

## 5. 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

建築・都市システム学系 客員教授 青木 伸一, 教授 井上 隆信

### 5-1 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・水路内では夏期には慢性的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、発生のメカニズムや影響範囲を明らかにする必要がある。

湾内の水質汚濁の原因には流入する河川流域や沿岸域における産業活動や、生活の影響が大きいといわれているが、陸域からの発生負荷量は水質総量規制によって減少傾向にある。しかし、現状では三河湾の水質改善は見られない。この原因として考えられるのが非特定汚染源からの流入負荷量の推定方法である。現在の推定方法は平水時の調査結果を用いて算出しているが、降雨時に多くの栄養塩物質が流出するという報告があり、必ずしも正確な値が用いられていない可能性がある。そのため正確な発生負荷量を降雨時調査によって明らかにする必要がある。昨年度はモデルによる推定手法について示したが、本年度は詳細な調査に基づく正確な負荷量算定手法について検討を行った。

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、貧酸素水塊の発生メカニズムの解明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、港外への移流・拡散による周辺海域への影響などについては未だほとんど明らかにされておらず、今後の重要な研究課題と言えよう。平成 23 年度の調査により、港内には夏期に大規模な貧酸素水塊が発生することが明らかになったが、その影響が干潟域まで伝播して苦潮が発生しているのではなく、風の作用を受けて東西方向に振動する内部波の影響により貧酸素水塊が干潟上に遡上するのではないかと推論された。そこで本年度は、豊川河口沖に 2 点の連続観測点を設けるとともに、短期間の集中的な調査を行って、貧酸素水塊の挙動を把握する目的で調査を実施した。

### 5-2 栄養塩流入負荷量の算定方法

#### (1) 対象地域

図 5-2-1 に示す調査河川である梅田川は、愛知県東部の豊橋市雲谷町を源流とし、豊橋市を東西に横断している。一年を通じて晴天日が多く平均気温が 16℃前後、降水量 1,400~1,700 mm と比較的温和な気候帯である。また、豊川用水が整備され、水田のほか、キャベツやハクサイなどの露地野菜、メロンや花木などハウス栽培、ウズラなどの畜産など農業が盛んな地域である。調査地点までの流域面積は 57.0 km<sup>2</sup>であり、土地利用は、畑地 28.7 km<sup>2</sup>、水田 9.58 km<sup>2</sup>、果樹園 1.32 km<sup>2</sup>、建設用地 9.25 km<sup>2</sup>と畑地が流域の約 50 %を占めている。南側の支川は流域に広域に畑地が広がっており、降雨時には畑地の土壌が濁水となって河川へ流入している。

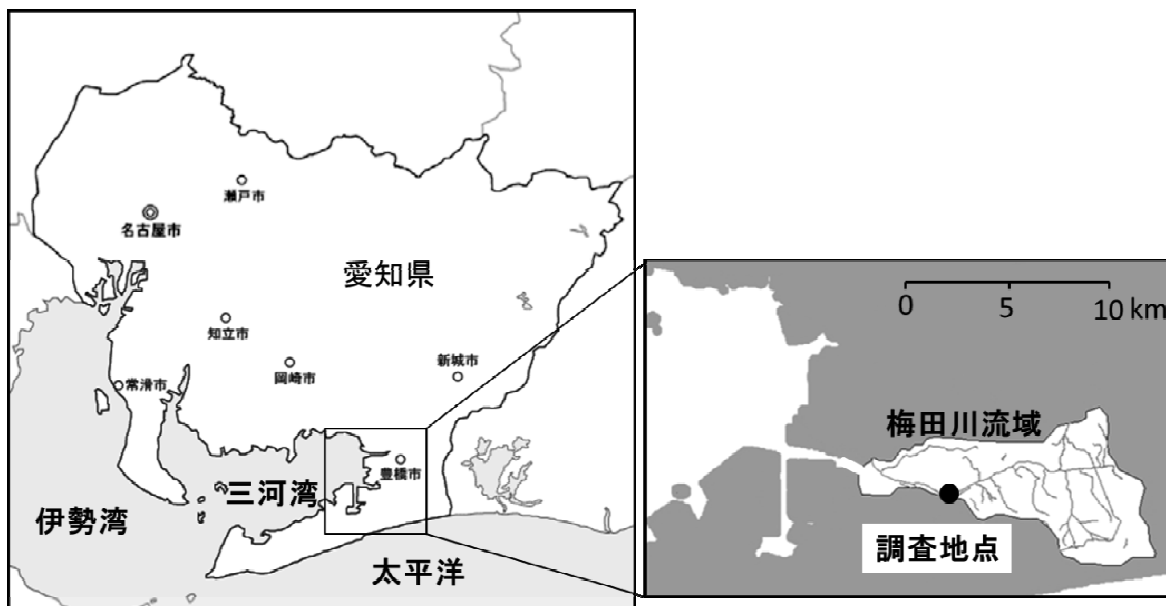


図 5-2-1 対象流域

## (2) 流入負荷量算定調査の概要

調査期間を 2010 年 4 月から 2011 年 3 月の 1 年間とし、潮汐の影響を受けない河口から約 7 km 上流の畑田橋（北緯 34°42'35.7″，東経 137°23'47.1″）において実施した調査を用いた。本調査では、自動採水器を用い、定期調査用の自動採水器は 1 日 1 回採水するように設定し、1 週間に 1 回試水を回収した。降雨時にも採水したため、平水時調査でなく、定期調査とした。採水器のトラブルで一部採水できなかった日を除き年間の 73%に相当する 268 日の試料を採水した。一方、降雨時調査は、降雨に伴い水位が 10cm 上昇すると採水するように自動採水器を設定し、その後採水開始から 1～3 時間ごとに 1 回採水し、試水は速やかに回収した。調査は全 18 回（37 日）実施し、合計 396 回採水した。

また、調査地点には、水位計を設置し、水位は 10 分毎の平均値をデータロガーに記録し、定期的にデータを回収した。この水位データから流量を算出するために、試水回収の際に流量を測定し図 5-2-2 に示した水位流量曲線を求め、これをもとに 10 分間平均流量を算定した。降雨時流量実測の最大値は 9 月 16 日の水位 1.83 m，流量 88.2 m<sup>3</sup>/sec であり、観測した水位の最大値は 2.01 m と流量測定時の最大水位の 1.1 倍程度であった。このため、この水位流量曲線を用いて水位から流量を算定することは妥当であると判断した。

## (3) 水質分析

試水は、全窒素（TN）及び全リン（TP）分析用の試料を分取後、100℃で 2 時間焼いたガラス繊維ろ紙（GF/F Whatman）でろ過した。ろ液は溶存態窒素（DN），溶存態リン（DP）の測定をした。

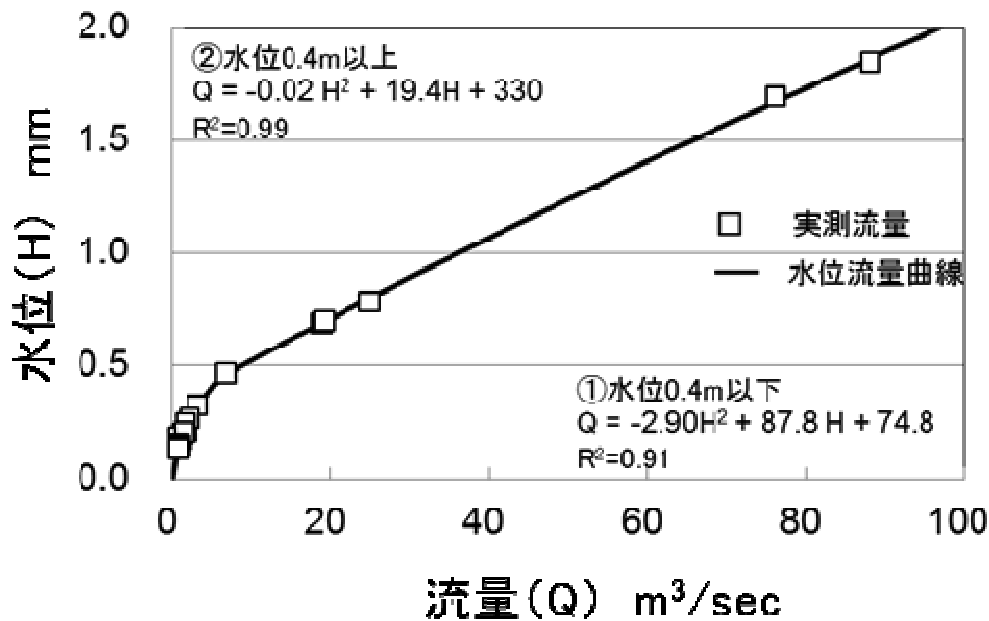


図 5-2-2 水位流量曲線

TN 及び DN は JIS K010 に準じて測定した。TP 及び DP は JIS K0102 に準じて前処理後、リン酸態リンとしてオートアナライザー（Bran+Luebbe）を用いてモリブデンブルー（880nm）法で測定した。

#### （４）梅田川の水質

定期及び降雨時調査の TN 及び DN, TP 及び DP 濃度の経日変化を図 5-2-3 に示す。また、定期調査での TN, DN, TP, DP の最大濃度、最小濃度、平均濃度及び標準偏差を表 5-2-1 に示す。この値は三河湾の環境基準値（Ⅲ類型：TN0.6 mg/L 以下、TP0.05 mg/L 以下）と比べて 10 倍以上高い値であった。TN 及び DN の濃度は、4 月から 6 月にかけて流量が増加するのに伴い低下し、流量が減少する 10 月に上昇した後、12 月から 1 月にかけては高く推移していた。この期間の平均濃度は TN で 10.7 mg/L, DN で 9.1 mg/L と全期間の 1.2 倍高い値となっていた。TN に占める DN は約 90 % と大部分が DN で存在していた。TP に占める DP は約 70 % で窒素と比べて懸濁態の割合が高く、窒素ほど顕著な季節変化は見られないものの、12 月から 2 月にかけて 1.14, 1.08 倍とわずかに濃度が上昇していた。

閉鎖性海域での植物プランクトンの増殖には様々な要因があるが、河川からの影響は窒素及びリンである。特に、無機態窒素やリンは直接藻類等の栄養源として吸収されることが知られており、その変動は藻類の消長に密接な関係を有しているといわれている。そこで、NP 比について質量比で検討したところ、TN/TP 比が年間の平均 15.1, DN/DP で 17.3 でありいずれも窒素過多であった。流量が少なくなる 12 月では TN/TP 比が 24.2, DN/DP 比が 25.1 と更に窒素が過剰に存在していた。

上述したように 1 年を通じて流量は一定ではないため、採水時刻の流量（m³/sec）と濃度（mg/L）

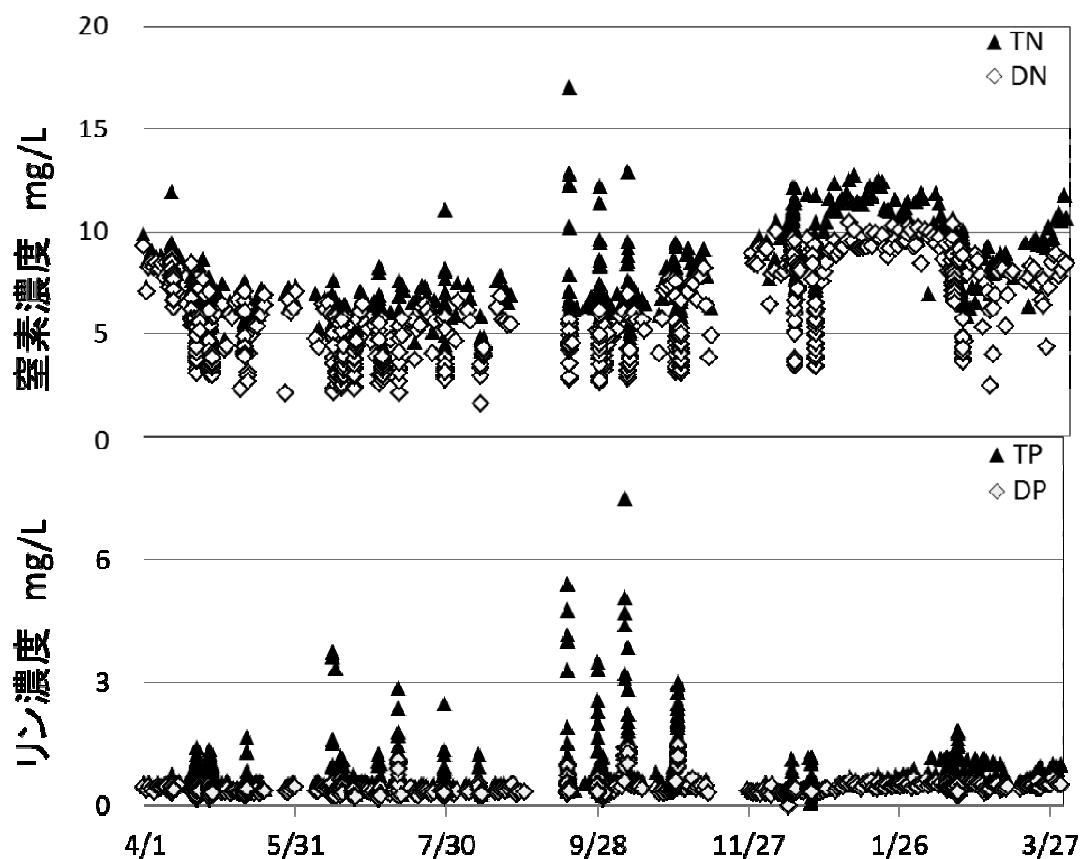


図 5-2-3 窒素・リンの経日濃度変化

表 5-2-1 水質分析結果(定期調査)

|      | 濃度 mg/L |      |      |      | 負荷量 g/sec |      |      |      |
|------|---------|------|------|------|-----------|------|------|------|
|      | TN      | DN   | TP   | DP   | TN        | DN   | TP   | DP   |
| 最大値  | 12.7    | 10.4 | 1.16 | 0.66 | 105       | 58.9 | 8.70 | 5.40 |
| 最小値  | 4.28    | 2.10 | 0.32 | 0.23 | 5.05      | 2.19 | 0.27 | 0.24 |
| 平均値  | 8.37    | 7.22 | 0.59 | 0.41 | 10.2      | 7.99 | 0.75 | 0.51 |
| 標準偏差 | 1.94    | 1.80 | 0.19 | 0.08 | 7.77      | 4.34 | 0.68 | 0.42 |

を掛け合わせた負荷量 (g/sec) を算出し、TN、DN、TP、DP の経日変化を図 5-2-4 に示した。定期調査時の最大値、最小値、平均値及び標準偏差を表 5-2-1 に示した。平均値は TN で 10.20 g/sec、DN で 7.99 g/sec、TP で 0.75 g/sec、DP で 0.51 g/sec であった。負荷量の分布について検討したところ、標準偏差は TN で 7.77、DN は 4.34、TP は 0.68、DP は 0.42 であり、懸濁態において分布にばらつきがあるため、TN、TP で値が大きくなった。図 5-3-1 に示した流量と負荷量の関係からも、降雨に伴い流量が増加すると負荷量が増加することがわかるが、それを除く定期調査の結果から負荷量は年間を通じて濃度変化のような経日変化は見られなかった。このことは、汚濁発生量は一年を通じて一

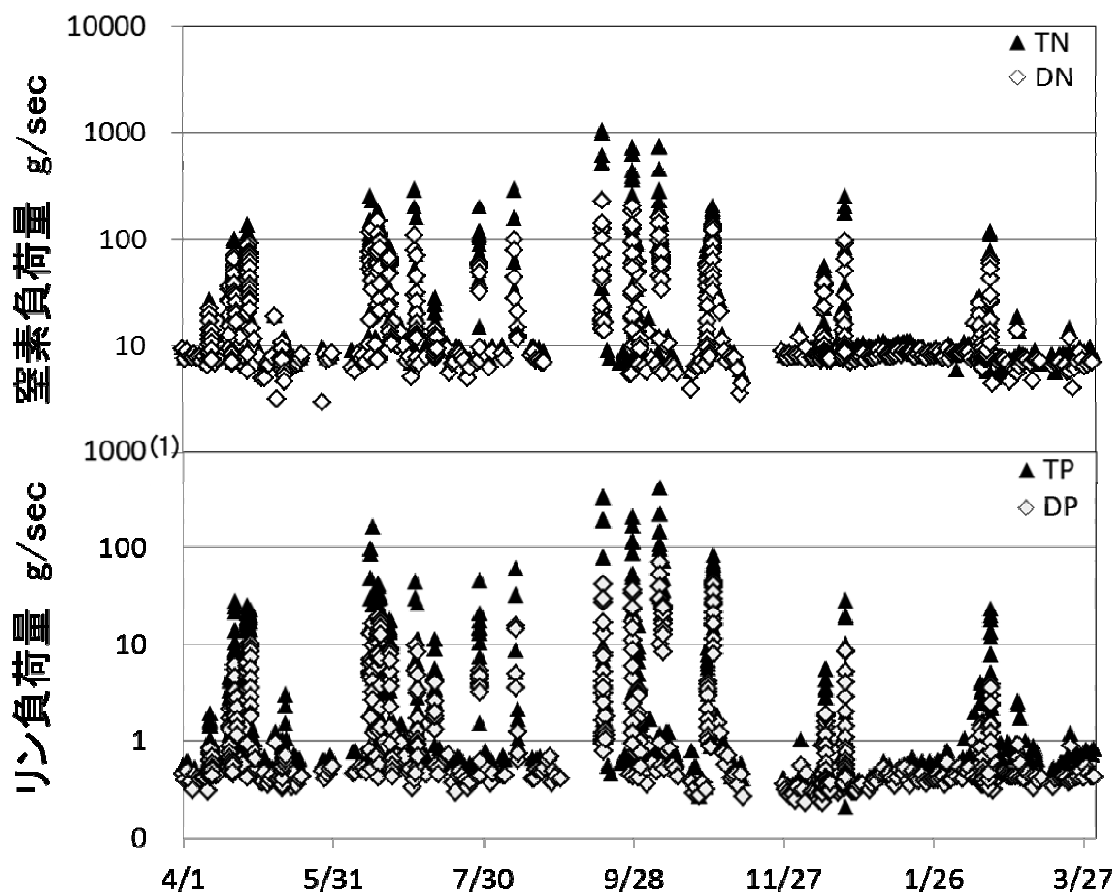


図 5-2-4 窒素・リン負荷量の経日変化

定であり、梅田川の水質は、流量の変化に依存していることが明らかとなった。

### 5-3 流入負荷量の算定

$L=aQ^n$  の関係式を仮定して、回帰により  $a$ ,  $n$  を求めた。 $n$  の値によって流出負荷量は  $n>1$  で「溶脱型」、 $n \div 1$  で「濃度一定型」、 $n<1$  で「希釈型」に分類できる。線形回帰より非線形回帰を用いる方が実測値に近ことが知られおり、推定法 1, 2 により検討した。

推定法 1 は、 $L=aQ^n$  式を両辺に対数を取り、 $\log L = \log a + n \log Q$  の線形回帰により  $a$ ,  $n$  を決定した。求めた回帰式に連続流量の値を代入し  $Q$  の時系列データにし、年間で積算して算出した。

推定法 2 は  $L=aQ^n$  の形のまま回帰し、直接最小二乗法により誤差の総和を求め最小となるように  $a$ ,  $n$  の値を決定した。推定法 1 と同様に回帰式に連続流量を代入し  $Q$  の時系列データにし、年間で積算することにより算出した。

推定法 1 で算出した年間比負荷量は、TN で 7.3 t/year/km<sup>2</sup>、TP で 1.0 t/year/km<sup>2</sup> であり、推定法 2 では、TN で 5.4 t/year/km<sup>2</sup>、TP で 1.1 t/year/km<sup>2</sup> であった。窒素負荷量は推定方法 2 が推定方法 1 より小さい結果となったが、図 5-3-1 に示すように、低流量時に、負荷量と  $LQ$  式の関係は、TP で

は分布に即して近似されているが、TN では流量に対して負荷量が小さく算出されていた。そのため、この LQ 式にて算出した TN 年間負荷量は約 70% と過小に評価されたことがわかった。

そのため、推定法 3 として、推定法 2 の係数  $a$ ,  $n$  を①定期調査と②降雨時調査に分けて算定し、①式と②式の交点  $x$  を求めた。連続流量データを代入する際、 $Q < x$  の時は①にて算定した係数を、それ以上の時は②にて決定した係数を代入して  $Q$  の時系列データにし、年間で積算することにより算出した。推定法 1～3 に用いた LQ 式の係数  $a$ ,  $n$  を表 5-3-1 に示した。

推定法 1 では、TN、TP ともに実測値が多い低負荷量に依存しており、TN は希釈型、TP は溶脱型に分類された。それに対して、推定法 2 では、TN、TP の  $n$  の値がそれぞれ 1.42, 1.70 と「溶脱型」に分類され、流量増大に伴う高負荷量を反映していた。推定方法 3 では、低流量時は  $n$  の値が TN では 0.88, TP では 0.91 と希釈型であるのが、高流量時は TN では 1.65, TP では 1.68 と溶脱型になっており、降雨に伴う流量増大時には負荷量が大きくなることが反映された結果となった。

推定方法 3 では、一つの LQ 式では対応できなかった TN 負荷量と LQ 式の関係を保流量時において分布に即して近似されており、高流量時においては、より高負荷量に近似され実測に即した結果が得られた。この二つの LQ 式にて算出した TN 年間比負荷量は 8.9 t/year/km<sup>2</sup> であり、TP 年間比負荷量は 1.3 t/year/km<sup>2</sup> となった。

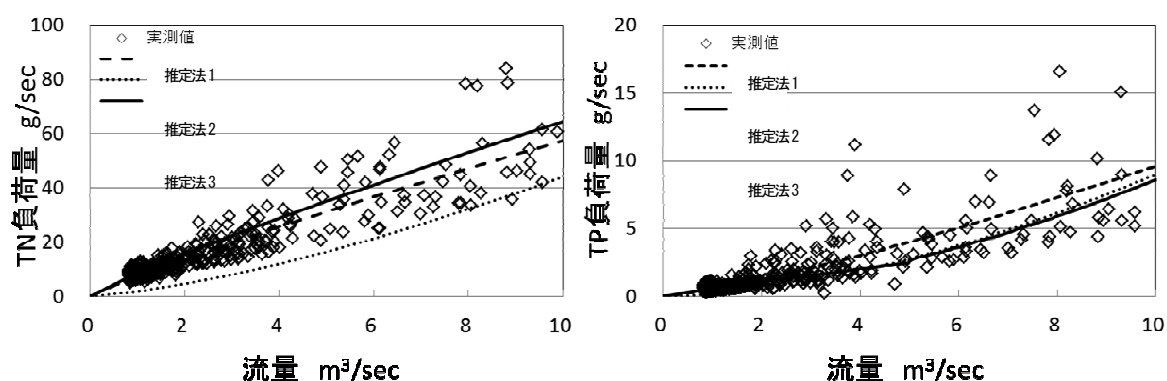


図 5-3-1 流量と負荷量の関係

表 5-3-1 LQ 式の係数

|    |     | 推定法 1 | 推定法 2 | 推定法 3                           |                              |
|----|-----|-------|-------|---------------------------------|------------------------------|
|    |     |       |       | $\leq X \text{ m}^3/\text{sec}$ | $X \text{ m}^3/\text{sec} <$ |
| TN | $a$ | 7.58  | 1.68  | 8.51                            | 0.69                         |
|    | $n$ | 0.88  | 1.42  | 0.88                            | 1.65                         |
| TP | $a$ | 0.53  | 0.18  | 0.58                            | 0.18                         |
|    | $n$ | 1.26  | 1.70  | 0.91                            | 1.68                         |

#### 5-4 海域調査の概要

海域での調査は、図 5-4-1 に示す地点で 2012 年 8 月 10 日から 9 月 29 日の期間に実施した。図中の St.A および St.B には後述する計測器を設置して、期間中連続して観測を行った。また、St.1～St.12 では、船上から計測器を投入して水質データを取得するスポット観測を実施した。

スポット観測の実施日は、8/10, 8/17, 8/26, 8/27, 8/31, 9/9, 9/15, 9/22, 9/28, 9/29 の計 10 日である。ただし、8/10 と 9/29 を除くすべての日で、水質の空間分布の時間変化を見るために、午前と午後の 2 回観測を実施した。

連続観測用の機器の設置状況を図 5-4-2 に示す。クロロフィル蛍光値、塩分、水温、DO などの水質項目は 10 分間隔、水圧は 1 分間隔で計測・記録した。流速プロファイルについては、鉛直方向に 1 m 間隔で 1 分平均流速を 10 分間隔で観測・記録した。スポット観測の観測点は豊川河口から沖に向けて約 1 km 間隔で 8 点 (St.1～St.8, St.5 は St.B と同一)、豊川河口から港の入口まで南北ライン上に 5 点 (St.A, St.9～St.12)、の計 13 点で実施した。観測は、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 (蛍光値)、濁度、溶存酸素濃度の鉛直プロファイルを計測した。なお、1 日 2 回観測を実施する場合は、概ね、午前中の観測は 8 時前後に、午後の観測は 14 時前後に実施している。

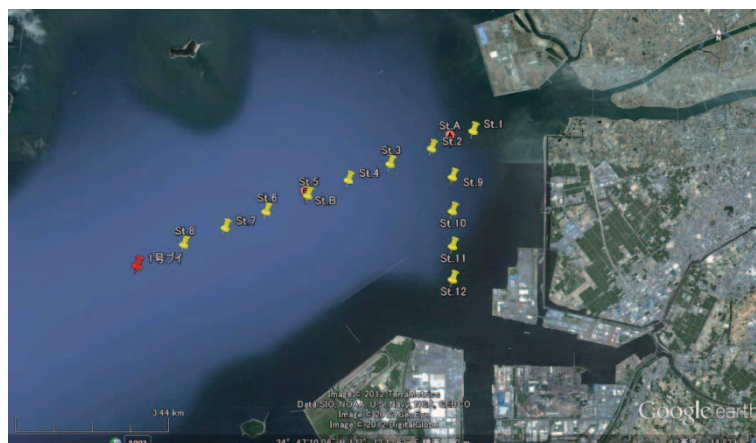


図 5-4-1 水質観測地点 (図中 St. A, B が連続観測点)

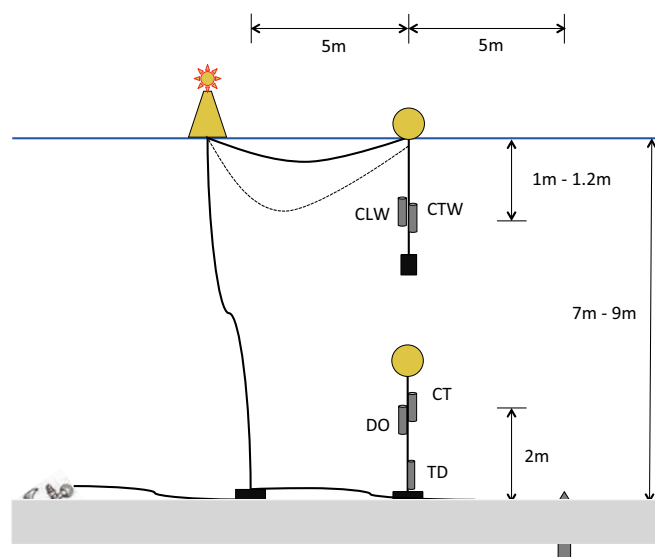


図 5-4-2 連続観測機器の設置概要

CLW : クロロフィル a 濃度・濁度計, CT (W) : 塩分・水温計,  
DO : 溶存酸素濃度計, TD : 水圧計, ADCP : 流速プロファイラー

## 5-5 海洋調査の結果と考察

### (1) 連続観測結果

まず、St.A および St.B での連続観測結果について示す。図 5-5-1 は、St.A および St.B での水位（水深）および海底面（海底直上）における水温の観測期間中の変化を示したものである。なお、St.B については、9/28 の観測時に計測ブイが北西方向に約 400 m 移動していることがわかった。データから、9/22 の夕方に漁船により引きずられたものとみられる。したがって、9/22 以降は観測地点がやや異なっている。これより平均水深を求めると、St.A が 7.4 m、St.B が 9.6 m であった。水温については、両地点の水深の違いから観測当初は 2 °C 程度の差が見られるが、9/18 前後でその差がほとんどなくなっている。これは、台風の影響 16 号の気象擾乱によるものと思われる。

図 5-5-2 は St.A での表層（水面下 1 m）と底層（海底面上 2 m）の塩分と水温の変化を示している。ただし、底層塩分については生物付着による劣化が激しく、信頼性が低い。表層塩分については、期間中降雨が非常に少なかったため、高塩分のまま推移していることが分かる。図 5-5-3 は、同様に St.B での表層（水面下 1 m）と底層（海底面上 2 m）の塩分と水温の変化を示したものである。底層塩分についても、高塩分が続いていたことが分かる。

図 5-5-4 は、St.A および St.B での底層溶存酸素飽和度の変化を示したものである。平均水深 9.6 m の St.B では、8 月中旬から 9 月中旬までの期間、ほとんど貧酸素あるいは無酸素状態が継続していることがわかる。一方、河口に近い平均水深 7.4 m の St.A では、8 月 19 日～21 日の間は無酸素状態となっているものの、それ以外では酸素濃度の変動は大きいものの、長期間無酸素状態が続くことはなかった。

図 5-5-5 は、St.A および St.B でのクロロフィル蛍光値の変化を示したものである。観測期間中、例年に比べて透明度が高く、全般的にクロロフィル濃度は低い値を示した。

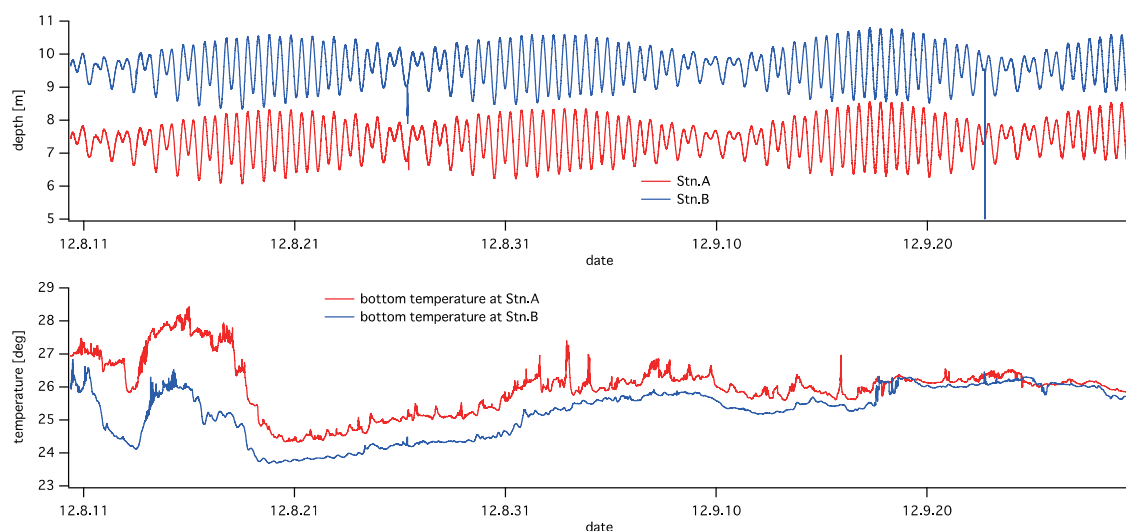


図 5-5-1 St. A および St. B での水位，海底水温の変化



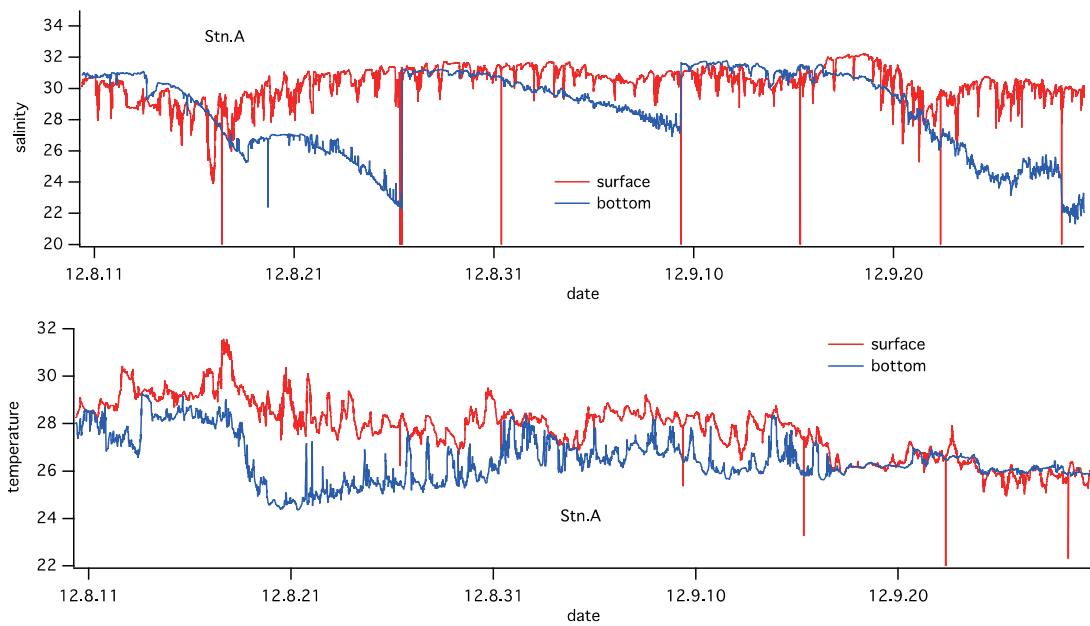


図 5-5-2 St. A での塩分と水温の変化

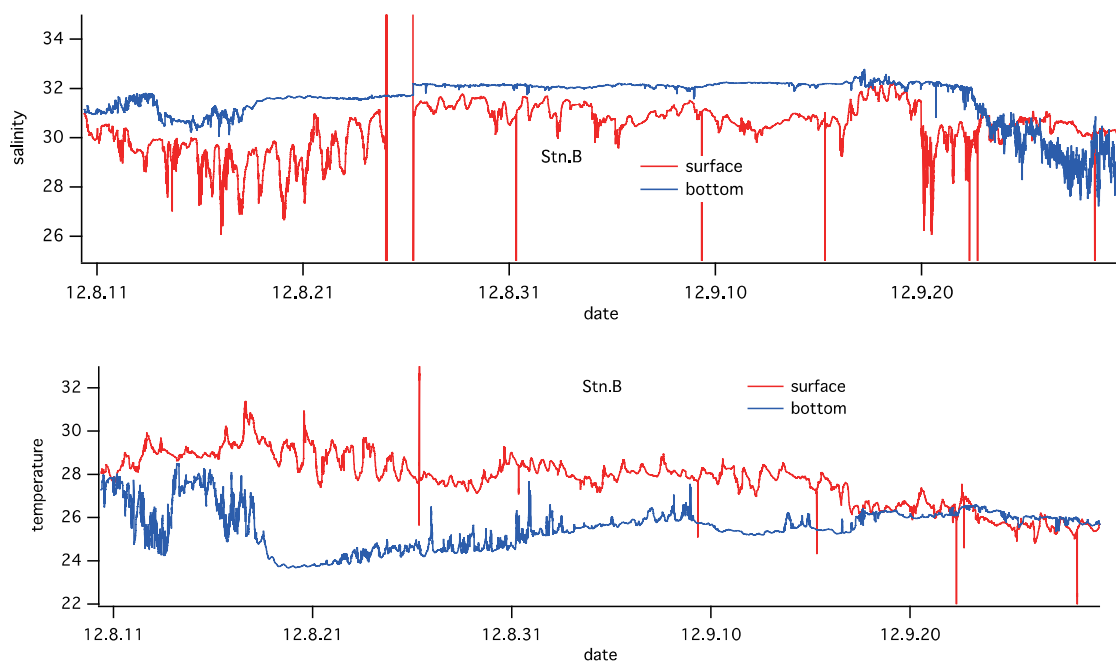


図 5-5-3 St. B での塩分と水温の変化

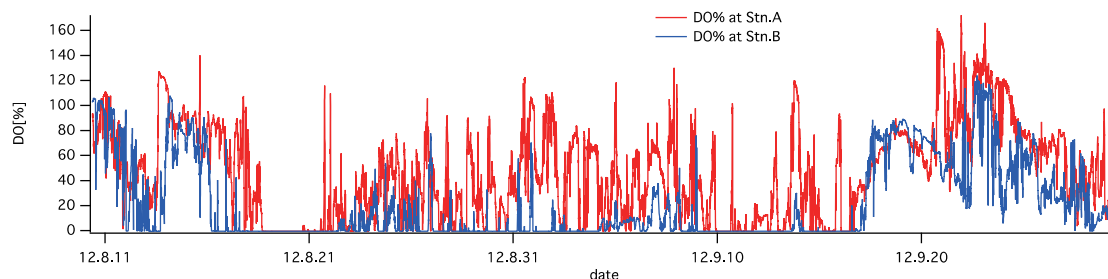


図 5-5-4 St. A および St. B での溶存酸素飽和度の変化

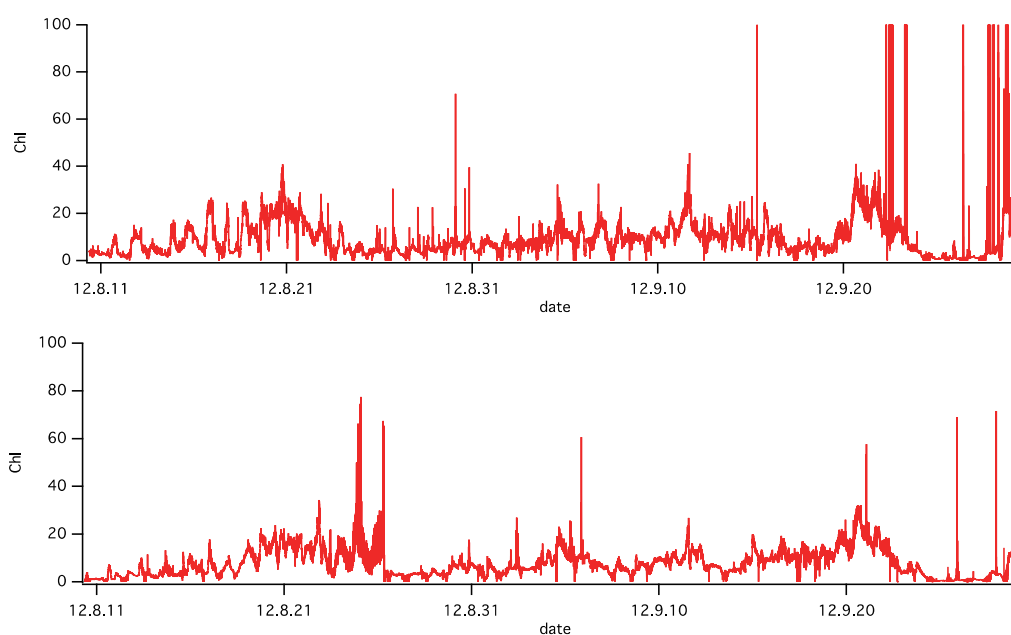


図 5-5-5 St. A (上) および St. B (下) でのクロロフィル蛍光値の変化

## (2) 水質分布特性

以下では、スポット観測のデータを用いて水質分布特性を示す。図 5-5-6～図 5-5-13 は、スポット観測を実施した 10 日間のうちの 8 日間について、溶存酸素濃度 (DO) の分布を示したものである (1 日 2 回観測した場合は午前中のデータを使用した)。2 つのコンター図は、それぞれ、St.1～St.8 までの豊川河口から沖合に伸びるライン上の断面、および St.A から St.12 まで南に伸びるライン上の断面について示している。図中、横軸の距離は、それぞれ St.1 および St.A からの距離である。底層の貧酸素水塊 (2 ppm 以下の水塊) の変動に着目すると、その水量の増減は、豊川河口ラインおよび南北ラインとも同様の変化を示していることがわかる。今年度は降雨が少ないため密度成層の発達が弱く、全体的に貧酸素水塊の規模が小さかった。観測期間中、貧酸素水塊が最も発達したのは 9 月 9 日および 9 月 15 日付近であるが、図 5-5-4 を見ると、この期間でも St.A の DO にはかなりの時間変動が見られる。このことは、河口付近では貧酸素水塊は安定して存在するのではなく、外力の作用に対応して常に動いていることを意味している。

次に、貧酸素水塊の時間変動を見るために、8 月 26 日 (午前、午後) および 8 月 27 日 (午前、午後) の 4 回を比較して、図 5-5-14 に示した。これからも、水塊の変動が確認できる。

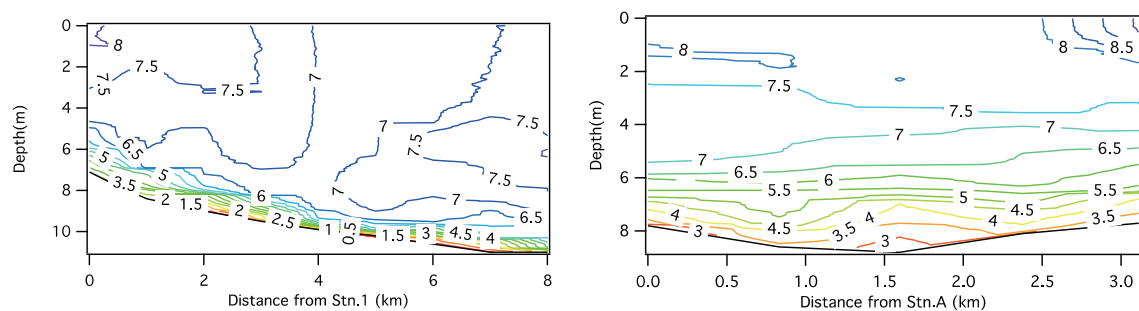


図5-5-6 8月10日の溶存酸素濃度の分布（左：豊川河口ライン，右：南北ライン）

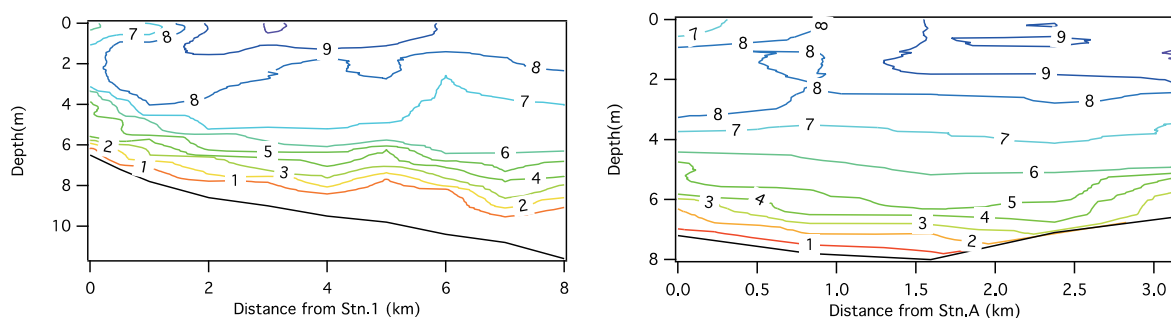


図5-5-7 8月17日の溶存酸素濃度の分布（左：豊川河口ライン，右：南北ライン）

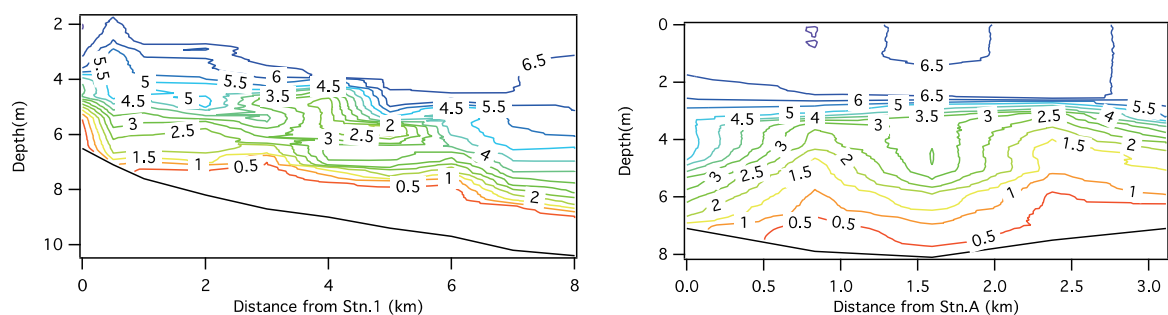


図5-5-8 8月26日の溶存酸素濃度の分布（左：豊川河口ライン，右：南北ライン）

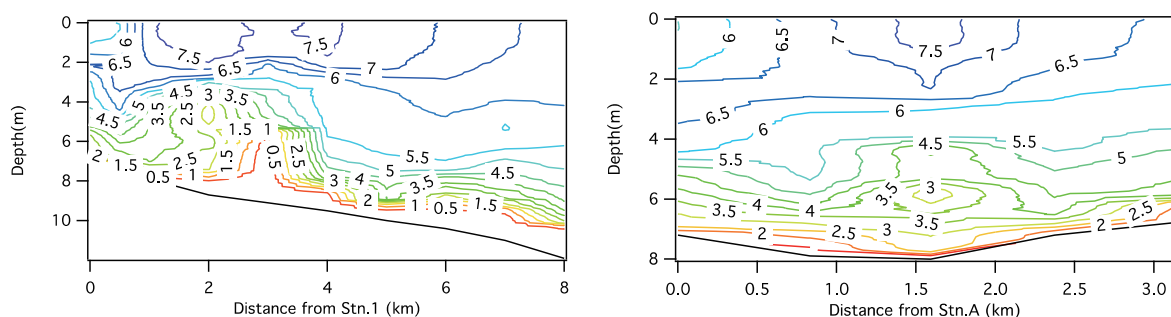


図5-5-9 8月31日の溶存酸素濃度の分布（左：豊川河口ライン，右：南北ライン）

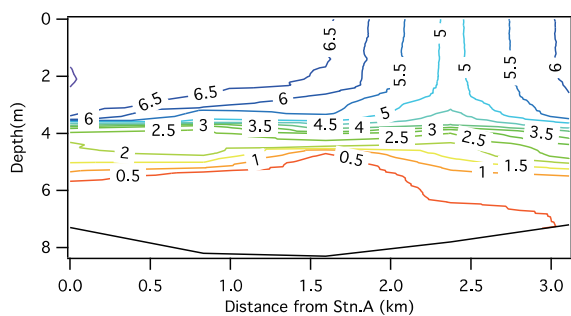
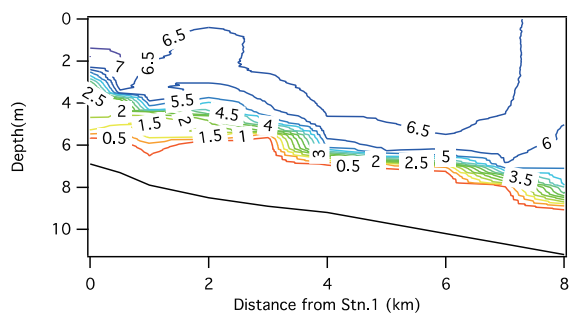


図 5-5-10 9 月 9 日の溶存酸素濃度の分布 (左 : 豊川河口ライン, 右 : 南北ライン)

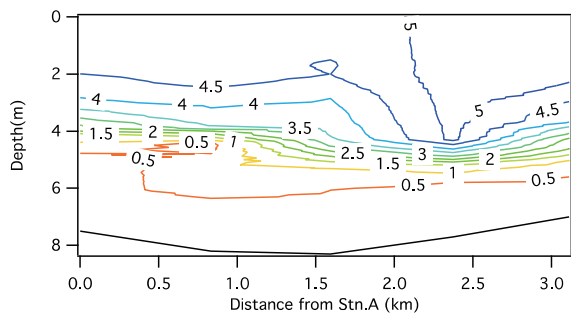
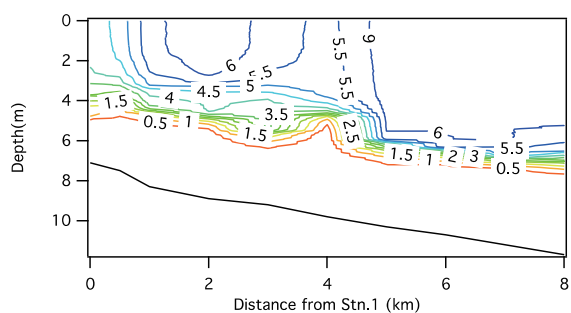


図 5-5-11 9 月 15 日の溶存酸素濃度の分布 (左 : 豊川河口ライン, 右 : 南北ライン)

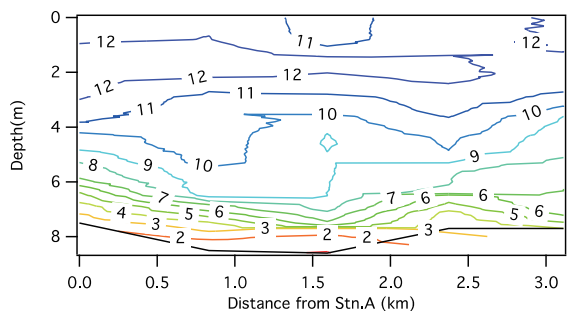
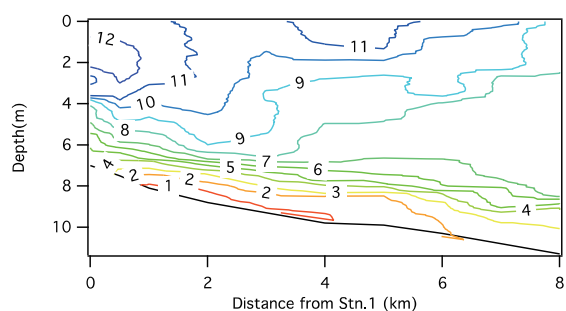


図 5-5-12 9 月 22 日の溶存酸素濃度の分布 (左 : 豊川河口ライン, 右 : 南北ライン)

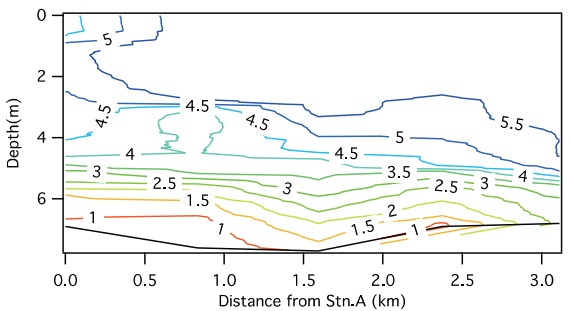
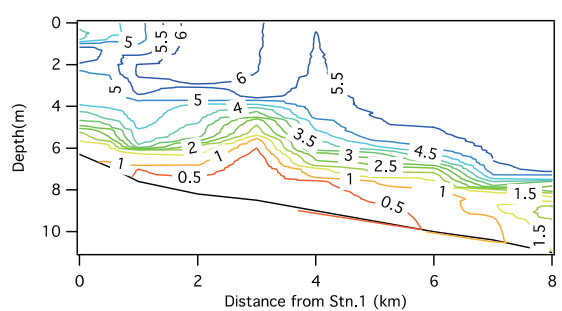


図 5-5-13 9 月 28 日の溶存酸素濃度の分布 (左 : 豊川河口ライン, 右 : 南北ライン)

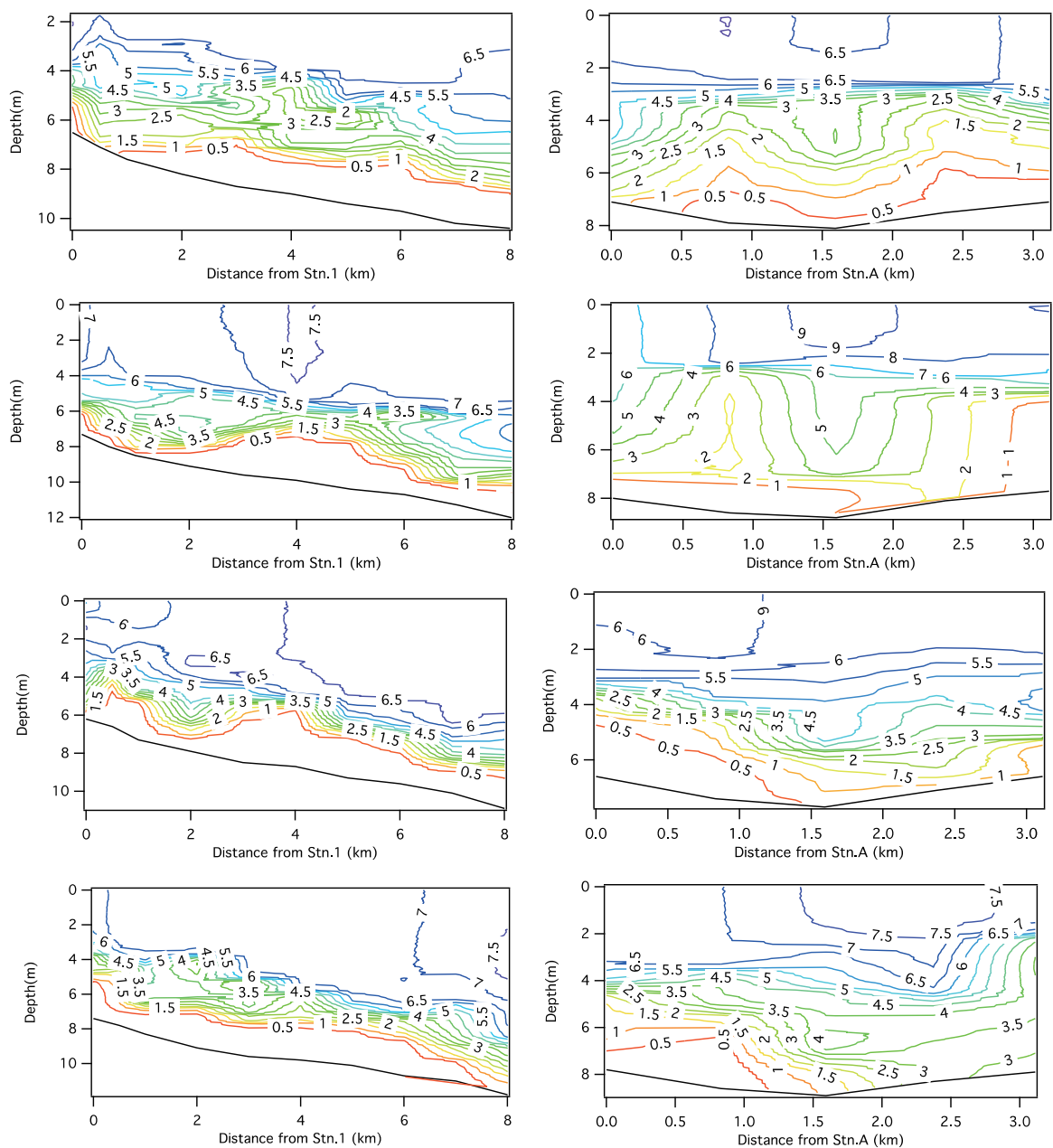


図 5-5-14 溶存酸素濃度の分布の時間変化 (上から 8 月 26 日 AM, 同 PM, 27 日 AM, 同 PM)

(左 : 豊川河口ライン, 右 : 南北ライン)