水柱の大部分は宗谷暖流水塊の指標である33.6psu⁵⁾を超える高塩分水で占められるが、2009年にはその勢力は弱く、9月30日の底層で超えたのみであった。2009年には、水柱全体の塩分が低いだけでなく、秋から冬にかけて起こる低塩分水への置



Fig. 5 溶存態無機窒素 (■: 硝酸態窒素, □: 亜硝酸態窒素, ■: アンモニア態窒素) の鉛直分布の季節変動
 *6-8月の多くの調査日, 2008年9月9日, 2009年12月15日の横軸スケールは異なる

Temperature (°C)



Salinity (psu)

Fig. 6 CTD 測定による水温・塩分の鉛直分布の季節変動 ■：水温 ■：塩分

換の時期も明らかに早かった。

11月ないし12月以降は3ヶ年とも全層で塩分の低下がみられ、2007年12月14日は32.3psu前後、2008年12月12日は32.4psu前後、2009年12月15日は31.3psu前後と、東樺太海流を起源とするオホーツク海表層低塩分水（指標塩分32psu以下）⁶⁾の影響を受けていたことが推察される。

考 察

能取湖はオホーツク海とつながり、河川水の流入量がきわめて少ないため、湖水の性質は外海から流入する海水の影響を強く受ける。一方、閉鎖性が高いため、集積効果が働き、能取湖特有の水柱環境を構築する側面もある。そのため能取湖における水柱環境は、外海水と湖水の交換率が大きいときには外海水の影響が強くあらわれ、小さいときには、能取湖固有の影響が強くなると考えられる。前者は宗谷暖流、東樺太海流の勢力の強さにより湖内水柱環境の変動をもたらす、後者は温暖期の表面加熱と寒冷期の表面冷却による塩分と水温の変化およびそれらが原因になって起こる水柱の成層と対流が環境変動をもたらすと考えられる。いずれの変動も栄養塩濃度の変動をもたらす、そのことが日射量の変化と組み合わせると能取湖における一次生産の季節的および突発的な変化をひき起こすと推察される。

本研究の結果、4月から12月の非結氷期、能取湖におけるクロロフィル*a*濃度の動態は、4月に底層できわめて高くなることが確認された。これまで報告されている能取湖の水柱中のクロロフィル*a*濃度の季節変化でも4月に高い値が観測されており^{2,7,8)}、本研究の結果を支持するものといえる。ただし、これら研究報告は水柱全体の層別クロロフィル*a*濃度の平均値や積算値であり、クロロフィル*a*極大層での濃度は知見が乏しい。4月の底層でみられた高濃度のクロロフィル*a*の要因として、アイスアルジーの存在が考えられる。

能取湖は例年、1月から4月上旬にかけて結氷し、その海水中にはアイスアルジーが分布する⁹⁾。アイスアルジーは、海水が結氷する際に海水中に植物プランクトンが取り込まれ、海水中で生息している微細藻類である。海水中に生息しているため附着性の特質をもっている。また群体を形成していることも多い。そのため海水から水中に放出された際、沈降しやすい性質がある¹⁰⁾。能取湖の海水は、例年3月中旬あたりから融解がはじまり、3月下旬から4月上旬には崩壊がおこる。この海水の融解・崩壊に伴い放出されたアイスアルジーは底層に沈降することが推察される。

一方、底層で顕著なクロロフィル*a*極大が確認された2007年4月9日と2008年4月18日の透過率1%深度と海底での透過率は、前者は17mと0.15%、後者は16mと0.6%であった（Fig. 7）。弱光環境に順応した光合成を営むアイスアルジー¹¹⁾にとって好適な光環境であったといえる。

3月中下旬に水柱に放出されたアイスアルジーは、豊富な栄養塩と好適な光環境を受け、プランクトンとして振る舞い、その結果、4月の底層における高いクロロフィル*a*濃度としてあらわれたと推察される。

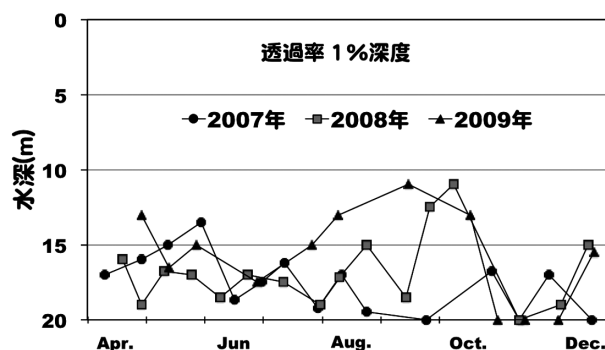


Fig 7 透過率1%深度の推移

4月に底層で高濃度を示したのは>10-Chlであり、ほぼ珪藻類によって占められていた。浅見ら⁸⁾も4月に能取湖で珪藻類が優占していたことを報告している。珪藻類は沿岸海洋における主要な一次生産者であり、大型の植食性動物プランクトンに摂食され、それを魚介類が捕食する。そのため珪藻類の生産物はすみやかに効率的に高次生産者に転送され、その結果、漁業生産を高めることとなる¹²⁾。アイスアルジーを起源とする珪藻類の増殖が能取湖の高い生物生産の一端を支えていることが推察された。

サイズ別クロロフィル*a*濃度は、5、6月に<10-Chlの占める割合が増加する傾向が見られた。一般に、10μm以上サイズの大型の植物プランクトンは高い栄養塩濃度に適応しているといわれ^{13,14)}、また栄養塩の供給は大型の植物プランクトンの増加をもたらすことが知られている¹⁵⁾。一方、10μm以下サイズの小型の植物プランクトンはバックグラウンド的存在といわれ、日本の沿岸域では、0.5μg/Lを超えることはないという報告がある^{16,17)}。本研究の結果では、調査した全深度別測点260点のうち、210点で<10-Chl濃度が0.5μg/Lを超えた。このうち85点で1μg/L以上のクロロフィル*a*濃度を示した。特に2007年6月14日には水深18mで3.5μg/Lと高い値を示した。観測定点はオホーツク海からの海水が流れ込む場所に位置する。上記結果は、オホーツク海沿岸では、他の海域にくらべ10μm以下サイズの小型の植物プランクトンの占める割合が多いことが可能性のひとつとして推察される。

一般に一次生産者は、沿岸域では、10μm以上サイズの比較的大型の植物プランクトンが優占し、外洋域では10μm以下サイズの微細な植物プランクトンが起点となる¹⁸⁾。本研究の結果、能取湖では>10-Chl濃度が優占する沿岸域の特徴が基本的な姿であるものの、<10-Chl濃度が低いわけではないことが示された。一般に10μm以下サイズの微細な植物プランクトンは、貧栄養塩環境にあることの多い外洋域で優占する¹⁸⁾。本研究で<10-Chl濃度が3.5μg/Lともっとも高い値を示した2007年6月14日の底層におけるDINの濃度は4.3μM（アンモニア態窒素：4.1μM）、リン酸態リンや珪酸態ケイ素はそれぞれ0.7μM、56.7μM¹⁹⁾と貧栄養環境とは言えない。また<10-Chl濃度が2.1μg/Lであった2008年6月21日の栄養塩環境も同様の傾向であった。このことより6月にみられた<10-Chl濃度の優占

は、外洋域でみられるような貧栄養環境に起因するものではないと考えられる。

上記、現象がみられた5月下旬から6月はカイアシ類をはじめとする動物プランクトンの現存量が多いことが報告されており²⁰⁾、またホタテガイ浮游幼生をはじめとする一時性動物プランクトンの出現が多い時でもある²¹⁾。これら動物プランクトンは一般に珪藻類等の大型の植物プランクトンを摂餌することが知られており、今後、これら動物プランクトンによる摂餌や微小動物プランクトンの影響などを検討する必要がある。

2007年と2009年の11、12月にも<10-Chlが優占していた。このときのDINは硝酸態窒素の濃度が顕著に増加しており、栄養塩の豊富な寒流起源の海水の流入が考えられる。水温・塩分のデータから、低塩分高密度のオホーツク海表層低塩分水の影響があらわれたと推察される。一方、2008年の同時期はDINの濃度は数 μM 程度と低濃度であったが、>10-Chlが優占しており、12月12日には全層で10 $\mu\text{g/L}$ 前後の高い値を示した。このときのDINは全層で2 μM 以下であり、アンモニア態窒素が優占していた。冬季のアンモニア態窒素の濃度は2007、2008年は2 μM 以下、2009年も2-5 μM と年による濃度変化は小さく、硝酸態窒素の濃度がDIN濃度を変動させていたといえる。また、硝酸態窒素が優占しているときは、>10-Chlが少なくなる傾向がみられた。

本研究で能取湖におけるDINはアンモニア態窒素の濃度がきわめて高いことが示された。一般に、好氣的な海洋環境では、アンモニアは酸化され、亜硝酸を経て、硝酸となる。そのため、通常、海洋におけるDINは硝酸態窒素の濃度が高い値を示す。一方、海洋の植物である植物プランクトンや海藻・海草類が光合成を行ない、有機物を合成する際の窒素同化に直接使われるのはアンモニア態窒素である。硝酸態窒素は植物の体内で還元され、アンモニア態窒素に変換される必要がある。

本研究でのDINの動態は、一次生産者である植物プランクトンにとって利用しやすい栄養塩環境にあることが推察される。また2007、2008年の成層期(6、7、8月)の透過率1%深度は、海底付近まで届いており(Fig. 7)、底層でも光合成が行われていたことが推察できる。

3年間にわたる調査の結果、能取湖の高い生産性は10 μm 以上サイズの植物プランクトンにより支えられていることが示唆された。これら大型の植物プランクトンの背景には溶存態窒素としてアンモニア態窒素の存在が影響している可能性が示された。特に5月以降の成層期、底層にアンモニア態窒素の高濃度層が持続的に存在していた。これは、近底層の溶存酸素濃度が低下するにつれて、海底で分解した有機物を起源とするアンモニア態窒素が亜硝酸態窒素や硝酸態窒素に酸化されずに蓄積していることを示唆している。例年、能取湖では5月下旬からの成層期には底層で貧酸素水塊が形成されることが知られている^{22,23)}。成層期に再生されたアンモニア態窒素は秋季の対流開始とともに全層に拡散し、植物プランクトンに消費されたか、酸化されたものと考えなければならない。この時期、亜硝酸態

窒素や硝酸態窒素の増加はみられていないこと、アンモニア態窒素が優占していたことから、酸化されたとは考えにくい。2009年の成層期に底層に存在したアンモニア態窒素のパッチの解消後(2009年8月26日)に、表層中層でクロロフィル*a*濃度の増加がみられており、対流期に全層に拡散したアンモニア態窒素は植物プランクトンに利用されたと考えられる。ただし、調査間隔は約2週間あり、対流が起こった時期や潮汐の影響等により、年によるクロロフィル*a*濃度の増加傾向に違いがみられたと思われる。アンモニア態窒素の動態は、半閉鎖的環境にある能取湖独特のものであることが推察された。特に成層期の底層における高濃度のアンモニア態窒素は、表層から沈降した有機物が底層で分解され、貧酸素水塊が形成され、そのため酸化されることなく底層に滞留したか、または消費・拡散を上回る速度で海底から再生されたものと推察される。成層期に形成される底層の貧酸素水塊が、能取湖における栄養塩供給システムの一部を担っているといえる。

本研究の結果より、能取湖内の水柱環境は湖口でつながるオホーツク海から流入する外海水(宗谷暖流、東樺太海流)の勢力による変動、気象の変化にともなう表面加熱・表面冷却による水柱の成層と対流による変動、そして半閉鎖的環境による集積効果、これらが複合的に組み合わせられ構築されていることが示された。これらの複雑な変動にともない栄養塩環境の変化、さらにはサイズ別クロロフィル*a*濃度の変化の季節的・鉛直的変動をもたらしめていることが推察された。今後、これらの相互関係を明らかにするには、宗谷暖流や東樺太海流といった外海水のデータならびに継続的なデータの蓄積が必要となる。

引用文献

- 1) 今田和史, 坂崎繁樹, 川尻敏文, 小林耕一, (1995) 網走市4湖沼(網走湖, 能取湖, 濤沸湖, 藻琴湖)の湖盆形態と塩分環境. 北海道水産孵化場研報, 49: 37-48.
- 2) 蔵田 護, 西浜雄二, (1987) 能取湖における海洋条件の季節変化. 北水試研報, 29: 17-24.
- 3) 山本 潤, 酒向章哲, 渡辺光弘, 牧田佳巳, 田中 仁, (2009) 能取湖における密度成層崩壊時の貧酸素水塊の挙動に関する現地観測. 土木学会論文集B2, 65: 966-970.
- 4) 瀬戸雅文, 井上佑奈, 多田匡秀, 品田晃良, 渡部貴聰, 川尻敏文, 巻口範人, (2010) 能取湖における外海水の混合過程に依存した貧酸素水塊の上昇機構. 海洋開発論文集, 26: 651-656.
- 5) 青田昌秋, 1975: 宗谷暖流の研究, 低温科学, 33: 151-172.
- 6) 藤井 浄, 佐藤芳和(1989) 日本海, オホーツク海沿岸の海洋構造と生産力. 水産海洋研究, 53, 1: 57-62.
- 7) 西浜雄二, 蔵田 護, 多田匡秀, (1989) サロマ湖・能取湖・網走沖におけるクロロフィル量の季節変化. 水産海洋研究, 53, 1: 52-54.
- 8) 浅見大樹, 今田和史, 安富亮平, 伊沢敏徳, (1995) 北海道能取湖における植物プランクトンと栄養塩の周年サイクル. 北海道水産孵化場研報, 49: 17-23.
- 9) ASAMI, H. and IMADA, K., (2001) Ice algae and phytoplankton in the late ice-covered season in Notoro KO lagoon, Hokkaido. *Polar Biosci.* 14: 24-32.
- 10) 田口 哲, (1993) アイスアルジーの生産と沈降. 沿岸海

- 洋研究. **31**, 1 : 3-16.
- 11) 工藤 栄, 菓子野康浩, (2002) 海水藻類の生理生態—サロマ湖での光合成に関する研究例を中心に—. 海水生態系, 月刊海洋, **30** : 130-139.
 - 12) 谷口 旭, (1991) 海洋プランクトンの主要分類群. 海洋と生物, **74**, 13, 3 : 162-167.
 - 13) PARSONS, T., R., TAKAHASHI M., (1973) Environmental control of phytoplankton cell size. *Limnol. Oceanogr.* **18** : 511-515.
 - 14) MALONE, T. C., (1980) Algal size. *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, (ed. by Morris, I.), Oxford, Blackwell : 433-464.
 - 15) SHIOMOTO, A. HASHIMOTO, S., (2001) Size-fractionated chlorophyll *a* and primary productivity in the off-shore Oyashio waters in July 1992. *La mer*, **39** : 9-18.
 - 16) YAMAMOTO, T. TANIGUCHI, A., (1993) Spring and summer phytoplankton chlorophyll *a* size fractions (>10 μm and <10 μm) in the offshore waters around Japan, *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, **32** : 1-6.
 - 17) CHISHOLM, S. W., (1992) Phytoplankton size, In *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*, Plenum Press, New York and London : 213-237.
 - 18) LALLI, C. M. T. R. PARSONS, (1997) Food chains and energy transfer. *Biological Oceanography An Introduction Elsevier* : 112-117.
 - 19) 西野康人, 朝隈康司, 千葉 晋, 佐藤智希, 塩本明弘, 谷口 旭, (2007) オホーツク海沿岸能取湖における現場環境と一次生産特性. *CROSSROADS* **19** : 10-11.
 - 20) 菅野泰次, 福田研二, (1993) 能取湖における餌生物環境と湖に棲息するニシンの食性について. *北大水産集報*. **44** (4) : 158-170.
 - 21) 丸 邦義, (1985) ホタテガイの種苗生産に関する生態学的研究. *北水試研報*, **27** : 1-53.
 - 22) 品田晃良, 西野康人, 佐藤智希, 菊地隆太, 工藤亮太, 瀬戸鈴代, 松井大宇, (2011) 能取湖の低次生産と貧酸素化. *沿岸海洋研究*. **49**, 1 : 31-35.
 - 23) 品田晃良, 多田匡秀, 西野康人, 川尻敏文, (2010) 能取湖における貧酸素水塊の分布特性. *北水試研報*. **78** : 69-71.

Lower Trophic Levels of Coastal Marine Ecosystem in Lagoon Notoroko on the Coastal Okhotsk Sea

—Seasonal Changes of Size Fractionated Chlorophyll *a*
and Dissolved Inorganic Nitrogen—

By

Yasuto NISHINO*, Tomoki SATOH**, Akihiro SHIOMOTO* and Akira TANIGUCHI***

(Received April 11, 2013/Accepted December 6, 2013)

Summary : Lagoon Notoroko is connected to the Okhotsk Sea by an artificial channel so the water mass of this lagoon has been exchanged by tidal movement and little river water flows into this lagoon. Therefore, the lagoon is assumed to be a saltwater lagoon and seasonal change of environmental conditions in the lagoon have been affected by the coastal waters of the Okhotsk Sea. Size-fractionated chlorophyll *a* and dissolved inorganic Nitrogen were measured in this lagoon from 2007 through 2009. The chlorophyll *a* was basically comprised by large-sized phytoplankton (more than 10 μm). However, the small-sized phytoplankton (<2 and 2-10 μm fraction) might be found at high concentrations after spring bloom and/or in the winter season so the influence of open-sea water might be strongly seen. It was notable that ammonium nitrogen concentration existed most in dissolved inorganic nitrogen (DIN). Especially, concentrated ammonium has been distributed in the bottom water. Ammonium was an easily assimilable nutrients for phytoplankton which was the primary producer in the marine ecosystem. It was suggested that these changes of concentrations of size-fractionated chlorophyll *a* and DIN were constructed by the variation of the inflow of water mass from Okhotsk Sea, the change of the stratification and convection of the water column with the change of the temperature and the cumulus effect of semi-enclosed environment.

Key words : lagoon Notoro-ko, Okhotsk Sea, size fractionated chlorophyll *a*, ammonium nitrogen

* Department of Aquatic Bioscience, Faculty of Bio-Industry, Tokyo University of Agriculture

** Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency

*** Sanyo Techno Marine, Inc.