

## 7. 解析モニタリング1

# 琵琶湖の低酸素化の実態把握および北湖生態系に与える影響の把握に関する解析モニタリング

## -琵琶湖の低酸素化の実態およびその生態系に与える影響-

焦 春萌・青木眞一・奥村陽子・南 真紀・矢田 稔<sup>1)</sup>・石川可奈子・中島拓男・石川俊之<sup>2)</sup>・辻村茂男<sup>3)</sup>

### 要約

琵琶湖北湖の今津沖中央定点（水深約90m）における2008、2009、2010年度の水深別水質調査結果について、溶存酸素濃度の変動とそれに関わる要因を中心に検討した。また、第1湖盆の水深90m以深の低酸素水塊の水温・溶存酸素濃度の変化の特徴を理解するために、自動連続観測機器を用いて、溶存酸素濃度の低下した水塊を観測し、その動態を解析した。その結果2008年度は11月17日に湖底直上1mの溶存酸素濃度としては過去32年間の最低値となる0.5 mg/Lを記録した。2008年度、2009年度、2010年度ともに、冬の鉛直混合による湖底の溶存酸素濃度の回復を確認した。水深90mの溶存酸素濃度の平面分布には濃度差があり、均一には低下や回復をしていないことが分かった。2008年度から2010年度まで深層部での溶存酸素濃度が低くなると、マンガン濃度は高くなる傾向があった。湖底直上1mの全りんは2009年度まで5年間上昇傾向であるが、表層の濃度に影響を与えるにはいたっておらず、湖底直上1mの珪酸は、1979年度から2009年度まで上昇傾向で、表層濃度にまで影響していて、2010年度の湖底直上1mの全りんと珪酸は、ともに低下したことを確認した。

一方、夏の琵琶湖深底部における低酸素水塊の溶存酸素濃度は区間分布が不均一で時間的にも変化していて、その動態は物理変数（水温、流れ）に依存することが分かった。第一湖盆の湖底直上1mにある観測地点（N3、N4、N5）における水温と溶存酸素濃度の短期変動は正の相関で、低酸素水塊の北端N3の水温、溶存酸素の短期変動値と低酸素水塊の南端のN5の水温、溶存酸素の短期変動値は顕著な負の相関であることが明らかになった。

また、深水層の低酸素化が生物群集に与える影響を明らかにするため、低酸素化の指標生物になる可能性が指摘されてきた好気性の硫黄酸化細菌チオプロローカの動態を調査した。2007年4月～2008年2月に早崎沖90地点において月1回の頻度で底泥コアを採取し、同様の方法で計数を行い、10年前の1997年～2000年と比較したところ、湖底表面0-2cm、2-5cmで低くなっていた。2009年6月および11月に琵琶湖の17地点において同種の現存量を調べたところ、酸素濃度が低くなりやすい地点では、他の地点よりも少なくなる傾向がみられた。琵琶湖の水深90m湖盆の一部においては、すでに好気性細菌チオプロローカにとっても生息しにくい環境になっていることが推察された。

また、琵琶湖深底部に生息する3種の無脊椎動物（ビワオオウズムシ、アナンデルヨコエビ、スジエビ）について、Pc値による貧酸素耐性の評価を行うことができた。このことは、貧酸素耐性が最も強いのがビワオオウズムシ、次に強いのがアナンデルヨコエビ、最も弱いのがスジエビという結果が示された。

### 1. はじめに

世界中で地球温暖化が進行しており、集中豪雨や熱波などの異常気象の頻度が高くなっている。これらの気象変動は、気温、湿度、降水、風向・風速、雲量といった湖の物理境界条件の変化により、湖の物理構造（水温、混合パターン・時期、成層強度）を変化させ、湖の水質、生態系への影響を及ぼす（IPCC, 2007）。地球温暖化によって、完全循環湖が不完全循環湖へ移行する湖がある。例えば、ドイツのコンスタンス湖は、年一回循環湖であるが、気温の長期上昇に伴い、冬期湖水全循環が不完全になった年が現れたことが観測で分かった（Straile

*et. al.*, 2003）。池田湖ではすでに1970年代後半以降、冬季循環が弱まり、すでに不完全循環湖へ移行している（平江, 2000）。

世界の深水湖（フランスのレマン湖、アメリカのエリー湖など）では、深湖底の低酸素化問題が深刻になっている。この低酸素化に伴い、湖底から栄養塩や化学物質が溶出し、湖底生物の生息域は縮小している。池田湖では、1970年代後半以降数年にわたり冬季全循環が起らず、深水層が半恒久的に無酸素化している（平江, 2000）。

1) 滋賀県湖東環境・総合事務所、2) 滋賀大学教育学部、3) 京都学園大学バイオ環境学部

日本最大の湖である琵琶湖において、1960～1970代ごろ、この低酸素化問題は富栄養化が進んだことによる現象であった。富栄養化対策の進行により低酸素化は一旦抑えられたが、近年、地球温暖化による全循環欠損、成層強化などにより、低酸素問題が再び進行している。この深底部での低酸素化現象が顕著になってきたのは1960年代頃であり、その要因は富栄養化に伴う表水層での有機物生産の増大とその深層への沈降であることが古くから指摘されてきた(中、1973)。1979年に開始した琵琶湖水深別調査(当センター環境監視部門(旧衛生環境センター環境部門))での今津沖中央定点17Bでは1987年と2002年に湖底直上1mで0.9mg/Lの値を記録するなど、深底部における全循環期前の溶存酸素濃度の低下が毎年観測されてきた。そのような中、1991年には硫黄酸化細菌のチオプロローカの出現が確認された(Nishino *et al.*, 1998)。チオプロローカは湖底泥の嫌気化が進むと溶出する硫化物を酸化してエネルギーを得る細菌であることから、琵琶湖の深底部において低酸素化が進行してきたことが指摘された。また、2002年11月には微生物由来のマンガン酸化物の構造体メタロゲニウムが第一湖盆の深層部に広範囲に多量に出現した(一瀬ら、2006)。メタロゲニウムの出現もまた、湖底泥の嫌気化を示している。さらに2006年度には記録的な暖冬による冬季鉛直混合の異常がみられた。例年であれば1～2月に観察される全循環が起こらず、3月下旬になって深底部の溶存酸素濃度がかろうじて回復する事象が生じた。2007年秋季には第一湖盆内の深底部で溶存酸素濃度の極めて低い水塊が確認され、12月には当センターが保有する自律型潜水ロボット「淡探」による撮影で第一湖盆湖底の広範囲においてイサザやエビ類が死亡している様子が観察され(熊谷、2008)、生物への低酸素化の直接的な影響も明らかとなってきた。

このような背景を踏まえて、琵琶湖の低酸素化問題を的確に理解していくため、「琵琶湖の低酸素化の実態把握および北湖生態系に与える影響の把握に関する解析モニタリング」が2008年度から開始された。この解析モニタリングでは、3つのサブテーマを設けて調査研究を行ってきた。「琵琶湖水深別水質解析調査研究」では、1979年から継続して実施している水深別水質調査ならびに第一湖盆での溶存酸素濃度補足調査を行い、琵琶湖の中層・深層の水質の現状把握と動態解析を推進している。「琵琶湖北湖の流動場と酸素濃度分布の把握および数値解析調査研究」では、第一湖盆を中心にロガー式水温計、溶存酸素計、ドップラー式多層流向流速計による物理計測を行い、溶存酸素濃度の平面分布の解析や流動との関連性の解明を進めている。また、今津沖中央定点

で蓄積されたデータを活用した数値解析を行っている。「深水層の低酸素化が生物群集に与える影響に関する解析調査研究」では無脊椎動物や微生物について酸素濃度の低下に対する応答に関する実験を行い、生物への影響評価を検討することを目的としている。本報告では、それぞれのサブテーマで実施してきた調査研究について述べる。

## 2. 琵琶湖水深別水質解析調査研究

### 2.1 はじめに

琵琶湖北湖の深層部では、富栄養化や地球温暖化が原因と考えられる溶存酸素濃度の低下が観測されている。溶存酸素濃度の低下は、重金属や栄養塩類の溶出および生物生息環境の悪化などを引き起こす可能性がある。そのため溶存酸素濃度の低下の要因やその寄与を検討することは重要である。ここでは琵琶湖の水深90mの地点で行った2008年度から2010年度の水質調査の結果などから、深層部での溶存酸素濃度の低下や植物プランクトン量のそれらへの影響、強風の影響による深層部での溶存酸素濃度の一部回復などについて報告する。

### 2.2 方法

調査地点を図2.1に示す。水質調査は、琵琶湖第一湖盆の水深約90mの今津沖中央定点(17B)で行った。測定水深は、0.5m, 5m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m, 60m, 80mおよび湖底直上1mの10水深とした。測定は月2回の頻度で実施した。これらに加えて水深90mのA～F点と第一湖盆の中央のL点においても17Bと同様に水温と溶存酸素濃度を月1～2回の頻度で測定した。水温と溶存酸素濃度は、HydroLab製ケーブル式のクオンタ水質計を使用した。その他の水質項目は、バンドーン採水器で採水し、実験室に持ち帰り、JIS K0102に準拠した方法等で測定した。風向風速は、彦根地方気象台の観測データを使用した。

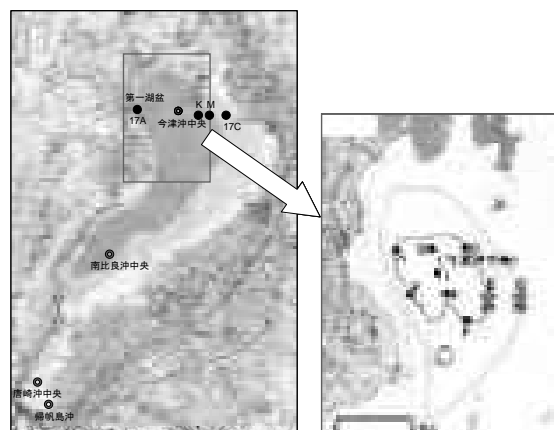


図2.1 調査地点

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 深層部の溶存酸素の低下と水質について

調査を開始した1979年以後の今津沖中央定点(17B)での湖底直上1mの溶存酸素濃度の経年変化を図2.2に示す。毎年低下と回復を繰り返しているが、2008年度の年度最低値の0.5 mg/Lは、過去32年間の最低値であった。また過年度10年間(1998-2007年度)で、溶存酸素濃度の年度最低値が2 mg/L未満となった年が3回あった。しかし、1987年と2002年にも年度最低値の0.9 mg/Lが観測されており、経年的に年度最低値が低下傾向であるとまではいえない。2009年度の年度最低値は、2.5 mg/Lで、2010年度の年度最低値は、3.1 mg/Lで、過去と比べて特に低い値ではなかった。

2008年度、2009年度、2010年度の今津沖中央定点(17B)での湖底直上1mの溶存酸素濃度の経月変化を図2.3に示す。2008年度の溶存酸素濃度は、過年度10年間の平均値を5月から下まわり、9月には過年度10年間の月最低値をも下まわり、11月17日には年度最低値の0.5 mg/Lとなった。その後2月2日には、深層部までの湖水の鉛直混合によると考えられる溶存酸素濃度の回復が見られた。回復の時期は例年並みであった。2009年度の溶存酸素濃度も、過年度10年間の平均値を5月から下まわり、9月には過年度10年間の月最低値をも下まわり、10月5日には年度最低値の2.5 mg/Lとなった。しかしその後1月まで一部回復がみられ、2月9日には表層から深層部までの湖水の鉛直混合によると考えられる溶存酸素濃度の全層での回復が見られた。全層での回復の時期は例年並みであった。図2.3の上部に彦根地方気象台の日最大風速と風向を示したが、2008年度は、4月から1月の間に台風の通過はなく、日最大風速で15 m/s以上の風は吹いていない。これに比べて、2009年度は、10月8日には台風通過による日最大風速15.5 m/sの風が

吹いている。10月19日の一部回復は、10月8日の台風通過による風の影響と考えられる。2010年度は、過年度平均値を、5月から下まわり、9月6日には年度最低値の3.1 mg/Lとなった。その後9月8日の台風通過等の影響もあり、一部回復がみられ、1月18日には鉛直混合による溶存酸素濃度の回復を確認した。これは平年より約2週間早い時期であった。

今津沖中央定点(17B)と第一湖盆中央(L点)での台風通過(10月8日)前後の溶存酸素濃度の鉛直分布(2009年度)を図2.4に示す。2009年10月8日の台風通過後に、水深80m以深での溶存酸素濃度の一部回復がみられた。

今津沖中央定点(17B)での鉛直混合前後の溶存酸素濃度の鉛直分布を図2.5に示す。2008年度と2009年度の冬の鉛直混合による溶存酸素濃度の回復は、表層から下層へと濃度の経時的上昇がみられた。しかし2010年度には冬の回復時の溶存酸素濃度が、水深70m以深の底層の方が表水層より高い時期がみられた(L点でも同様の傾向が見られた)。冷たく溶存酸素を多く含んだ水が湖底に沿って沈んできた可能性が考えられる。

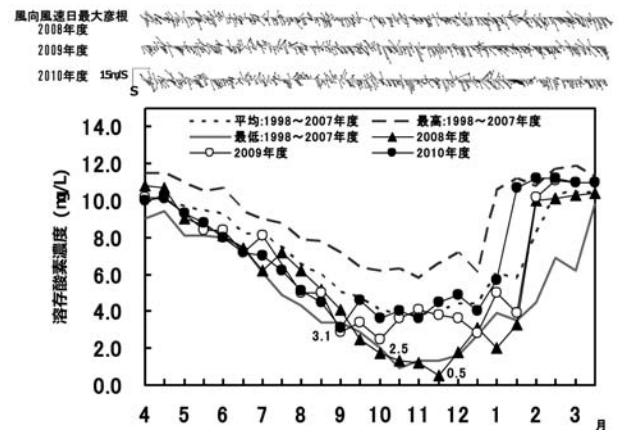


図2.3 今津沖中央定点(17B)での湖底直上1mの溶存酸素濃度の経月変化

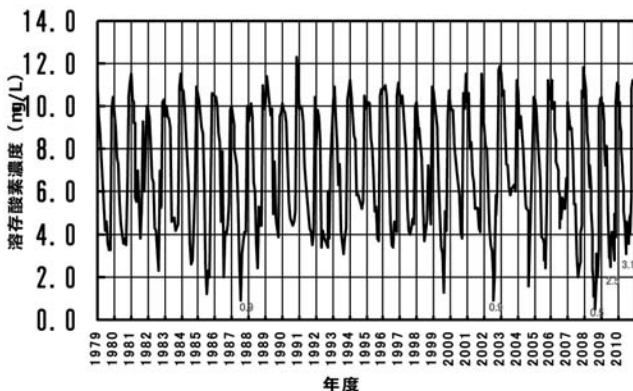


図2.2 今津沖中央定点(17B)での湖底直上1mの溶存酸素濃度の経年変化

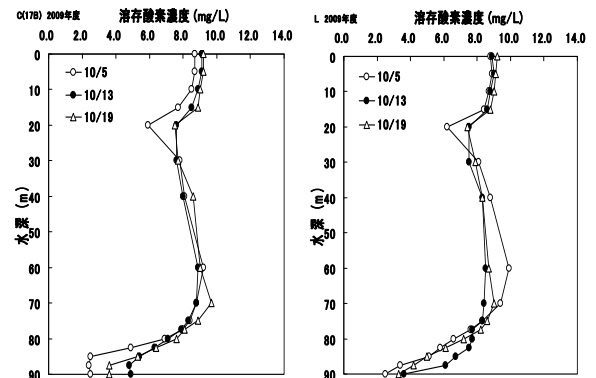


図2.4 17BとL点での台風通過(10月8日)前後の溶存酸素濃度の鉛直分布(2009年度)

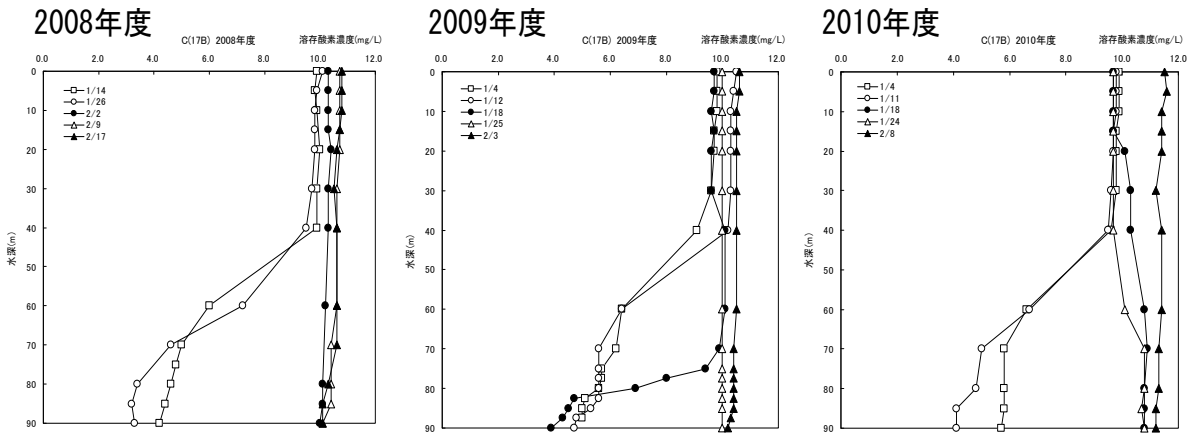


図 2.5 今津沖中央定点 (17B) での鉛直混合前後の溶存酸素濃度の鉛直分布

溶存酸素補足調査の結果から、今津沖中央定点 (17B) と第一湖盆中央 (L 点) での湖底直上 1m の溶存酸素濃度の時間変化をそれぞれ図 2.6、図 2.7 に示す。同じ年度で比較すると 17B より L 点のほうが少し低く推移している。

今津沖中央定点 (17B) での水温の鉛直分布の時間変化を図 2.8 に示す。夏季には水温躍層の形成により、表層と深水層の水は混合せず、表層から深水層への酸素は供給されなくなる。2008 年度は、水温躍層が強く 60 m 以深の 10 月以後の混合が遅かったことも、年度最低溶存酸素濃度の低下に影響を与えたと考えられる。2009 年度は水温躍層が弱く、表層から中層の等温線の間隔が広がっている。また 60 m 以深では 10 月以後に混合が進んでいる。2010 年度は、猛暑で水深 0.5m の水温も、9 月 6 日に 31.1℃と 32 年間の最大値となった。また水温躍層が強くなる時期も 9 月中旬と遅い時期になっている。

今津沖中央定点 (17B) での溶存酸素濃度の鉛直分布の時間変化を図 2.9 に示す。2008 年度の溶存酸素 2 mg/L 未満の低濃度化は、10、11 月に水深 80 m 以深の深層部のみで起こっていることがわかる。2009 年度の秋季の中層から深層部の溶存酸素濃度は、2008 年度ほど低くない。10 月 8 日の台風通過後に、水深 80 m 以深での混合によると考えられる溶存酸素濃度の一部回復がみられた。このように湖上での強風が、深層部での水の混合を生じ、溶存酸素濃度の一部回復に寄与していると考えられる。2010 年度の最も濃度の低い溶存酸素濃度の 4mg/L 未満への低下は 9 月から 11 月の水深 80m 以深の深層部のみで起こっていることがわかる。

今津沖中央定点 (17B) での全りん濃度の鉛直分布の時間変化を図 2.10 に示す。2008 年度は、深層部で溶存酸素濃度が低くなる時期に、同じ水深で全りん濃度は高くなっていることがわかる。これに比べて、2009 年度は深層部での溶存酸素濃度は低くないにもかか

わらず全りん濃度は高くなっている。10 月以後は深層部での一部混合で濃度が低下したと考えられる。2010 年度は、2009 年度と比較して、深層部での全りん濃度は低かった。これは溶存酸素濃度が低くならなかったことも影響していると考えられる。

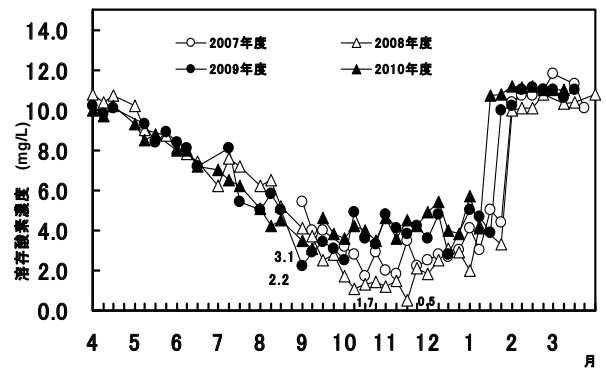


図 2.6 今津沖中央定点 (17B) での湖底直上 1m の溶存酸素濃度の時間変化

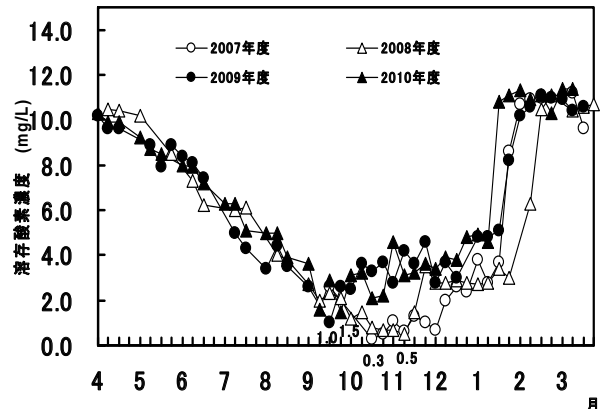


図 2.7 第一湖盆中央 (L 点) での湖底直上 1m の溶存酸素濃度の時間変化

今津沖中央定点（17B）でのマンガンの鉛直分布の時間変化を図 2.11 に示す。2008 年度から 2010 年度まで深層部での溶存酸素濃度が低くなると、マンガンの濃度は高くなる傾向がある。2010 年度は、過去 2 年と比較して、深層部でのマンガンの濃度は低かった。これは溶存酸素濃度が低くならなかったことが影響していると考えられる。

今津沖第一湖盆の水深 90m の溶存酸素濃度の平面分布の時間変化を図 2.12 に示す。2mg/L 未満が観測されたのは、2008 年度には 10 月 14 日から 11 月 25 日の期間であったが、2010 年度には 9 月 21 日だけで、その広がりも小さなものであった。水深 90m の溶存酸素濃度の平面分布には濃度差があり、平面に均一には低下や回復をしていないことがわかる。

今津沖中央定点（17B）でのりん濃度の年度平均値の経年変化を図 2.13 に示す。湖底直上 1 m の全りんは、りん酸態りんの変動と同調している。全りんは 2009 年度まで 5 年間上昇傾向であるが、表層の濃度に影響を与えるにはいたっていない。2010 年度の湖底直上 1 m の全りんは、低下した。今津沖中央定点（17B）での溶存性珪酸濃度の年度平均値の経年変化を図 2.14 に示す。全りに比べて湖底直上 1 m の珪酸は、1979 年度から 2009 年度まで上昇傾向で、表層濃度にまで影響している。2010 年度の湖底直上 1 m の珪酸も低下した。ダム建設による海洋でのシリカ欠損仮説では、ダム湖での珪藻の沈降が流出水の珪酸濃度を下げる。琵琶湖の場合も 70～80% がトラップされているとの報告がある（原島、2011）。琵琶湖での珪酸の沈降と湖底からの再溶出が、琵琶湖水での珪酸濃度が底層ほど高く、経年的に上昇している理由であると考えられる。また底層での溶存酸素の低下や地球温暖化による底層の水温上昇も要因として検討する必要はある。

今津沖中央定点（17B）で同時に計測している月 2 回の水深 0.5 m での植物プランクトン調査結果から、1989 年から 2008 年の 20 年間の各年の 3 月から 9 月の総細胞容積の平均値と湖底直上 1 m の溶存酸素濃度の年度最低値との関係を図 2.15 に示す。各年の 3 月から 9 月の総細胞容積の平均値と溶存酸素濃度の年度最低値には、相関係数  $R = -0.568$  ( $P < 0.01$ ) の負の相関があった。これは表層で生産された植物プランクトンが湖底まで沈降して、分解し酸素の消費に関与したものと考えられる。このことは水深 90m の深層部での溶存酸素濃度の低下に、その年の表層での植物プランクトンの生産量が寄与している可能性を示すものである。

以上のことをまとめると

① 2008 年度の今津沖中央定点(17B)での湖底直上 1 m

の溶存酸素濃度の年度最低値の 0.5 mg/L は、過去 32 年間の最低値であった。しかし、経年的に年度最低値が低下傾向ではない。

② 2008 年度、2009 年度、2010 年度ともに、冬の鉛直混合による湖底の溶存酸素濃度の回復を確認した。

③ 2009 年度の今津沖中央定点（17B）での湖底直上 1 m の溶存酸素濃度の、10 月 19 日の一部回復は、10 月 8 日の台風通過による日最大風速 15.5 m/s の風の影響と考えられる。

④ 今津沖中央定点（17B）での鉛直混合前後の溶存酸素濃度の鉛直分布から、2010 年度には冬の回復時の溶存酸素濃度が、水深 70m 以深の底層の方が表水層より高い時期がみられた。冷たく溶存酸素を多く含んだ水が湖底に沿って沈んできた可能性が考えられる。

⑤ 今津沖中央定点（17B）と第一湖盆中央（L 点）での湖底直上 1m の溶存酸素濃度について、同じ年度で比較すると 17B より L 点のほうが少し低く推移している。

⑥ 2008 年度は、水温躍層が強く 60 m 以深の 10 月以後の混合が遅かった。2009 年度は、水温躍層が弱く、10 月以後に 60 m 以深での混合が進んだ。2010 年度は 9 月までの猛暑で、水深 0.5m の水温も 9 月 6 日に 31.1℃と 32 年間の最大値となった。また水温躍層が強くなる時期も 9 月中旬と遅い時期であった。表水層の水温は、10 月には平年並みの温度に下がった。

⑦ 2008 年度の溶存酸素 2 mg/L 未満の低濃度化は、10、11 月に水深 80 m 以深の深層部のみで起こっている。

⑧ 2008 年度は、深層部で溶存酸素濃度が低くなる時期に、同じ水深で全りん濃度は高くなっている。2009 年度は深層部での溶存酸素濃度は低くなっていないにもかかわらず全りん濃度は高くなっている。

⑨ 2008 年度から 2010 年度まで深層部での溶存酸素濃度が低くなると、マンガンの濃度は高くなる傾向がある。

⑩ 水深 90 m の溶存酸素濃度の平面分布には濃度差があり、均一には低下や回復をしていない。

⑪ 湖底直上 1 m の全りんは 2009 年度まで 5 年間上昇傾向であるが、表層の濃度に影響を与えるにはいたっていない。湖底直上 1 m の珪酸は、1979 年度から 2009 年度まで上昇傾向で、表層濃度にまで影響している。2010 年度の湖底直上 1 m の全りんと珪酸は、ともに低下した。

⑫ 各年の 3 月から 9 月の水深 0.5 m の植物プランクトンの総細胞容積の平均値と湖底直上 1 m の溶存酸素濃度の年度最低値には、負の相関があった。このことは水深 90 m の深層部での溶存酸素濃度の低下に、その年の表層での植物プランクトンの生産量が寄与している可能性を示す。

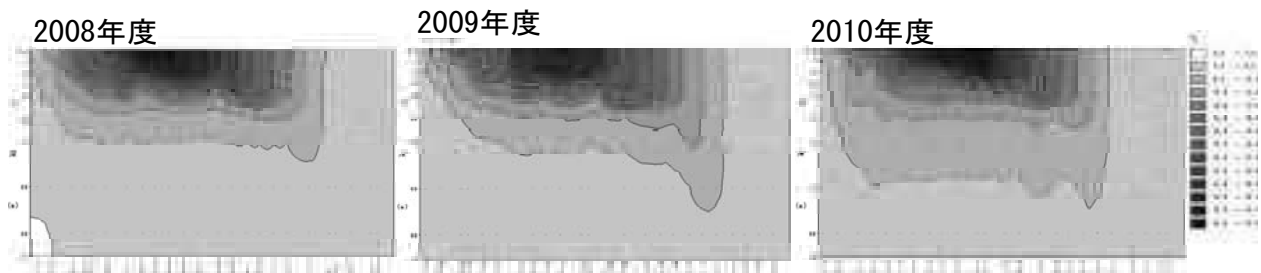


図 2.8 今津沖中央定点（17B）での水温の鉛直分布の時間変化（カラー版は 10 ページ参照）

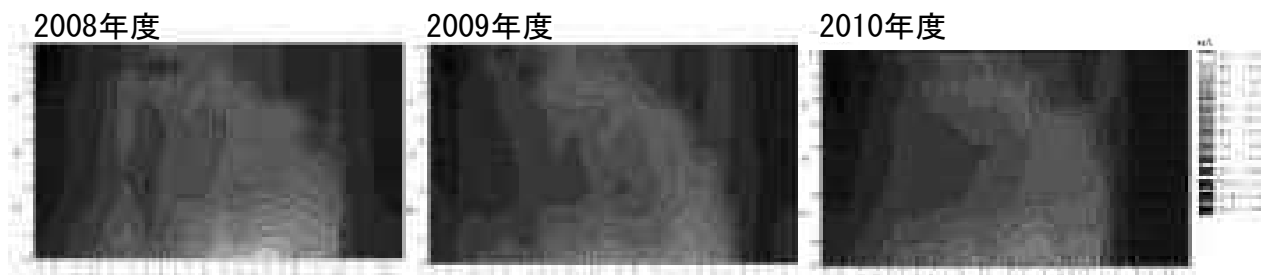


図 2.9 今津沖中央定点（17B）での溶存酸素濃度の鉛直分布の時間変化（カラー版は 10 ページ参照）



図 2.10 今津沖中央定点（17B）での全りん濃度の鉛直分布の時間変化（カラー版は 10 ページ参照）

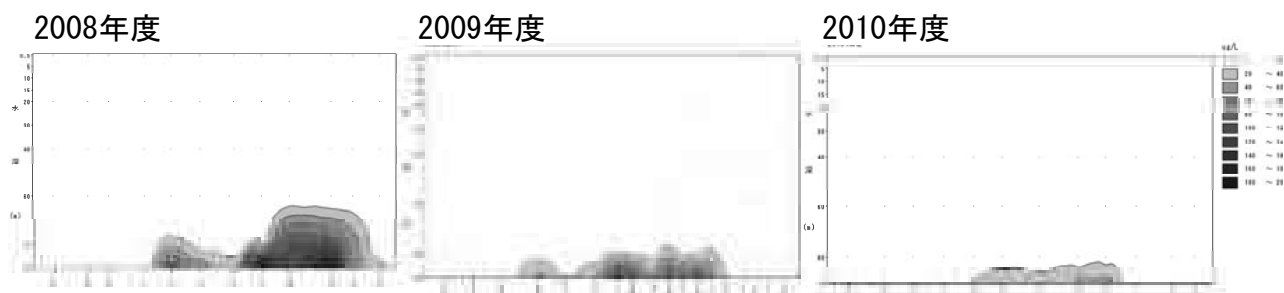


図 2.11 今津沖中央定点（17B）でのマンガン濃度の鉛直分布の時間変化（カラー版は 10 ページ参照）

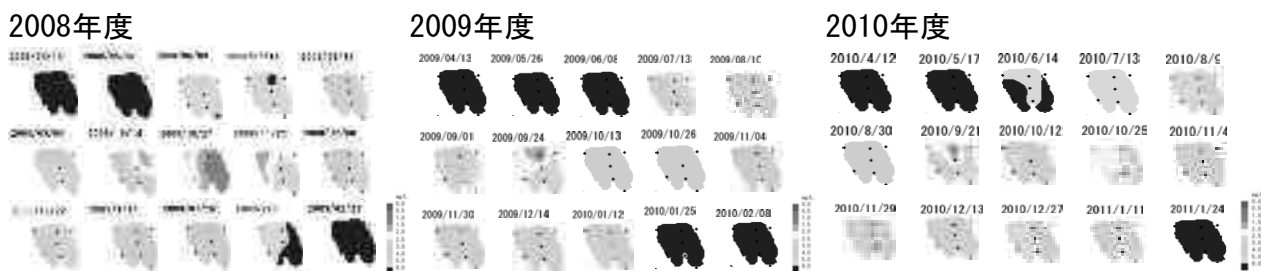


図 2.12 今津沖第一湖盆の水深 90m の溶存酸素濃度の平面分布の時間変化（カラー版は 10 ページ参照）

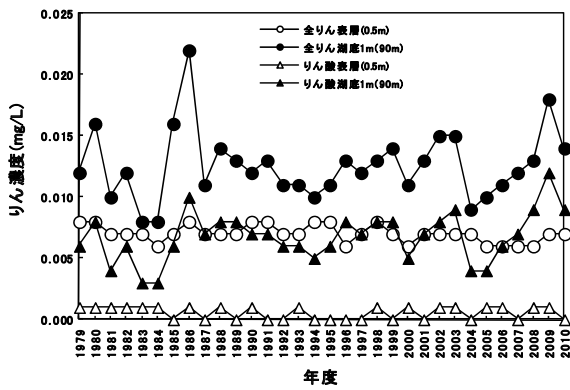


図 2.13 今津沖中央定点（17B）でのりん濃度の経年変化

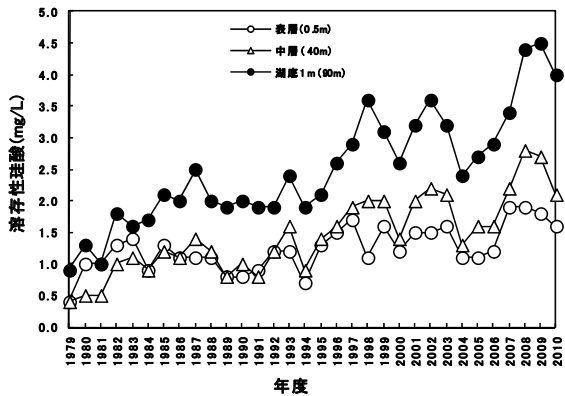


図 2.14 今津沖中央定点（17B）での溶存性珪酸の経年変化

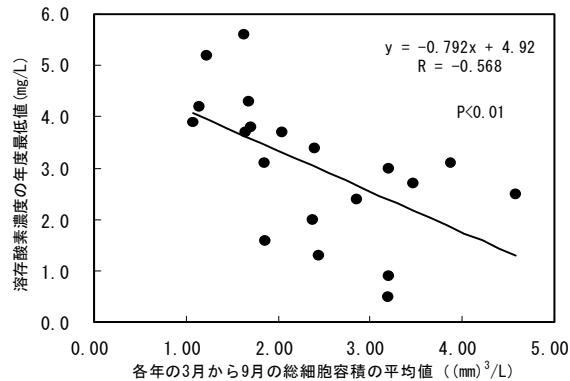


図 2.15 水深 0.5m の各年の 3 月から 9 月の植物プランクトンの総細胞容積の平均値と湖底直上 1m の溶存酸素濃度の年度最低値との関係

### 2.3.2 全窒素・全りんについて

L 点では水深別詳細調査として、17B とともに水質の把握も実施している。ここでは 2008 年度から 2010 年度における両地点の全窒素および全りんの調査結果について報告する。また、両地点におけるデータの差異についても検証を加えたので報告する。また、形態別窒素お

よび形態別りんについても若干の考察を加えたので、併せて報告する。

ここでは 17B と L 点での水質を比較するため、両地点で同時に調査を実施している、水深別水質調査時の水深 0.5m、40m、60m、80m および 90m の 5 水深の調査結果について述べる。

### TN、DTN

各水深における TN、DTN の 3 年間の経月変動を図 2.16 から図 2.20 に示す。

TN について 17B および L 点を見ると、水深 0.5m では夏季(成層期)に濃度が低下し、冬季(循環期)に上昇する傾向が見られた。水深 40m、水深 60m および水深 80m では季節変動はあまり見られなかった。水深 90m では水深 0.5m ほど変動は大きくないが、夏季に濃度が上昇し、冬季に低下する傾向が見られた。また両地点で同様の傾向を示し、地点間の差もほとんど見られなかった。

DTN についても TN と同様の傾向であり、地点間の差もほとんど見られなかった。

### TN と形態別窒素

窒素の存在形態は大きく無機態窒素と有機態窒素に分類できる。琵琶湖における無機態窒素は硝酸態窒素(以下「 $\text{NO}_3\text{-N}$ 」という)として存在する割合が大きい。

まず  $\text{NO}_3\text{-N}$  について、水深別の経月変動を見ることにした。その結果を図 2.21 から図 2.25 に示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$  も TN と同様、表層では夏季に低下し、冬季には回復していることが分かる。時に夏季においては枯渇状態になる。底層でも TN と同様、夏季に濃度が上昇し、冬季には低下する傾向があった。これは水深 40m 以深で見られる傾向であり、水深が深くなるほど、変動が大きい。

また、 $\text{NO}_3\text{-N}$  はこのような経月変動を繰り返しながらこの 3 年間で見て経年変動では低下傾向にあり、水深が深くなるほど、変動が顕著であった。

TN についても変動は小さいものの、同様の傾向が見られた。

次に有機態窒素(以下「 $\text{Org-N}$ 」という)について、17B における 5 水深の経月変動を図 2.26 に示したが、全水深とも経月変動および経年変動はほとんど見られなかった。

このことから、TN の経月および経年変動については  $\text{NO}_3\text{-N}$  の変動が大きく影響していることが分かる。

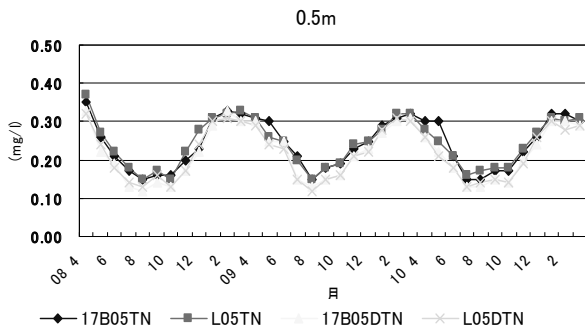


図 2.16 TN、DTN 経月変動 0.5m(2008-2010)

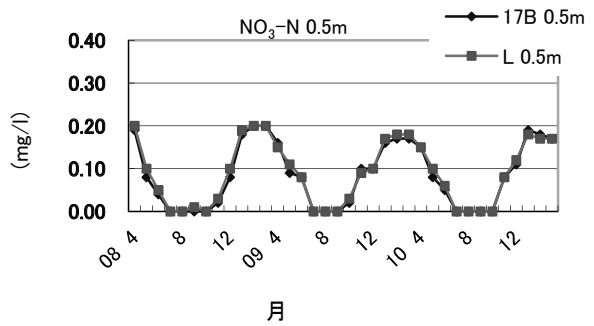


図 2.21 NO<sub>3</sub>-N 経月変動 0.5m(2008-2010)

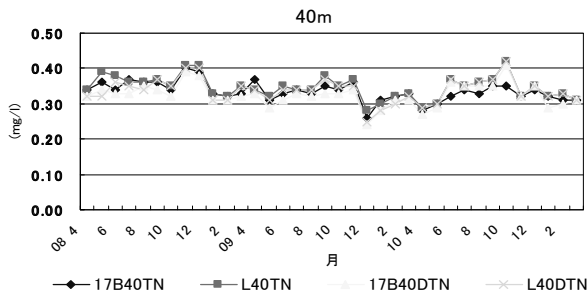


図 2.17 TN、DTN 経月変動 40m(2008-2010)

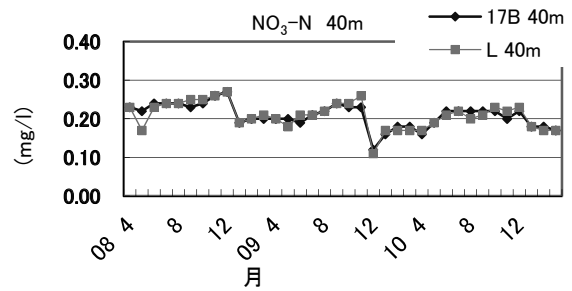


図 2.22 NO<sub>3</sub>-N 経月変動 40m(2008-2010)

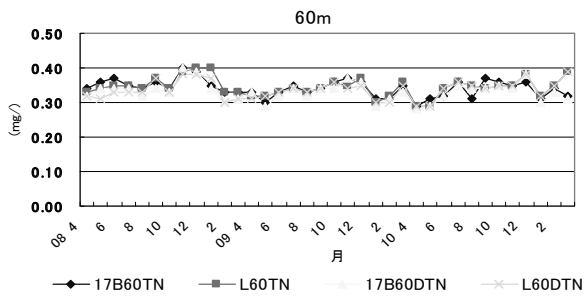


図 2.18 TN、DTN 経月変動 60m(2008-2010)

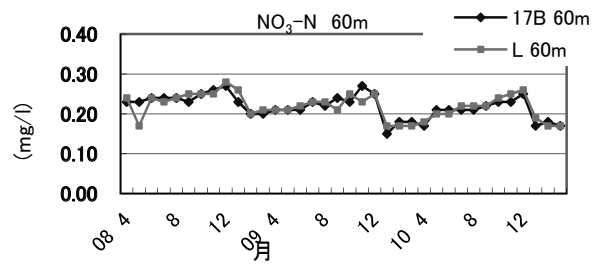


図 2.23 NO<sub>3</sub>-N 経月変動 60m(2008-2010)

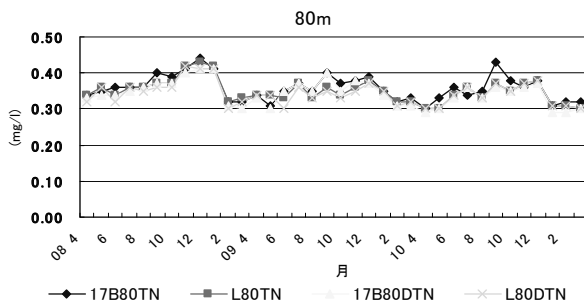


図 2.19 TN、DTN 経月変動 80m(2008-2010)

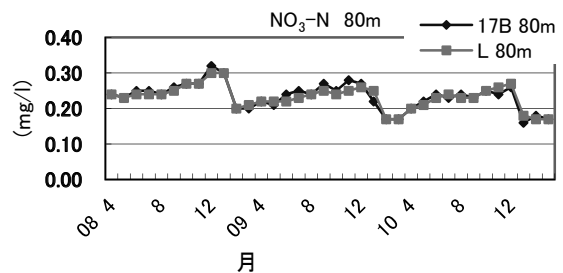


図 2.24 NO<sub>3</sub>-N 経月変動 80m(2008-2010)

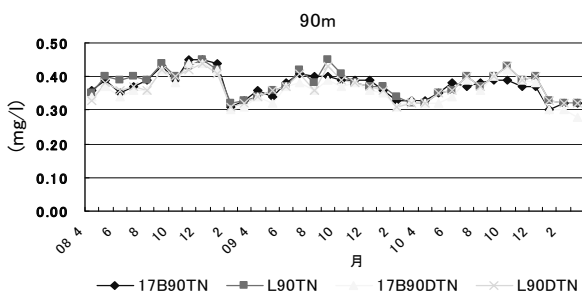


図 2.20 TN、DTN 経月変動 90m(2008-2010)

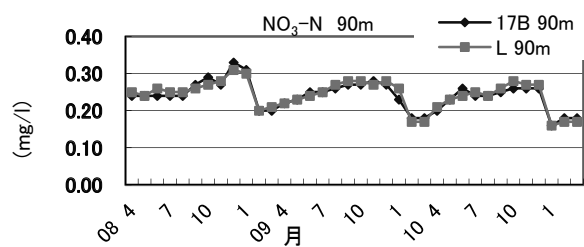


図 2.25 NO<sub>3</sub>-N 経月変動 90m(2008-2010)



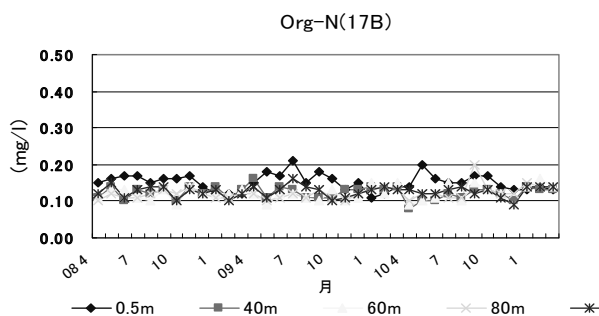


図 2.26 Org-N 経月変動 17B (2008-2010)

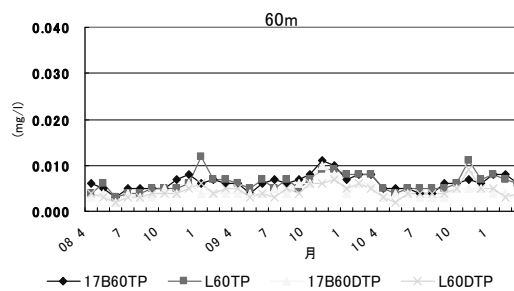


図 2.29 TP、DTP 経月変動 60m (2008-2010)

## TP・DTP

各水深における 3 年間の経月変動を図 2.27 から図 2.31 に示す。

TP について 17B および L 点を見ると、水深 0.5m、水深 40m および水深 60m では経月変動はあまり見られなかった。水深 80m および水深 90m では夏季から冬季にかけて上昇し、特に水深 90m ではより大きく上昇する傾向が見られた。

DTP についても TP と同様の傾向であり、地点間の差は水深 80m でやや見られるものの、他の水深ではほとんど見られなかった。

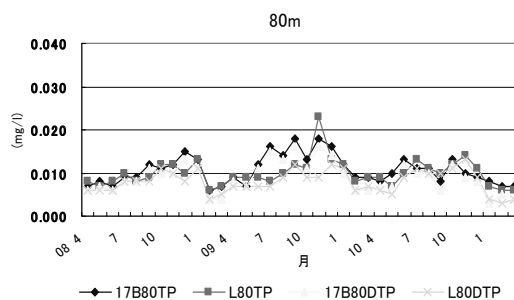


図 2.30 TP、DTP 経月変動 80m (2008-2010)

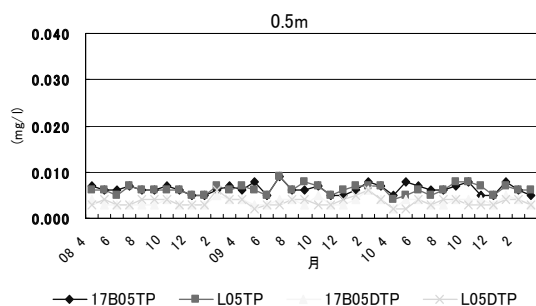


図 2.27 TP、DTP 経月変動 0.5m (2008-2010)

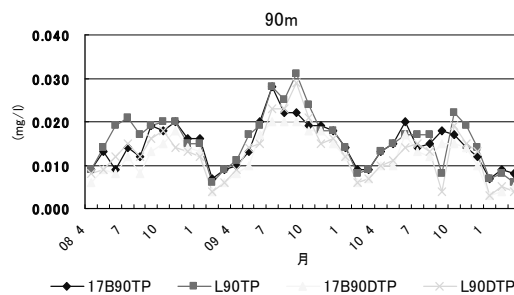


図 2.31 TP、DTP 経月変動 90m (2008-2010)

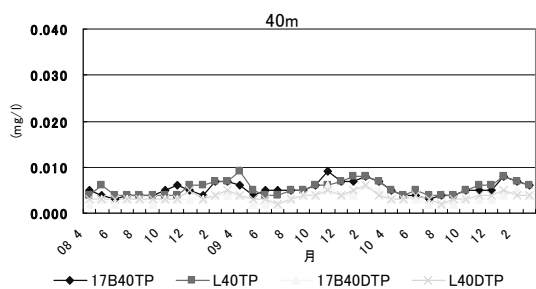


図 2.28 TP、DTP 経月変動 40m (2008-2010)

## TP・りん酸態りん

琵琶湖におけるりんはりん酸態りん（以下「 $PO_4\text{-P}$ 」という）として存在することが多いことから、図 2.32 から図 2.36 に  $PO_4\text{-P}$  の水深別の経月変動を示す。

$PO_4\text{-P}$  は TP と同様、表層 0.5m から水深 60m までは経月変動はほとんど見られなかった。水深 80m から底層 90m にかけては夏季から冬季にかけて上昇し、全循環により低下する傾向があった。濃度の変動は水深 80m より、水深 90m のほうが、より濃度の上昇は大きかった。これもまた TP と同様であった。

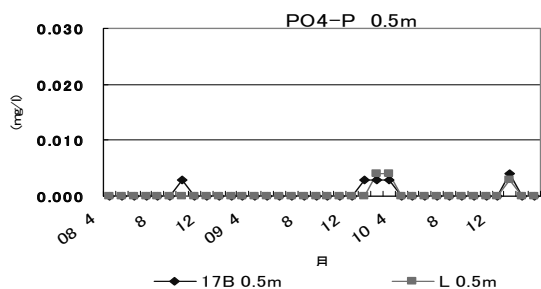


図 2.32 PO<sub>4</sub>-P 経月変動 0.5m(2008-2010)

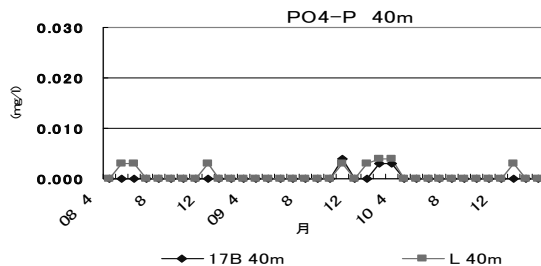


図 2.33 PO<sub>4</sub>-P 経月変動 40m(2008-2010)

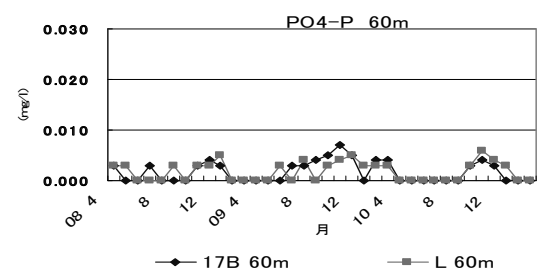


図 2.34 PO<sub>4</sub>-P 経月変動 60m(2008-2010)

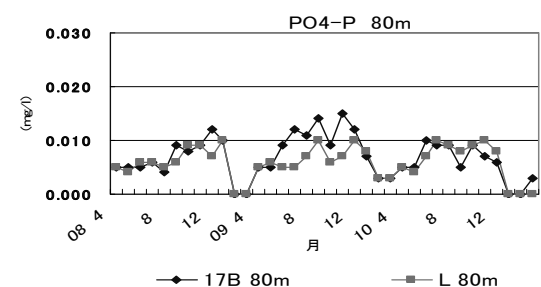


図 2.35 PO<sub>4</sub>-P 経月変動 80m(2008-2010)

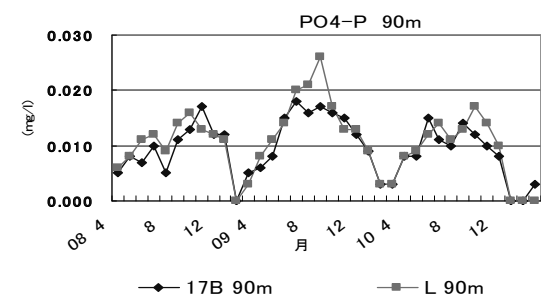


図 2.36 PO<sub>4</sub>-P 経月変動 90m(2008-2010)

以上について考察してみると、

### TN・DTN

TNおよびDTNの水深0.5m(表層)と水深90m(湖底直上1m)では季節変動が見られる。

その要因の一つとして、窒素の湖水中での挙動が考えられる。湖水中への窒素の供給は陸域や大気等から、おもにNO<sub>3</sub>-Nとして供給される。夏季には植物プランクトンの増殖に伴い、NO<sub>3</sub>-Nが体内に取り込まれる。植物プランクトンが底層に沈降すると、取り込まれたNO<sub>3</sub>-Nも底層に移動する。その結果、表層の窒素濃度は低下するが、下層では上昇すると考えられる。また冬季には全循環により、表層の窒素濃度は回復すると考えられる。

また、経年変動については全層でTNおよびNO<sub>3</sub>-Nは低下傾向を示している。この要因としては平常時の流入河川やセンター屋上での降雨調査結果から、それらの負荷の減少等が考えられる。また表層より深層部での低下傾向が大きいことから、深層部での脱窒等も考えられるが、これらについては今後更に検証していかなければならない。

17BとL点におけるTNおよびDTN分析値に有意差が認められるか検討した。

まずF検定を行ったところ、表2.1に示すようにTNおよびDTNは全水深において等分散することが判明したため、等分散を仮定したt検定を行った。表2.2に示すように両地点でTNおよびDTNとも全水深において分析値に有意差が認められなかった。

表 2.1 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	TN		DTN	
	P 値	$\alpha$ (片側)	P 値	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.39	0.025	0.41	0.025
40m	0.70	0.025	0.39	0.025
60m	0.34	0.025	0.43	0.025
80m	0.31	0.025	0.32	0.025
90m	0.40	0.025	0.30	0.025

P 値：絶対値

$\alpha$ ：有意水準5%としたときの値(片側)

表 2.2 t-検定：等分散を仮定した2 標本による検定

水深	TN		DTN	
	t 値	t 境界値(両側)	t 値	t 境界値(両側)
0.5m	0.11	1.99	0.02	1.99
40m	1.63	1.99	1.58	1.99
60m	0.54	1.99	0.88	1.99
80m	1.12	1.99	0.07	1.99
90m	0.64	1.99	1.10	1.99

## TP・DTP

TPおよびDTPは水深80mおよび水深90mで夏季から冬季にかけて濃度が上昇する傾向があった。考えられる要因として、夏季から秋季にかけて成層が進むと、深層部では溶存酸素濃度の低下が進む。底層で酸素が不足する様な状況になると、底泥から金属やりの溶出する可能性が考えられる。また夏季には表層からプランクトンが沈降すること等が考えられる。しかしこのことに関しては、さらに検証する必要がある。

またTPおよびDTPについても17BとL点で分析値に有意差が認められるか検討した。TNおよびDTNと同様、表2.3および表2.4に示すように両地点で全水深において分析値に有意差が認められなかった。

表 2.3 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	TP		DTP	
	P 値	$\alpha$ (片側)	P 値	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.45	0.025	0.23	0.025
40m	0.48	0.025	0.14	0.025
60m	0.17	0.025	0.29	0.025
80m	0.41	0.025	0.04	0.025
90m	0.11	0.025	0.15	0.025

P 値：絶対値

$\alpha$ ：有意水準5%としたときの値（片側）

表 2.4 t-検定：等分散を仮定した2 標本による検定

水深	TP		DTP	
	t 値	t 境界値(両側)	t 値	t 境界値(両側)
0.5m	0.43	1.99	0.27	1.99
40m	0.48	1.99	1.42	1.99
60m	0.00	1.99	0.08	1.99
80m	0.92	1.99	1.35	1.99
90m	0.88	1.99	0.65	1.99

## 形態別窒素および形態別りん

形態別窒素および形態別りんについても17BとL点で分析値に差があるか確認するためにt検定を行った。その結果、TNおよびTPと同様有意差がないことが確認できた。

結果については表2.5から表2.14に示すとおりである。

## NO<sub>3</sub>-N の検定結果

F検定を行ったところ、全水深について等分散することが判明したので、等分散を仮定した2標本によるt検定を行った(表2.5、表2.6)。

表 2.5 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	NO <sub>3</sub> -N	
	P 値(絶対値)	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.50	0.025
40m	0.25	0.025
60m	0.39	0.025
80m	0.28	0.025
90m	0.44	0.025

表 2.6 t-検定：等分散を仮定した2 標本による検定

水深	NO <sub>3</sub> -N	
	t 値(絶対値)	t 境界値(両側)
0.5m	0.24	1.99
40m	0.00	1.99
60m	1.25	1.99
80m	0.30	1.99
90m	0.22	1.99

## NO<sub>2</sub>-N の検定結果

F検定の結果、表2.7に示すようにでは全水深で等分散することが判明したので、等分散を仮定した2標本によるt検定をおこなった(表2.7、表2.8)。

表 2.7 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	NO <sub>2</sub> -N	
	P 値(絶対値)	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.46	0.025
40m	0.45	0.025
60m	0.26	0.025
80m	0.46	0.025
90m	0.03	0.025

表 2.8 t-検定：等分散を仮定した2 標本による検定

水深	NO <sub>2</sub> -N	
	t 値(絶対値)	t 境界値(両側)
0.5m	0.18	1.99
40m	0.00	1.99
60m	0.25	1.99
80m	0.06	1.99
90m	0.51	1.99

## NH<sub>4</sub>-N の検定結果

F 検定を行ったところ、水深 80m については P 値（絶対値）が  $\alpha$ （片側）0.025 より小さくなったため、分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を行った。結果については他の水深と同様 17B と L 点の分析値に有意差がないことが確認できた（表 2.9、表 2.10、表 2.11）。

表 2.9 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	NH <sub>4</sub> -N	
	P 値(絶対値)	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.49	0.025
40m	0.35	0.025
60m	0.05	0.025
80m	0.02	0.025
90m	0.03	0.025

表 2.10 t-検定：等分散を仮定した 2 標本による検定

水深	NH <sub>4</sub> -N	
	t 値(絶対値)	t 境界値(両側)
0.5m	0.69	1.99
40m	0.28	1.99
60m	0.31	1.99
80m	0.34	1.99
90m	0.51	1.99

表 2.11 t-検定：分散が等しくないと仮定した 2 標本による検定

水深	NH <sub>4</sub> -N	
	t 値(絶対値)	t 境界値(両側)
80m	0.34	1.99

## PO<sub>4</sub>-P の検定結果

F 検定の結果、水深 40m では等分散しないことが判明したので、分散が等しくないと仮定した 2 標本の t 検定を行った。結果は他の水深と同様 17B と L 点の分析値に有意差がないことが確認できた（表 2.12、表 2.13、表 2.14）。

表 2.12 F-検定：2 標本を使った分散の検定

水深	PO <sub>4</sub> -P	
	P 値(絶対値)	$\alpha$ (片側)
0.5m	0.30	0.025
40m	0.01	0.025
60m	0.34	0.025
80m	0.10	0.025
90m	0.15	0.025

表 2.13 t-検定：等分散を仮定した 2 標本による検定

水深	PO <sub>4</sub> -P	
	t 値	t 境界値(両側)
0.5m	0.54	1.99
60m	0.18	1.99
80m	1.13	1.99
90m	0.82	1.99

表 2.14 t-検定：分散が等しくないと仮定した 2 標本による検定

水深	PO <sub>4</sub> -P	
	t 値	t 境界値(両側)
40m	1.59	1.99

以上のことをまとめると、

2008 年度から 2009 年度の水深別水質調査における窒素およびリンの調査結果から、TN および DTN は 17B および L 点において同様の傾向を示し、水深 0.5m では夏季（成層期）に濃度が低下し、冬季（循環期）には上昇した。逆に水深 90m では夏季に濃度が上昇し、冬季には低下したことが明らかになった。

NO<sub>3</sub>-N についても同様の傾向であった。特に表層では夏季には枯渇し、TN に比較して夏季と冬季の変動幅が大きい。

さらに、3 か年の変動を見ると 40m 以深での TN、DTN および NO<sub>3</sub>-N は季節的な変動を繰り返しながら、経年的には低下傾向にあった。TN、DTN より NO<sub>3</sub>-N のほうが、また表層より深層部のほうが変動は顕著であった。

TP および DTP についても 17B および L 点で同様の傾向を示し、表層では経月変動は小さいが、水深 80m から水深 90m の深層部では夏季から冬季にかけて濃度が上昇し、水深 90m のほうがより大きく上昇した。

PO<sub>4</sub>-P についても TP および DTP と同様の傾向を示したが、表層での変動は TP および DTP より小さかった。

また、17B と L 点における分析値の検定を行ったところ、すべての水深およびすべての項目で有意差が認められないことが確認できた。

### 2.3.3 水質の変動について

ここでは 2007～2010 年度にかけて、今津沖中央にて採水分析を行った項目のうち、COD、T-N、T-P、有機態窒素、硝酸態窒素について報告する。

#### COD

COD について経年変動を見てみると、北湖、南湖ともに、1984 年度以降上昇であり、1998 年度以降は横ばい傾向である (図 2.37)。

2008 年度の今津沖中央(17B)での底層(湖底上 1m)の COD は、表層と同じように、近年横ばいの傾向がみられる (図 2.37)。季節変動でみると、表層から水深 20m までは、春季から COD 値は上昇し始めて、秋季に最も高値となり冬季には表層から深層部までほぼ同値となるまで下がっている。30m より深いところでは、大きな季節変動は見られなかった (図 2.38)。

2009 年度は、表層、中層、底層においても 1998 年度以降横ばいの傾向であった (図 2.37)。季節変動は、表層と水深 5m は春季が最も COD 値が高く、夏季に少し下がったが秋季に再度上昇した。15m および 20m は、夏季に一端値が下がったが秋季に最も高くなった。30m 以深では大きな季節変動は見られなかった (図 2.39)。

2010 年度は季節変動で見ると、5m では春季が最も高く、夏季から冬季にかけて下がっていた。10m は夏季が最も高く、秋季には春季値よりも下がった。15m および 20m では夏季が最も高く、秋季～冬季と下がり、15m では冬季値は春季値と同値であった。3 年間とも、30m より深いところではそれより浅いところと比べて大きな季節変動は見られなかった (図 2.40)。

#### T-N

T-N は、北湖、南湖共に 2003 年度以降低下傾向となっている。今津沖中央での鉛直経年変動も、同様に 2003 年度以降全層において低下傾向にある (図 2.41)。

2008 年度の T-N は、表層から 10m までは、夏季に、15m、20m では、秋季に最も低い値となった。冬季には、湖水の全循環により、全層が均一化されている。30m より深いところでは、春季と夏季は値はほぼ同じ程度で、秋季に最も高い値となっている (図 2.42)。

2009 年度・2010 年度もほぼ 2008 年度の変動形態と同じであった。また、最深部では、夏季から秋季に T-N 上昇がみられた (図 2.43、図 2.44)。

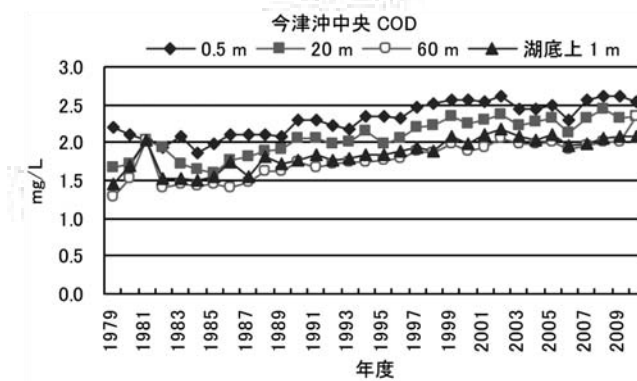


図 2.37 今津沖中央における COD の経年変動

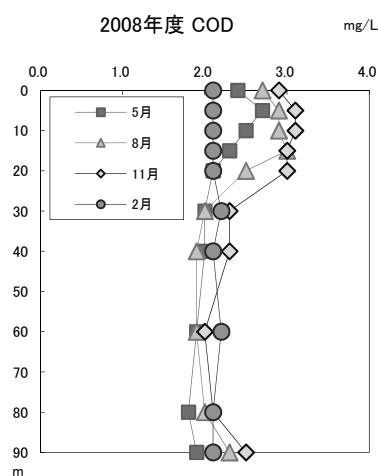


図 2.38 2008 年度 COD 鉛直季節変動 (今津沖中央)

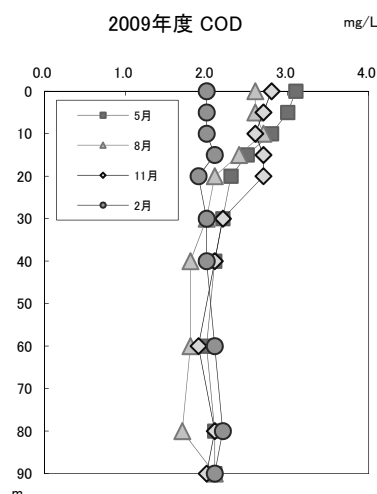


図 2.39 2009 年度 COD 鉛直季節変動 (今津沖中央)

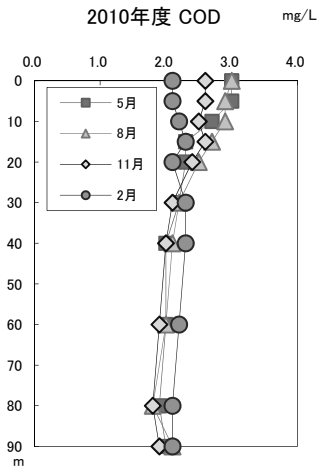


図 2.40 2010 年度 COD 鉛直季節変動 (今津沖中央)

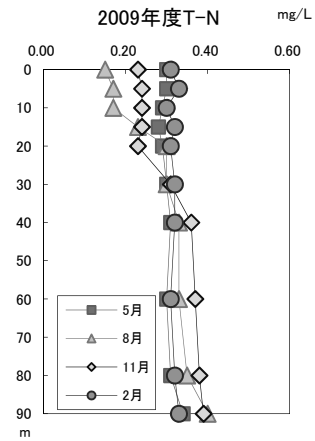


図 2.43 2009 年度 T-N 鉛直季節変動 (今津沖中央)

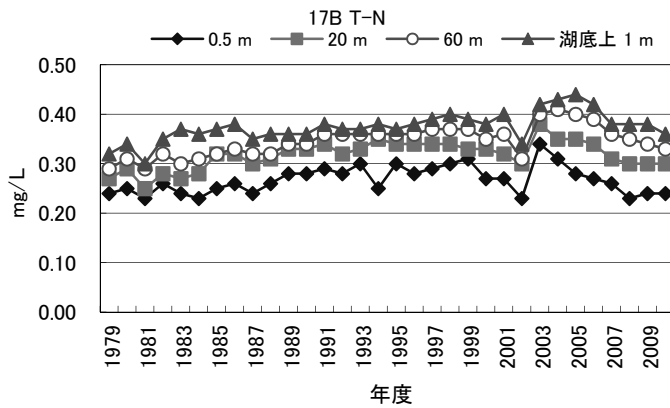


図 2.41 今津沖中央における T-N の経年変動

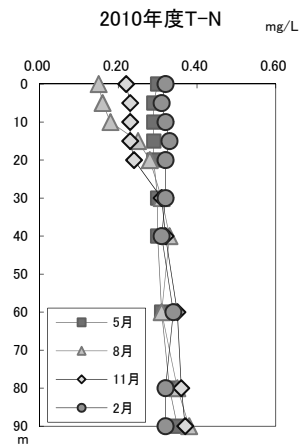


図 2.44 2010 年度 T-N 鉛直季節変動 (今津沖中央)

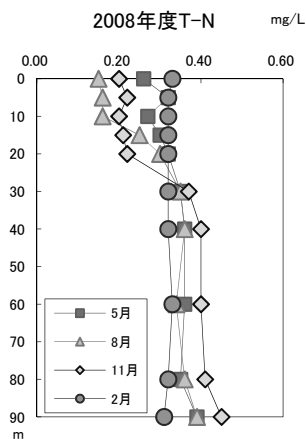


図 2.42 2008 年度 T-N 鉛直季節変動 (今津沖中央)

### T-P

T-P は北湖も南湖も 1979 年度以降、減少傾向にある。今津沖中央での鉛直経年変動は、表層と中層では減少から横ばいの傾向が続いており、最深部（湖底上 1m）については値の変動が大きい（図 2.45）。

2008 年度の T-P は底層ほど季節変動は大きかった。最深部において秋季に最も高い値となった（図 2.46）。

2009 年度も底層の変動が大きく、最深部では夏季に最も高くなった（図 2.47）。

2010 年度は、最深部において春季、夏季から秋季で高い値を示していた（図 2.48）。

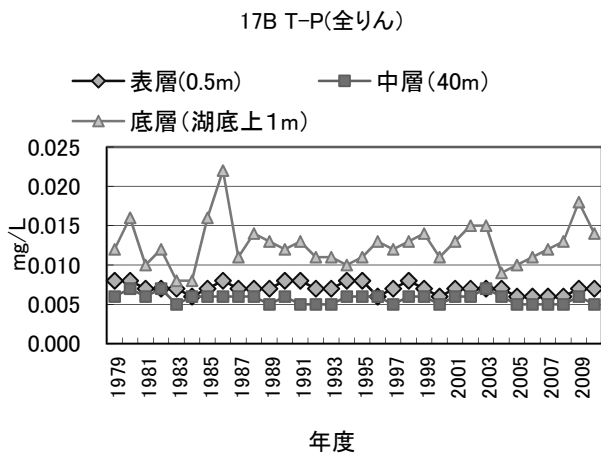


図 2.45 今津沖中央における T-P の経年変動

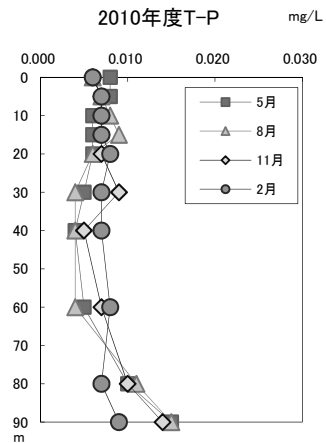


図 2.48 2010 年度 T-P 鉛直季節変動（今津沖中央）

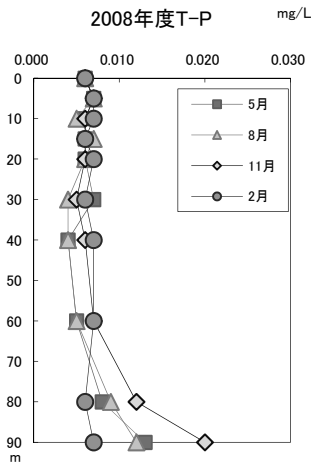


図 2.46 2008 年度 T-P 鉛直季節変動（今津沖中央）

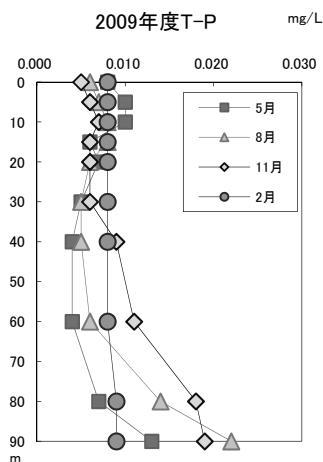


図 2.47 2009 年度 T-P 鉛直季節変動（今津沖中央）

### 有機態窒素

有機態窒素は、1979 年度以来北湖も南湖もやや低下傾向だったが、2001 年度以降は横ばい傾向が続いている（図 2.49）。

1998 年度以降、今津沖中央での鉛直経年変動でも、2008 年度から 2010 年度は全水深において、横ばいの傾向がみられる（図 2.50）。鉛直季節変動を見ると、2008 年度の有機態窒素は、水深 20m で秋季に最も高い値を示し、水深 5m では春季に高値となった。30m 以深では、大きな変化はみられなかった（図 2.51）。

2009 年度では、水深 30m までの浅いところでは大きく値は変わらず、それより深いところでは春季から夏季、秋季と順に上昇し、最深部では夏季に最も高い値を示している（図 2.52）。

2010 年度では 30m までは大きな値の変動はみられず、30m 以深では春夏秋の値は冬季の値を下回っていた（図 2.53）。特に周期的な年度の特徴は見られていない。

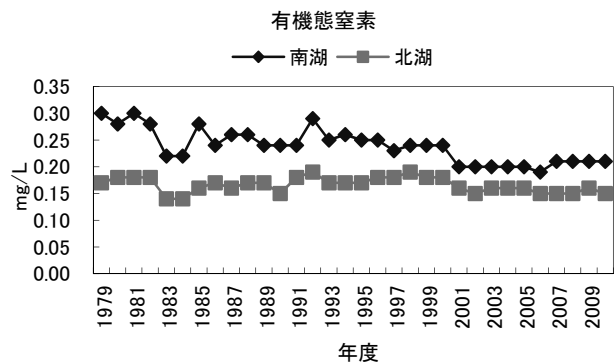


図 2.49 有機態窒素の経年変動（表層平均値）

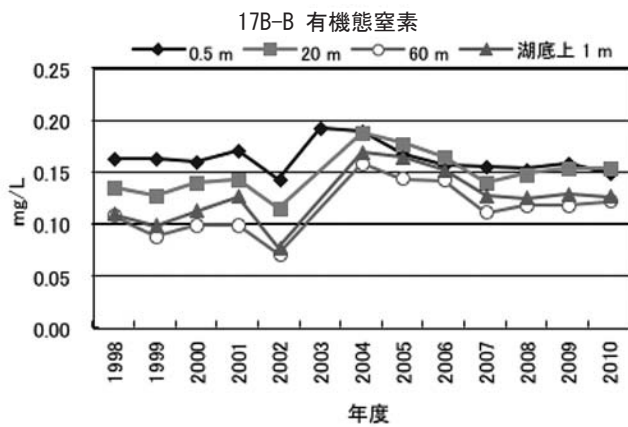


図 2.50 今津沖中央における有機態窒素の経年変動

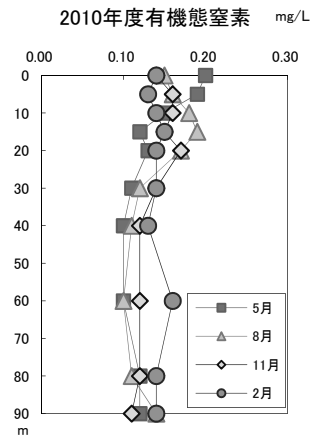


図 2.53 2010 年度 有機態窒素鉛直季節変動 (今津沖中央)

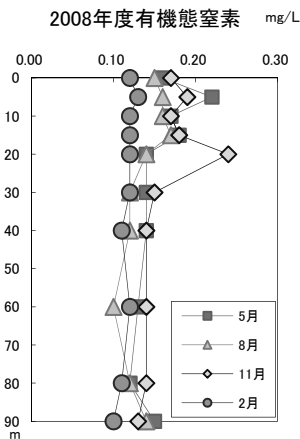


図 2.51 2008 年度 有機態窒素鉛直季節変動 (今津沖中央)

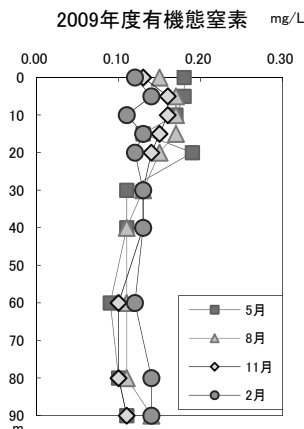


図 2.52 2009 年度 有機態窒素鉛直季節変動 (今津沖中央)

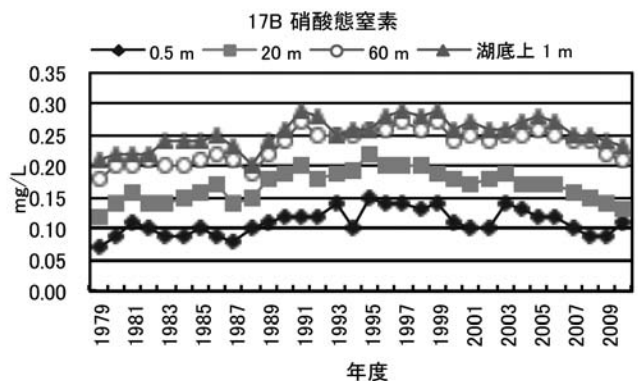


図 2.54 今津沖中央における硝酸態窒素の経年変動

### 硝酸態窒素

硝酸態窒素について、今津沖中央(17B)での鉛直経年変動は、2003 年度以降、全層において低下傾向がみられている (図 2.54)。

2008 年度から 2010 年度までの 3 年間の今津沖中央(17B)における鉛直季節変動は、2008 年度の秋季の表水層の回復の遅れを除けば、ほぼ同じ動態を示していた。表層では夏季に最も低く枯渇し秋季に回復していた。30m 以深では、春季から秋季にかけて増加し冬季に減少した。冬季は全層でほぼ同じ値となっている (図 2.55、図 2.56、図 2.57)。



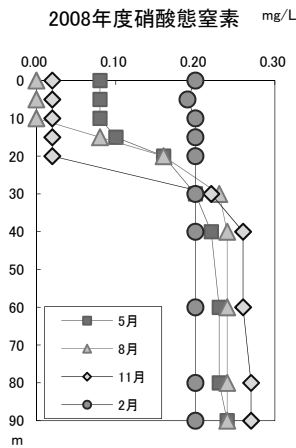


図 2.55 2008 年度 硝酸態窒素鉛直季節変動  
(今津沖中央)

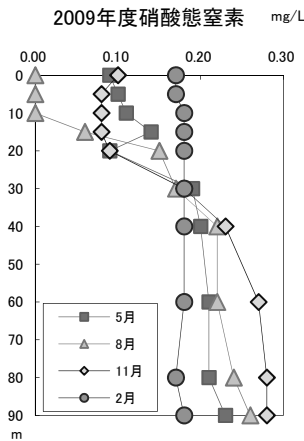


図 2.56 2009 年度 硝酸態窒素鉛直季節変動  
(今津沖中央)

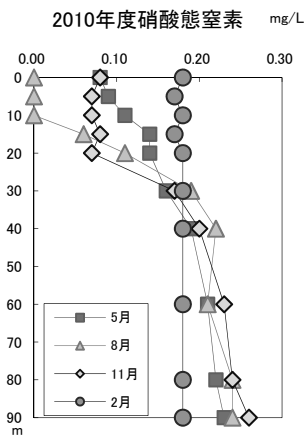


図 2.57 2010 年度 硝酸態窒素鉛直季節変動  
(今津沖中央)

今津沖中央（17B:水深約 90m）地点で鉛直方向の調査を行い、季節変動から考察した。

毎年春季から秋季に形成される琵琶湖の水溫躍層の上層部分では、植物プランクトンが窒素を消費して有機物を産生し、それらは沈降する（図 2.58）。表層に近い部分では、植物プランクトンの生産により窒素はとりこまれ、それによって春季から徐々に窒素濃度は減少している。増えた植物プランクトンが、沈降によって下層へ取り除かれ、特に深いところでは、窒素が上昇している。夏季に沈降した粒子の分解のため、躍層より深層部分では溶存酸素が消費され、窒素やりんの濃度は上昇していると考えられる。全りんは、最深部において、夏季に最高値を示している。有機態窒素は季節による定まった周年変動傾向は認められていないうえに、全層で横ばいの傾向がある。硝酸態窒素は、全層において低下の傾向が見られており、全窒素の全層での低下は、硝酸態窒素の全層での低下によるところが大きいと考えられる。

硝酸態窒素の鉛直変化は、プランクトンの増殖に利用されて、秋季に底層の濃度が高くなるという周年変化がみられている。

以上のことをまとめると、今津沖中央（17B:水深約 90m）地点での鉛直季節変動は、春季から秋季に形成される水溫躍層より上層で、全窒素は減少していた。これは、植物プランクトンによる窒素のとりこみと、有機物産生を行うことと関連していると考えられた。

水溫躍層より下層では、増殖した植物プランクトンが沈降して窒素が上昇し、最深部において高値を示していた。また深層部では、低酸素により全窒素、全りんが底泥から溶出されて、夏季から秋季にかけて高値となっていると考えられた。有機態窒素は周年変化は認められず全層で横ばい傾向であり、硝酸態窒素は秋季に深層部にいくほど高値を示す周年変化がみられたうえ、全層で低下傾向であるため、全窒素の全層での低下傾向は硝酸態窒素の低下傾向によるものと考えられた。