

## 9. 三河港水路内の夏期の水質悪化の実態とその要因に関する研究

### 9-1 研究の背景と目的

三河湾の湾奥に位置する三河港では、港湾域全域で富栄養化状態にあり、特に航路・水路内では夏期に頻繁に貧酸素水塊が発生し悪臭の要因となっているだけでなく、三河湾湾奥の水質悪化の要因ともなっている。貧酸素水塊の抑制のためには、港内に流入する河川からの汚濁負荷を低減するとともに、湾奥全体の窒素、リンといった栄養塩の濃度を低下させる必要がある。また、貧酸素水塊の発生状況を把握するとともに、発生メカニズムや影響範囲を明らかにする必要がある。

河川からの流入負荷削減については、総量規制が実施されているものの濃度は横ばい状態が続いている。栄養塩の供給源は、底質からの溶出と降雨および流域からの流入であるが、底質に蓄積した栄養塩も元は湾内に流入したものである。富栄養化の根本的な抑制には流域からの流入量削減が不可欠であるが、その発生源からの排出特性や排出負荷量について正確な見積もりがなされていないのが現状である。水質評価の方法には、濃度と負荷量の二つがあり、一般的には濃度による評価が行われる。しかし、湖沼や閉鎖性水域においては、いくつもの河川がこれらに流入するため濃度の評価だけでは湖沼や閉鎖性海域にどの河川が影響を与えているか判断しにくい。この場合に負荷量が用いられる。汚染源からの負荷量を算出するには、平水時調査のみならず流量や懸濁物質が増加する降雨時調査を同時に行うことが重要である。

海域での貧酸素水塊については、その発生時期や規模を予測することはアサリの大量斃死を防ぐ上でも重要であり、貧酸素水塊の発生特性や水質動態の研究は重要な研究テーマである。また、港内の航路や水路内で継続的に高濃度に発生する貧酸素水塊の鉛直混合や港外への拡散による周辺海域への影響などについてはほとんど明らかにされておらず、今後の重要な研究課題である。

本研究では、三河湾湾奥へ流入する河川を定期的に調査し、平水時調査のみでなく、降雨時調査を実施する。これより、水質特性を把握すると共に、降雨時の影響を考慮し、中小河川も含めた三河湾湾奥への流出負荷量を算出し、三河湾湾奥への影響を検討した。また、三河港港内では、夏期に水質観測を継続的に実施し、貧酸素水塊の発生状況や拡散状況を把握するとともに、水塊構造や1次生産、栄養塩濃度などと比較してその発生要因を考察した。

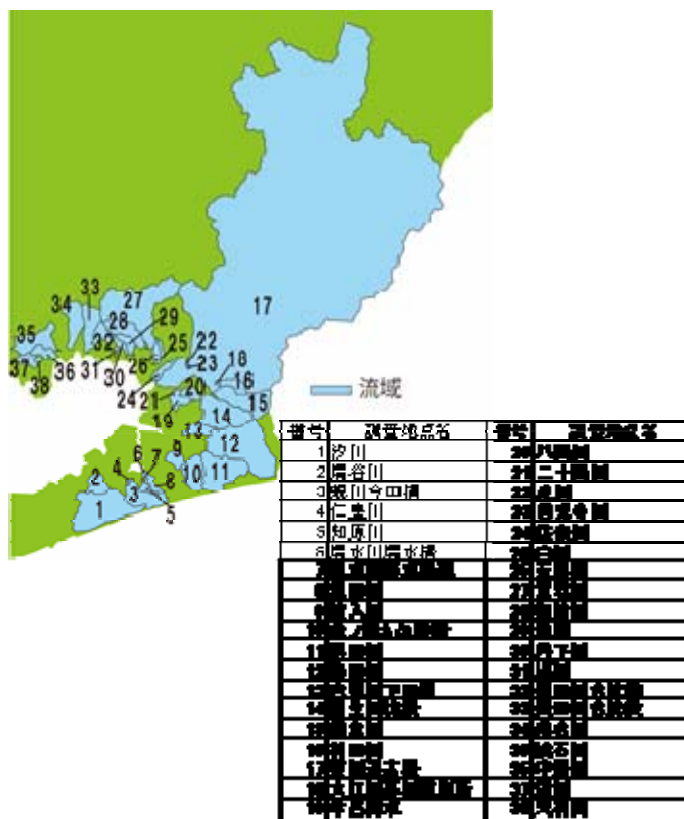


図9-1-1 調査対象河川

## 9-2 現地調査の概要

### (1) 流入河川における調査

調査地は、図9-1-1に示す愛知県内の田原市、豊橋市、蒲郡市から三河湾湾奥へ流入する38河川である。2008年4月から月1回の間隔で採水を行った。なお、2009年4月からは2008年度の結果より、16河川に、2010年4月からは10河川に絞り平水時調査を実施した。また、降雨時調査を豊川、梅田川、西の川で行った。現地では採水の他に流量を測定し、測定水質項目は、全窒素(TN)、溶存態窒素(DN)、全リン(TP)、溶存態リン(DP)、リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)、懸濁物質(SS)、生物化学的酸素要求量(BOD)である。懸濁態窒素(PN)、懸濁態リン(PP)はそれぞれTN-DN、TP-DPより算出した。



図9-2-1 水質観測地点 (図中 Stn. 11-18 が港内の観測点)

### (2) 水路内における調査

海域での調査は、図9-2-1に示す地点で7月12日から11月6日までの約4ヶ月間、およそ10日間隔で計12回実施した。港内の観測点は、図中の Stn. 11 から 18 までの8地点である(ただし Stn. 11 については防波堤工事のため実質的にはデータが取得できていない)。観測では、投入型水質計 (ASTD, JFE アドバンテック社製) を用いて、塩分、水温、クロロフィル濃度、濁度、溶存酸素濃度の鉛直プロファイルを計測するとともに、海表面下1mおよび海底上1mの水深から海水を1Lサンプリングし、栄養塩濃度などの水質分析を実験室に持ち帰り実施した。

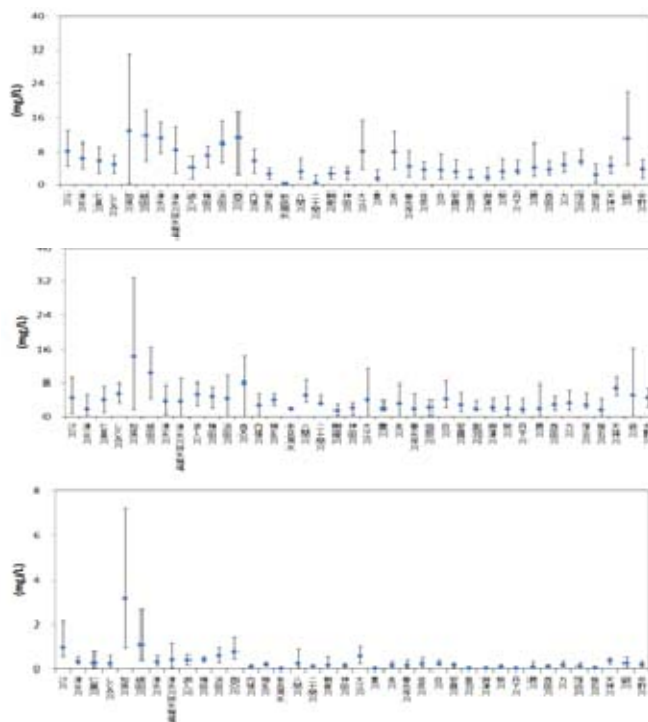


図9-3-1 平水時の河川濃度

### 9-3 結果と考察

#### (1) 河川からの流入負荷の特性

図9-3-1に各河川の水質項目(濃度 mg/L)の最低値, 最高値, 平均値を示した。河川の水質基準となる BOD, 富栄養化の原因とされる窒素(TN)とリン(TP)の値を示す。なお BODは2008年度のみ測定した。

BODは環境基準 AA 類型(1mg/L以下)を満たしている河川はほとんどなく, 平均値は環境基準 B, C 類型(3 mg/L, 5 mg/L以下)に属している河川が多いことがわかった。知原川,

紙田川, 西の川は平均値も他河川より高く, 非常に高濃度の時期もあるため特に注意が必要である。

TN に関しては, 汐川, 知原川, 紙田川, 西の川で平均値が 10mg/L 以上, 最高値は知原川で 32.5mg/L, 紙田川, 西の川で 18 mg/L となり非常に高濃度であった。全河川中最も高濃度であった知原川では 2008 年度の 7 月・9 月, 2009 年度の 9 月に特に高濃度であり, 他河川については 10 月に最高値となる河川が多く, 施肥期間中の土から流出した畑の肥料などが原因として考えられる。

TP に関しては知原川の濃度が平均 3.2mg/L, 最高 7.2mg/L と群を抜いて高濃度であった。他河川は平均が 0~1mg/L に収まり低い濃度であったといえるが, 汐川, 紙田川で最高 2mg/L を越える月があった。

図9-3-2に2009年10月7日~8日の降雨時イベントの雨量, 流量, 窒素, リンの時間変化を示した。降雨量は 58mm で7日の7時から降り始め, 7日の20時にピークの 10mm となった。流量のピークとほぼ同時刻に SS 濃度のピークがきていた。SS の平水時平均とピ

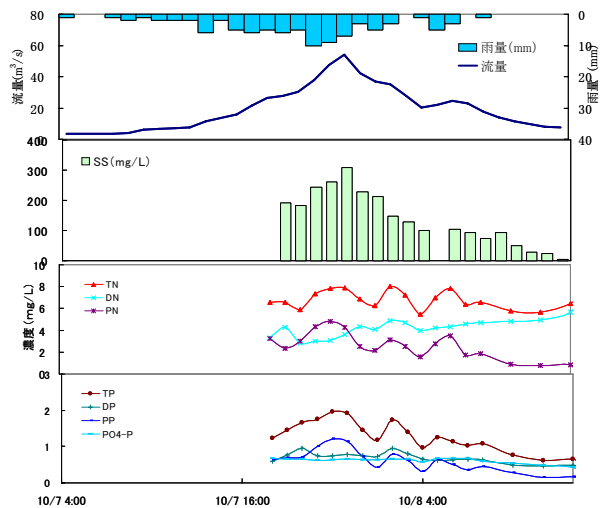


図9-3-2 降雨時の濃度変化

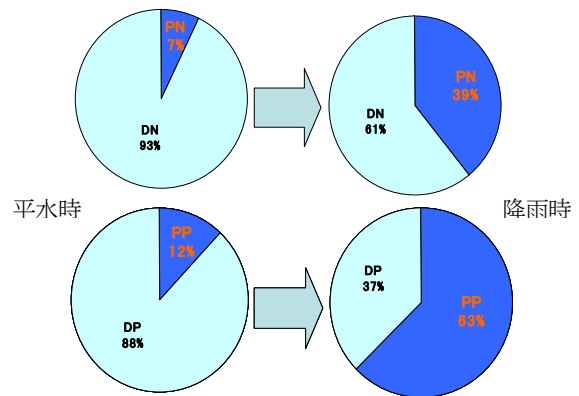


図9-3-3 平水時と降雨時の栄養塩の組成比

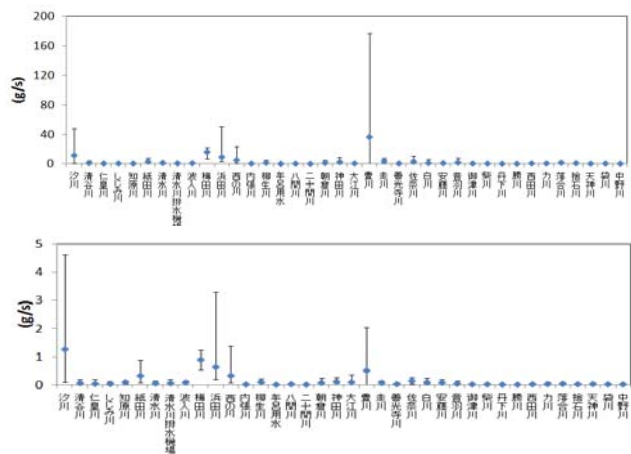


図9-3-4 平水時の河川流出負荷量

ーク時濃度は、4.2mg/L, 308 mg/L  
で約 73 倍の濃度で流出していた。

TN 濃度については流量のピーク後  
に濃度のピークがきていた。濃度は  
平水時平均, ピーク時でそれぞれ  
7.05mg/L, 8.01mg/L で約 1.1 倍の  
濃度となっていた。TP の濃度につ  
いては, ピークの濃度は流量のピー

クと同時刻で 1.95 mg/L, 平水時平均の 0.45 mg/L の約 4.3 倍であった。また, 図 9-3-3 に平水  
時と降雨時のリンの組成比のグラフを示した。平水時では, 溶存態として 88%を検出したが, 降雨時  
においては, 懸濁態として 63%検出した。このことから降雨時において栄養塩は懸濁物質とともに流出  
すると言える。

図 9-3-4 に平水時の TN, TP の平水時の流出負荷量(g/s)を示す。先述の濃度では知原川や紙  
田川で高濃度であったのに対し, TN 負荷量では汐川, 梅田川, 豊川, 佐奈川, TP 負荷量では汐川,  
梅田川, 豊川といった流量の多い河川で負荷量を多く流出している結果となった。

年間流出負荷量の算出には, 降雨時の流量増大に伴う栄養塩の流出特性を把握し, 負荷量の増大を  
考慮しなければならない。本研究では豊川・梅田川(各 5 回/2008~2010), 白川(2 回/2008), 西の  
川(3 回/2009・2010)で行った。表 9-3-1 に各イベントの総雨量, 一降雨あたりの負荷量と平水  
時との比較を示す。

イベント 1, 3, 5 は短期間集中型, イベント 2, 4 は長時間分散型の降雨であった。平水時の負荷量  
と比較すると, 降雨によって特にリンが多く流出していた。4 河川中, 特に西の川での流出負荷量の  
増加は顕著であり, イベント 2 の TN 負荷量は平水時の約 49 日, TP 負荷量では 150 日分を超える負  
荷量が流出しており, 降雨による影響が非常に大きいことがわかる。また, 西の川のイベント 1 と 2  
の総雨量は 13mm 程度であるが, 流出負荷量は TN が 10 倍以上, TP が約 3 倍の差があり, 雨量が  
同程度であっても降雨タイプの違いによって流出する負荷量の差は大きいことがわかる。

年間流出負荷量の算出には, 2008 年度 1 時間毎の連続データの得られた豊川, 梅田川については 4  
つの推定方法を用い, 評価を行った。

・推定方法①<濃度・流量一定法>: 月 1 回の調査日の流量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) と濃度  $c$  (mg/L) がその一ヶ月一  
定だと仮定して, 負荷量  $L$  (g/s)= $c \cdot Q$  より算出した。

・推定方法②<L-Q 式対数法>, ③<L-Q 式直接法>: 流量と負荷量に高い相関関係があることに着  
目した方法で(1)式を用いる。

$$L = a \cdot Q^n \quad (1)$$

( $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s),  $L$ : 流出負荷量 (g/s),  $a, n$ : 係数) 定期調査と降雨時調査における流量と水質成分負荷  
量の関係から  $a, n$  の係数を計算し, 1 時間毎の流量から負荷量を算出した。推定方法②では式(2)の  
回帰直線として求めた。

表 9-3-1 降雨時調査日データと一降雨あたりの負荷量

河川		日時	雨量(mm)	TN負荷量(t)	TP負荷量(t)	TN平水時日	TP平水時日
豊川	イベント1	2008/8/28	93	367	2.4	13.8	57.9
	イベント2	2008/9/18~9/21	68	11.7	0.5	4.4	12.1
	イベント3	2009/8/9~9/14	19	152	1.1	4.5	11.3
	イベント4	2009/10/7~10/8	56	762	4.2	22.5	43
	イベント5	2010/10/30~10/31	34	334	2.8	7	36
梅田川	イベント1	2008/8/28	227	11.8	7.2	5.2	56.6
	イベント2	2008/9/19	54	96	5	4.3	38.6
	イベント3	2009/8/9~9/11	43	57	0.9	5.3	13.9
	イベント4	2009/10/7~10/8	58	136	2.7	12.7	41.7
	イベント5	2010/10/30~10/31	69	103	1.7	13.4	30.7
白川	イベント1	2008/8/28	93	14	0.7	7.5	54
	イベント2	2008/9/19	68	12	0.2	6.4	154
西の川	イベント1	2009/8/9~9/11	43	12	0.9	4.3	57.9
	イベント2	2009/10/7~10/8	58	136	2.4	48.9	154.3
	イベント3	2010/10/30~10/31	69	53	0.9	25.5	89

$$\log L = \log a + n \cdot \log Q \quad (2)$$

推定方法③は調査時の流量Qと負荷量Lから直接二乗法により試行錯誤的に係数の最適解を求めた。nの値によって流出負荷量は、n>1で「溶脱型」、n=1で「濃度一定型」、n<1で「希釈型」に分類される。

・推定方法④<ΣL・ΣQ法>：降雨による影響を考慮した年間負荷量を算出するため、降雨の影響と関係なく常に流出している成分(基底流量, 基底負荷量)と降雨により増加して流出する成分(累加流量, 累加負荷量)がある。推定方法④は調査日で降雨の影響がないと考えられる日の負荷量の平均値から基底負荷量を求め、降雨の影響で増加した負荷量を加え年間負荷量を算出する方法である。豊川, 梅田川, 西の川, および中小河川の年間流出負荷量の算出に用いた。

図9-3-5に豊川のL-Q式の対応性を示す。二つの方法でも推定方法③直接法が高流量時に多く流出する水質特性のN,Pを評価できており最も正值に近い値となると考えられる。

表9-3-2に各河川推定方法別の算出結果を示す。推定方法①は濃度、流量変化が考慮されていないため、調査当日の数値に依存し、負荷量が過小評価になったり過大評価になったりした。推定方法④は豊川では、TNは約1.5倍、TPは約4.5倍、梅田川ではTNは約2.7倍、TPは約4.5倍多く算出されたが、推定方法③④との差が大きく、豊川は過大評価、梅田川は過小評価されていると考えられる。推定方法④は、平水時の値を基底負荷量とするため、晴天降雨を考慮していない2008年度、2009年度の調査値では、誤差がでるといえる。また、降雨時に増加する負荷量を評価できるが、様々な降雨条件で多くの降雨時調査が必要であり、現実的には採用しにくい方法である。

つまり、推定方法③④のL-Q式から算出した負荷量は流量、濃度変化を考慮できており、正值に近くなるといえる。

## (2) 水路内の水質の特性

以下では、8月の観測結果をもとに三河港水路内での貧酸素水塊の特性と栄養塩濃度の変化について考察する。7月から8月にかけての気象条件は、7月中旬の梅雨明けから7月28日までは降雨もな

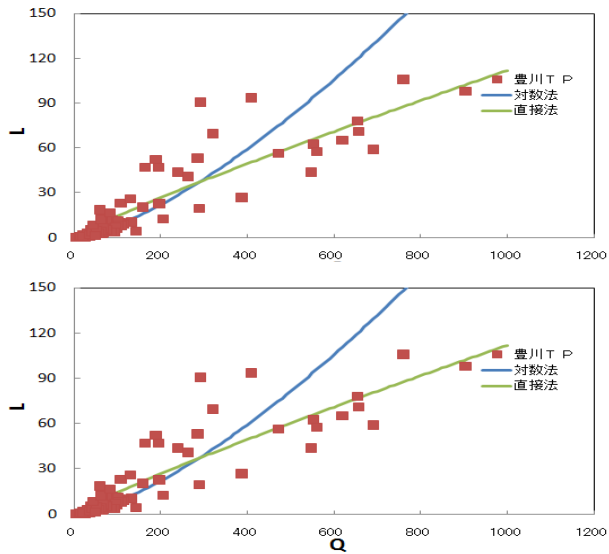


図9-3-5 豊川におけるL-Q曲線

表9-3-2 推定方法別負荷量(t/year)

2009年度		①	②	③	④
豊川	TN	1275	1555	1890	1964
	TP	38	75	137	168
	Q(m³/year)	1.2 × 10 <sup>9</sup>	3.3 × 10 <sup>8</sup>		***
2009年度		①	②	③	④
梅田川	TN	271	1449	1212	756
	TP	18	276	171	84
	Q(m³/year)	4.6 × 10 <sup>7</sup>	2.3 × 10 <sup>8</sup>		***

く安定した猛暑が続いていたが、7月29、30および8月10日前後に雨が降った。特に8月12日は台風の影響でまとまった雨と強風が観測されている。その後は再び安定した猛暑が続いた。

図9-3-6は、水路内の観測点 Stn.17 における、8月の3回の観測日における溶存酸素飽和度の鉛直分布を示したものである。これより、水路内の溶存酸素濃度の鉛直分布は気象条件の変化に対応して大きく変動していることがわかる。小雨安定期末期の8月1日では、表層で高いDOと4m以深の貧酸素水塊の形成が特徴的で、明確な2層構造を有しているのに対し、まとまった降雨と強風の影響を受けた8月13日にはかなり鉛直混合が進み、底層の貧酸素水塊が表面まで上昇して表層のDO濃度がかなり低下するとともに底層のDO濃度が上昇している。この混合は気候の安定とともに次第に安定化に向かい、8月23日には再び底層に貧酸素水塊が形成されている。このように、流入河川につながる水路内では貧酸素水塊の構造は時間的に大きな変化を示すことがわかった。

図9-3-7は、図9-2-2に示した海域の観測点で採水したサンプルの栄養塩濃度のうち、8月に実施した3回の観測における溶存態リン濃度(DP)の分布を示したものである。図には、観測点毎に表層(UP)および底層(Low)の濃度を示してある。これらの図より、いずれの日においても、港内(ST12-ST18)のリン濃度は豊川河口沖(ST3-ST10)に比べて高くなっており、港奥すなわち河口部(ST15: 汐川河口部, ST18: 梅田川および柳生川河口部)に近いほど高い値を示していることがわかる。時間的な変化については、8月1日にはそれまでの小雨と安定した天候のためにリン濃度は低い値を示しているが、降雨後の河川水の流入により、豊川河口沖および港内ともにリン濃度が上昇している。また、安定期には表層のリン濃度が非常に小さいのに対し、降雨後には特に港内の観測点で表層のリン濃度が著しく上昇している。これは、港内に流入する河川からの供給が非常に大きいことを意味している。8月11日から23日の変化を見ると、全体的に表層の濃度が低下し底層の濃度が増大している。これは、栄養塩の流入後に発生した植物プランクトンの分解によるものと考えられる。

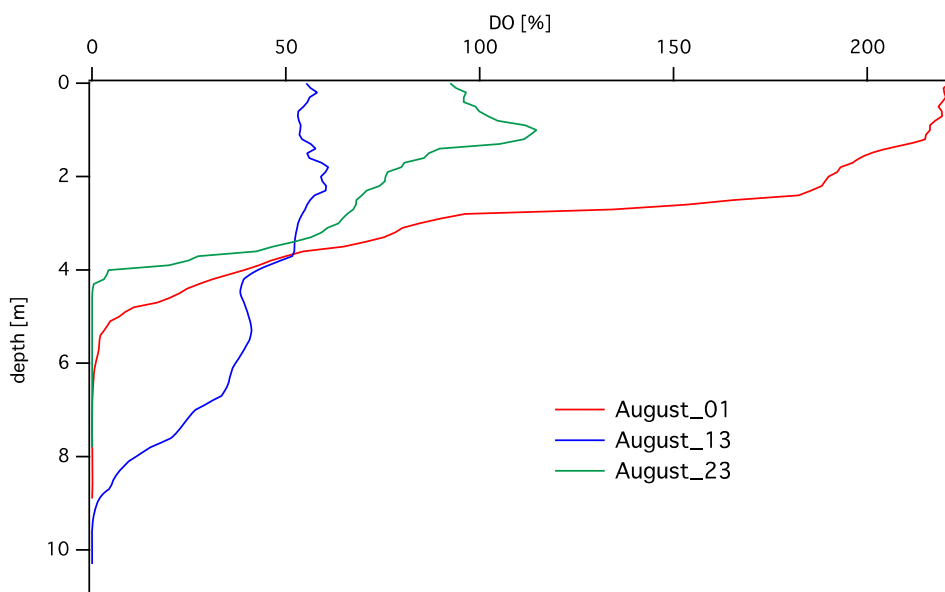
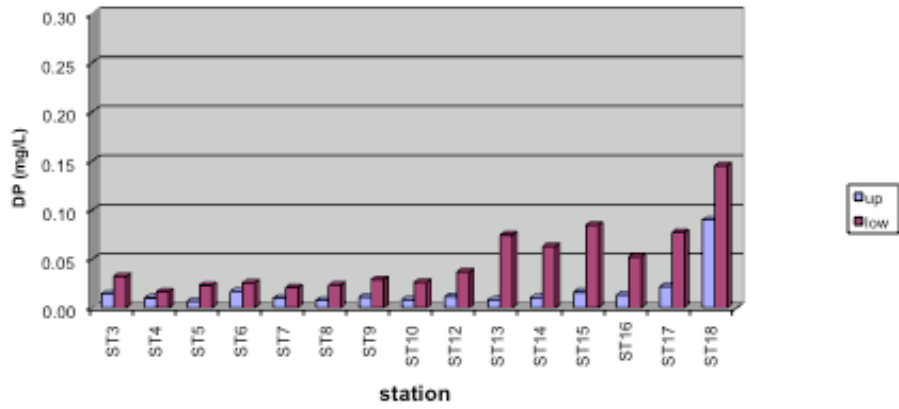
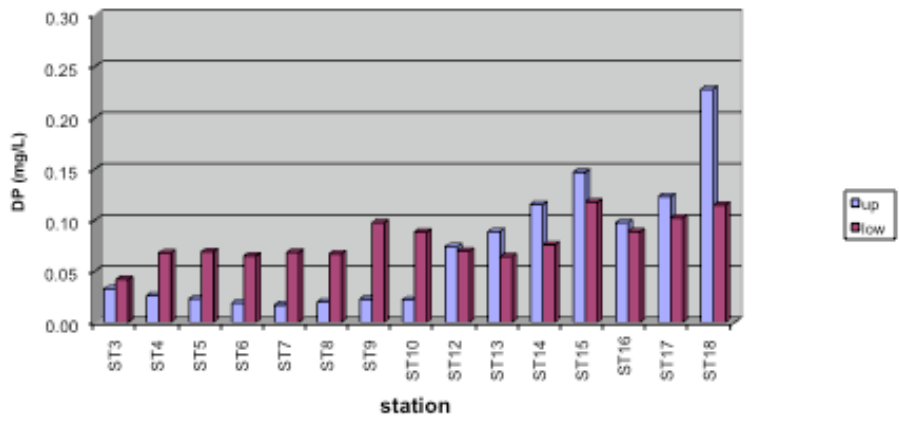


図9-3-6 8月の水路内 Stn. 17 での溶存酸素飽和度 (DO) の鉛直分布

2010 August 01



2010 August 11



2010 August 23

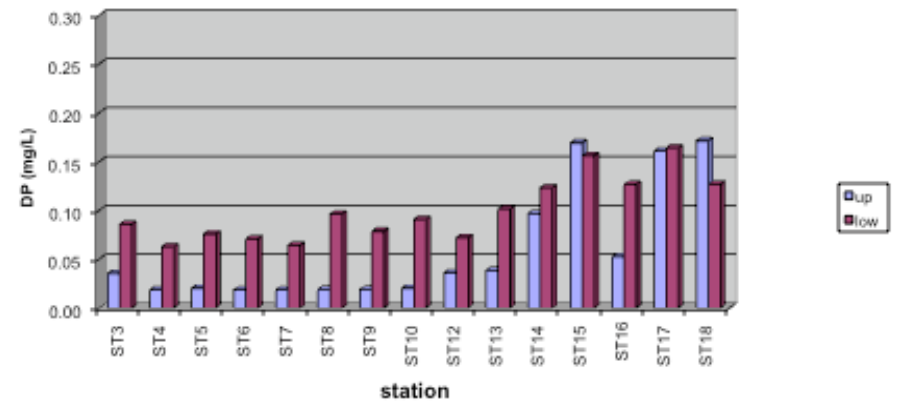


図9-3-7 海域での8月の溶存態リン濃度の分布状況