

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

建築・都市システム学系 教授 青木 伸一, 井上 隆信

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が、毎降雨時に精度の高い観測、分析をすることは非常に困難であり現実的ではない。そこで本研究では三河湾湾奥部に流入する主要な中小河川である梅田川を対象として栄養塩流出モデルを構築し、富栄養化の主な原因である窒素、リンの年間負荷量を算出した。また、降雨時における負荷量の影響を考察するため降雨時、平水時別に流出負荷量を算出し比較検証を行った。面源からの流出負荷量に関しては栄養塩流出モデルに点源からの窒素、リンの発生負荷量を組み込むだけでなく、梅田川流域を土地利用別に分割することで面源からの窒素、リンの流出状況を把握した。

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。本研究では、豊川河口沖合および三河港港内で、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。

9-2 梅田川モデルの概要

本研究で対象とする梅田川は、愛知県豊橋市雲谷町を源流とする二級河川である。図 9-2-1 に研究対象流域を示す。流域面積は 45km² であり豊橋市を横断し三河湾へと流入する。流域の土地利用の割合は農耕地が全体の 55%を占めており、河川に隣接する地域では水田が多く見られる。そのため流域は豊川用水を導水しており、季節ごとに流入量を操作しているため複雑な水の利用形態となっている。ここでの流域は、本研究室によって水位計が設置された畑ヶ田橋から上流域までとした。

流域の各データを求めるためにまず、GIS(ArcGIS9.3, ESRI)を用いて計算流域を決定し、500mメッシュに区切った。流域は数値地図25,000(空間データ基盤)の50mメッシュ標高を基に落水方向を求め、本研究室によって水位計が設置された畑ヶ田橋の集水域を計算した。各メッシュのデータ(降雨量, 気温, 風速, 日射量, 日照時間, 湿度)をメッシュごとに入力し、各メッシュの周囲4方向のメッシュとの標高を比較し最も勾配のある方向へ水が流れるとしてメッシュ間の落水方向を求めた。

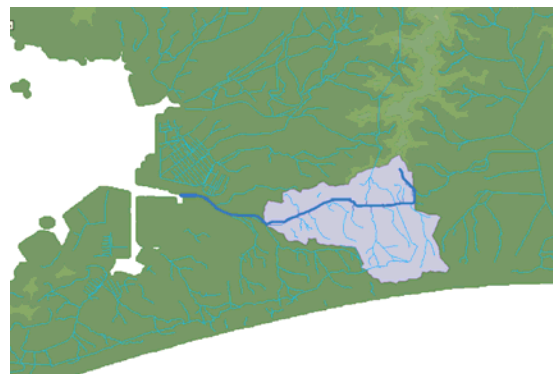


図9-2-1 梅田川の流域

土壌部分を鉛直方向にA, B, Cレイヤの3層、河川部分にRレイヤを想定した水分流出モデルとした。

土壌部分のA, B, Cレイヤにはそれぞれ水平方向、鉛直方向の流出があり水平方向の流出はすべて落水方

向に従い、次のメッシュのRレイヤに流入することとした。鉛直方向の流出はA, Bレイヤの場合、その下層のレイヤが水で飽和していなければ下層のレイヤに移動するものとした。Cレイヤの鉛直方向の流出はそのまま地下水になることとした。また、降水による水分はAレイヤにのみ流入し、Aレイヤに水が存在する場合はAレイヤから蒸発、Aレイヤに水がなくBレイヤに水がある場合はBレイヤから蒸発するものとし、A, Bのどちらのレイヤにも水がない場合、蒸発はないものとした。また、流域内に用水が存在するため該当するメッシュのAレイヤに入力した。各メッシュの蒸発量は地表面における熱収支式を用いて計算した。

流量の計算では豊川で用いられたパラメータを初期値として与えた。愛知県によって行われている流量観測結果と、1時間ごとの観測水位から水位流量曲線を用いて1時間ごとの流量を算出しその値を観測流量とした。この値と一致するように梅田川の未知のパラメータ値(水平・鉛直透水係数 α)を試行計算により求め、このパラメータ値を用いて2008年の梅田川における流量を計算しモデルの適応性を検証した。また、2008年の流量に一致するパラメータ値を求める際に以下の評価基準を用い、各基準で誤差が最小となるようにした。

1) 平均2乗誤差平方根

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{ot} - Q_{st})^2}$$

2) 相対誤差の平均2乗平方根

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(Q_{ot} - Q_{st})^2}{Q_{ot}^2}}$$

ここで、n:データ数、 Q_{ot} :流量の観測値(m/sec)、 Q_{st} :流量の計算値(m/sec)である。

水分流出モデルにより計算した各層からの水分流出量を基に栄養塩流出モデルを構築した。図9-2-2にモデルの概要を示す。栄養塩流出モデルで計算対象とした物質は溶存態窒素(DN)、懸濁態窒素(PN)、

溶存態リン (DP)、懸濁態リン (PP)、浮遊懸濁物質 (SS) である。DN, DP の流出量は各層の各土地利用からの水平方向の水分流出成分に一定の濃度を乗じて算出した。

SS の流出量は土地利用に応じて算出方法を使い分けて算出した。土地利用が建設用地の場合は路面堆積モデル、それ以外の土地利用の場合は LQ 式を用いて算出した。PN, PP の流出量はそれぞれ SS の中に一定の割合で存在していると仮定し、SS の流出量に一定の比率を乗じて算出した。ここで、DN と PN の合計を全窒素 (TN)、DP と PP の合計を全リン (TP) とした。また、これらの土壌層から流出した汚濁物質は水分流出モデルと同様に落水方向のメッシュの河川層に流入し運搬されることとした。点源からの窒素、リン流出は環境省による発生負荷量等算定調査報告書の値を用いた。このデータは市町村、流入する河川 (支流) ごとに発生源別の負荷量が記載されているので点源からの窒素、リン流出量を当該メッシュの河川層に加えた。

本研究ではまず、2008 年の流量をシミュレーションし、観測値に最も適合する未知のパラメータの値を求めた。図 9-2-3 に評価基準によりフィッティングした 2008 年の年間流量計算結果、図 9-2-4 にその積算流量を示す。ここでの結果はもっとも再現できている平均 2 乗誤差平方根のみ示す。平水時や小さな降雨ピークについてはどの評価基準を用いても精度よく再現できたといえる。しかし、8 月の大きな洪水の前後にある洪水ピークについては相対誤差の平均 2 乗平方根を用いると精度よく再現できない結果となった。モデルに

入力する降雨データとしてはレーダーアメダス解析雨量を用いているが、このデータは 1 時間雨量であり、計算ステップは 1 分なので 1 時間の降雨量を 1 分間の降雨量に換算して用いている。そのため、1 時間より短期間の間に集中して降雨があった場合は実際のピーク流量より小さい計算値となる可能

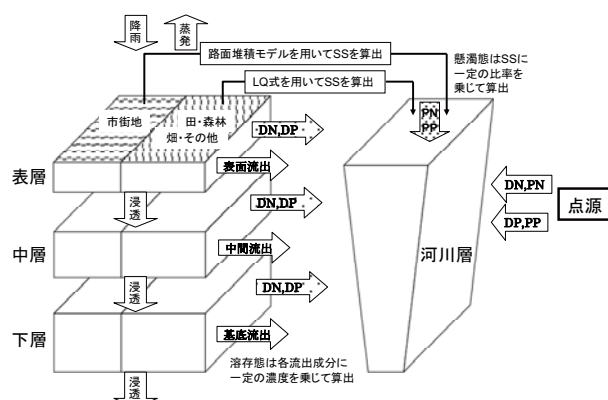


図 9-2-2 栄養塩流出モデルの概

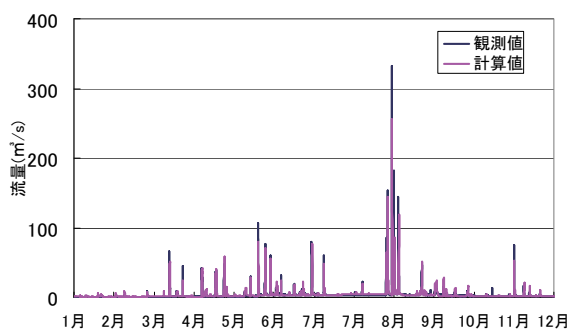


図 9-2-3 平均 2 乗誤差平方根を用いた
流量算出結果

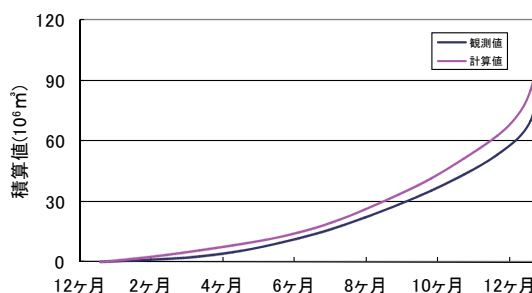


図 9-2-4 平均 2 乗誤差平方根を用いた積算

性がある。そのため今回のように大きな洪水ピーク前後にこのような差が発生したと考えられる。

これらより、平均 2 乗誤差平方根を用いた場合、低水時の流量を若干過大評価したがピーク流量、年間総流量は最も精度よく再現できることが分かった。また、栄養塩の多くは降雨時に流出することが報告されている。そのため平均 2 乗誤差平方根を用いてフィッティングを行ったパラメータ値を栄養塩流出モデルに使用することとした。

次に平均 2 乗誤差平方根を用いて 2008 年の流量にフィッティングさせたパラメータ値を用いて 2009 年の流量を計算し水分流出モデルの精度を検証した。図 9-2-5 は 2009 年の年間流量の再現結果である。これをみると、平水時や小さな流量ピークは精度よく再現できているが年数回の大きな洪水ピークは実測流量より小さな計算結果となった。特に観測値で 100 m^3/s を超える洪水ピークは再現率が低い結果となった。これは先ほどのパラメータフィッティングの際に起こったデータ間隔によるものが原因と考えられる。実際に、4 月 14 日と 8 月 10 日は同程度の降雨が豊橋気象観測台にて観測されているが前者は降雨の集中が見られたが、後者は少量の雨が長時間続くものだった。したがって、4 月の降雨では再現性が低くなる結果となった。

水分流出モデルによって算出した各層からの流量を基に、栄養塩流出モデルによって溶存態窒素(DN)、懸濁態窒素(PN)、溶存態リン(DP)、懸濁態リン(PP)、浮遊懸濁物質(SS)の流出量を算出した。栄養塩流出モデルのパラメータは畑地等以外のパラメータは過去の研究より豊川の栄養塩流出モデルの値を用いた。畑地等については降雨時にあわせてフィッティングを行うことにした。降雨時のフィッティングは 2008 年 8 月 28 日の降雨時調査結果

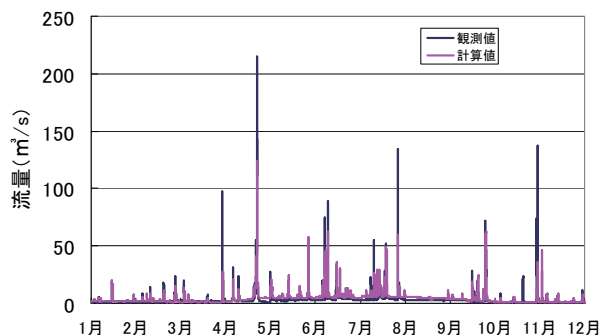


図 9-2-5 2009 年年間流量算出結果

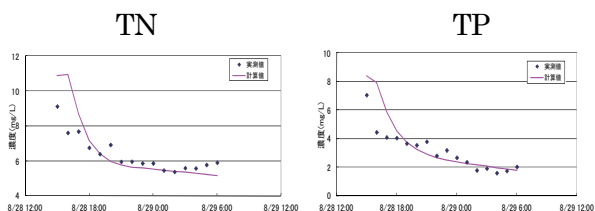


図 9-2-6 降雨時におけるパラメータフィッティング結果

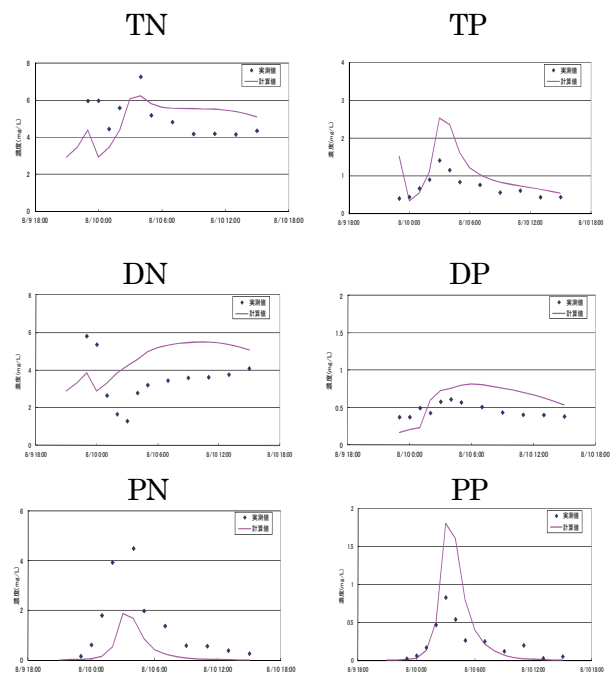


図 9-2-7 2009/8/10 検証結果

をもとに行った。ここで、パラメータ数を減少させるため路面堆積負荷流出モデルに関するパラメータは文献値を用いた。図 9-2-6 に 2008 年 8 月 28 日の降雨におけるパラメータフィッティングの結果を示す。TN、TP ともにおおむね実測と一致した。

2008 年 8 月 28 日の降雨時水質にフィッティングさせたパラメータ値を用いて 2009 年 8 月 10 日と 2009 年 10 月 7 日の降雨時水質を計算し、モデルの再現性を検証した。8 月 28 日の降雨は時間雨量が 60mm を超え 226mm/日にも達する大きな降雨イベントだったのに対し、2009 年 8 月 10 日の降雨は最大時間雨量 32mm, 44mm/日、2009 年 10 月 7 日の降雨は最大時間雨量 10mm, 58mm/日とかなり異なる降雨形態である。図 9-2-7 に 2009 年 8 月 10 日の降雨時水質の再現結果を示す。TN、TP をみると TP については実測値の挙動とよく一致しているが、TN については降雨の降り始めでの濃度が低下していることが分かる。また DN、DP は過小評価する結果となった。DN については、雨の降り始めでの濃度低下が再現できていない。これは、降雨期間が短いため入力された値の影響が大きくなり、実際の濃度低下時刻よりも早い段階で濃度が減少してしまうためである。これによりこの栄養塩流出モデルは、降雨の形態により再現性に差が出ることがわかった。

表 9-3-1 年間流出負荷量の算出結果と環境省による梅田川流域の発生負荷量の比較

	TN(t/year)	TP(t/year)
2008 年	351.9	24.6
2009 年	334.9	27.7
環境省による発生負荷量	231.2	29.1

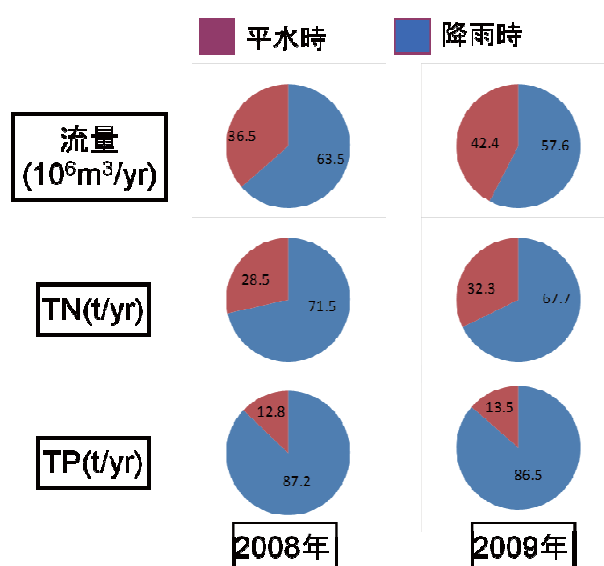


図 9-3-1 降雨時、平水時別の年間流出負荷量

9-3 梅田川流出負荷モデルによる解析結果

パラメータフィッティングを行った値を用いて 2008 年、2009 年における窒素、リンの年間流出負荷量を算定した。

まず、各年の TN、TP の年間流出負荷量を算出し比較を行った。また、環境省の行った梅田川流域の発生負荷量との比較を行った。表 9-3-1 に算出した年間流出負荷量と梅田川流域の発生負荷量を示す。TP は環境省とほぼ等しい結果となったが、TN は環境省の 1.5 倍ほどの値となっている。計算値は畑ヶ田橋より上流からの流出負荷量であり、梅田川の河口まで含めた流域で計算を行うとさらに発生

負荷量より大きな値になると考えられる。

次に豊水流量（1年を通じて 95 日はこれを下回らない流量）より流量が多い場合を降雨時，少ない場合を平水時と仮定して降雨時，平水時別に年間流出負荷量を算出した。図 9-3-1 に計算結果を示す。どの年も TN に比べて TP の方が降雨時に流出する割合が高くなった。また，TN，TP とともに降雨時の流出量が 7 割となっていることがわかる。

最後に，梅田川の主要な土地利用である農用地を対象に溶存態，懸濁態別に流出負荷量を 10%削減した際の年間流出負荷量を算出し，各土地利用の削減効果を検証した。表 9-3-2 に計算結果を示す。これを見ると，畑地等での削減量が大きく削減効果が高いといえる。窒素，リンで比べると，窒素よりもリンが削減されやすく，特に畑地等での PP 削減効果が有効であることが分かる。これは懸濁態リンの場合，大部分が土壌由来であり畑地から流出するためだと考えられる

表 9-3-2 各土地利用流出負荷量削減による年間負荷量比(%)

	DN-10%	PN-10%	TN-10%
田	99.6	99.7	98.8
畑地等	97.5	96.2	93.9

	DP-10%	PP-10%	TP-10%
田	99.6	99.1	98.9
畑地等	96.6	94.4	91.3

9-4 海域調査の概要

海域での調査は，図 9-4-1 に示す地点で 7 月 4 日から 9 月 26 日までの約 3 ヶ月間，一週間間隔で計 13 回実施した。観測点は豊川河口から沖に向けて約 1km 間隔で 8 点 (St. 3～St. 10)，豊川河口から港の入口まで南北ライン上に 5 点 (A～St. 12)，港湾水路内に 6 点 (St. 13～St. 18) の計 19 点を設定した。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，各地点で海表面下 1m および海底上 1m の水深から海水を 1L サンプルングし，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。なお，図中の緑のマークの地点では，鉛直方向に 2m 間隔で採水・分析した。

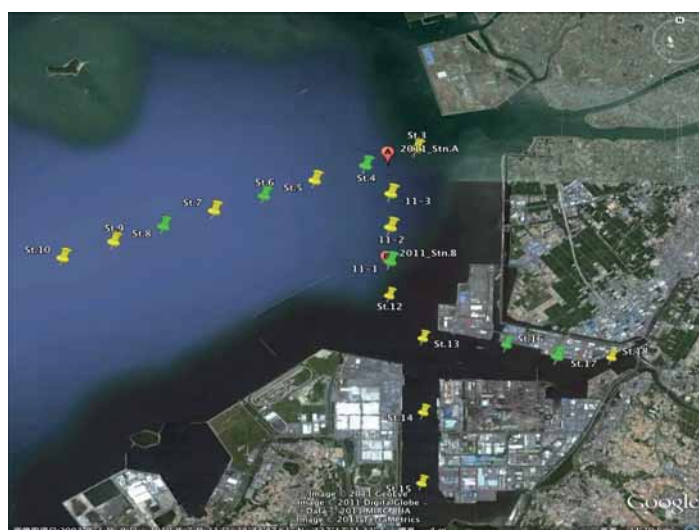


図9-4-1 水質観測地点(図中 Stn. 12-18 が港内の観測点)

さらに，豊川および港内からの物質輸送を捕えるために，7 月 18 日から 9 月 30 日の期間において，上記の定期的な観測に加えて観測点の A 点と B 点 (St. 11-1 と同一) に連続観測用の機器を設置した。

機器の設置状況を図 9-4-2 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 1m 間隔で 1 分平均流速を 10 分間隔で観測・記録した。

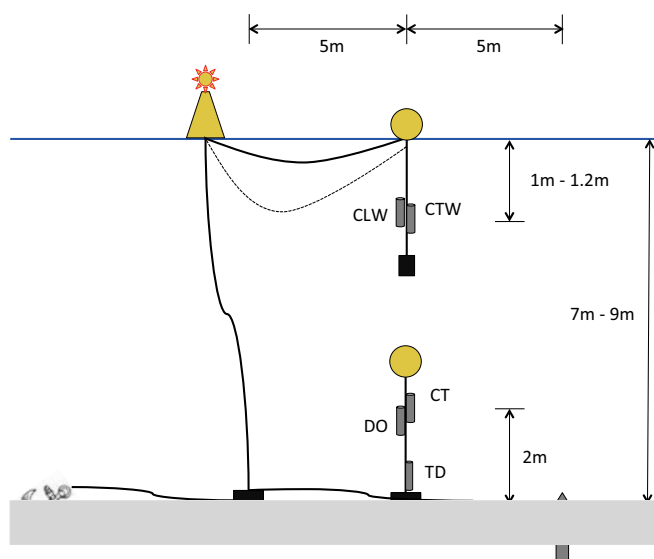


図 9-4-2 連続観測機器の設置概要

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

9-5 結果と考察

(1) 連続観測結果

まず、観測点 A および B での連続観測結果について示す。図 9-5-1 は A 点の底層（海底から 2m 上）における水温、塩分、DO 濃度、水深の変化を示したものである。期間中（7 月 18 日～9 月 30 日）の底層 DO の分布を見ると、DO 濃度は無酸素状態から過飽和状態である 8～10mg/L まで急激な変化を示している。その急激な変化に対応するように底層の水温、塩分の両方で同じような変化が起きている。したがって、DO の急激な変化の要因は、密度（水温、塩分）の異なる水塊（底層水）が移動してきたか、もしくは塩分が低く水温が高い表層水との混合が行われたことを示唆している。

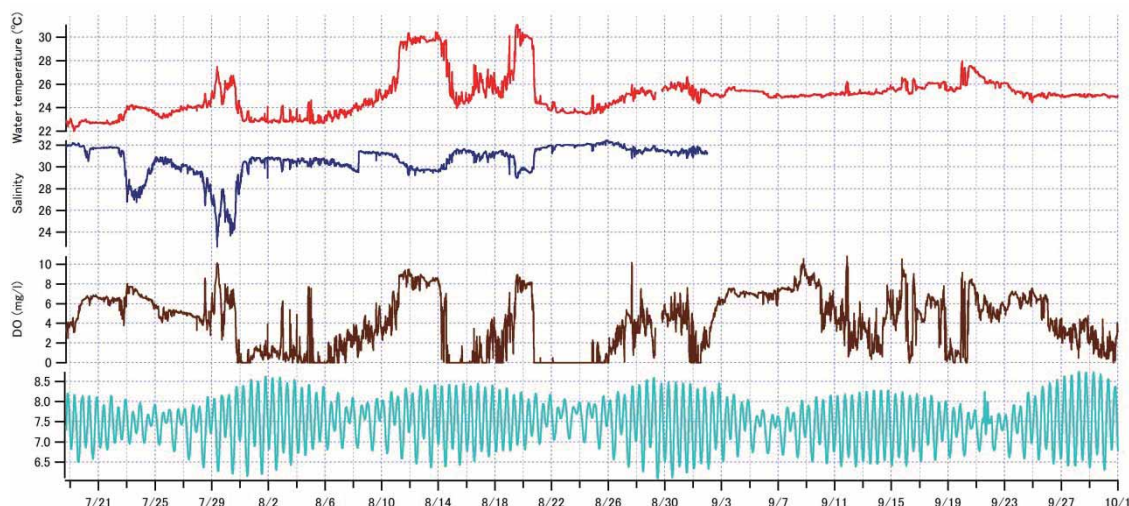


図 9-5-1 A 点での底層における連続観測結果（水温，塩分 DO，水位）

図 9-5-2 は A 点と B 点の底層 DO 濃度の変化を示したものである。両者を比較すると，変化の仕方や大きさがよく似ている。これらの間の相関係数を求めると 0.949 と非常に高い値を示した。これは，水温や塩分に関しても同様であった。A および B 点は南北方向に約 2.4km 離れているが，この二点での連続観測データがほぼ同じ変化を示していることから南北方向には水塊構造の変化(水塊の移動)が小さいと考えられる。このことは，夏期の水質の変化は東西方向からの影響を大きく受けていることを示唆している。

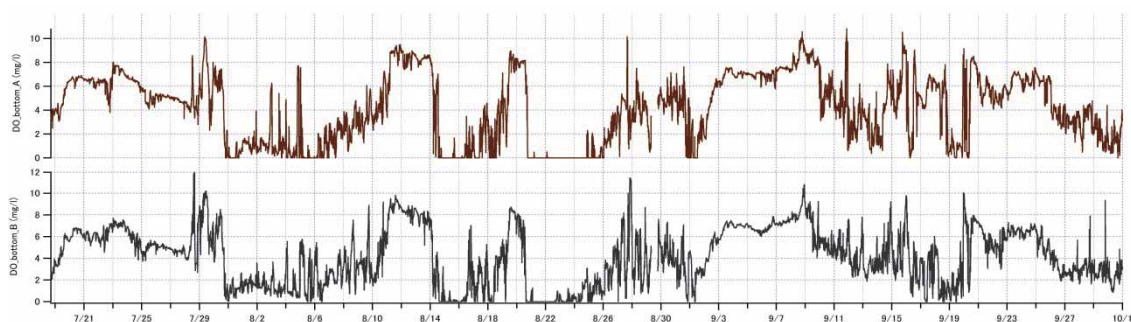


図 9-5-2 A 点と B 点での底層の DO 濃度の変化（上：A 点，下：B 点）

(2) 港湾内の水質変動特性

断面的に水塊構造を見るために，定点観測によって得られる水温，塩分，海水密度 (σT), DO 等のコンター図を作成した。断面としては，図 9-5-3 に示す St. 3～St. 10, A～St. 15, A～St. 18 の 3 つのラインの縦断を対象とした。

DO 濃度の空間的な分布を見るために，

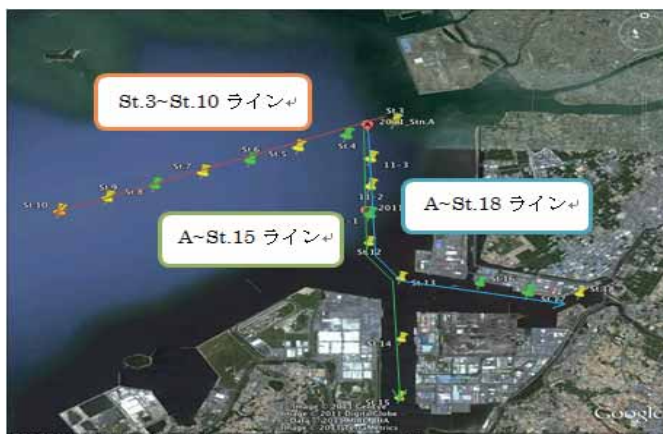


図 9-5-3 コンターを作成した断面のライン

8月1日および8月22日のA～St. 18ラインのコンター図を図9-5-4および図9-5-5に示す。8月1日のDOの図をみると、豊川河口部表層ではDO濃度が高く、港内では表層まで貧酸素水が広がっていることがわかるが、これは夏期には比較的頻繁に見られる水塊構造である。一方、8月22日には、港内での貧酸素化が一層進み、豊川河口付近（六条潟前面）まで張り出していることがわかる。この状態が港湾の貧酸素水塊の移動によって形成されたものであるかどうかは未解明であるが、港湾内に形成された大規模な貧酸素水塊が周辺海域に影響を及ぼしていることは否定できない。

図9-5-6～図9-5-9は定点観測による表層（海面下1m）と底層（水底上1m）のDIN, DIP, NO₃-N, NH₄の変化を示したものである。図中には、豊川河口に位置するSt. 3, 最も沖合のSt. 10, 港内のSt. 12, 港奥のSt. 15およびSt. 18での値をプロットしてある。これらの図より、港内部は港外部に比べて栄養塩濃度が全体的に高くなっていることがわかる。特に、貧酸素水塊が表層にまで広がっている8月1日および8月後半には表層でも非常に大きな栄養塩濃度が現れている。これは、港内における鉛直混合によることが考えられる。

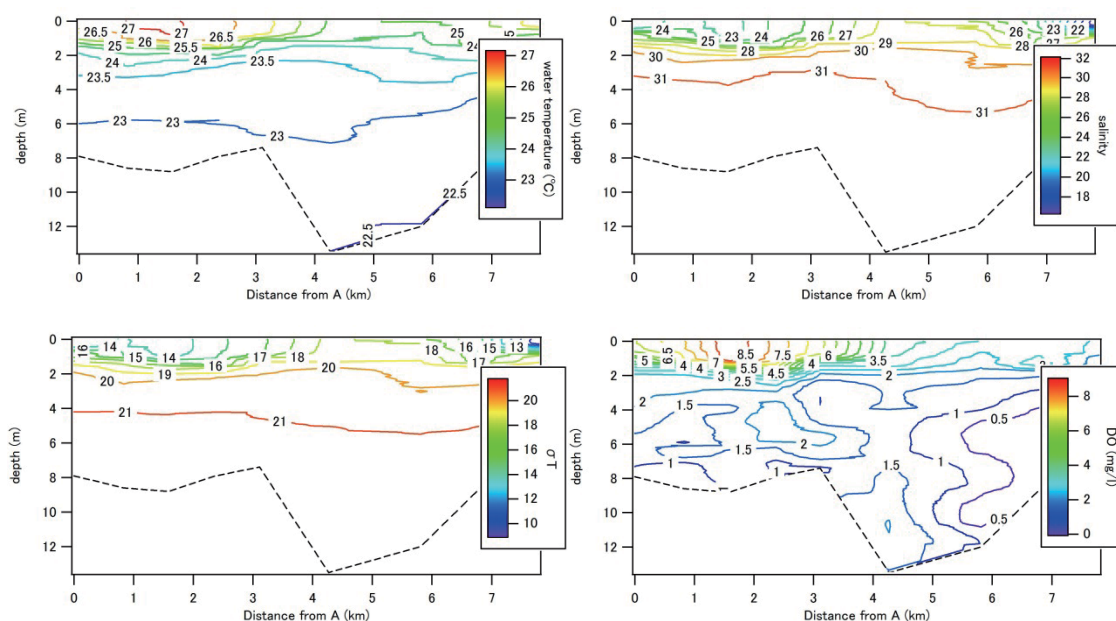


図9-5-4 A～St. 18ラインのコンター（8月1日）

左上：水温（°C），右上：塩分，左下：σ_T，右下：DO（mg/L）

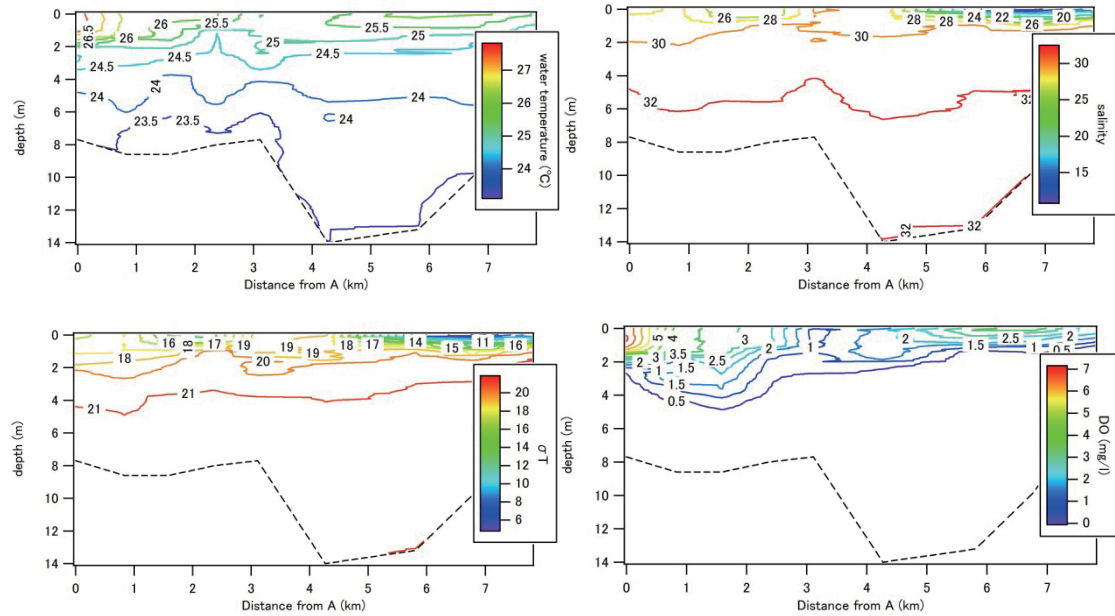


図9-5-5 A～St. 18ラインのコンター（8月22日）

左上：水温(°C)、右上：塩分、左下： σT 、右下：DO(mg/L)

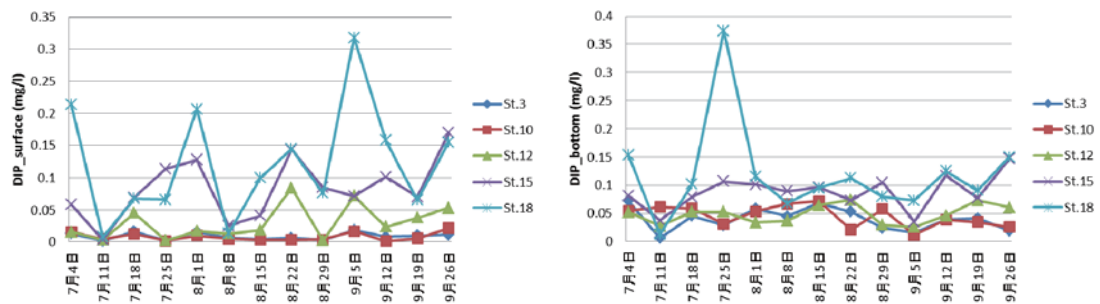


図9-5-6 定点観測におけるDIPの変化（左：表層，右：底層）

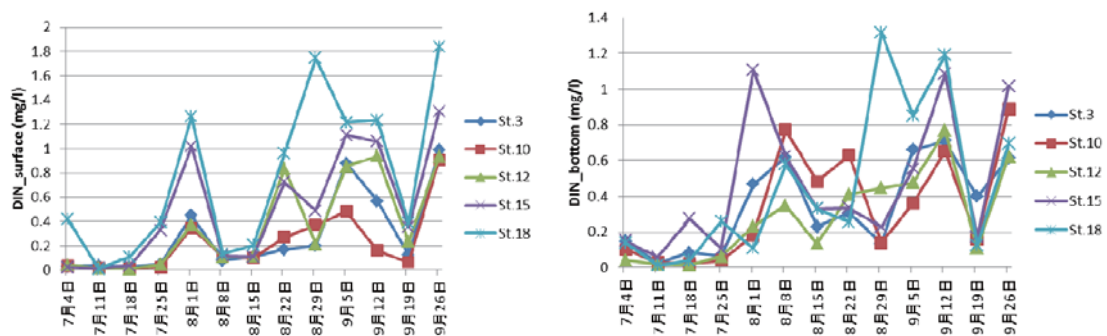


図9-5-7 定点観測におけるDINの変化（左：表層，右：底層）

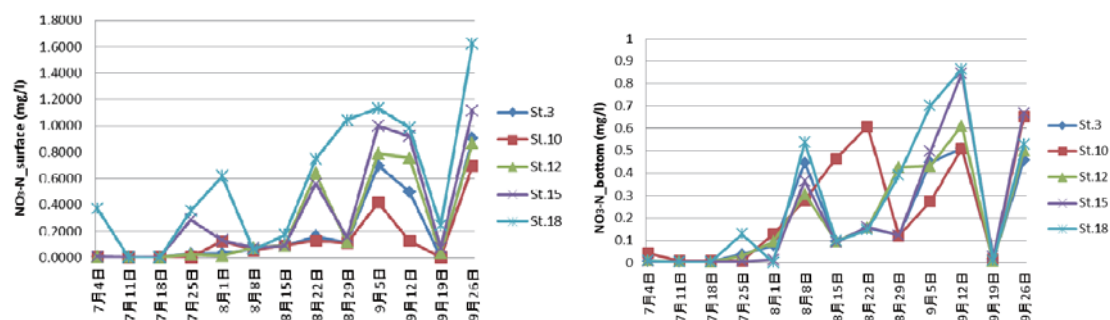


図9-5-8 定点観測におけるNO₃-Nの変化（左：表層，右：底層）

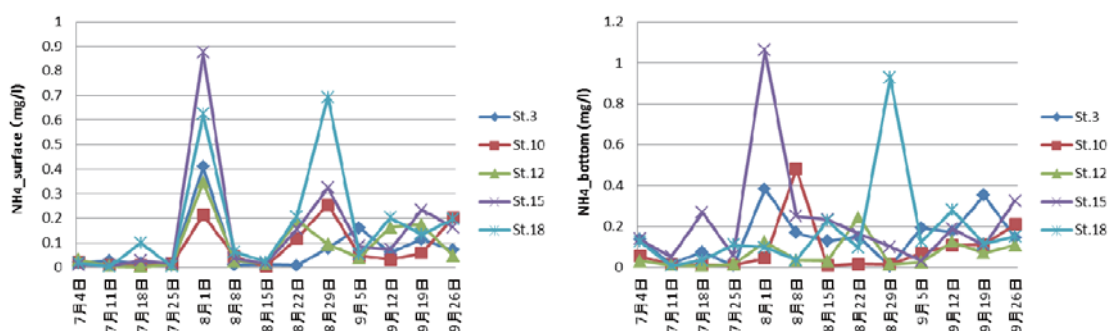


図9-5-9 定点観測におけるNH₄の変化（左：表層，右：底層）

図9-5-10 および図9-5-11 は観測期間中の表層と底層のDINとDIPを観測点ごとに平均をとって示したものである。これらの図からも、港内側の観測点（St. 12-18）では全体的に栄養塩濃度が高くなっていることがわかる。特に、港内側では表層で高い濃度を示していることが確認できる。これは、港奥部が汐川および梅田川の河口部に位置することが大きな理由であると思われるが、港内の貧酸素化に関連して底層で栄養塩の溶出が進み、それが鉛直混合により表層に輸送されることも大きく寄与しているものと考えられる。

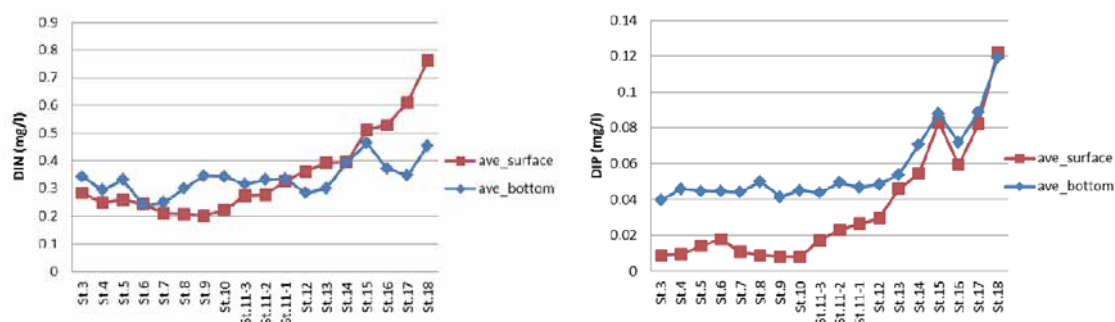


図9-5-10 DINとDIPの表層と底層における平均値の地点別変化

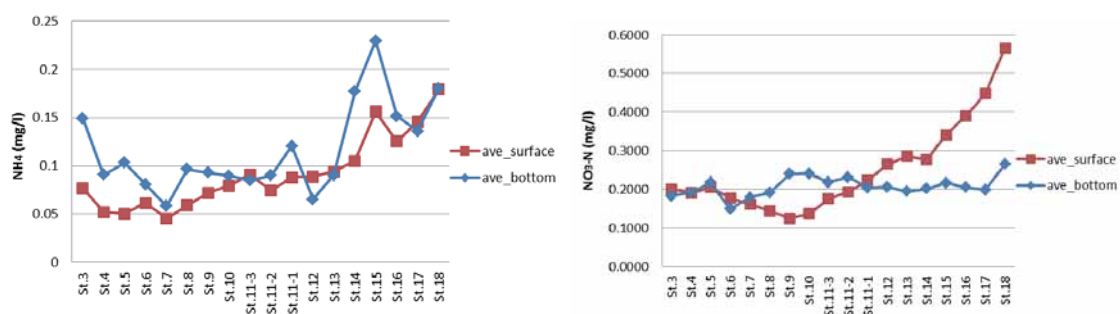


図 9-5-11 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の表層と底層における平均値の地点別変化

港内での鉛直混合を誘発する 1 つの要因として、入港船舶による水塊の攪乱が考えられる。そこで、St. 16, 17, 18 が位置する東西水路内に接岸した船舶の情報を収集した。図 9-5-12 は、入港した船舶のトン数を時間軸上にプロットしたものである。港内で表層まで貧酸素水塊が広がった 8 月 1 日と 8 月末に特に頻繁な入港が見られるわけではなく、この情報のみで船舶の影響を議論することは難しい。

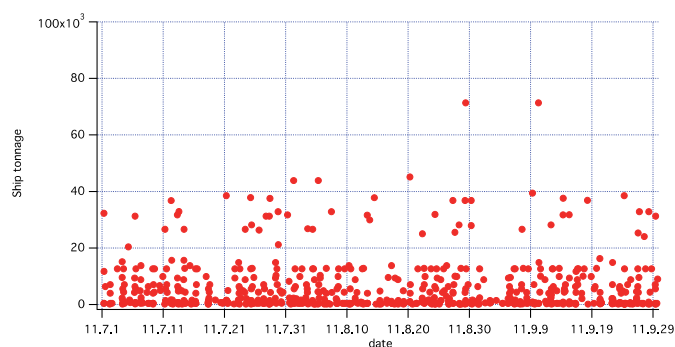


図 9-5-12 船舶の入港状況