

2006 年度 修 士 論 文

相模川汽水域における溶存酸素濃度に関する研究
Study on Dissolved oxygen in tidal downstream of Sagami river

西村 政倫

Nishimura, Masamichi

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学研究系 社会文化環境専攻

要旨

河口付近の汽水域は、性質の違う淡水と海水が混合し、潮汐による水位・流速の周期的変動や海水の浸入等、海域の影響を受け、環境が周期的に変動する。また汽水域では塩水くさびが発達しやすく、上層と下層の間の酸素等の物質交換が著しく減少する。この時、本研究で取上げる相模川のような有機汚濁の進んだ河川では、有機物やアンモニア・亜硝酸性窒素などが酸化されるため、下層で急激に酸素が消費され、貧酸素水塊が形成される事が示唆される。そこで本研究では、河口付近の汽水域における溶存酸素濃度（以下 DO）を中心とする水質の時空間的挙動を把握することを目的とし研究をおこなう。また、下水処理場や取水堰からの放流水が、水質変動に与える影響についても考察することを目的とする。神奈川県相模川の河口から 6 km 上流の寒川堰周辺までを対象地域とした。研究手法として、現地において投げ込み式水質計による水質計測、採水による栄養塩分析、また自記式水質計を用いて連続観測をおこない、水質の動態を評価する。

本研究で得られた結果は以下の通りである。

・流量の低下と塩分による成層化

相模川下流部では水温ではなく塩分による成層が卓越していることが明らかになり、水温成層は不安定となることがわかった。また塩水フロントにおいては、塩分による成層に加え、淡水中においても水温成層が形成されていた

・進入した塩水の貧酸素化

観測期間中、大潮時・小潮時の両方において、河川の底層が貧酸素化した。特に無酸素状態に陥る場合は、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ を下回っている時に限定される。また河口付近よりも塩水フロントの方が DO の低下が著しかった。

・酸素消費

水、底質の共に酸素消費能力があり、水に関しては塩水フロントの BOD は河口付近の海水に比べ約 2 倍あることがわかった。特に下水処理水の BOD が高く、1 年を通して栄養塩濃度、BOD、SOD 等の水質は河川水に比べ卓越している。底質においては河口付近の SOD が高く、また 2km 上流の砂状の底質においても酸素消費能力を有していることが明らかとなった。

・貧酸素化の解消に関して

河川内に進入した塩水を完全にフラッシュするには、おおよそ $70\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が必要であり、 $60\text{m}^3/\text{s}$ 以上であれば外海から塩水の進入が抑えられることが観測結果より判明した。

目 次

要旨

第1章 序論

1.1 背景及び目的.....	1
1.2 既往の研究.....	2
1.2.1 河口域での研究.....	2
1.2.2 相模川を対象とした研究.....	3
1.3 研究の流れ.....	4

第2章 対象地域の概要, 及び研究手法

2.1 対象地域の概要.....	6
2.1.1 相模川の概説, 地形および周辺構造物.....	6
2.1.2 相模川の地形変化.....	6
2.1.3 相模川流量.....	7
2.2 現地観測内容.....	9
2.2.1 自記式水質計による連続観測.....	9
2.2.2 投げ込み式水質計による観測.....	12
2.2.3 採水, 採泥.....	15
2.3 実験・分析内容.....	16

第3章 水質の時空間変動

3.1 空間変動.....	18
3.1.1 鉛直分布図.....	18
3.1.2 空間分布図.....	23
3.2 時間変動.....	25
3.2.1 St.2における時系列.....	25
3.2.2 馬入水質観測所時系列.....	30
3.2.3 馬入水質観測所の表層塩分.....	34
3.3 鉛直プロファイル.....	35
3.4 その他時系列.....	37
3.4.1 各地点の水温時系列.....	37
3.4.2 下水処理場の水質時系列.....	39

第4章 実験・分析結果

4.1 栄養塩分析結果.....	42
4.1.1 コンター図.....	42
4.1.2 栄養塩・塩分相関.....	48
4.1.3 下水処理水の栄養塩時系列.....	51
4.2 植物プランクトン分析結果.....	53
4.3 BOD・SOD 実験結果.....	57

第5章 考察

5.1 DO 低下に関する考察.....	61
5.1.1 水温, 塩分密度.....	61
5.1.2 外海の影響に関する検討.....	64
5.1.3 クロロフィル a と塩分の挙動.....	65
5.1.4 流量, DO, 塩分相関.....	66
5.2 酸素消費の検討.....	68
5.3 塩水フラッシュの検討.....	70

第6章 まとめ

6.1 まとめ.....	74
6.2 今後の課題.....	75

参考文献.....	76
-----------	----

謝辞.....	78
---------	----

第 1 章 序論

1.1 研究背景および研究目的

河口付近の汽水域は、性質の違う淡水と海水が混合し、潮汐による水位・流速の周期的変動や海水の進入等、海域の影響を受け、環境が周期的に変動する。このため、海域や淡水域に生息する生物のみならず、汽水性の生物が存在し多様な生態系を形成している。反面、地形の変化等の外的な要因により淡水と海水の影響のバランスが崩れ、影響を受けやすい環境でもある。

汽水域は、その立地から周辺に港が建設されるなど土地利用の圧力が強い地域であり、古くから人為的に改変されてきた。航路維持として滞筋の確保と砂州の発達を抑えるための導流堤や、沿岸の農地への塩害防止のため潮止め堰などの建設も挙げられる。ここで、神奈川県相模川においても塩害防止や利水のため潮止め堰等が建設され、そのため過去に比べ、流量減少・河床低下といった現象が顕在化している。

神奈川県にある相模川においても、人工構造物の建設等により過去に比較し流量が減少し、河床が低下する問題が起きている。特に河口から 1~2 km において、河床が窪地になるように変化している。

このように感潮区間で河道内に塩水が滞留しやすい状況になると、底層の水が貧酸素化するなどの問題が懸念される。更に、相模川では、河口より約 4km 上流の右岸に存在する下水処理場の排水もあるため河川内の栄養塩濃度も高いと考えられ、汽水域の環境は大きく変化しているものと考えられる。相模川河口部において、塩水遡上の距離については既往の研究においても把握されている。しかし、年間を通じた水質変動や栄養塩類に関する調査は多くはなされていない。そこで、本研究では溶存酸素濃度（以下 DO）を中心とする水質の時空間的挙動を把握することを目的に現地観測をおこなった。そして河川全体に影響を与える因子として下水処理場からの放流水を挙げ、その年変化特性を具体的に明らかにする。また、相模川河口から約 7km 上流に寒川取水堰があり、堰により下流に放流する流量が操作されている。そこで現地観測結果と流量の変化から環境に配慮した放流量の提言を目標とする。

1.2 既往の研究

1.2.1 河口域での研究

感潮域は多種多様な環境を形成している場であるため、そこでの研究も多岐にわたる。例として物理的・化学的なプロセスや生物的・生態学的なもの、そして人為活動に伴うものがある。更に時間軸をとっても秒単位から日単位、年単位と長短にわたり工学から理学まで幅広い分野にわたっている。そこで河口域を対象とした研究事例の一部を述べる。

汽水域において淡塩二層状態が強められ、微細懸濁物質の体積が促進されると底層水が貧酸素化しやすくなる。西條ら(1996)は長良川におけるモニタリング調査の結果をもとに、堰下流部の溶存酸素の時間変動特性を論じ、底層に停滞する塩水の内部で貧酸素化の生じていることを指摘している。また鈴木ら(1998)は利根川河口堰下流部において現地観測を行い、塩水楔先端から貧酸素化が進行する様子を明らかにしている。鈴木ら(2000)においても貧酸素水塊の発達過程と塩水流動の関係を、塩分・DO・流速等の鉛直分布観測を繰り返すことで断続的に把握している。且つ鉛直二次元シミュレーションモデルを構築し、再現性を検討している。

一般に河川水中の浮遊懸濁物質は、海水と淡水の混合部である河口付近やその境界線で沈降が促進される。懸濁物質の沈降が促進すると河床上に浮泥層が形成され、底質汚染の原因ともなっている。山西ら(1999)は佐賀県六角川を対象河川として、形成される高濃度SS水塊の挙動調査を行っている。魚群探知機を用いて、周波数の違いから浮泥層厚を観測し、浮泥層が河道内の流況に応じてその挙動を常に変化させていることを発見している。また濱ら(1999)らは感潮域の物質循環に対する有機物の役割を評価するために重要なパラメーターである有機物の安定性に着目して解析をおこなった。その結果、感潮域の河川水中に懸濁する有機物の多くが、河床の堆積物に起源を持つことを明らかにしている。

このように汽水域における貧酸素化のモニタリング等是他河川でも行われており、数値シミュレーションによる再現性も検討されている。しかし断続的な観測が多く、塩分やDOを同時に、且つ時間密度を小さくして連続観測した事例は少ない。また洪水による塩水楔のフラッシュにより貧酸素化は解消されることもわかっているが、フラッシュについての詳細な観測について多く述べられていない。また河川汚濁の大きな一因である有機物の挙動については研究されているものの、その有機物の排出源の一つである下水処理場からの排水については余り多くは研究されていない。

1.2.2 相模川を対象とした研究

相模川および相模湾を対象とした研究は、河口部や海岸の地形変化についてのものが多い。これは相模湾において海岸侵食が大きな問題となっているため、土砂移動に関する研究がどうしても多くなり、相模湾のような閉鎖性の小さい湾では富栄養化が起り難いため、水質に関する環境問題が小さく捉えられがちであることが原因と考えられる。

福山ら(2003)は河川からの供給土砂の減少、及び海岸構造物の建設による沿岸漂砂の遮断により、各地で進行している海岸侵食に伴った河口地形の変化の実態を解明することを目的として調査を行っている。その結果河川における砂利採取の影響により河床低下及び緩勾配化が進み、海岸部への土砂供給量が減少、供給土砂量が細粒化していることが分かった。また海岸部の深淺測量データを分析することにより相模川河口部への海岸からの供給土砂が減少していることを解明した。また宇多ら(2004)は相模川河口を対象として、洪水流によってフラッシュされた河口砂州の、波による復元過程を継続観察によって調べている。

水質、底質等の環境を対象としたものは国土交通省国土技術政策総合研究所(以下国総研)によってなされている。相模川河口から上流 7km までを対象範囲とし、地形変化に伴う塩分や生態系の変化を明らかにすることを目的として調査を行っている。その結果、河口付近において小潮時に貧酸素化したこと、塩水が遡上すると低潮時において遡上したまま停滞することがわかった。底質調査からの結果より河口付近は上流に比べシルト粘土分、細砂分が多くなることがわかり、強熱減量値も河口から 4.0km 上流までは 5.0km より上流に比べ高くなることがわかった。

1.3 研究の流れ

本研究作業として以下の事を中心として行った.

- ・ 自記式水質計による時系列水質計測
- ・ 多項目水質計による鉛直方向計測
- ・ 河川中の栄養塩濃度分析
- ・ 実験室内での BOD, SOD 実験

これら自力で採取したデータに加え, 寒川堰からの流量・雨量, 馬入水質観測所の水質測定結果(COD, DO, 濁度, EC, pH, 水温, 水位), 四之宮下水処理場の水質時系列(水温, 放流量, COD, BOD, 栄養塩 etc)のデータを用いた. 流量・雨量データは神奈川県企業庁から戴き, 馬入水質観測所の水質時系列は国土交通省京浜河川事務所環境課, 四之宮下水処理場の水質は神奈川県下水道公社に戴いたことをここに付記する. これらにより DO を中心とする水質の時空間的挙動, 及び栄養塩濃度・流量について検討する. また図 1.3.1 は作業を行った期間を示したものである. 各作業については 2 章において詳細に記述する.

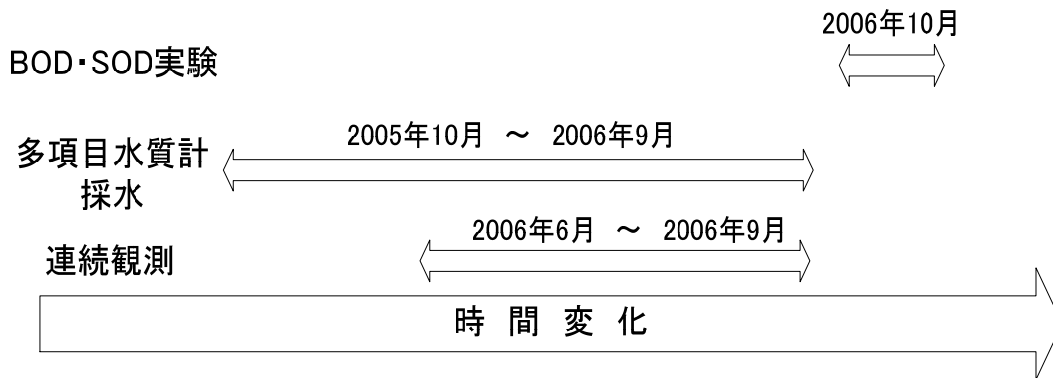


図 1.3.1 研究作業フロー

第2章 対象地域の概要，及び研究手法

本研究では神奈川県にある相模川を研究対象地域とした。本章では，相模川の現状を概説し，現地観測，また実験・分析内容について説明する。

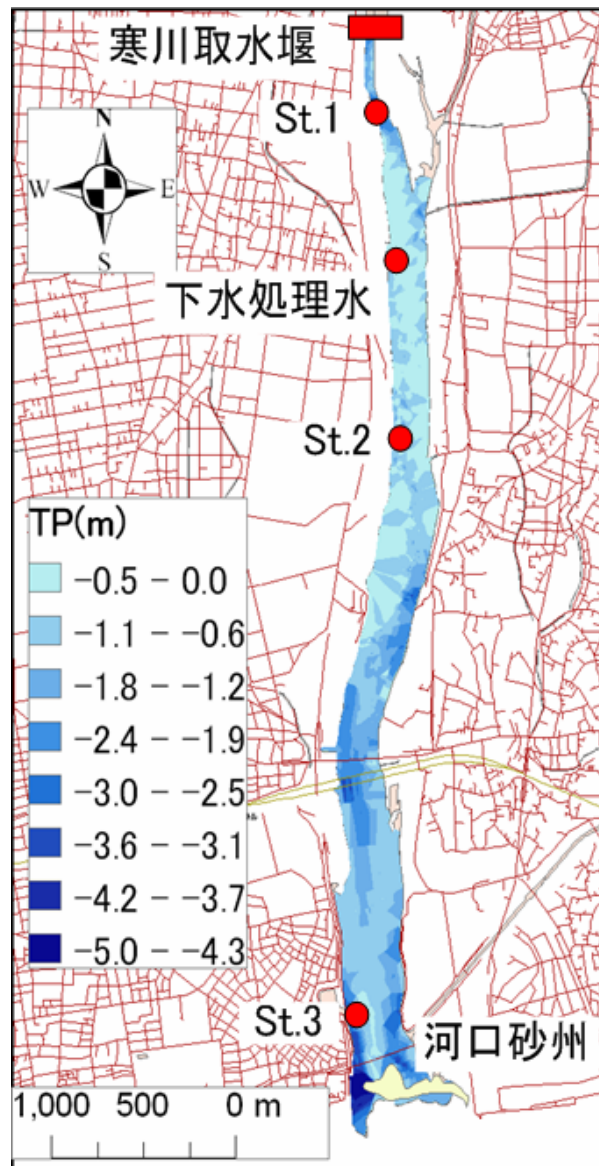


図 2.1 水深，観測地点図

2.1 対象地域の概要

2.1.1 相模川の概説，地形および周辺構造物

本研究の対象となる相模川は，山中湖に水源を發し，相模湖，津久井湖を経て中津川などの支川と合流し，神奈川県中央部を流れ相模湾に注ぐ流域面積 1680km²，流路延長 109km の一級河川である．中上流部は滞水性に富んだ森林地帯であり，このため相模川の流況，水質は比較的良く，水道用水，農業用水，工業用水など多目的に利用され，神奈川県などの生活及び産業の基盤となっている．流域の中流部は東京のベッドタウンとして，下流部は工業地帯として都市化が進展しており，相模川は観光やレクリエーション空間としても広域的な利用がなされている．

相模川流域の主な構造物として，相模ダム，城山ダム，相模大堰，寒川取水堰などがある．相模ダムの総貯水容量は 63,200 千m³で，1947 年に完成しており，城山ダムの総貯水容量は 63,400 千m³で，1965 年に完成している．相模大堰，寒川取水堰はそれぞれ 1998 年，1964 年の完成である．また，河口部河道内には平塚漁港があり，1951 年以降導流堤を整備し航路の確保を行っている．

本研究での観測対象地域は相模川の河口から 6 km 上流の寒川堰周辺までとした．図 2.1 は観測対象地域の水深図および連続観測地点を示したものである(後述)．図から相模川下流部は導流堤付近が最も深く，次いで河口より 2km~3km 地点，砂州背後の左岸側が深くなっていることがわかる．これらの地点に進入した塩水が溜まりやすく，潮位が低低潮の時間帯においても塩水は遡上したままである．

2.1.2 相模川の地形変化

図 2.1.1 は相模川における河床高の断面図であり，1961 年から 2001 年にかけて河床が大きく低下したことを示している．特に河口から 1~2 km において，河床が窪地になるように変化している．このように感潮区間で河道内に塩水が滞留しやすい状況になると，底層の水が貧酸素化するなどの問題が懸念される．

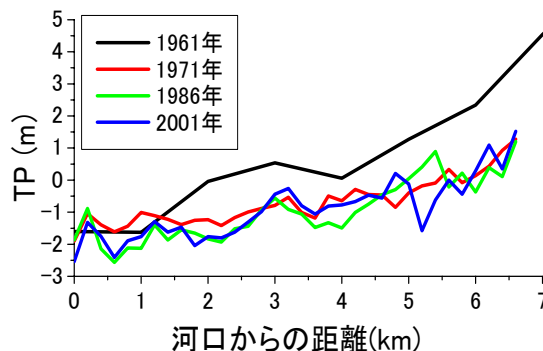


図 2.1.1 寒川取水堰

2.1.3 相模川流量

相模川河口より約 6.5km 上流に寒川取水堰（図 2.1.2 参照）が存在し，下流への放流量が測定されている．図 2.1.3 は 2004 年 1 月 1 日から 2006 年 9 月 1 日までの日平均流量・降水量を示したものである．

過去の文献によると，寒川取水堰建設(1964 年)以前の昭和 22～26 年において低流量は約 $23\text{m}^3/\text{s}$ であり，塩水の遡上は 1935 年において河口から 1.35 km 程度までと記されている．工藤ら(2001)によると堰からの流量が $2\text{m}^3/\text{s}$ の状態だった時は，河口から 6 km 程度まで遡上したと記されている．また，図 2.1.3 の流量の変化を見ると，降雨によって大きく増加することがわかる．ここで流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ を超える期間が数回見られるが，これは台風が到来したことが原因である．また，降雨が長く見られなくなると流量が $8\text{m}^3/\text{s}$ まで低下し，これは相模川における濁水流量に対応している．流量が $8\text{m}^3/\text{s}$ の場合，河口から 5.7km 地点まで塩水の遡上が見られた（図は後に示す）．このように，相模川下流部における河川流量の変動は，人為的な影響を強く受けていることがわかる．

本研究で観測を実施した 2005 年 10 月から 2006 年において流量のピークは $250\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり，2004 年 1 月から 2005 年 9 月までと比べるとピークは小さく，また数も少ない．本来，夏場は洪水期にあたるが 2006 年は台風も到来しなかったため，流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ を下回る期間も多かった．図 2.2.1 は流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ の時の写真であるが，下流には殆ど河川水が放流されていないことがわかる．



図 2.1.2 寒川取水堰

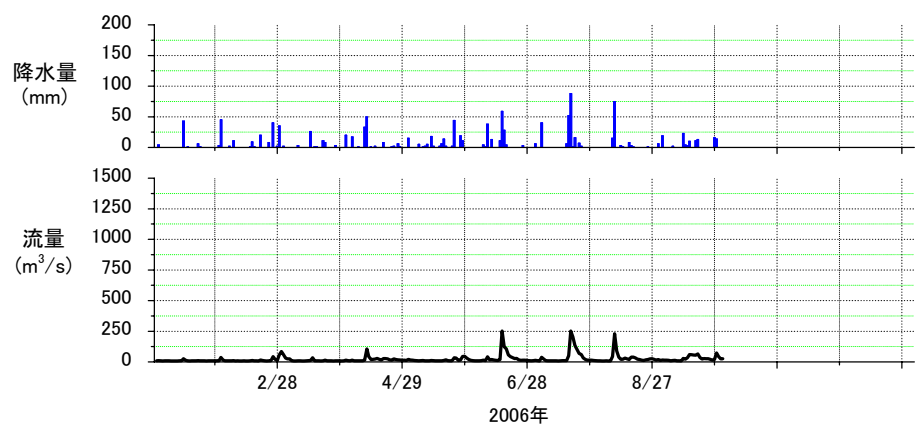
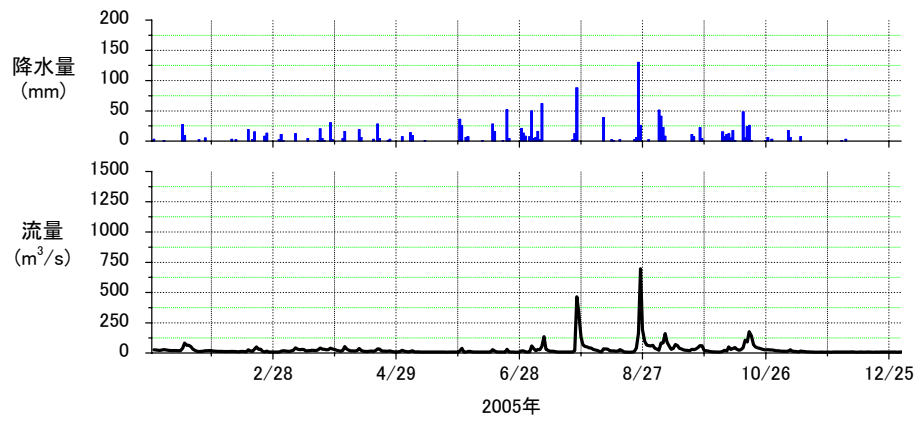
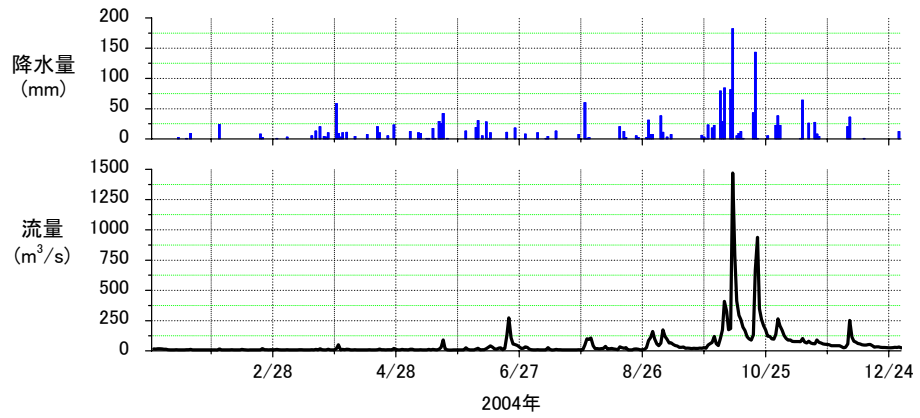


図 2.1.3 流量, 降水量の時系列

2.2 現地観測内容

2.2.1 自記式水質計による連続観測

本研究では相模川下流部の水質の挙動を把握するため、自記式水質計を河川内の3箇所において設置した。設置した場所は、上流から順に St.1, St.2, St.3 である(図 2.2.1 参照)。また、国土交通省京浜河川事務所より St.1 に存在する馬入水質観測所(図 2.2.1)の時系列データ(水温, DO, 濁度, pH, COD, 電気伝導度), 神奈川県企業庁利水課より寒川取水堰の流量および降水量の時系列データ, 神奈川県下水道公社より四之宮下水処理場における処理水(排水場所は図 2.1 参照)の時系列データ(放流量, 各種水質)を頂いた。以下に, 測定地点, 使用機器, 観測期間, 設置方法, 測定間隔を説明する。

(1) 測定地点

測定地点に関する項目を表 2.1.1 に示す。

表 2.2.1 測定地点一覧

地点名称	目安距離	横断位置	緯度	経度
St.1	河口より 5.5km 上流	流心	35° 21' 47"	139° 22' 4"
St.2	河口より 3.5km 上流	右岸	35° 20' 47"	139° 22' 9"
St.3	河口より 0.5km 上流	右岸	35° 19' 16"	139° 22' 0"

(2) 使用機器

測定機器名称, 測定項目, 及び設置位置について表 2.2.2 に示す

表 2.2.2 使用機器, 期間, 位置

地点	使用機器	設置層	設置期間
St.1	水温計	表層, 中層, 底層	6/16~7/6 7/26~9/1
St.2	DO 計	底層	6/16~7/6 7/26~9/1
〃	塩分計	底層	6/16~7/6 7/26~9/1
〃	クロロフィル a, 濁度計	底層	7/26~8/14
〃	水温計	表層, 中層, 底層	6/16~7/6 7/26~9/1
St.3	水温計	表層, 中層, 底層	6/16~7/6 7/26~9/1

水温計は, St.1, St.2, St.3 の各地点で, 表層下 0.2m, 底上 0.5m, 1.0m において測定した。DO 計, 塩分計, クロロフィル a・濁度計は底上 0.2m において設置した。

(3) 設置方法

St.1, St.2 においては、河川内に 15kg (密度 8.7g/cm³) のシンカー (おもり) を基準とし、フロートおよびワイヤーを用いて水質計を垂直に設置できるようにした。各地点での設置図を図 2.2.2, 図 2.2.3, 図 2.2.4 に示す。

(4) 測定間隔

DO 計, 塩分計, クロロフィル a・濁度計は 10 分間隔であり, 水温計は 15 分間隔である。馬入水質観測所および寒川取水堰のデータは 1 時間毎の測定であり, 四之宮下水処理場のデータは 1 日毎, または 1 週間毎のデータである。



図 2.2.1 馬入水質観測所

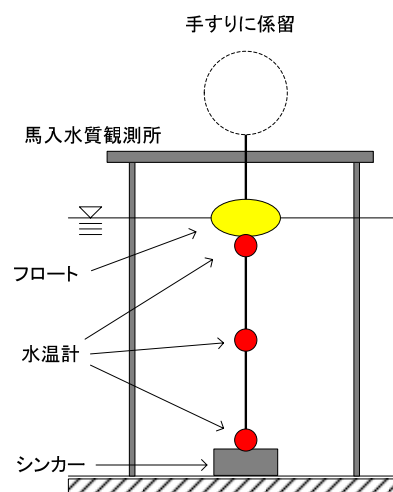


図 2.2.2 St.1 (馬入水質観測所) での設置概略図

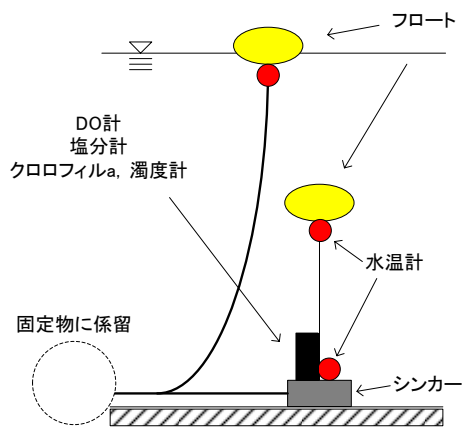


図 2.2.3 St.2 の設置概略図

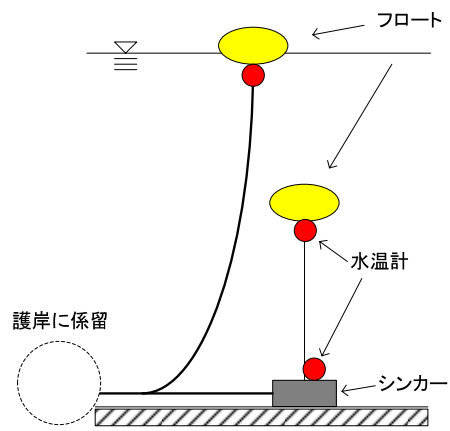


図 2.2.4 St.3 の設置概略図



図 2.2.5 St.2 の写真 (周囲を囲うことで水質計を防護)

2.2.2 投げ込み式水質計（多項目水質計）による観測

本研究では自記式水質計での結果を主として議論を進めていくが、自記式水質計を設置した3地点のみの結果では相模川下流部全体を議論する事は難しい。そのため、観測当日における河川全体の水質を把握することを目的として、多項目水質計を用いた鉛直方向の水質を多地点で計測した。計測日は2005年においては10月20日、11月16日、12月14日であり、2006年は6月26日、8月14日、9月1日である。以下に当日の測定地点を述べる。

(1) 2005年10月20日

表 2.2.1 2005年10月20日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度
1	0km	左岸	35° 19' 4"	139° 22' 10"
2	1km	左岸	35° 19' 25.3"	139° 22' 9.5"
3	2km	流心	35° 19' 57.7"	139° 22' 2"
4	3km	流心	35° 20' 29.6"	139° 22' 12.5"
5	4km	左岸	35° 21' 13.8"	139° 22' 12.8"
6	5km	流心	35° 21' 31.68"	139° 22' 11"
7	6km	流心	35° 22' 6.42"	139° 22' 7"

(2) 2005年11月16日

表 2.2.2 2005年11月16日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度	備考
1	0km	右岸	35° 18' 58.3"	139° 22' 2.1"	高潮, 低潮時
2	0.5km	右岸	35° 19' 11.2"	139° 22' 1.8"	低潮時のみ
3	1km	流心	35° 19' 26.4"	139° 22' 9.5"	高潮, 低潮時
4	1.5km	流心	35° 19' 41.4"	139° 22' 6.9"	低潮時のみ
5	2km	右岸	35° 19' 57.5"	139° 22' 4.5"	高潮, 低潮時
6	3km	左岸	35° 20' 30"	139° 22' 15.2"	高潮, 低潮時
7	4km	左岸	35° 21' 2.5"	139° 22' 10.1"	高潮, 低潮時
8	5km	左岸	35° 21' 33.6"	139° 22' 11"	高潮, 低潮時
9	5.5km	流心	35° 21' 46.7"	139° 22' 3.7"	高潮, 低潮時
10	5.7km	流心	35° 22' 1.6"	139° 22' 4.3"	高潮, 低潮時
11	6km	流心	35° 22' 6.42"	139° 22' 7"	高潮, 低潮時

(3) 2005年12月14日

表 2.2.3 2005年12月14日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度	備考
1	0.5km	右岸	35° 19' 11.2"	139° 22' 1.8"	低潮時のみ
2	1km	流心	35° 19' 26.4"	139° 22' 9.5"	高潮, 低潮時
3	1.5km	流心	35° 19' 41.4"	139° 22' 6.9"	低潮時のみ
4	2km	右岸	35° 19' 57.5"	139° 22' 4.5"	高潮, 低潮時
5	2.5km	左岸	35° 20' 12.4"	139° 22' 9.8"	低潮時のみ
6	3km	左岸	35° 20' 30"	139° 22' 15.2"	高潮, 低潮時
7	3.5km	左岸	35° 20' 43.8"	139° 22' 13.1"	低潮時のみ
8	4km	左岸	35° 21' 2.5"	139° 22' 10.1"	高潮, 低潮時
9	4.5km	左岸	35° 21' 27.5"	139° 22' 14.6"	高潮, 低潮時
10	5km	左岸	35° 21' 33.6"	139° 22' 11"	高潮, 低潮時
11	5.5km	流心	35° 21' 46.7"	139° 22' 3.7"	高潮, 低潮時
12	6km	流心	35° 22' 6.42"	139° 22' 7"	高潮, 低潮時

(4) 2006年6月26日

表 2.2.4 2006年6月26日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度	備考
1	2km	流心	35° 19' 56.6"	139° 22' 2.3"	2回計測
2	2.5km	左岸	35° 20' 12"	139° 22' 9.9"	2回計測
3	3km	左岸	35° 20' 28.9"	139° 22' 16.5"	
4	3.5km	右岸	35° 20' 4.5"	139° 22' 9.5"	2回計測
5	4.2km	右岸	35° 21' 8"	139° 22' 10"	2回計測
6	4.2km	左岸	35° 21' 8"	139° 22' 14.4"	2回計測
7	5.5km	流心	35° 21' 48"	139° 22' 3.6"	
8	3.7km	流心	35° 20' 47.5"	139° 22' 12.3"	
9	1.2km	左岸	35° 19' 29.5"	139° 22' 1.4"	
10	0.7km	右岸	35° 19' 17.3"	139° 21' 59"	
11	0.3km	左岸	35° 19' 5.8"	139° 22' 11"	
12	1km	左岸	35° 19' 25.6"	139° 22' 9.5"	
13	1.5km	左岸	35° 19' 38.4"	139° 22' 8.7"	

(5) 2006年8月14日

表 2.2.5 2006年8月14日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度
1	5.5km	中央	35° 21' 47"	139° 22' 4"
2	5km	中央	35° 21' 33"	139° 22' 10"
3	4.2km	左岸	35° 21' 18"	139° 22' 17"
4	4km	左岸	35° 21' 6"	139° 22' 15"
5	4km	右岸	35° 21' 6"	139° 22' 9"
6	3.5km	右岸	35° 20' 47"	139° 22' 9"
7	3.5km	左岸	35° 20' 47"	139° 22' 15"
8	3km	左岸	35° 20' 29"	139° 22' 15"
9	2.5km	左岸	35° 20' 12"	139° 22' 9"
10	2km	中央	35° 19' 55"	139° 22' 2"
11	1.5km	左岸	35° 19' 38"	139° 22' 4"
12	1km	左岸	35° 19' 25"	139° 22' 9"
13	1km	右岸	35° 19' 25"	139° 22' 2"
14	0.5km	左岸	35° 19' 11.1"	139° 22' 10.7"
15	0.5km	中央	35° 19' 15.4"	139° 22' 14.9"
16	0.5km	右岸	35° 19' 16"	139° 22' 0"

(6) 2006年9月1日

表 2.2.6 2006年9月1日の測定地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度	備考
1	5.5km	中央	35° 21' 47"	139° 22' 4"	
2	5km	中央	35° 21' 33"	139° 22' 10"	
3	4.2km	左岸	35° 21' 18"	139° 22' 14"	
4	4km	左岸	35° 21' 6"	139° 22' 15"	
5	4km	右岸	35° 21' 6"	139° 22' 9"	
6	3.5km	右岸	35° 20' 47"	139° 22' 9"	
7	3.5km	左岸	35° 20' 47"	139° 22' 15"	
8	3km	左岸	35° 20' 29"	139° 22' 15"	No8 と 9 の中間を測定
9	2.5km	左岸	35° 20' 12"	139° 22' 9"	No9 と 10 の中間を測定
10	2km	中央	35° 19' 57"	139° 22' 2"	右岸も測定
11	1.5km	左岸	35° 19' 41"	139° 22' 4"	
12	1km	左岸	35° 19' 25"	139° 22' 9"	
13	0.3km	左岸	35° 19' 4"	139° 22' 12"	
14	0.3km	右岸	35° 19' 4"	139° 22' 0"	
15	0.5km	右岸	35° 19' 16"	139° 22' 0"	

2.2.3 採水, 採泥

河川内の栄養塩濃度を把握するため、多項目水質計による観測と同時に採水をおこなった。採水日は2005年においては10月20日、11月16日、12月14日、3月15日であり、2006年は6月26日、7月26日、8月14日、9月1日である。測定地点は多項目水質計での測定地点と同じ場所で行い、表層と底層においてサンプリングした。

また、8月14日と10月30日に表層の底質サンプリングを行った。8月に採泥した場所を表2.9に示す。10月はSt.1、河口より1.0km上流右岸、2.0km上流において行った。

表 2.2.7 2006 年 8 月 14 日の採泥地点

No.	河口からの距離	横断方向	緯度	経度
1	2.2km	流心	35° 20' 7.1"	139° 22' 1.3"
2	2km	右岸	35° 19' 53.7"	139° 21' 58.7"
3	2km	流心	35° 19' 52.8"	139° 22' 3.5"
4	1.5km	左岸	35° 19' 38.3"	139° 22' 8.5"
5	1.2km	左岸	35° 19' 31.2"	139° 22' 9.9"
6	0.7km	左岸	35° 19' 18.3"	139° 22' 10.4"
7	0.4km	左岸	35° 19' 6.8"	139° 22' 11.2"
8	0.7km	流心	35° 19' 16.1"	139° 22' 4.8"
9	0.7km	右岸	35° 19' 17.5"	139° 21' 59"
10	1.5km	右岸	35° 19' 35.5"	139° 22' 4.3"
11	2.7km	左岸	35° 20' 20.1"	139° 22' 12.8"
12	3.5km	右岸	35° 20' 48.6"	139° 22' 9.2"
13	5.5km	流心	35° 21' 47"	139° 22' 3.9"

2.3 実験・分析内容

栄養塩分析

採水、及び採泥したサンプルを用いて、実験室で無機態窒素、燐の栄養塩分析を行った。栄養塩の分析には、オートアナライザー(ブラン・ルーベ(株)製AACSⅢ)を用いた。この機械は吸光度法により栄養塩濃度を自動的に測定することができる。吸光度法の原理は、試料溶液中の目的成分を適当な試薬(呈色試薬)で光吸収物質に変え、特定波長での光の吸収の度合いを測定し、目的成分を定量する方法である。

BOD・SOD 実験

BOD(Biochemical Oxygen Demand)は、試料水中に存在する有機物が、微生物によって好気的な条件下で分解・安定化される間に消費する酸素量のことである。今回は試料水を一定温度(20℃)に設定し、5日間で減少する酸素の量を調べた。これはBOD5と呼ばれる最も一般的な測定方法である。また、今回のBOD実験は、有機物の分解及び硝化菌による消費も含めた、純粋な水自体の消費量を調べることを目的として行った。そのため硝化

菌による硝化作用を抑制する N-アリルチオ尿素を加えずに実験をしたことを明記する。

BOD 実験には 2006 年 10 月 30 日に採水した試料を用いて行った。サンプルは、それぞれ河口より 5km 上流の表層水、下水処理水、河口より 2km 上流の表層水、塩水フロントの底層水、河口底層の海水の 5 つである。

また、10 月 30 日には採水と同時に底質サンプリングを行い、その試料を用いて実験室において SOD 実験をした。SOD(Sediment Oxygen Demand)とは底質による酸素要求量である。実験方法は、試料を入れた柱状コアの中に、サンプルを乱さないように飽和させた蒸留水を入れ DO の消費量を記録した。この時、20°C に設定した高温水槽で光が当たらないようにした条件で実験を行った。SOD 実験は DO が 0mg/L になるまでか、DO の消費スピードが一定になるまでの時間で実験した。



図 2.3.1 オートアナライザ



図 2.3.2 多項目水質計



図 2.3.3 BOD, SOD 実験に用いた高温水槽
(光が当たらないようにダンボールで囲った)



図 2.3.4 SOD 実験に用いたコア

第3章 水質の時空間変動

本章では、現地観測結果について述べる。3.1 について空間分布について述べ、3.2 については時系列の変動について、そして3.3 では代表した地点毎での鉛直プロファイルについて述べる。

3.1 空間変動

3.1.1 では塩分、水温、DO の鉛直分布図を季節毎に示す。3.1.2 については6月、8月および9月についての横断分布図を示す。

3.1.1 鉛直分布図

相模川河口から上流にかけての水質状況を把握するため、多項目水質計による観測結果を用いて観測毎の鉛直分布図を示す。図3.1.1 では塩分の鉛直分布を、上から順に2005年10月、11月、12月、2006年8月、9月と示す。同様に、図3.1.2 では水温について、図3.1.3 ではDO についての鉛直分布図を示す。

凡例については各値を8分割して示した。塩分では0psu～30psuを、水温については2005年10月、11月、12月は10℃～20℃とし、2006年8月、9月は22℃～27℃を8分割して示した。DO については3mg/L～12mg/Lとした。

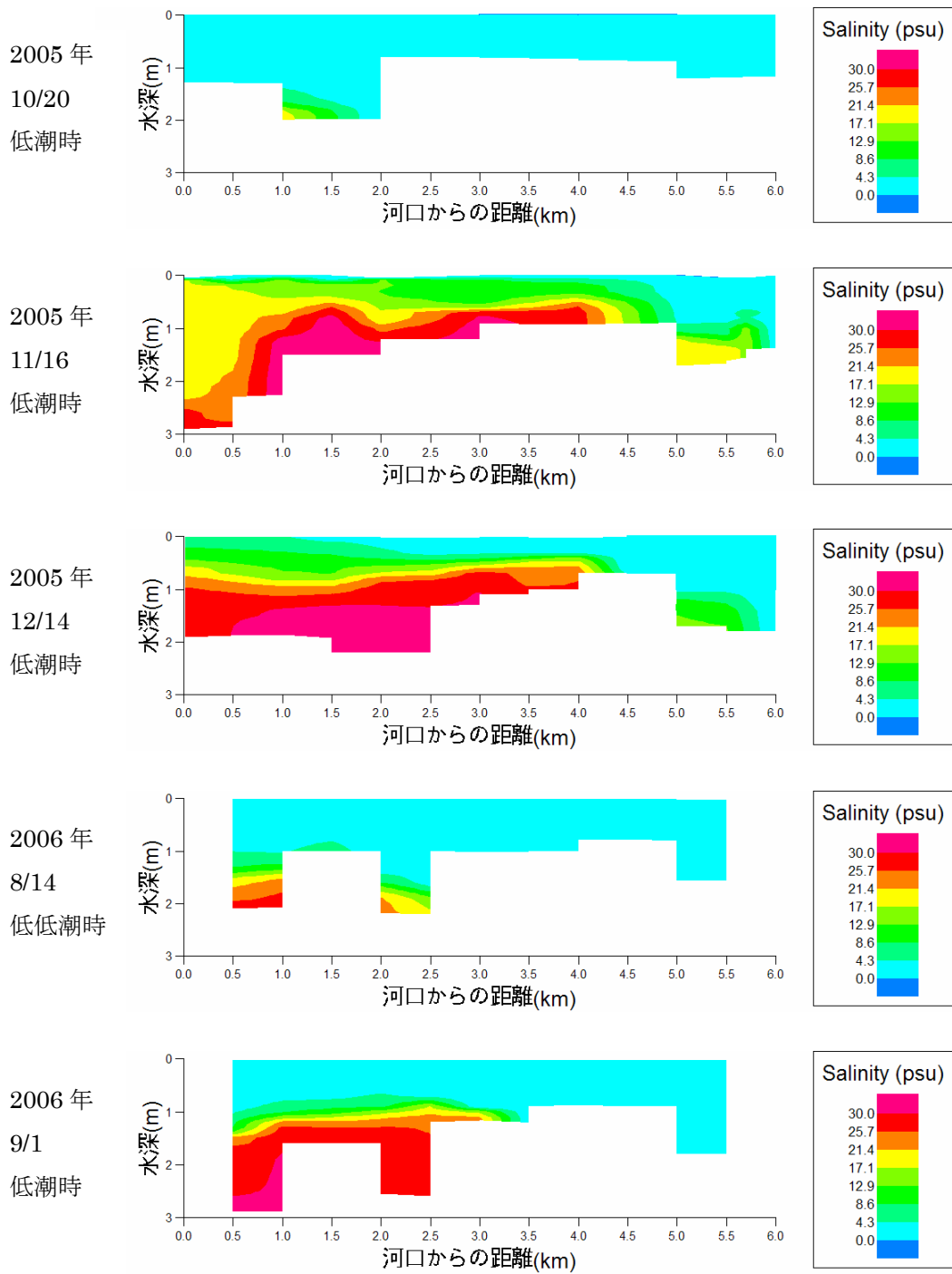


図 3.1.1 塩分鉛直分布図

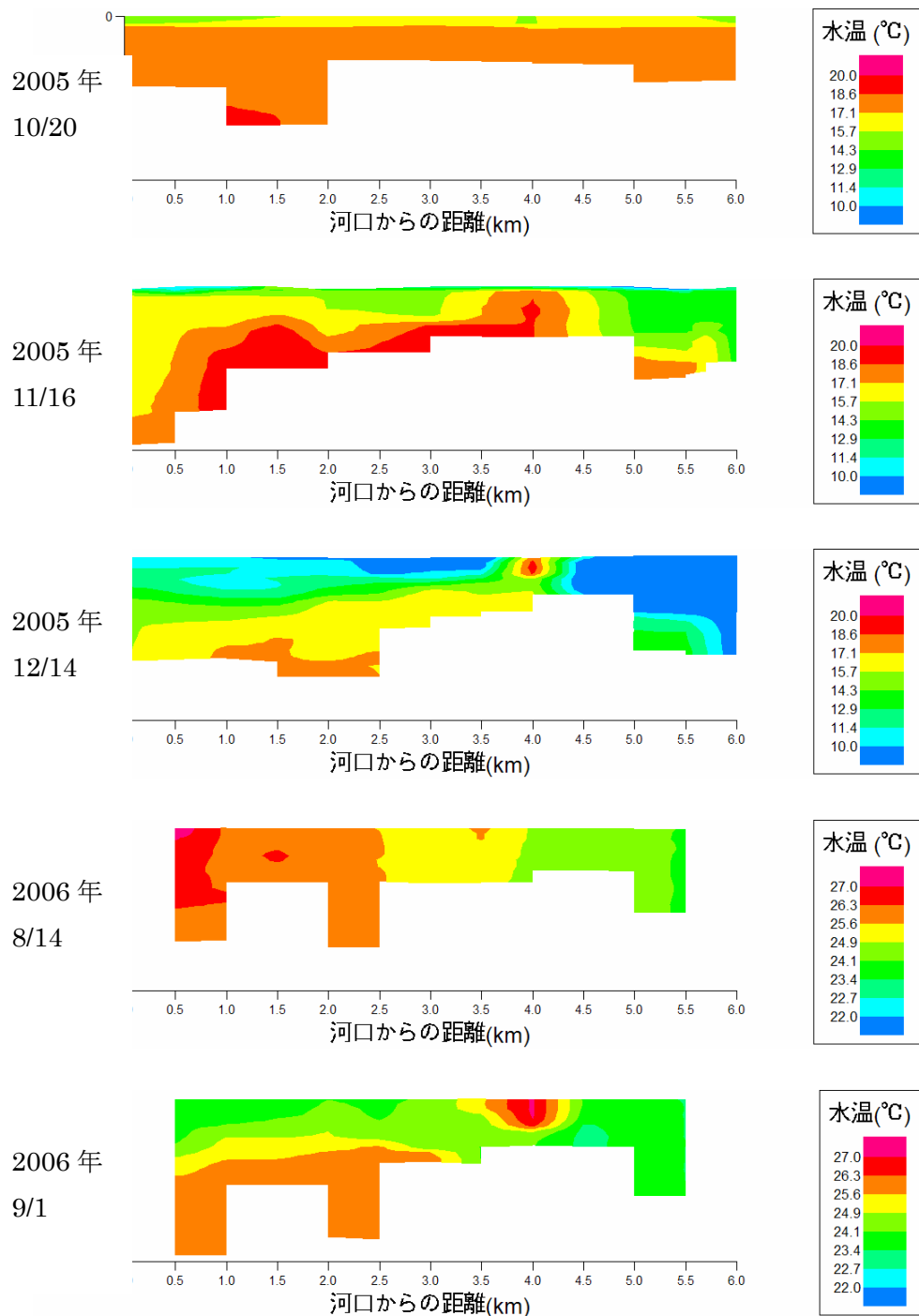


図 3.1.2 水温鉛直分布図

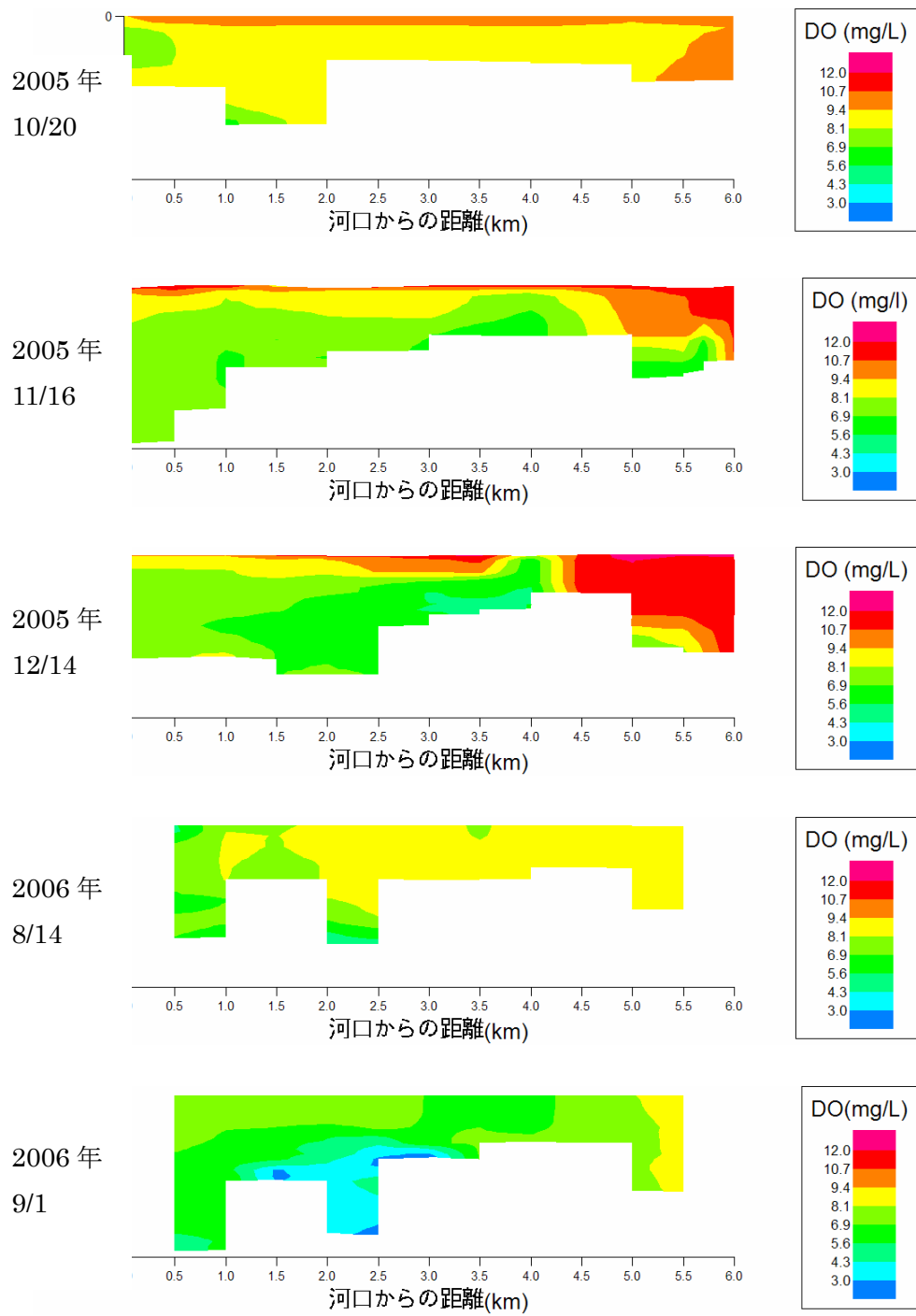


図 3.1.3 DO 鉛直分布図

表 3.1.1 観測日前の流量(m³/s)推移

	2005/10/20	2005/11/16	2005/12/14	2006/8/14	2006/9/1
4 日前	106.27	15.92	8.04	90.1	21.12
3 日前	91.41	12.77	8.52	39.54	15.3
2 日前	177.57	11.72	8.49	20.79	19.21
前日	140.36	9.77	8.04	22.4	12.47
当日	69.74	9.67	8.13	30.4	16.85
平均	117.1	12.0	8.2	40.6	17.0

(1) 塩分

表 3.1.1 は観測日より 4 日前から当日までの流量の変化を示したものである。図 3.1.1 と表 3.1.1 より、塩水の遡上距離と流量に相関があることがわかる。11 月、12 月のように流量が少ない状況が続けば、低潮時においても 25psu 以上の濃度の高い塩水が 4.0km 程度まで遡上している。逆に 10 月のような流量が多い状況であれば、塩水は殆どフラッシュされ河川内に溜まっていない。

塩水の遡上は最長で 6.0km 程度まで見られた。また河口より 1.5～2.5km の範囲および砂州の背後周辺は水深が大きく、塩水が溜まりやすい状況になっている(図 2.1 参照)。これにより遡上した塩水がフラッシュ混合し難い地形となっていることが示唆される。

過去の資料によると従来、相模川は潮位差が 1.5m 程度であり、塩淡水の混合状態は緩混合型である。しかし現在では、流量の低下や河床の低下により弱混合に変化していると言える。

(2) 水温

図 3.1.1 において塩水楔が形成された場合、水温も同様に成層ができていることがわかる(図 3.1.2 参照)。また成層が形成された全観測日で、表層の水温は底層の水温よりも低く、成層は逆になっている。各観測日における最低水温および最高水温は季節により変動しており、夏場においては 27℃以上になる所もあった。また 11 月、12 月においても底層の水温が 20℃弱と高い水温が維持されている。4.0km 地点において、水温が周辺に比べ高くなっているが、これは下水処理場からの排水が影響している。

(3) DO

図 3.1.3 より、年間を通して底層の DO が表層と比較して低いことがわかる。これは、進入した塩水の DO が淡水に比べ低く、密度成層が形成されているため DO が供給され難い。また底質による分解作用が DO の消費を促している事も考えられる。11 月、12 月に比較して 9 月は塩分の成層が強くないが水温は 10℃ 近く高いため、底質による分解作用が DO の消費を促しているためであると考えられる。DO の低下は、供給の減少と消費の増加によって起こるものと考えられる。また、塩水のフロントが特に DO が低下しており、9 月 1 日においては 3.0mg/L 以下まで低下していた。

3.1.2 空間分布図

各地点において多項目水質計を用いて測定した底層塩分および底層 DO の空間分布図を図 3.1.4 に示す。上が DO、下が塩分であり 6 月 26 日、8 月 14 日、9 月 1 日のものをそれぞれ載せた。

3 つの期間のいずれにも見られることとして、塩水が河川内に進入し、塩水フロント周辺において他の塩水区間に比べ DO が低下していることが挙げられる。6 月の DO の最低値は 2.9mg/L であり、8 月は 3.75 mg/L、9 月は 1.89 mg/L であった。6 月 26 日の 11 日前の 6 月 15 日においてフラッシュがあり、8 月では 4 日前の 8 月 10 日、9 月では 8 月 10 日から大きなフラッシュは発生していない。8 月 14 日のものは塩分も他の 2 つに比べ低いことから、塩水が進入してから日数が浅く、強い成層構造が形成されず有機物等による DO の層日も少なかったため DO が大きく低下しなかったと言える。

進入した塩水の塩分は河口付近で最も高く、塩水フロントに進むにつれ低くなる。8 月においては塩分の高い場所が、砂州背後の左岸側と河口より 2.0km 上流付近のみであり、図 2.1 を見るとわかるが水深の深い部分に限られている。8 月 14 日の流量は 30m³/s と 6 月、9 月の約 10 m³/s に比べると 3 倍近かった。また低低潮時の観測であったため、進入した塩水の水位が低く、そのため塩淡水が混合してしまい水深の浅い所の塩分が低くなったと考えられる。逆に 9 月の観測日は小潮時であったため、他の 2 つに比べ水深が高く、底層の塩分は高くなっている。

DO を見ると、河口付近はおおよそ 7mg/L を下回ることなく高い値を維持している。表層は河川水が流れているため外海から進入する塩水は底層を通る。その後、エスチャリー循環によって河口付近の底層塩水は塩水フロントに向かい、塩水フロントの塩水は表層を流れ河川水と混合または外海へ流出する。このように河口付近の DO が高く、塩水フロントに向かいながら低下していくことが示唆される。

6月26日

8月14日

9月1日

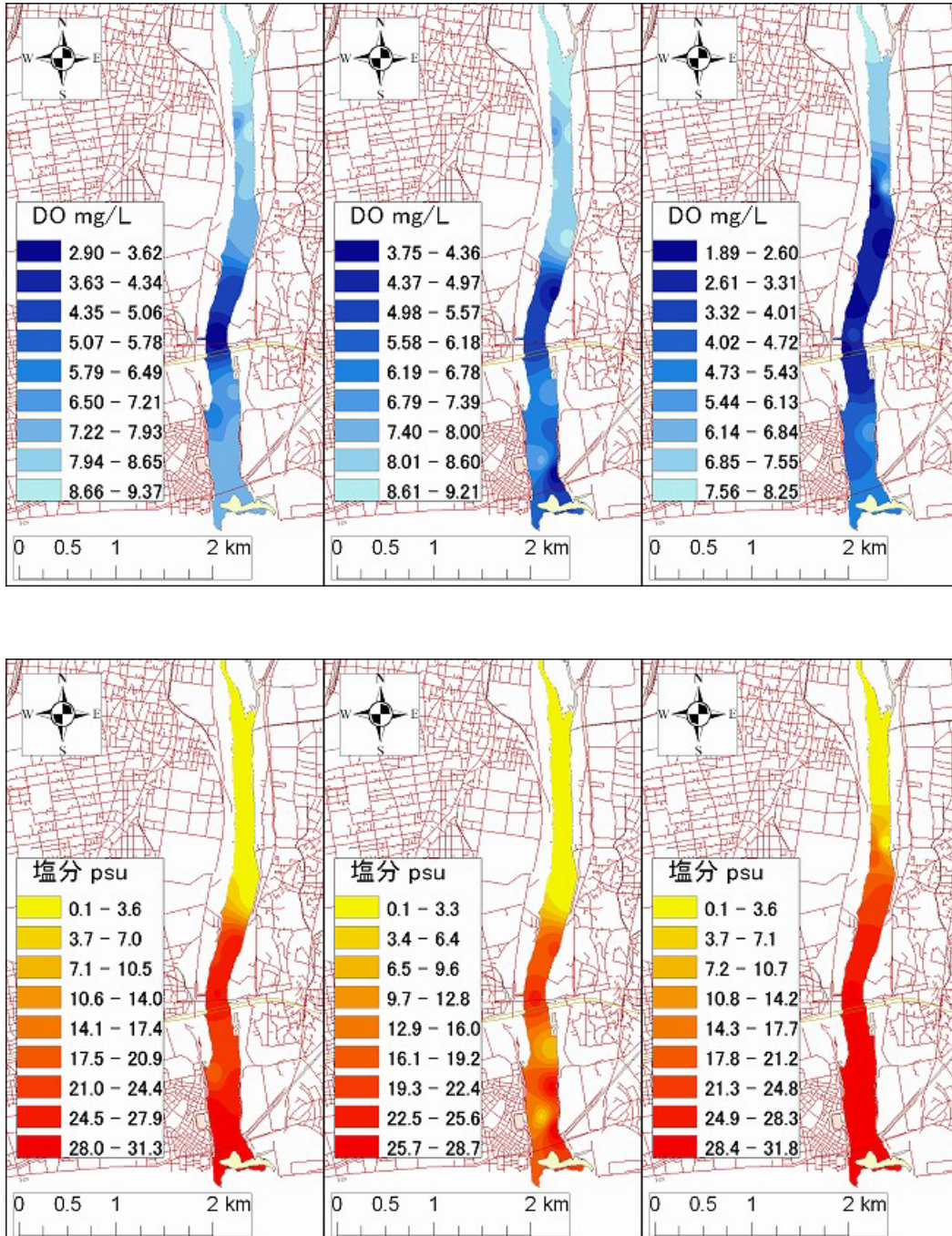


図 3. 1. 4 底層 DO, 塩分の空間分布図

3.2 時間変動

3.2.1 St.2 における時系列

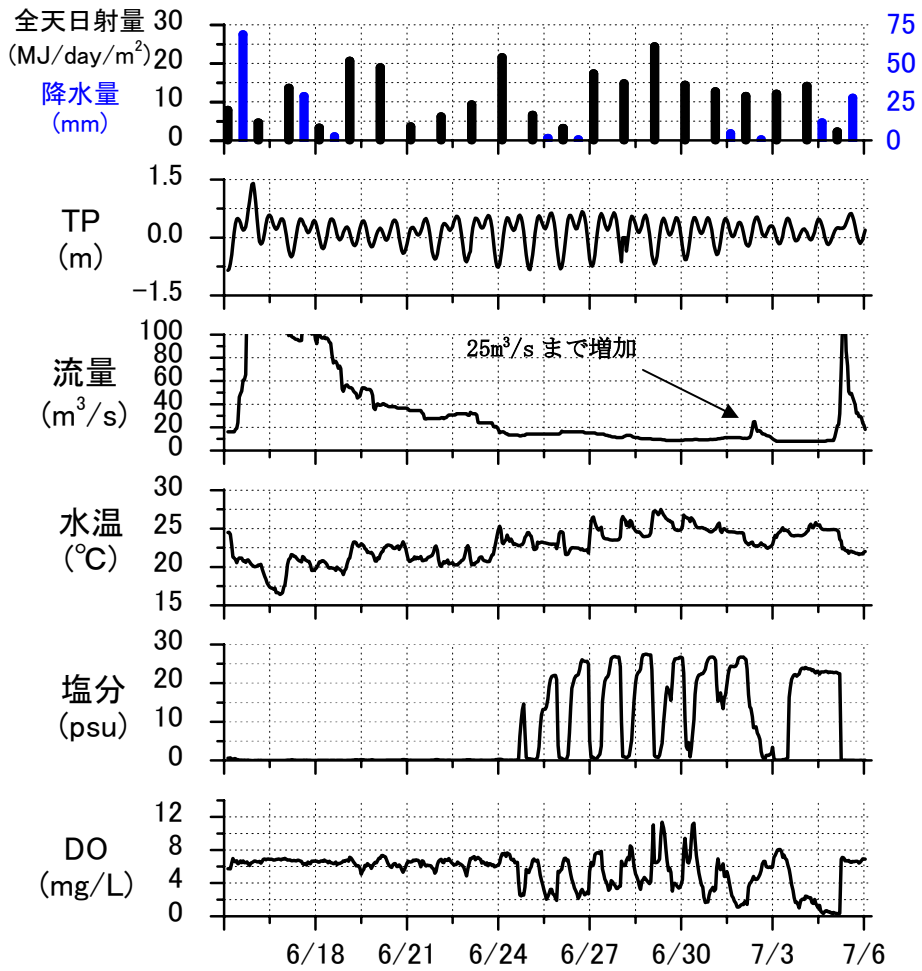


図 3.2.1 6月時系列

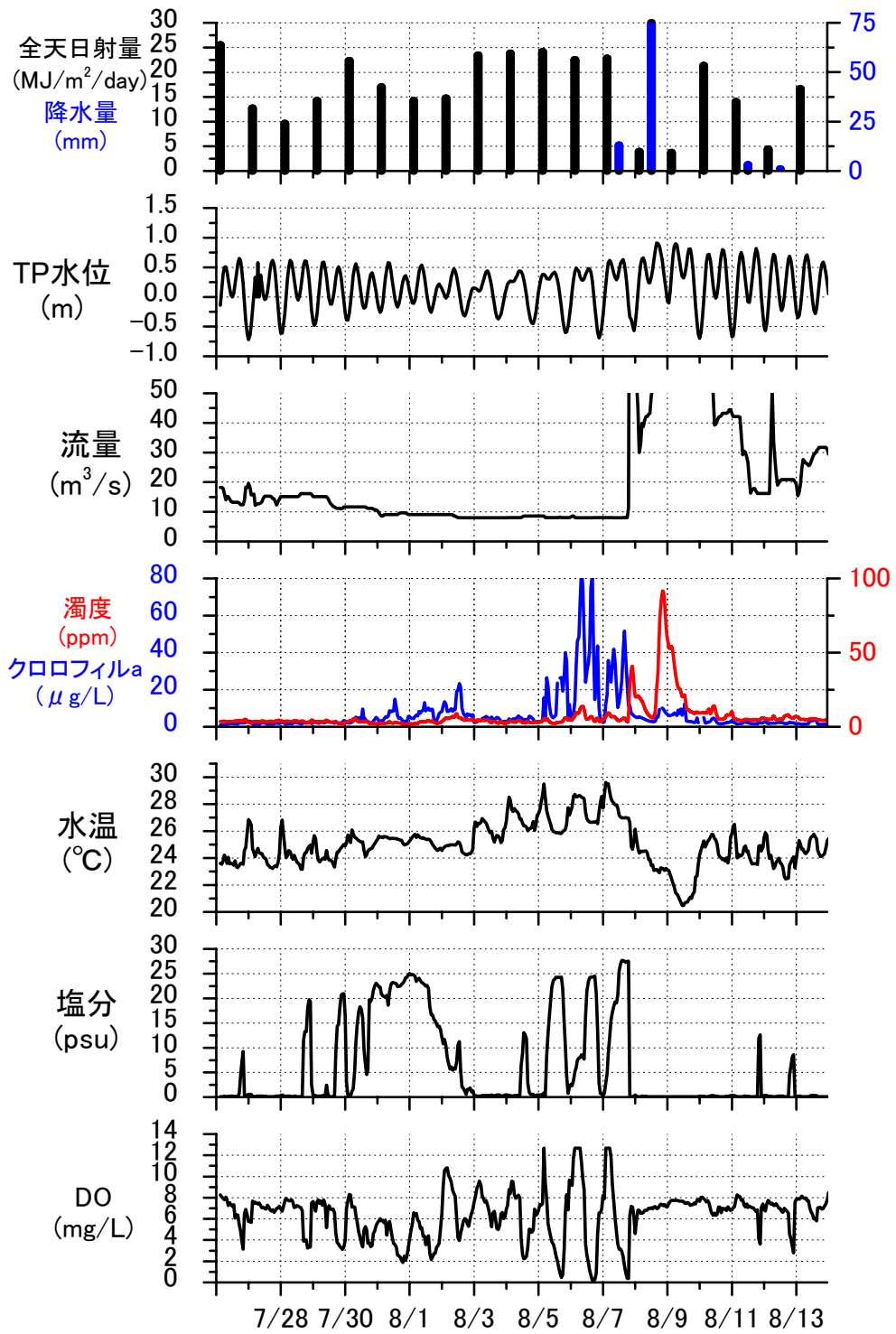


図 3.2.2 8月時系列(前半)

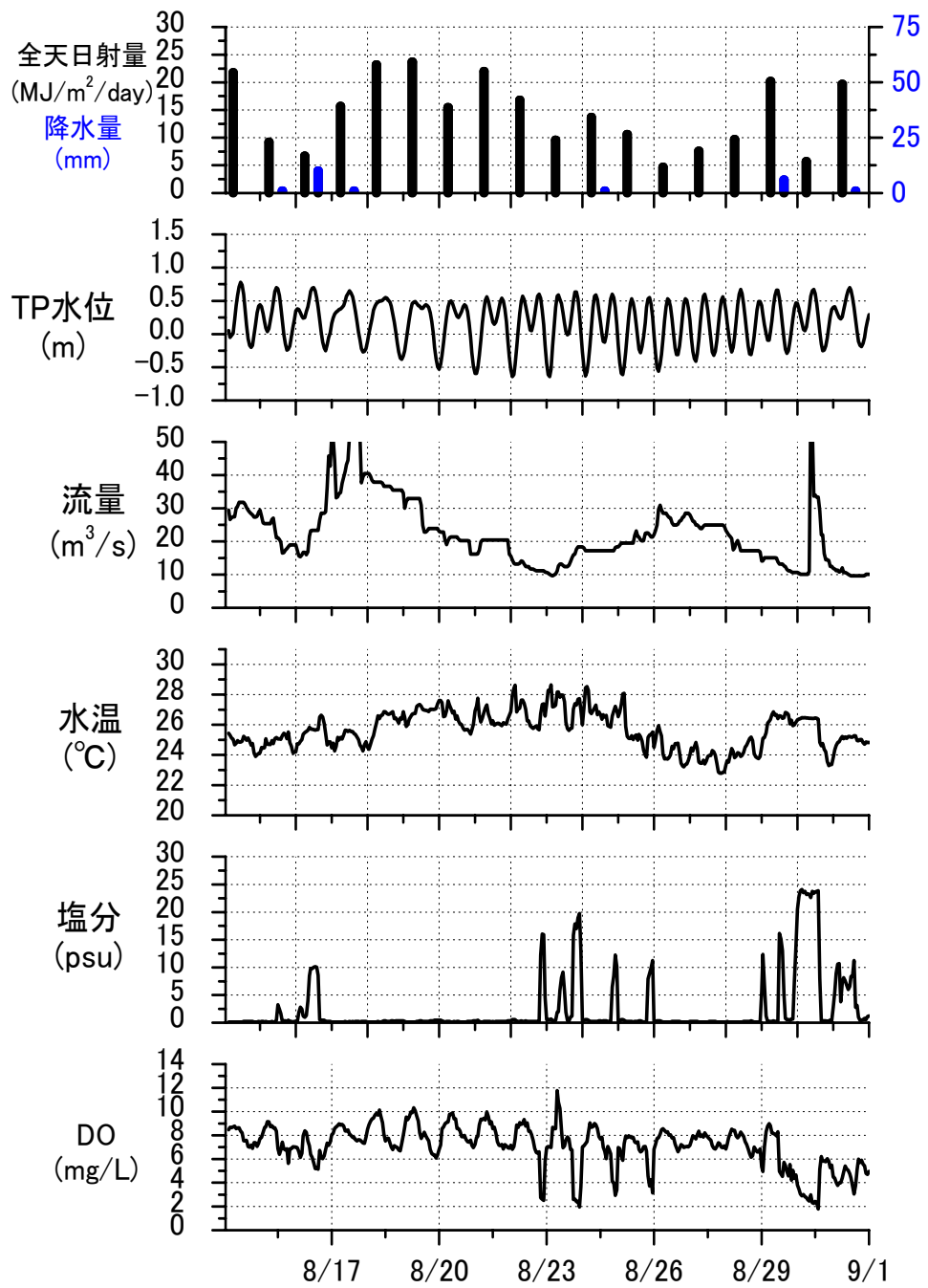


图 3.2.2 8月時系列(後半)

(1) 塩分の挙動

図 3.2.1, 図 3.2.2 は St.2 における DO, 塩分, 水温, 馬入水質観測所における水位(TP 表示), 寒川取水堰からの放流量, 全天日射量 (東京), 雨量(平塚), の 6 月 26 日から 9 月 1 日までの時系列データである。また, 図 3.2.2 については濁度・クロロフィル a を 7 月 26 日から 8 月 14 日において追加した。6 月 15 日から 18 日にかけて, 計 149mm の降雨があった結果, 流量が大きく増加した。その後も, 流量は降雨後には上昇し, 数日かけて減少していくという変動を繰り返した。その結果, St.2 まで遡上する塩水は, 流量が概ね $20\text{m}^3/\text{s}$ 以下の値で安定している状態においてのみ見られた。7 月 2 日には少量の降雨により流量が $25\text{m}^3/\text{s}$ まで上昇し, 結果容易に塩分が下がり塩水が下流に流されている。そのため, 塩水の遡上が見られたのは 6 月 25 日から 7 月 5 日, 7 月 29 日から 8 月 8 日, 8 月 29 日から 9 月 1 日までであった。ここで 7 月 5 日, 8 月 8 日の両日に塩分が急激に 0psu まで下がったことは, 降雨による流量の増加で塩水がフラッシュされたためである。

塩分の平均的な変動は流量に依存するが, 潮汐にも依存する。塩分は, 大潮時において上潮～高潮にかけて上昇し, 低潮時にも 20psu 以上の高い値を維持し, 低低潮時には 0psu まで下がる。また小潮時には, 塩分は潮汐に依存することなく常に 20psu 以上の値を保っていた。小潮時は大潮時に比較して潮位変動が小さいため, 河川水と混合し難い。また低低潮時における潮位が大潮時より高いため, 塩水が遡上したまま滞留し, 高い塩分を維持していたと考えられる。

(2) DO の挙動

DO の挙動は, 塩分の変動と強い相関があることが図 3.2.1, 図 3.2.2 より見てとれる。そこで, 観測期間全般の挙動と貧酸素化した大潮時・小潮時の挙動に分けて説明する。

a) 全体的な挙動

観測期間中, 塩分の上昇に連動して DO は低下する結果となった。しかし塩分が上昇しない時には, DO は概ね $7\sim 8\text{mg}/\text{l}$ の高い値を保ち, ほぼ飽和状態であった。6/29, 6/30, 8/2～8/7, 8/18～8/24 において DO が $10\text{mg}/\text{l}$ を超え, 過飽和状態になった。この期間中は水温が 25°C 以上であり, 全天日射量が大きく, 平均で $20\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ であった。そのためクロロフィル a が増加し DO が過飽和になったと考えられる。また, 7/5, 8/8 において DO が下がった状態から, 急激に上昇しているが, これは降雨により流量が増加し, 貧酸素水塊がフラッシュされたためである。今回の観測では, 小潮・大潮時の両方において, 貧酸素化する結果が得られた。

b) 小潮時における貧酸素化

6/25 から DO は塩分の上昇に合わせて減少し、低低潮時に DO は回復するという変動を繰り返した。小潮になるにつれ、DO の最小値が下がり始め 7/1 から DO が 3mg/L を下回るようになった。7/2 から 7/3 にかけて流量が一時的に増加したため、DO が上昇したが、最終的に 7/5 には無酸素状態まで低下している。

c) 大潮時における貧酸素化

7/30 の小潮時には DO は 2.2mg/l と貧酸素化している。その後、一時、塩水が遡上しなくなるが 8/5 から塩分の上昇にあわせ DO が低下し始め、8/6 には無酸素状態まで低下した。

d) 考察

今回の観測期間において、貧酸素化した期間は 6 月下旬、8 月上旬、8 月下旬に三度見られたが、貧酸素化した期間における共通事項は、高塩分、高水温、低流量であった。また、塩水が遡上して、上述の状態が数日間連続し、無酸素状態まで DO が低下することがわかった。流量が低下し、成層強度が増すことで酸素供給が減少し、水温が上昇することで生物活性が上がり酸素消費が増加したと考えられる。

貧酸素化は一般的には潮位差の小さい小潮時に起こりやすい。逆に大潮時は潮位差が大きく塩淡水の混合が起きやすいため成層が破壊されやすく、そのため貧酸素化は起こりにくいと言われている。しかし今回の観測では小潮時と大潮時の両方において貧酸素化が見られた。酸素消費が酸素供給に卓越したことが考えられるが、酸素を供給する塩淡水の混合を考えると流量は 8 m³/s の相模川における最低流量が一週間近く続いた。また水温が上昇すると有機物の分解等が進み酸素消費が加速されるが、水温は 30℃ 近くまで上昇し非常に高かった。このように酸素消費の増加、そして酸素供給の低下が相互に作用したため大潮時においても貧酸素化が起こったと考えられる。

(3)その他水質

流量が多いときには水温が低くなる傾向が見られる。6 月 15 日および 8 月 10 日のフラッシュ時には何れも水温が低下しており、水温が上昇するときには流量が小さい傾向にある。これは流量が少ないと同時に流速も遅くなるため、日射等によって暖まりやすくなるものと考えられる。

流量は降雨があると増加する傾向にあり、降雨強度が強いほど流量の増加も激しくなる。またフラッシュ後に降雨が無ければ相模川の低水量である 8 m³/s に近づいていく。観測期間中に 8 m³/s まで下がったのは 6 月 30 日～7 月 4 日、8 月 2 日～8 月 8 日であり、いずれも貧酸素化していた。降雨が長期にわたって無く、流量が低下した状態が続くことで貧酸素状態に達することが示唆される。

3.2.2 馬入水質觀測所時系列

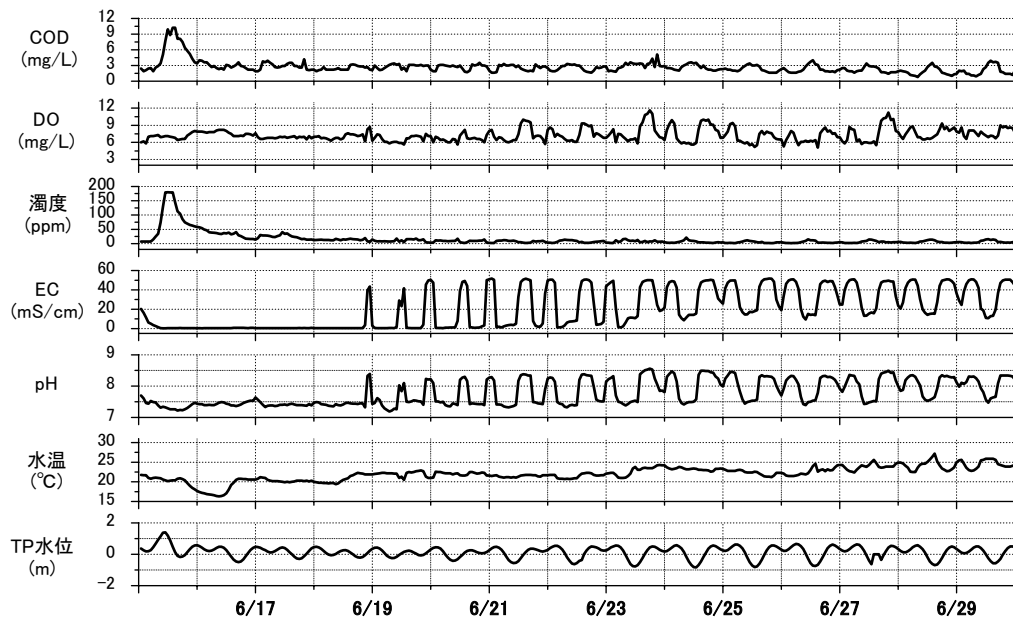
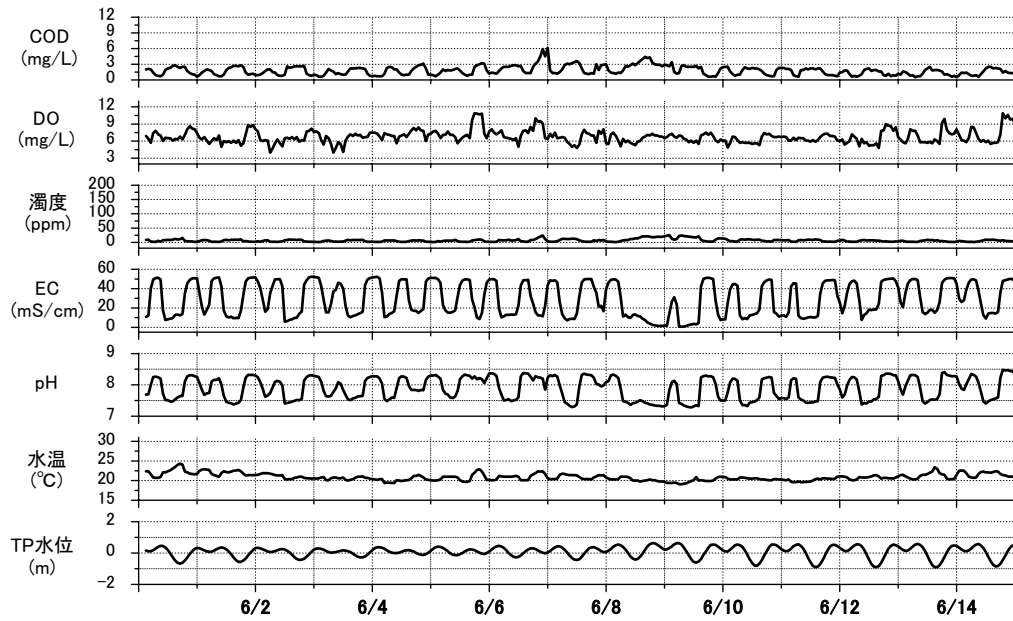


図 3.2.3 馬入水質觀測所 6月時系列

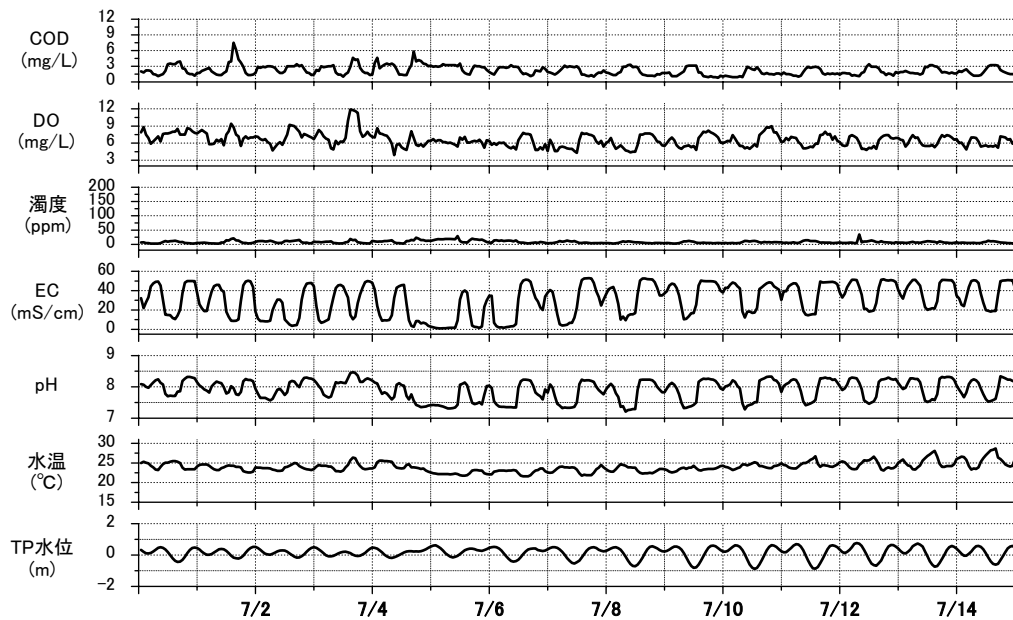


図 3.2.4 馬入水質観測所 7月時系列

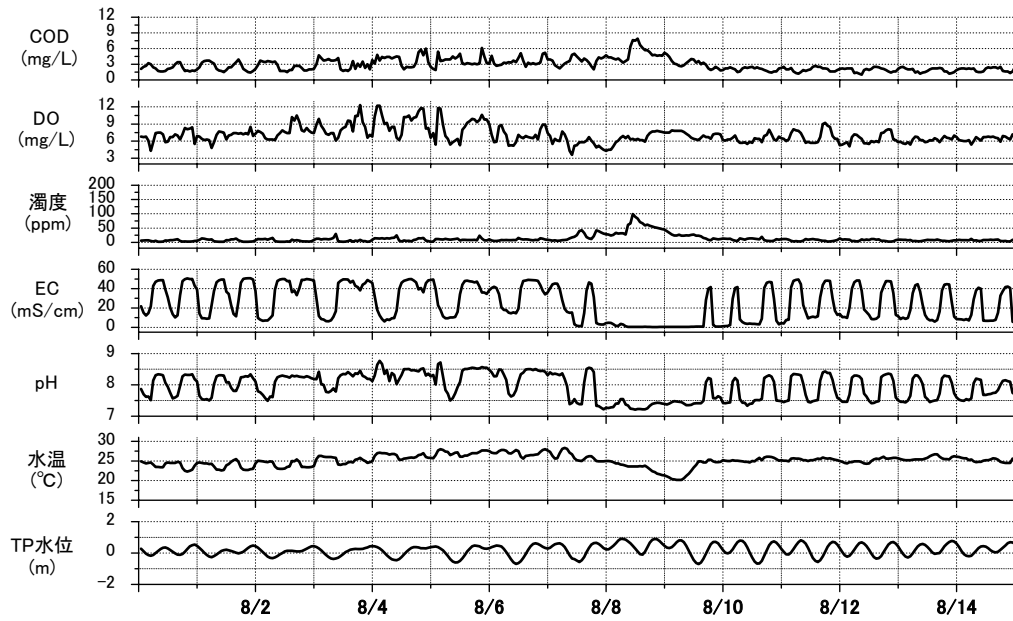


図 3.2.5 馬入水質観測所 8月時系列

図 3.2.3～図 3.2.5 は馬入水質観測所で測定している 2006 年の水質時系列である。図 3.2.3 は 6 月のデータであり、図 3.2.4 は 7 月、図 3.2.5 は 8 月のものである。測定項目は上から順に COD(mg/L), DO(mg/L), 濁度(ppm), EC(mS/cm), pH, 水温 (°C), TP 水位(m)を示してある。

濁度と水温を除き、他の項目は潮位の影響を受け変動することがわかる。水位の変動は潮位のそれと連動しており、水位の上昇に伴い EC が上昇する。EC が上昇する時は pH と DO も上昇し、COD は逆に下がる。これは、海水は河川水に比べ酸化の進んでいないため pH が高く、また有機物量が少ないため COD 値が低いと言える。

水温は 6 月から 8 月にかけて徐々に上昇していき、6 月前半は 20°C 前後であるものが 8 月中は 25°C を超える日も多く見られた。日単位の変動は日射によるものと考えられる。また水温が突然下がる日が何度か見られるが、これは降雨によるフラッシュが原因である。そのため水温が低下する時には濁度は同時に急激に上昇している。また COD も上昇しているが、濁度が増加することで有機物量も同時に増えた結果であると考えられる。

観測期間中、DO が何度も 10mg/L 程度もしくは以上になる場合が見られた。6 月中と 7 月の後半は DO が 9mg/L 以上になる時は EC が上昇しているが、7 月の前半と 8 月中は DO が 9mg/L 以上になっている時は EC が低下している時である。一般的に DO が過飽和になるような時は植物プランクトン等による光合成が原因である。また頻度は少ないが相模湾においても赤潮が発生した経験はある。つまり 6 月中および 7 月後半は湾内で DO が過飽和になり上げ潮時に河川内に進入し、7 月前半および 8 月は河川内で DO が過飽和になり湾外へ流出していったと考えられる。

3.2.3 馬入水質観測所の表層塩分

図 3.2.6, 図 3.2.7 は馬入水質観測所(St.1)における表層塩分、水位、流量を示した時系列である。6 月 15 日のフラッシュにより流量が 600m³/s まで上昇し(図 3.2.1 参照)、水位が 1.4m まで上昇した。これは全観測期間を通して最も大きな値であった。その後は流量が減少し 6 月 25 日には 20 m³/s 以下まで低下し、表層の塩分も反応を見せ始めた。

表層の塩分が反応している間の流量はのきなみ 20 m³/s 以下であり、また塩分の変動は水位変化と相関があることがわかる。すなわち水位の上昇に伴い塩分が上昇しており、最大は 30psu で底層塩分値と変わらない値を出している。塩分の極大値は常に上潮の中間時であり、これは中間時において水位上昇速度が最も高いからである。また 7/3, 7/4 のような小潮時には塩分が上昇しないのは潮位差が小さいために塩水の進入速度が遅いためである。

このように相模川河口部においては上潮時に河口部の表層塩分は非常に高くなることがわかった。これは流量が少ないために河川内への塩水流入が河川水に卓越するからと考えられる。また潮汐速度が最大になるとき塩分も最大になり、小潮時において塩分が余り上昇せず、これは潮汐速度が大潮時に比較し小さいからといえる。

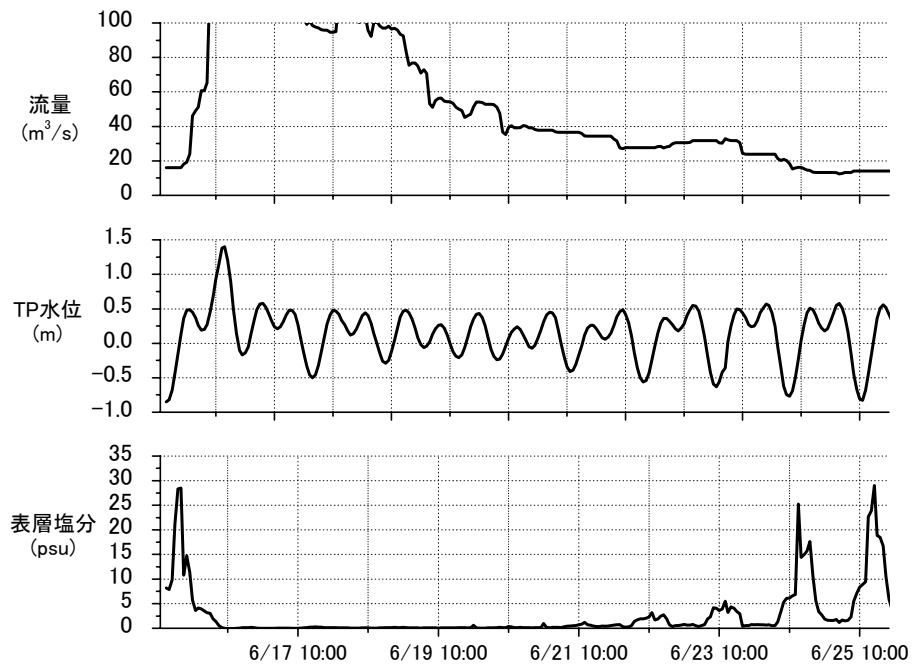


图 3.2.6 馬入水質觀測所_表層塩分(psu)前半

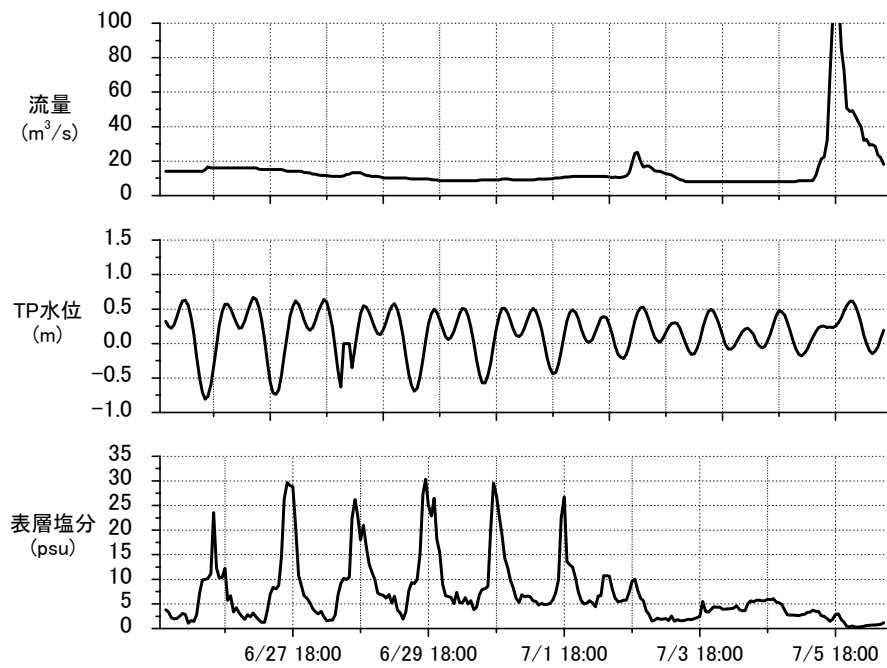


图 3.2.7 馬入水質觀測所_表層塩分(psu)後半

3.3 鉛直プロファイル

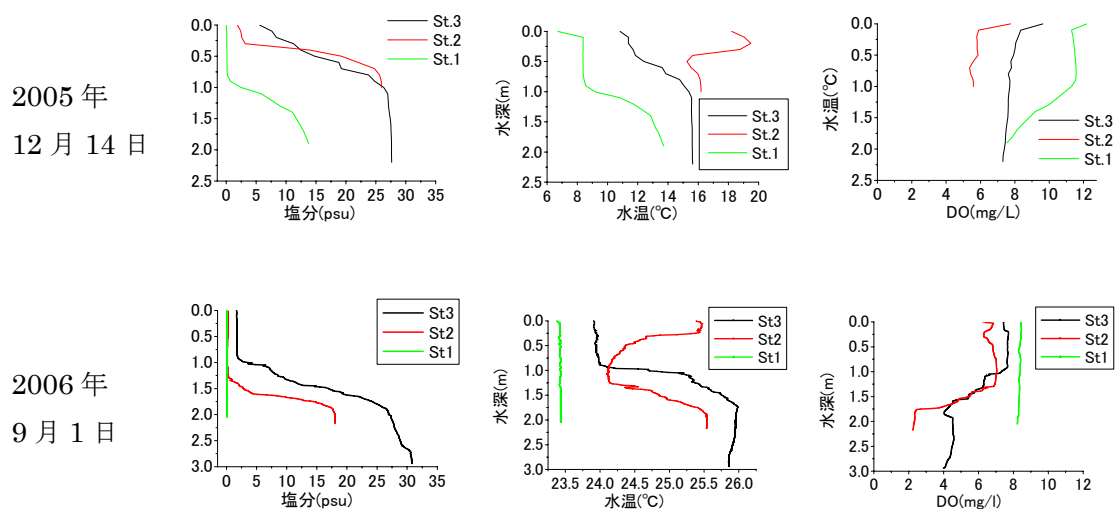


図 3.3.1 塩分 水温 DO 鉛直プロファイル

図 3.3.1 に 2005 年 12 月 14 日及び 2006 年 9 月 1 日の各水質計設置地点における塩分，DO，水温の鉛直プロファイルを示す．2005 年 12 月においては，大潮時，晴天，流量は $10\text{m}^3/\text{s}$ であり低潮時であった．2006 年 9 月 1 日は小潮であり，流量は $10\text{m}^3/\text{s}$ ，また水質測定時に 3mm/h 程度の降雨があった．

a) 塩分

2005 年は塩水の遡上が St.1 まで見られるが，2006 年度は St.1 においては見られなかった．St.2 においては両日共に塩水が遡上しているが，2005 年の方が，塩分濃度が高い．これは潮位条件が違うためであり，低潮時であっても大潮の方が遡上することがわかる．また，St.3 においては両日共に 30psu 程度の塩分であった．

b) 水温

2006 年の St.1 においては鉛直方向に混合しており，成層化は見られない．しかし，他の 5 地点においては，それぞれ成層化が見られた．また，2006 年の St.2 においては 2 段階の成層が見られた．St.2 は下水処理水と河川水が混合する場所であり，処理水は河川水に比べ水温が高い．そこで，その 2 つの水と塩水がそれぞれ成層化したため，2 段階の成層が見

られたものと考えられる。ここで、成層化している 5 地点について表層より底層の方が水温が高く不安定な状態になっている。また水温差について、2005 年においては表層と底層で最大 6°C 程度の差が見られるが、2006 年度については 2°C 程度が最大である。

c) DO

2005 年において、貧酸素化は見られなかった。St.2 においては 6mg/L 程度まで低下しているが、これは下水処理場からの排水が多く含まれているためである。また、St.1 においては過飽和状態になっている。2006 年において、St.2 における底層の DO は 2mg/l 程度まで低下していた。St.3 では塩分成層、水温成層が見られ、DO は 4mg/l 程度までの低下であった。また水温だけ見ると不安定な状態になっているのに、DO に成層構造が見られるのは塩分による密度変化が支配的であるためである。2006 年の St.2, St.3 において DO の低下が見られた原因として、密度成層によって溶存酸素の供給が遮断されたこと、有機物の分解等によって酸素が消費されたことが考えられる。2005 年度においては、水温が低いため有機物等の分解が進まず酸素が消費されにくい環境であったと考えられる。また St.2 においては、下水処理水の影響を強く受けるため St.3 よりも DO の消費が進み、低い値になったと考えられる。

3.4 その他の時系列

3.4.1 各地点の水温時系列

本研究において、水温計は各地点の表層、中層、底層に設置した。図 3.4.1 に表層、底層の各地点毎における水温時系列を示す。中層の結果は、表層のデータと殆ど変化が無かったので今回は省く。図 3.4.1 の上 2 つの図が、6 月 16 日～7 月 6 日までの期間であり、下 2 つが 7 月 26 日～9 月 1 日までの期間である。

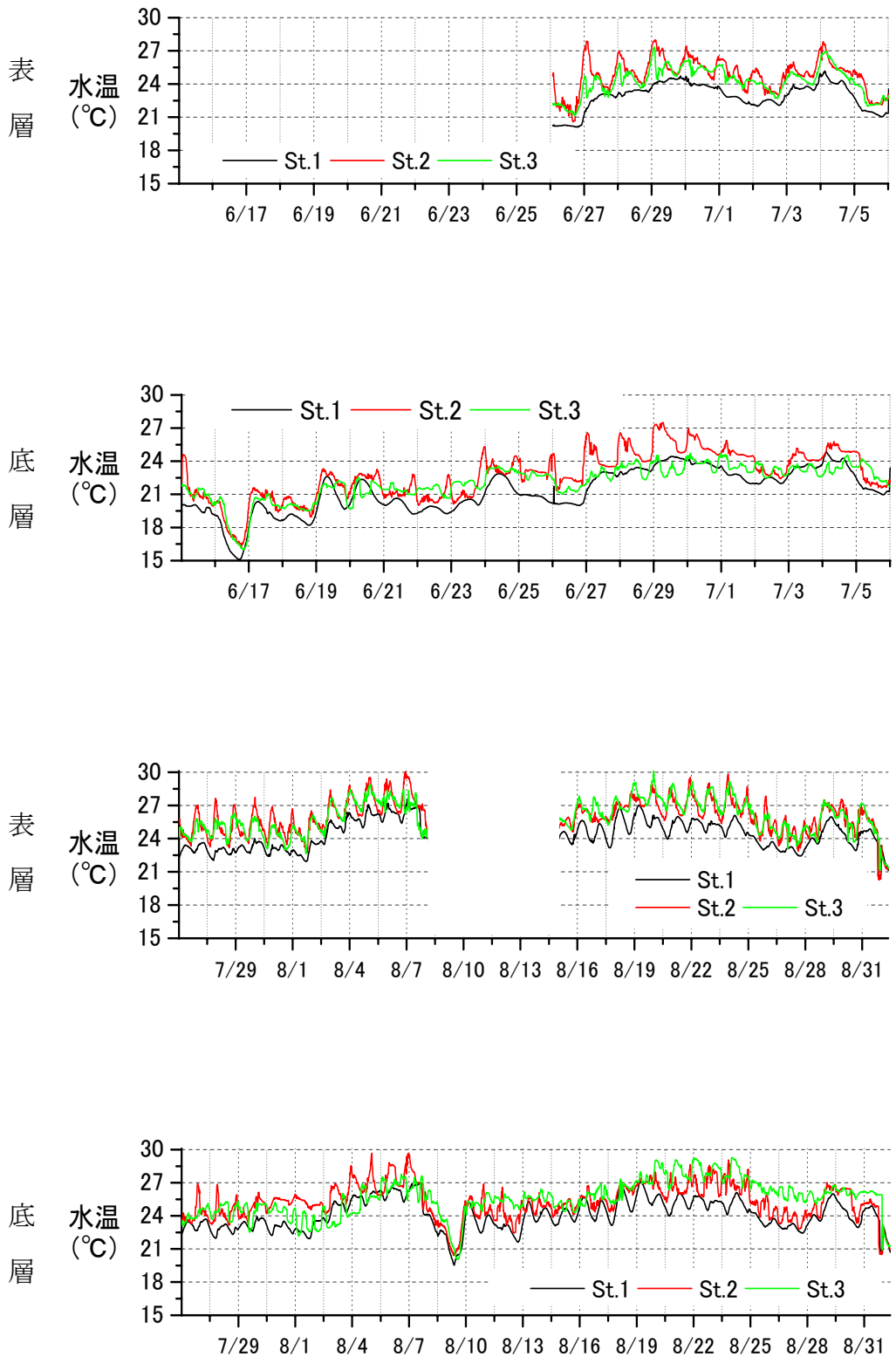


图 3.4.1 水温時系列

水温変動について、図 3.4.1 から示されるように、6 月中は 20℃～27℃の間で変動している。8 月は 22℃～30℃の間での変動であり、6 月に比べ水温は高い。また表層と底層の水温差は大きくなく、水温成層は強くないと考えられる。

St.1 は St.2, St.3 と比較し、全体的に水温が低く変動も小さい。これは、下水処理場の処理水が St.1 と St.2 の間に存在するため、St.2 がその影響を強く受けるためである。下水処理水は、水温が河川水に比べ高く、そのため河川水と完全に混合せず表層付近に集中しやすい。そのため表層の地点毎と比較して、底層では地点毎の水温差が比較的小さい。

短時間での周期変動は、表層及び St.1 の底層においては日中に高くなり夜間は低くなるという結果である。しかし St.2 と St.3 の底層においては、St.1 と変動周期が違っている。これは St.2 と St.3 においては日射による水温の変化だけでなく、塩水遡上の影響があるからである。塩水の水温は河川水とは異なるため、塩水の浸入により複雑な変化をしている。

6 月 15 日、7 月 6 日、8 月 9 日、8 月 31 日に水温が急激に減少しているが、これは降雨後の流量増加によるフラッシュの影響である。河川水は水温が低く、また急にフラッシュされるため日射等による水温上昇の影響を受けにくいと考えられる。そのため、水温は上昇せず、急激に低下したものと考えられる。

3.4.2 下水処理場の水質時系列

図 3.4.2 は下水処理場から排水される処理水の時系列であり 2004 年と 2005 年のものを示した。放流量については日平均を毎日測定し、水温・COD については週の月～金において測定してある。それ以外は週に 1 度の頻度で測定したものである。

放流量であるが、約 2m³/s～3 m³/s の値が平均的に示されていることがわかる。時期によっては突然多くなることがあるが、これは降雨があった時に増えていることが図よりわかる。相模川水系の下水設備は約 8 割が分流式であり、汚水と雨水が混ざることが少ない。しかし 2 割は合流式のため降雨のある場合には放流量が増加してしまう。下水処理場の設備上、降雨後は処理場にある程度は汚水を貯めておけるため放流量に大きな変動は無いが、降雨が続く夏場の時期であると放流量が増加する傾向が図より示される。河川流量との比較であるが、低水時であると流量は 8 m³/s 程度であるため河川内の 2 割から 3 割を処理水が占めることになる。この比が水質環境にどのような影響を与えるかは、知見が得られていないため今後調査を進める必要があると考えられる。

水温の挙動を見ると、長期間において一定の上下変動をしている。これは夏場において水温が上昇し冬場では逆に下がっており、気温と相関があるといえる。逆に COD の変動は大きくないが夏に下がり冬に上がる傾向があり処理水の水温と負の相関が見られる。また

水温と COD が突然減少する日が年に何度も見られる。この原因として降雨の影響が考えられ、放流量が増加する時と水温・COD の急減は一致している。降雨により処理場に流入する下水が希釈されるため COD 濃度が下がり、また降雨は下水に比べ水温が低い結果的に放流される水温も下がってしまうと考えられる。

次に BOD であるが一定の変化はしておらず、また濃度は 2mg/L から 15mg/L と変動も大きい。ATU-BOD は変化が小さく概ね 2mg/L から 4mg/L の間で変化していることがわかる。ここで ATU-BOD とは BOD 測定時にアリルチオ尿素を加えることで窒素化合物の酸化を抑えた BOD のことである。これより、下水処理水において炭素化合物は 1 年を通して一定の水質であり、窒素化合物による変動が大きいことがわかる。

COD 負荷量と BOD 負荷量は、特に大きな変動が見られず前者は 30mg/s 前後、後者は 20mg/s 前後で変化している。COD 負荷量については放流量の増加に伴い急増し最大で約 60mg/s になり、BOD 負荷量も同時期に 45mg/s 程度まで増加している。

DO については 5mg/L から 7mg/L の間で変動しており、夏場は低く冬場は高くなっている。これは水温と相関があり、飽和濃度の関係から夏場に下がるものと考えられる。SS について概ね 2mg/L から 4mg/L の間で変動しているが、急増したり急減している時期がある。特に 2005 年 1 月に 10mg/L まで増加しているが、図 3.4.2 からだけでは原因を掴むことができない。変動についても他の水質と相関は見られない。

TN と TP は共に変動が大きく TP においては特に顕著である。TN の変化を見ると COD の変動と対応している。水温が上昇することで処理水内の硝化菌による硝化が活発になり、結果的に夏場に低下しているものと考えられる。TP に関しては、TN と同様に夏場に低下し冬場に増加するようにも見えるが変動を掴むことは難しい。

図 3.4.2 において BOD, ATU-BOD, BOD 負荷量, DO, SS, TN, TP は週に一度測定している項目である。これらの項目からはおおよそその変動は確認できるものの、年単位の細かな変動や月毎での変化を把握することは難しい。そのため測定した結果が、その週を本当に代表するものか疑問が残る。また処理場に流入する下水の水質が常に一定であるとは考えられず、処理水の水質は 1 日の中でも変動するはずである。そのため河川環境への影響を把握するためには更に詳細な分析をする必要があるといえる。

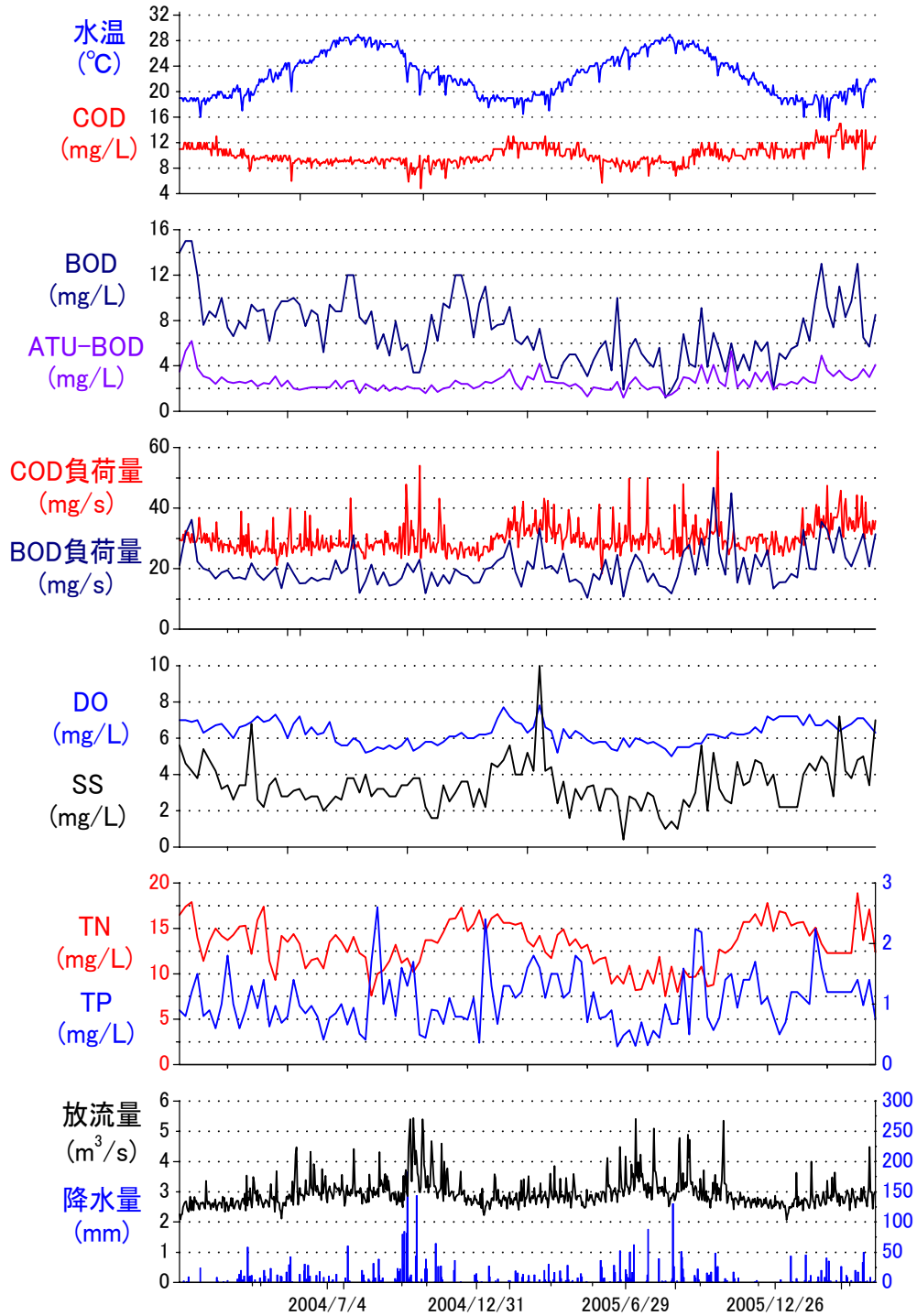


図 3.4.2 下水処理水の水質時系列

第4章 分析・実験結果

4.1 栄養塩分析結果

4.1.1 コンター図

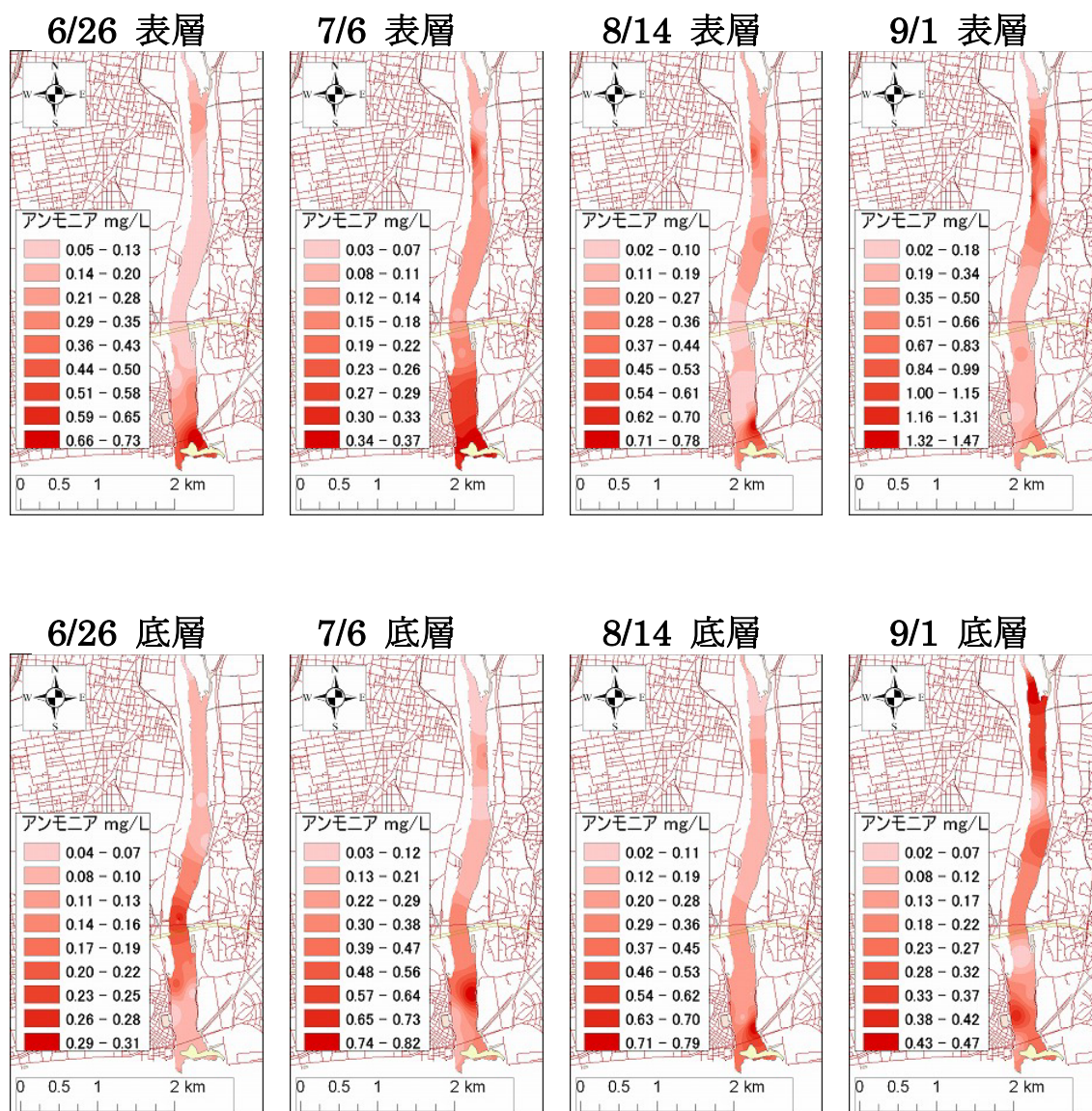


図 4.1.1 NH_4 コンター図

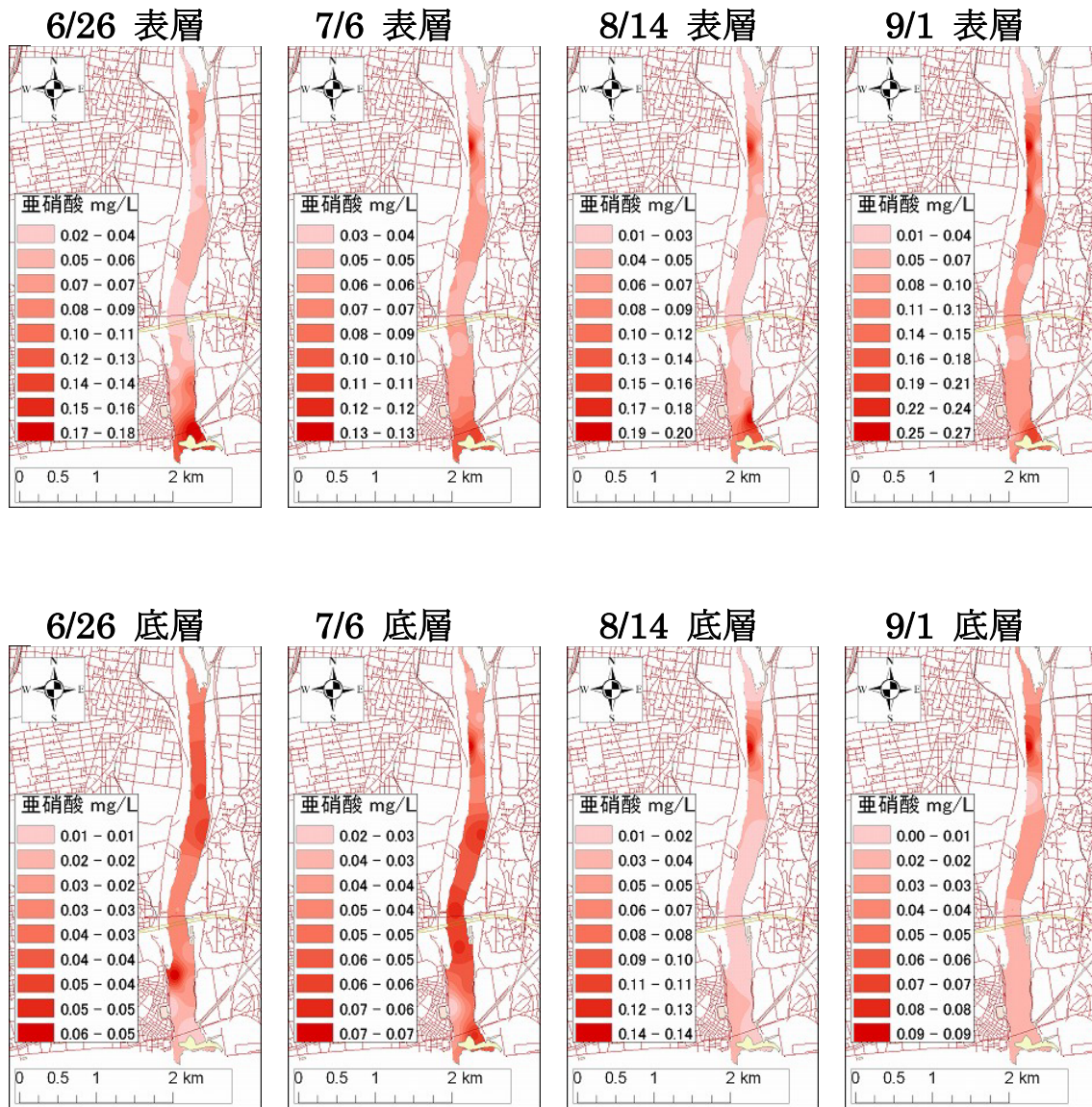


図 4.1.2 NO₂ コンター図

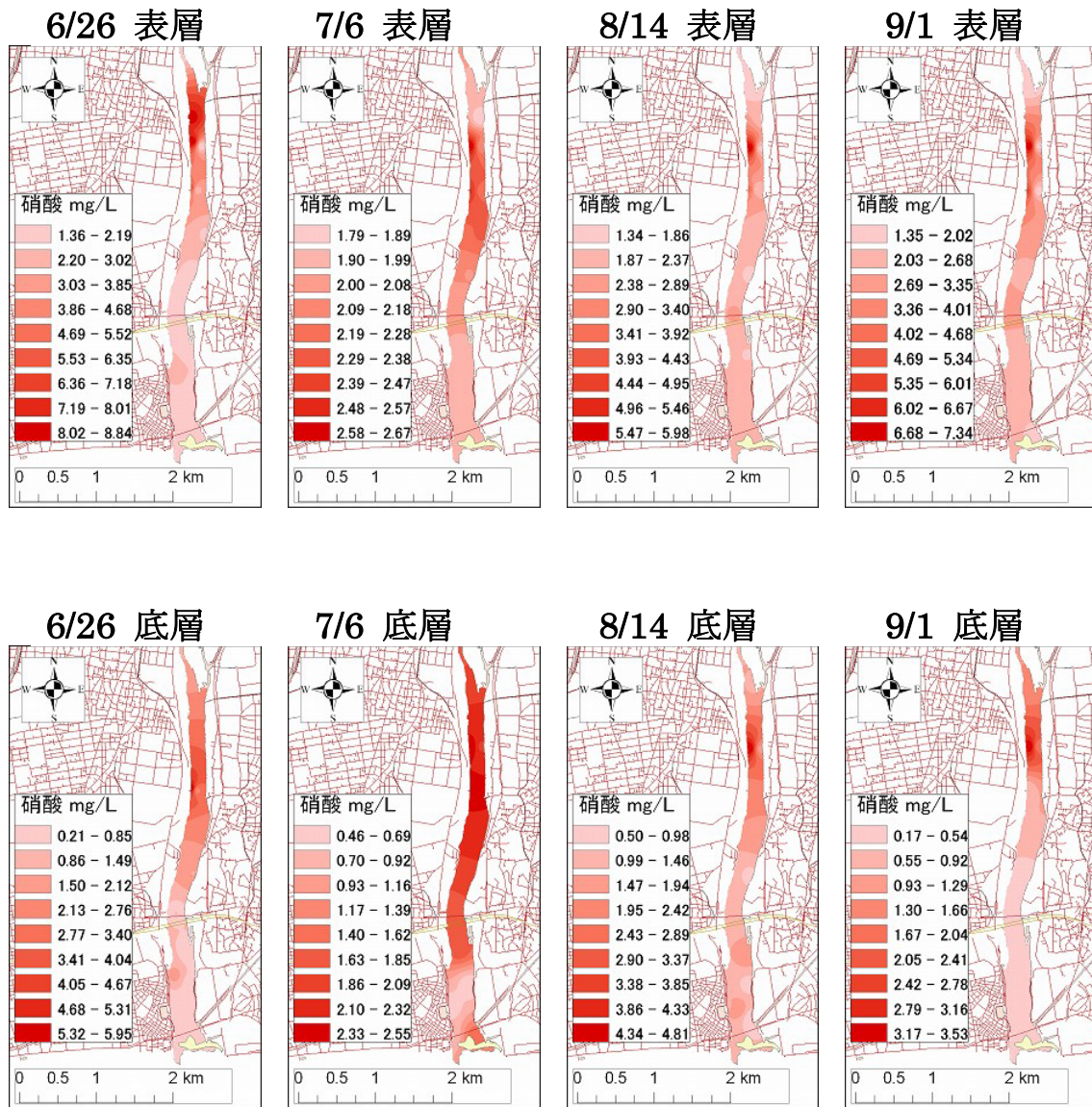


図 4.1.3 NO₃ コンター図

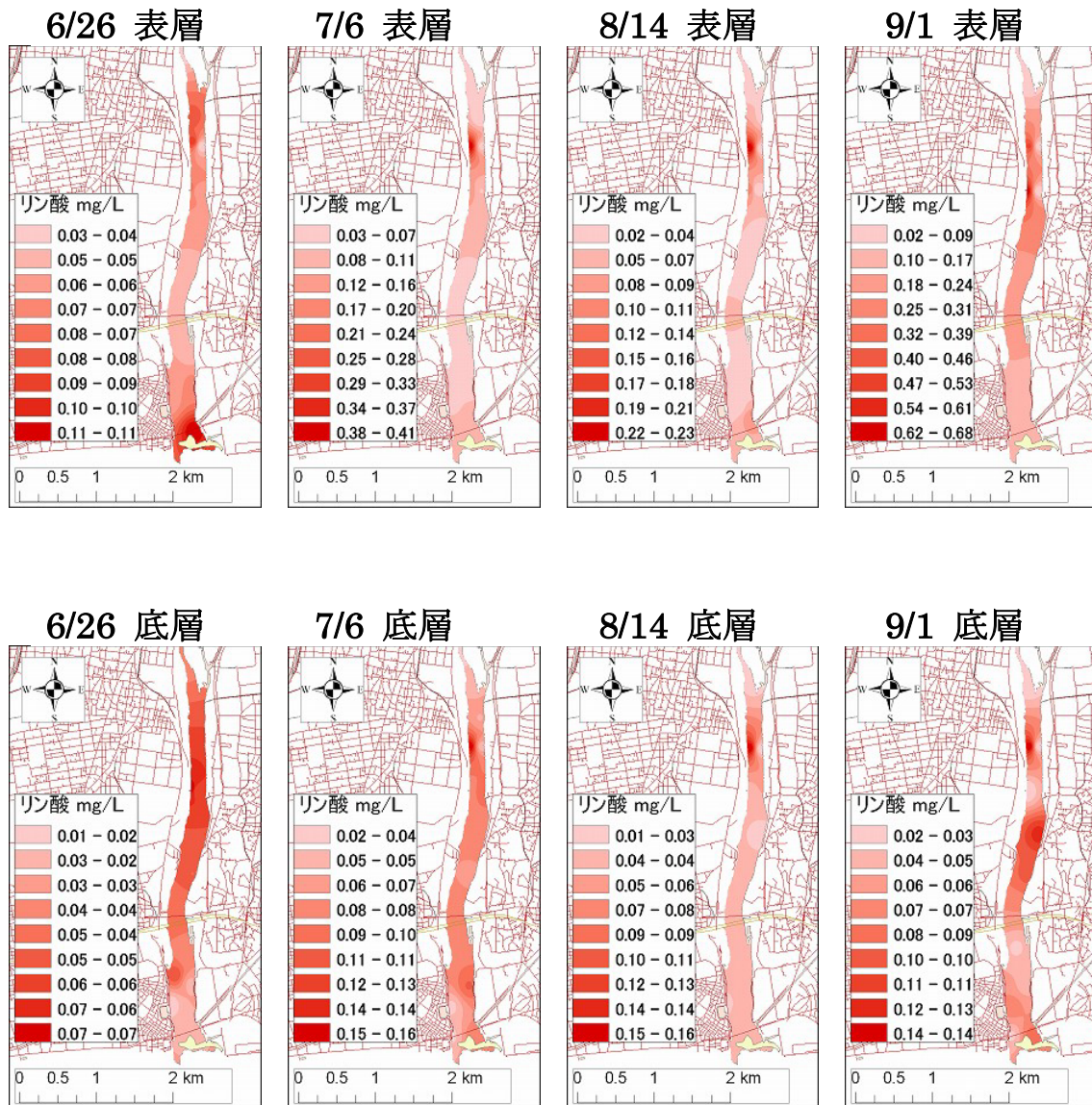


図 4.1.4 PO₄ コンター図

(1) 全体的特長

図 4.1.1～図 4.1.4 に共通することとして、濃度分布は一様ではない。まず一部を除き、河口より 4km 上流において濃度が高くなっていることがわかる。上流の境界付近(約 5.5km 上流)は逆に最も濃度が低いことが多い。河口より 4km 上流では下水処理場からの処理水が流れており、そのため濃度が高くなる原因となっている。逆に、上流から流れてくる河川水は下水処理水と比較すると濃度がずっと低いため、濃度分布に差が見られたと考えられる。アンモニアと亜硝酸においては河口砂州の背後においても濃度が高くなっている日が見られた。

(2) NH₄

特徴として河口砂州の背後と下水処理場付近において濃度が高くなっていることが多い。一方、上流の濃度は低く、アンモニアの起源は下水処理場と河口であることがわかる。河口周辺の底質は泥状であることが多く、特に砂州の背後周辺はヘドロ状になっている。

6月26日は砂州背後において濃度が高くなっているが、下水処理場付近は濃度が高くなっていない。これは下水処理場において、処理水が硝化された割合が多いため、アンモニアの排出量が少なかったためと考えられる。そのため同日の硝酸の濃度は月毎で最も高い値となった。7月6日の表層における濃度は観測した中で最も低い値となった。ただ、下水処理場付近の濃度は6月のものと大きく変化していない。ここで、7月の濃度が低かった原因として流量の増加が考えられる。7月5日において計40mmの降雨が観測され、流量は8m³/sから124m³/sまで増加した。6日においては30m³/s程度まで低下したが、依然として高い値を保っていたことで、河川水全体の処理水の占める割合が低くなり濃度も低下したと考えられる。8月14日においては、6月26日のものと表層における分布形状は同様である。しかし河口砂州の底層においては濃度が高くなるという結果が見られた。

河口付近において濃度が高くなる現象として、底泥からの溶出と砂州背後にある小出川という支川からの流入が考えられる。底泥からの溶出は一般的にDOが低い程に多くなり、DOとの相関が強いとされる。観測日においてDOが低かった日は9月だけであり、その日において濃度は高くなっていない。支川からの流入であるが、ここで砂州背後は止水域となるため流れが停滞しやすい。そのため、小出川からのアンモニア濃度の高い水が流入し、停滞したのではと考えられる。

9月1日の表層においては、下水処理場付近のみ濃度が高くなるという結果になり、砂州背後においては濃度が高くなっていなかった。底層においては全体的に一様に近い分布となり濃度差は大きくなることがなかった。

(3) NO₂

亜硝酸の濃度分布は表層においては、全観測日において分布形状が同様になった。一般的に亜硝酸は自然界に存在しにくいとされており、排出減としては下水処理場からの排水が考えられる。実際、下水処理場において濃度が高くなっており、特に表層ではアンモニアと同様に、下水処理場付近と砂州背後においてのみ濃度が高くなるといった結果になった。砂州背後において濃度が高い原因は、アンモニア同様に支川からの流入が示唆される。ただ、アンモニアが酸化したか若しくは硝酸態の還元したことも考えられる。

底層においては、6月26日および7月6日には、濃度の差が小さく各地点において同様の値であった。ただ濃度自体は表層に比較して低い値となっており、下水処理場付近を除けば全観測日において0.05mg/L以下になっていた。

(4) NO₃

溶存態窒素の形態別において、硝酸は最も濃度が高くなる結果となった。硝酸においては、砂州背後において濃度が高くなる現象は見られず、下水処理場付近において最大値を示す結果となった。

表層において7月6日だけが濃度が高い部分の範囲が広がっており、また濃度の最大値が他の観測日に比べ低いことがわかる。対して他の観測日では下水処理場付近に集中しており拡散しておらず濃度は6mg/L以上である。これは7月6日における流量が、他の観測日に比べ多かった事が原因と考えられる。流量が多いため、下水処理場からの排水と混合しやすくなり濃度も下がったと考えられる。

表層と底層を比較するにあたり、表層と底層での濃度の最低値がアンモニア・亜硝酸においては同程度であるが、硝酸については大きく異なり約1mg/L以上の差が見られる。硝酸態において濃度が最も低い場所は、表層・底層のどちらも河口付近であるが水質は河川水と塩水であり全く違う。河口では下水処理水と河川水は完全に混合していると考えられるが、依然として外海から進入してくる塩水より濃度が高い。そのため、表層・底層において濃度の差が大きく見られたと考えられる。

(5) PO₄

リン酸態においても、下水処理場付近の濃度が高くなっており、処理場より上流では濃度は低くなっている。下水処理場からの処理水が起源であると思われるが、他の形態別窒素に比べ下水処理場付近で、より濃度が集中している。特に7月6日では流量が多いため、拡散すると考えられるが、そうではなかった。また6月26日においては他の観測日に比べ濃度が低いが、硝酸態においては逆であり6月26日が最も濃度が高くなった。一概に窒素と燐の濃度には相関があるとは言えず、下水処理場に流入する水質を詳細に調べる必要があると言える。

4.1.2 栄養塩・塩分相関

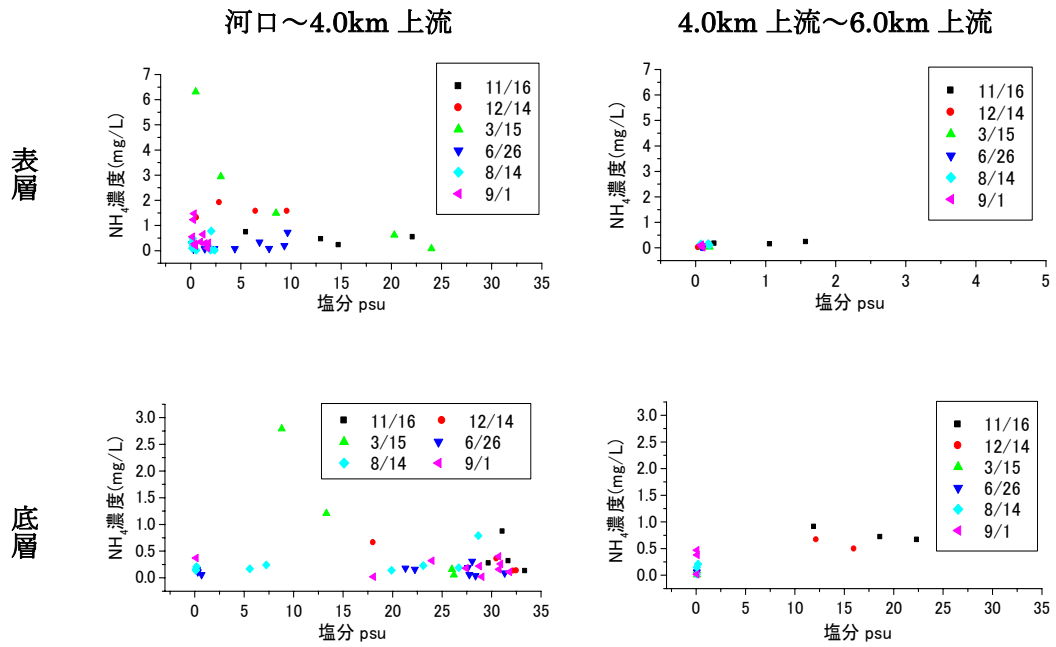


図 4.1.5 NH₄ 塩分相関図

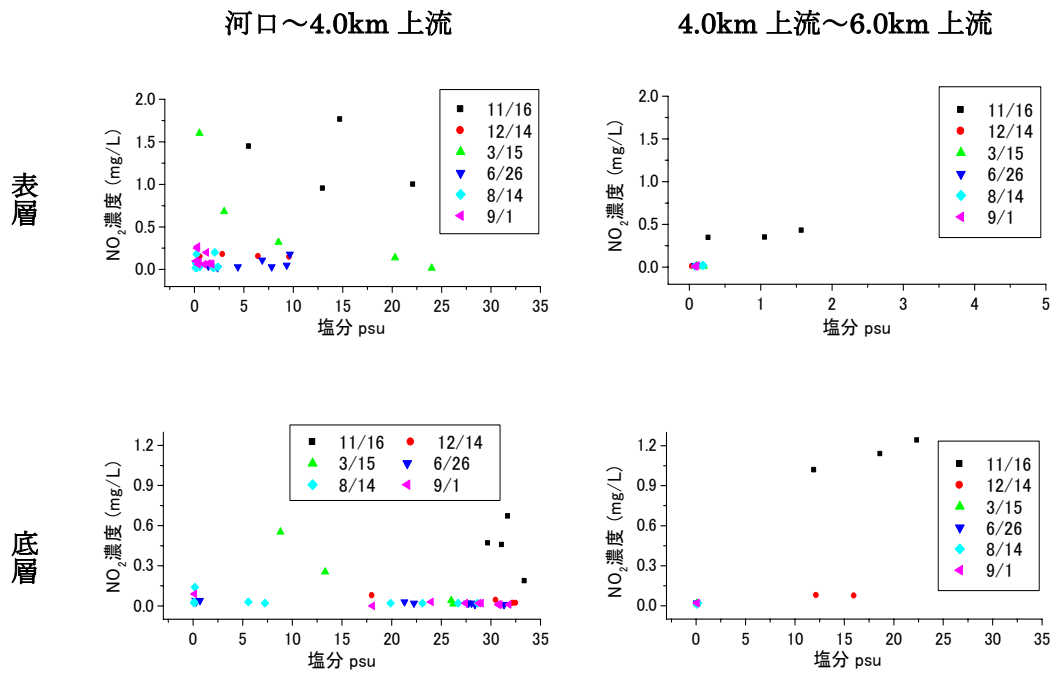


図 4.1.6 NO₂ 塩分相関図

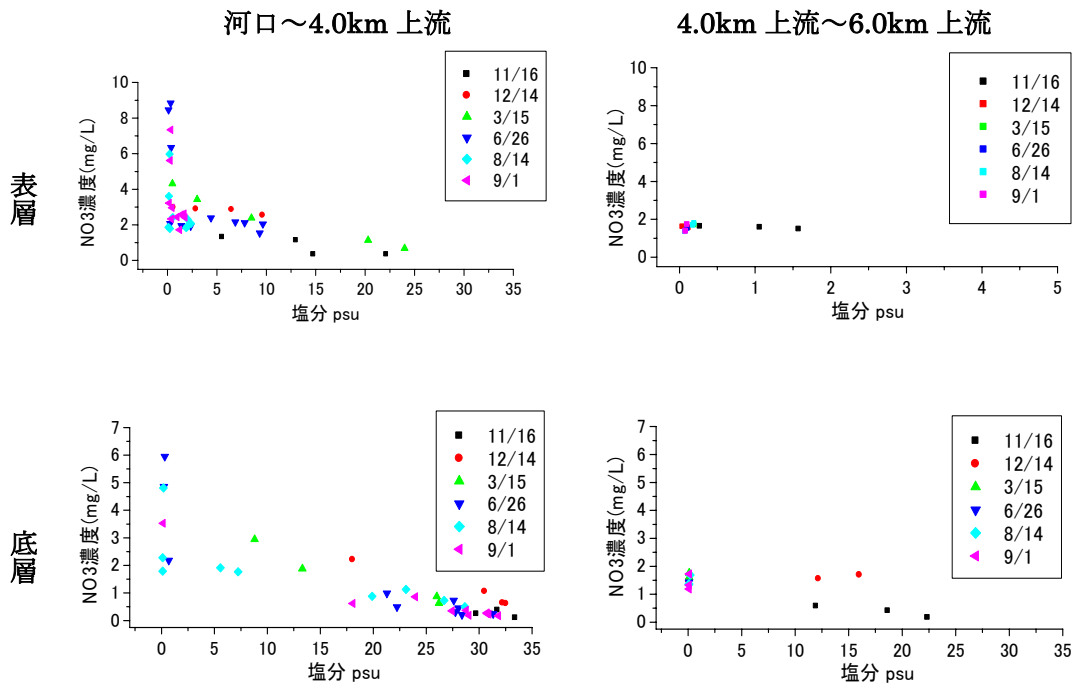


図 4.1.7 NO₃ 塩分相関図

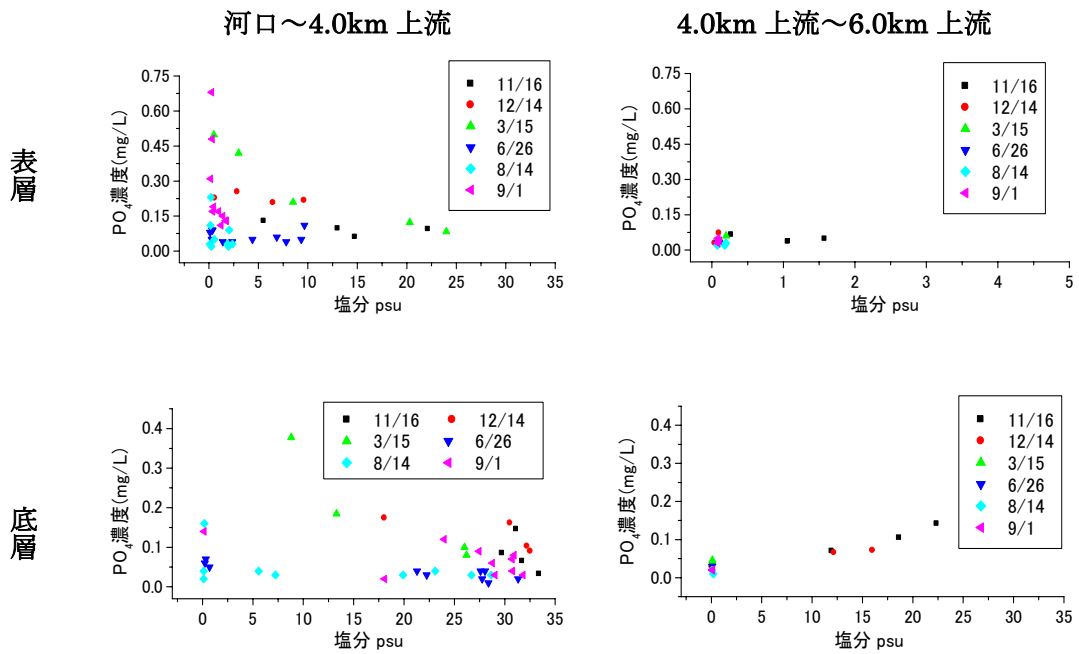


図 4.1.8 PO₄ 塩分相関図

図 4.1.5 から図 4.1.8 は各種形態別の窒素，リン酸，TN と塩分との相関を示したものである。それぞれの図は表層・底層の上下，および河口より 4.0km 上流までと 4.0km より上流の計 4 種類に分けてある。4.0km を境にした理由は，下水処理場からの処理水が排水されており，その影響を考慮するためである。塩分と各種栄養塩濃度との相関を見ることにより河川水と海水での濃度の違いを把握し，下水処理場を境として上流側と下流側にわけることによって塩養塩濃度の起源を特定することを目的として考察する。また表層と底層の違いから，河川水と海水との交換がなされているか確認する。

(1) NH₄ と塩分の相関

図 4.1.5 はアンモニアと塩分の相関を示している。図よりアンモニア濃度は概ね表層において 3.0mg/L 以下であり，底層においては 1.0mg/L であることがわかる。図からアンモニアと塩分に相関は見られない。また下流側において表層と底層に濃度の差は 1.0mg/L 程度見られ，塩分には大きな差があることがわかる。更に上流側の塩分が 0psu のものにおいては濃度が 0 に近いこと，これよりアンモニアの排出源は下水処理場または海水の可能性が強く上流から流れてくることはないと言える。上流側の底層において表層よりも濃度が高い原因は，下水処理水と塩水が混合し，潮汐の作用によって遡上したものと考えられる。そのため上流側の底層において塩分が高くアンモニア濃度が 1.0mg/L 程度のものが確認された。

(2) NO₂ と塩分の相関

図 4.1.6 より亜硝酸と塩分において相関は見られず，亜硝酸濃度は 11 月と 3 月において若干高いものの他の月においては 0mg/L に近い値となった。また上流側では，塩分が 0psu の時において全ての亜硝酸濃度が 0mg/L に近いことより，亜硝酸の起源は下水処理水および海水であることがわかる。月ごとの変化を見ると 11 月と 3 月においてのみ濃度が高いことより亜硝酸の排水は日によって異なり一定でないことが示唆される。

(3) NO₃ と塩分の相関

図 4.1.7 は硝酸濃度と塩分の相関を示したものであり，図より硝酸と塩分においては負の相関があることがわかる。よって海水中には硝酸は殆ど含まれず，淡水が起源であることがわかる。また上流側の表層・底層において，塩分が 0psu の時でも硝酸濃度が 1.5g/L 程度の値を示している。これにより硝酸においては起源が下水処理場および河川の上流であると考えられる。次に下流側の塩分が 0psu の時は濃度が季節ごとにおいて異なっているが，上流側では濃度は一様になっている。これより上流からは一定の濃度の硝酸が供給され，下水処理場からの処理水においては季節毎で異なる濃度の硝酸が供給されていると考えられる。

(4) PO₄と塩分の相関

リン酸と塩分との相関を図 4.1.8 に示す。図より下流側の表層においてリン酸濃度と塩分は負の相関があることがわかる。しかし上流側の表層・底層と下流側の底層においてはリン酸と塩分との相関は見られない。ただ上流側は下流側に比べ濃度が低いことより、リン酸の起源は下水処理水と海水が中心であり、上流の河川水からの流入は余り多くないと考えられる。次に季節毎の変動を考えると上流側では一様であるが、下流側は季節によって濃度分布が異なる。これより下水処理水と海水のリン酸濃度は 1 年を通して一定ではなく変動していることがわかる。

4.1.3 下水処理水の栄養塩時系列

相模川下流域の栄養塩濃度の流入は河口より約 4.0km 上流にある下水処理場からの処理水による影響が非常に大きいことが 4.1.2 より確認された。そこで下水処理水の栄養塩時系列を図 4.1.9 に示す。

一番上図の NH₄ であるが夏場は濃度が低く、冬場は濃度が上昇するという変動をしている。ただ 2005 年から 2006 年にかけての冬場は濃度が長期にわたって 9mg/L 程度の高い濃度であった。NO₂ は 0mg/L から 3mg/L までの値を推移しており NH₄ に比べ全体的な濃度は低い。しかし 2006 年の 3 月から 4 月にかけて濃度が他の期間に比較して著しく高くなっている。次に NO₃ であるが変動が大きく、長期間における一定の変動は見られなかった。殆どの期間におい濃度は 6mg/L 以上であり、NH₄ や NO₂ に比べると総じて濃度が高い結果となった。PO₄ については 2mg/L 以下で推移していることが図からわかり、突然 1 時期において増加することもあり、変動はわかりにくい。有機体窒素に関しては若干に変動があるものの、おおむね 2mg/L 弱の値であった。

TN、TP においては 3.4.2 で述べたが、TN は夏場に低く冬場に高い傾向であり TP については PO₄ と同様に長期において一定した変動を見ることがなかった。2005 年 11 月周辺は NH₄ 濃度が急増している。しかし TN の変化を見ると、NH₄ のように増加はしておらず全体の濃度としては変化が小さい。しかし NO₃ の濃度が、それまで横ばいだったものが減少していることから本来処理場において硝化されるべきものが未消化のまま放流されたと考えるべきである。

栄養塩の時系列結果は週一回の測定である。例として、降雨等のイベントがあると本当にその週を代表するものかどうか疑問が残る。また 1 日の中でも変動しているはずであり特に濃度の高い時間帯に測定することで河川に対する負荷量を把握する必要があると考えられる。

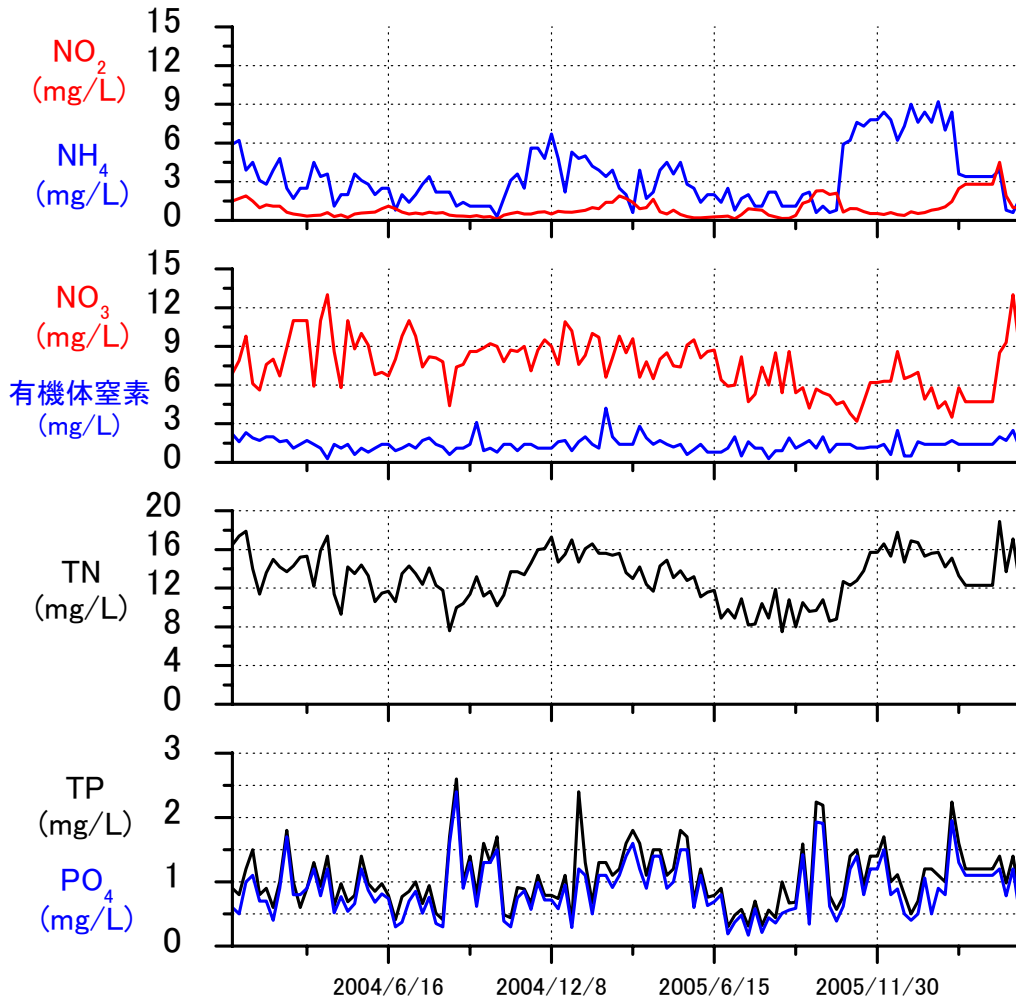


图 4.1.9 营养盐浓度时系列

4.2 植物プランクトン分析結果

表 4.2.1 植物プランクトン分析結果

平成18年8月10日			
番号	種名	3.5km	5.5km
1	藍藻類 <i>Oscillatoria</i> sp. *	300	
2	珪藻類 <i>Melosira distans</i>	16800	
3	<i>Melosira granulata</i>	15600	7200
4	<i>Melosira granulata</i> v. <i>angustissima</i>		2400
5	<i>Melosira italica</i> f. <i>curvata</i>	7200	1200
6	<i>Melosira varians</i>	14400	7200
7	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	6000	4800
8	<i>Cyclotella</i> spp.	24000	43200
9	<i>Stephanodiscus subsalsus</i>	25200	38400
10	<i>Stephanodiscus</i> sp.	20400	12000
11	<i>Thalassiosira bramaputrae</i>		300
12	<i>Thalassiosira</i> sp.	300	
13	Thalassiosiraceae	247200	336000
14	<i>Diatoma vulgare</i>	600	
15	<i>Fragilaria construens</i>	80400	104400
16	<i>Fragilaria crotonensis</i>	18000	15600
17	<i>Asterionella formosa</i>		1200
18	<i>Synedra ulna</i>	1800	1800
19	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>		3600
20	<i>Achnanthes</i> sp.		1200
21	<i>Cocconeis pediculus</i>	1200	1200
22	<i>Cocconeis placentula</i>	2400	1200
23	<i>Navicula</i> spp.	84000	74400
24	<i>Gomphonema parvulum</i>	2400	2400
25	<i>Gomphonema</i> spp.		3600
26	<i>Amphiprora</i> sp.	300	

27		<i>Amphora</i> spp.	1200	3600
28		<i>Cymbella minuta</i>		1200
29		<i>Cymbella prostrata</i>	300	
30		<i>Cymbella turgidula</i> v. <i>turgidula</i>	1200	4800
31		<i>Bacillaria paxillifer</i>	3000	
32		<i>Nitzschia dissipata</i>		2400
33		<i>Nitzschia</i> spp.	69600	51600
34	褐色鞭毛藻類	<i>Cryptomonas</i> sp.	2400	
35		Cryptophyceae		1200
36	ミドリムシ藻類	Eutreptiaceae	300	
37	緑藻類	<i>Chlamydomonas</i> sp.		1200
38		Chlamydomonadaceae	4800	7200
39		<i>Micractinium pusillum</i>		4800
40		<i>Dictyosphaerium</i> sp.	4800	
41		<i>Oocystis</i> sp.		7200
42		<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	6000	1200
43		<i>Monoraphidium</i> spp.	7200	8400
44		<i>Chlorella</i> sp.		3600
45		<i>Pediastrum duplex</i> v. <i>reticulatum</i>	9600	
46		<i>Coelastrum microporum</i>		2400
47		<i>Scenedesmus acuminatus</i>		4800
48		<i>Scenedesmus</i> spp.	28800	9600
種類数合計			33	37
細胞数合計			707700	778500
沈澱量(ml/l)			0.05	0.05
単位 : cells/l				

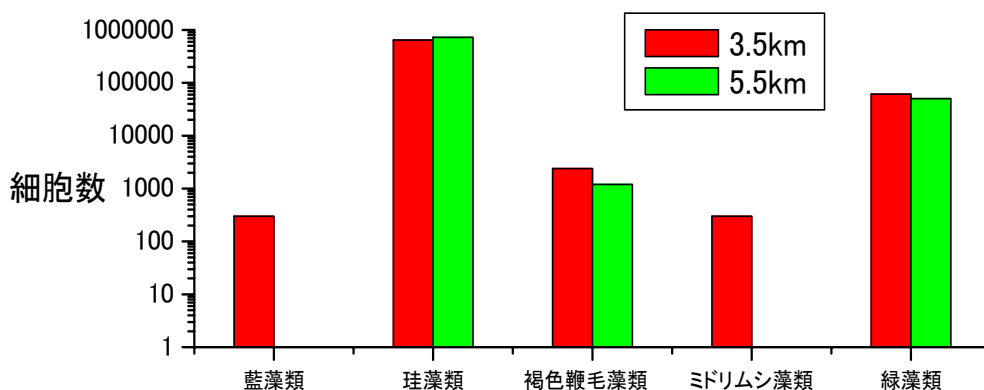


図 4.2.1 種類別細胞数

表 4.2.1 は相模川の河口より 3.5km 上流と 5.5km 上流に存在する各植物プランクトンの種名および細胞数を示したものである。また図 4.2.1 は植物プランクトンを類型に分け、その類別細胞数を示したものである。まず基本的なプランクトンに関する知見について触れ、実際に相模川に存在するプランクトンについて考察する。

- ・ 藍藻類

藍藻（らんそう）はシアノバクテリア（藍色細菌）とも呼ばれる真正細菌の一種であり、光合成によって酸素を生み出すという特徴を持つ。単細胞で浮遊するもの、少数細胞の集団を作るもの、糸状に細胞が並んだ構造を持つものなどがある。

藍藻類は水中に広く分布し、一部は湿った地上に発生する。夏場に発生するアオコのなかにはシアノバクテリアが大量に発生した結果引き起こされるものもある。この中には毒性を持つ種も含まれる。藍藻類は硝酸が多すぎると大量発生するとされ、対策としてメダカ目の魚に食べさせることがある。

- ・ 珪藻類

珪藻（ケイソウ）は不等毛植物門珪藻綱に属する単細胞性の藻類である。細胞が珪酸質の被殻（frustule）に入っているのが特徴である。

珪藻類は淡水から海水まで広く分布し海洋生態系においては一次生産者として大きな生態的地位を占める一方、大発生して赤潮を引き起こす事もある。陸水においても重要な生産者であり、魚類の餌として重要である。淡水中に見られる褐色のいわゆる「コケ」は蘚苔類ではなく、主に珪藻の群体である。プランクトン量の少ない流水系ではベントスとして存在し、川底の石の表面に付着してアユ等の餌となる。

・緑藻類

緑藻類というのは、広義には光合成色素としてクロロフィル a と b を含んでいる藻類のことである。海藻として出現するものもあれば、淡水産のものや、陸上生活のものまでがある。大きいものではミルのように 1m にも達する樹状のもの、アオサのように葉状のもの、アオミドロのような糸状のもの、ミカヅキモのような単細胞のものまでがある。

・鞭毛虫

鞭毛虫（べんもうちゅう）とは、原生動物の中で鞭毛で運動する生物を総称する呼び方である。以前は分類群の名称として用いられた事もあったが、現在では専ら「鞭毛を持つ原生生物」の意味で用いられ、自然分類群としての要素は無い。

河口より 3.5km 上流と 5.5km 上流を比較すると植物プランクトンの種類数、細胞数共に 5.5km 上流の方が多いたことが表 4.3.1 よりわかる。河口より約 4km 上流には下水処理水が流入するため、3.5km 上流の河川水は処理水の影響を受ける。また流量が 10m³/s に対し処理水は 2m³/s と無視できる量ではない。処理水中にはプランクトンが含まれないと考えられ、3.5km 上流では 5.5km 上流に比べ栄養塩濃度が格段に高くなるが、急激にプランクトンが増殖するとは考え難い。そのためプランクトン量が減ってしまったものといえる。

図 4.2.1 より 2 地点におけるプランクトンの細胞数、また種別の存在するか否かがわかる。図より計藻類、鞭毛藻類、緑藻類は両地点において存在することがわかるが、藍藻類とミドリムシ藻類は 3.5km 上流にはいるが 5.5km 上流にはいないことがわかる。塩水区域と淡水区域での生息分布による違いとも考えられるが、藍藻類とミドリムシ藻類は共に細胞数が他の種類に比べ非常に少ないことから偶然に 3.5km では検出されたが 5.5km では検出されなかったものと考えられる。一回だけの分析で種類数を決めることは難しいので、何回か分析を行う必要がある。また種別においては珪藻類、緑藻類が河川内に存在するプランクトンの多くを占めており、特に珪藻類の細胞数が多い。そのため淡水赤潮が起きる場合は珪藻類による植物プランクトンの急増が示唆される。

4.3 BOD・SOD 実験結果

4.3.1 BOD・SOD 実験結果

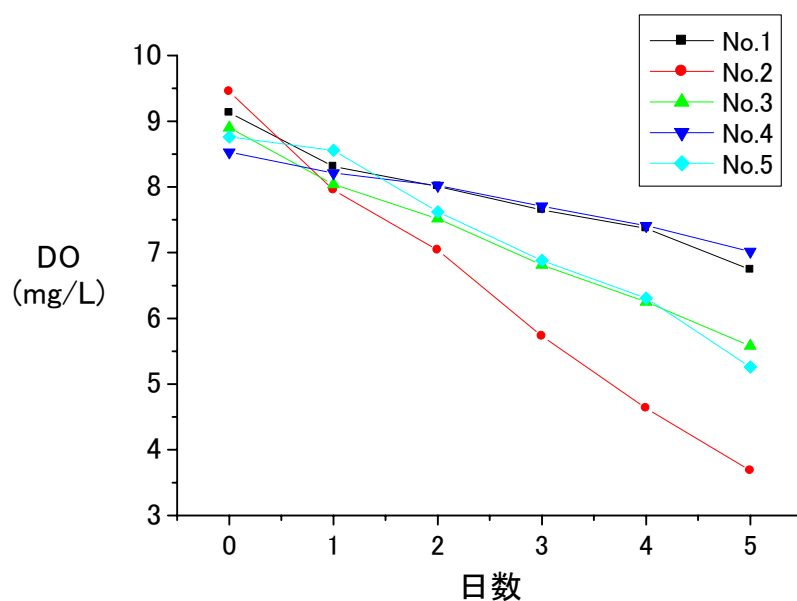


図 4.3.1 BOD 実験過程

表 4.3.1 BOD 実験結果

No	地点名称	希釈	消費量 mg/L	BOD mg/L
1	5.5km 上流	無	2.39	2.39
2	下水処理水	2 倍	5.77	11.54
3	塩水フロント水	無	3.32	3.32
4	海水	無	1.51	1.51
5	河川下流水	無	3.5	3.50

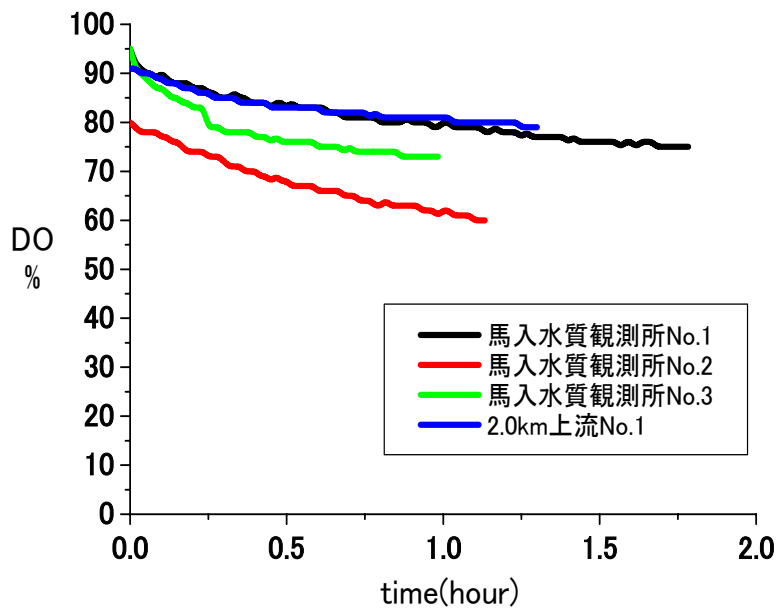


図 4.3.2 SOD 実験過程 (馬入水質観測所, 2.0km 上流)

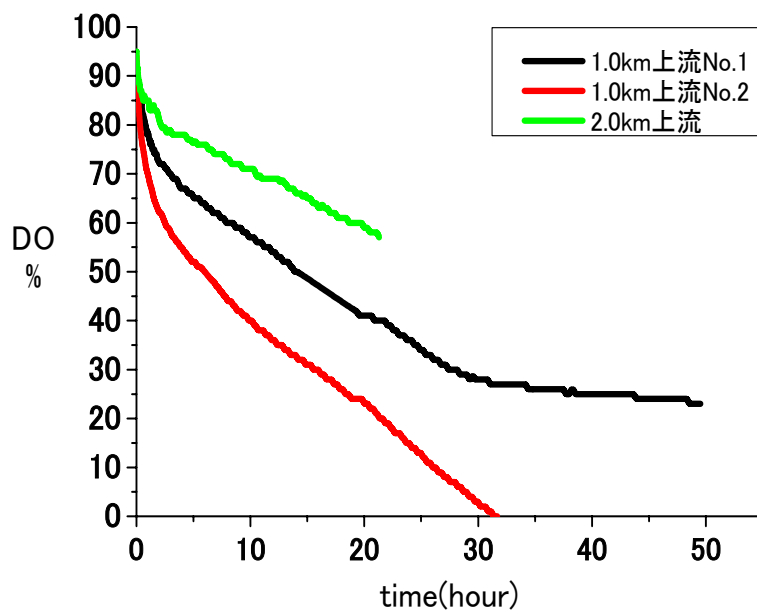


図 4.3.3 SOD 実験過程 (1.0km 上流, 2.0km 上流)

表 4.3.2 SOD 実験結果

地点名	No.	水体積(L)	底質面積(m ²)	酸素消費濃度(mg/L)	消費時間(hour)	SOD
馬入水質観測所	1	1.6	0.0095158	1.8	1.8	4.0
馬入水質観測所	2	1.5	0.0095158	1.7	1.1	5.6
馬入水質観測所	3	0.6	0.0023746	0.5	0.8	4.3
1.0km 上流	1	1.5	0.0094985	6.2	49.5	0.5
1.0km 上流	2	0.56	0.0023746	8.3	31.3	2.7
2.0km 上流	1	0.37	0.0023746	1.1	1.3	3.1
2.0km 上流	2	1.4	0.0094985	3.4	21.3	0.6

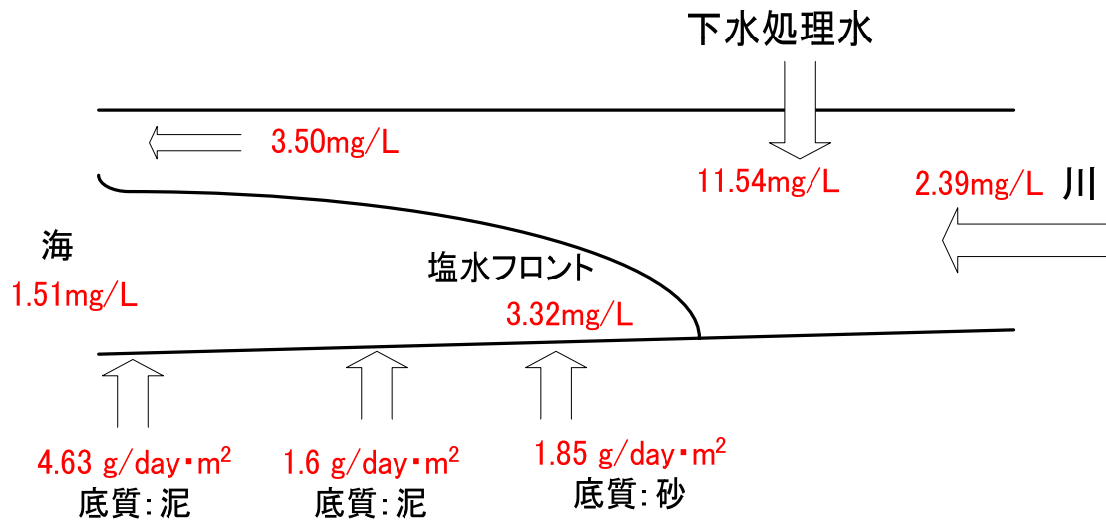


図 4.3.4 酸素消費概略図

BOD についての考察

今回の BOD 実験においては 5 日間の酸素消費量を求める BOD₅ を実験し、図 4.3.1 は BOD 実験の過程を示したものであり各地点において消費過程は一定であることがわかる。また表 4.3.1 に各地点の名称と BOD の実験結果を示す。

実験結果を見ると No.2 の下水処理水が他地点と比べ非常に濃度が高く、3 倍以上のちとなっている。河川水を構成するのは主に上流からの水と下水処理水であるが、No.1 の 5.5km 上流の BOD は 2.39mg/L であり、下水処理水の結果と比べると低い。流量の比を考えると、河川水の平均流量は 10m³/s であり下水処理水は 2m³/s であり、両者を混合すると理論上は BOD が 3.9mg/L となる。No.5 の河川下流水が BOD 3.5mg/L であるので誤差は小さいと考えられる。

今回の実験では海水の有機物量を測定するのに COD でなく BOD を用いた。普通は海水に対しては COD を用いる。しかし今回は相模湾から河川内に進入した塩水の短期間における消費量を求めるため BOD を測定した。No.4 の海水であるが BOD は 1.51mg/L であり、5 地点において最も低い値となった。これは河川水中に比べ海水中には有機物が少ないことを如実に示している。一方、塩水フロントの BOD は 3.32mg/L と進入してくる海水に比べ倍以上の値を示した。塩水フロントにおいて濃度が高くなった原因として、河川水との混合とフロック効果による有機物の凝集効果が考えられる。

河川中の浮遊懸濁物質 (SS) は、海水と淡水の境界域や河口付近で沈降が促進され、河床上に高濁度 SS 水塊が形成される。汽水域では潮汐流によって高濁度水塊が上流へ移送されるため塩水フロント付近で BOD が高くなった一因と考えられる。また塩水フロントは河川水と多少混合しているため塩分が低い。混合する河川水は下水処理水も含まれていることが結果的に水中の有機物量が増加する一因とも考えられる。

SOD についての考察

今回の SOD 実験は 3 箇所の底質を用いて行った。馬入水質観測所(右岸)、河口より 1.0km 上流(左岸)、2.0km 上流(中央)の底質である。底質状態は馬入水質観測所、1.0km 上流は泥であり 2.0km 上流は砂であった。図 4.3.2 および図 4.3.3 は SOD 実験での酸素消費過程を示している。図 4.3.2 は実験時間が 2.0 時間以内のものであり、図 4.3.3 は 20 時間以上実験したものである。また表 4.3.2 に実験条件と結果を示す。

馬入水質観測所の結果であるが、実験を 3 回行った結果 SOD が 4.0~5.6(g/day・m²)と酸素要求能力としては非常に高い値を示した。ここで今回の実験には 2 種類の円柱容器を用い、その形状の違いは図 2.3.4 に示している。大きいほうは面積が 0.0095158m² で体積は約 1500cm³、小さい方は面積が 0.0023746m² で体積は約 500cm³ 程度である。図 4.3.2 からは水

体積の違いによる実験結果の変化は見られない。

1.0km 上流と 2.0km 上流の実験結果はそれぞれ 2 回実験を行ったが、前者は $0.5(\text{g/day}\cdot\text{m}^2)$ と $2.7(\text{g/day}\cdot\text{m}^2)$ 、後者は $3.1(\text{g/day}\cdot\text{m}^2)$ と $0.6(\text{g/day}\cdot\text{m}^2)$ と結果が大きく異なった。この原因は実験に用いた円柱容器の体積の違いが考えられる。DO 計は容器内の水質を一定にするため、常にスターラーで容器内の水を攪拌している。大きい容器に比べ、小さい容器は攪拌が大きかったため、結果的に底質を巻き上げてしまい DO の消費を加速してしまったと考えられる。ただし、SOD 自体において精度が余り高くないこともあるため一概に容器の大きさによって結果が異なったとは断定できない。

今回の実験結果のそれぞれの値を平均したものを図 4.3.4 に載せる。図から河口の馬入水質観測所において SOD が高く、上流では河口に比べ SOD が低いことがわかる。ここで 1.0km 上流と 2.0 km 上流では底質の状態が泥と砂であるが、SOD の値に大きな違いがない。一般的には泥の方が有機物を多く含むため、SOD の値は大きいとされているが今回の実験では逆の結果が見られた。2.0km 上流は塩淡水の境界域になることが多く、フロック効果によって SS の沈降があったことが可能性として考えられる。そのため、砂質であるにもかかわらず SOD が泥状の底質と同等の値を示したことが示唆される。ただ SOD 自体の精度が低いいため実験を繰り返し行い精度を高める必要がある。

第5章 考察

本章では、相模川における DO 低下の原因，メカニズムおよび酸素消費速度について考察する。また貧酸素化の解消についても記述する。

5.1 DO 低下に関する考察

5.1.1 水温，塩分密度

図 5.1.1 は St.2 の表層と底層における密度差を時系列で示したものである。上の図は 6 月 26 日から 7 月 6 日までのものを示し，下の図は 7 月 26 日から 8 月 31 日までである。上下の図共に，上のグラフは水温と塩分の両方を考慮した密度差を示したものである。また下のグラフは，水温のみの密度差，及び塩分のみの密度差を考慮したものを示している。

図から，塩分・水温を考慮した密度差は塩分のみの密度とほぼ同値であり，変化も同等であることがわかる。これは 6 月と 8 月の両方において見られる現象であった。一方，水温のみによる密度差はほとんどない。また塩水が進入した場合にも鉛直方向において水温差による密度差が生じ難いことがわかる。8 月の真夏日が続いた場合には表層と底層の水温差による密度差が生じることが考えられるが，今回の観測においては水温による密度差は生じなかった。

貧酸素状態となる条件の一つに，塩分や水温による成層が形成されることで酸素供給の遮断があり一般的にこれが大きな問題となっている。相模川においては，塩分のみによって成層構造が強化され，水温差による成層構造は不安定であることがわかった。相模川の下流部における水深は 1.0m から 1.5m 程度の場所が多く，底層においても十分に日射が届き暖まりやすいことが相模川において水温差を生み出さない原因と考えられる。

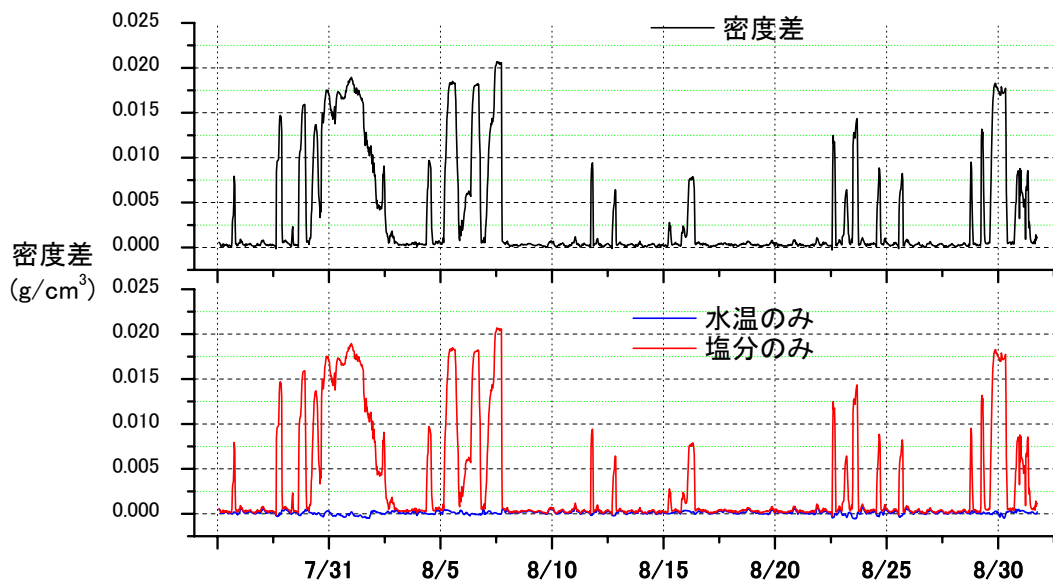
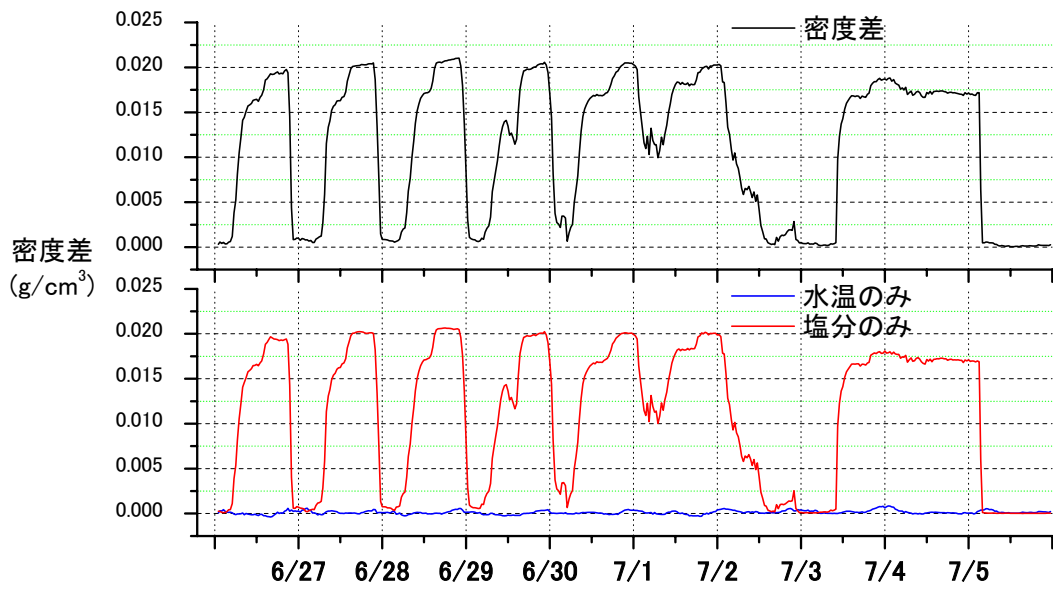


図 5.1.1 密度差時系列

5.1.2 外海の影響に関する検討

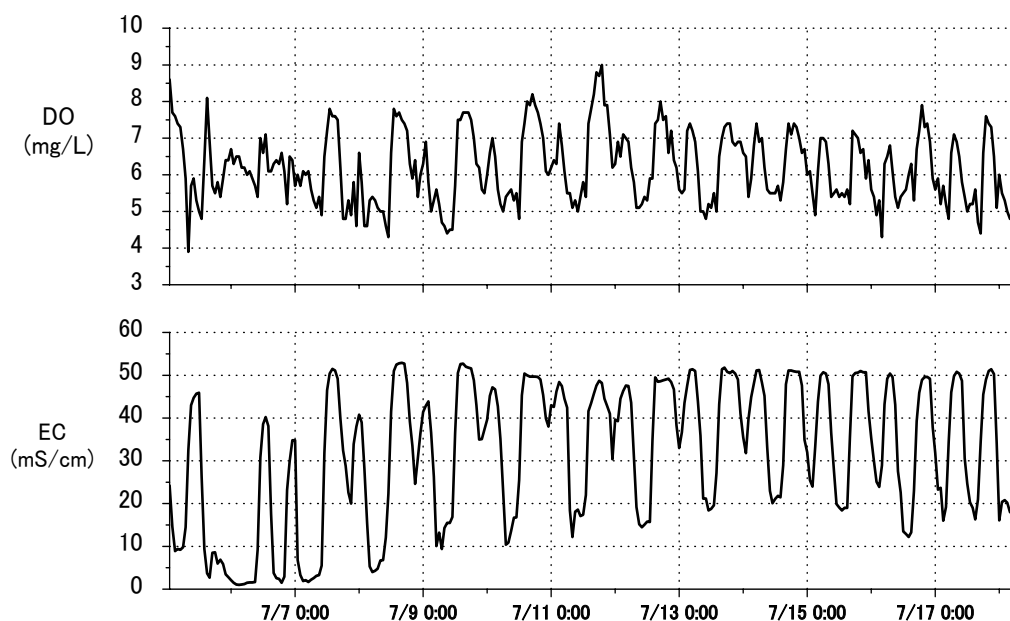


図 5.1.2 馬入水質観測所 DO, EC 時系列

図 5.1.2 は馬入水質観測所 (St.3) の底層における DO と EC を示したものである。馬入水質観測所の水質については 3.2.2 で既に述べているが、ここでは DO と EC との関係から相模湾より流入する海水と河川内から流出する海水について考察する。

図より EC が上昇する時、すなわち上げ潮時においては DO が上昇し、また下げ潮時においては逆に DO は低下する。特に低低潮時においては DO が 5mg/L 弱と低い。この低低潮時の水は流入する塩水より EC が低く、また EC は 0 ではないことから純粋な河川水でなく河川内に溜まっている塩水と淡水が混合したものであると考えられる。

図 2.1 を見ると相模川河口部は砂州背後の左岸側は水深が大きく進入した塩水が溜まりやすい。しかし中央部は浅く、底層に溜まった塩水が引き潮時に外海へ流出し難い構造となっている。そのため、引き潮時には停滞した塩水の上層部がエスチャリー循環によって外海へ流出していると考えられる。つまり進入する新鮮な塩水は DO が高く、流出する塩水は河川水と混合したもので EC が低く、古い塩水であるため DO が下がっていると考えられる。

これと図 3.2.3~3.2.5 により外海から貧酸素水塊の流入の可能性はないと言える。また海水交換により DO の上昇が定性的であるが促進されていると示唆される。

5.1.3 クロロフィル a と塩分の挙動

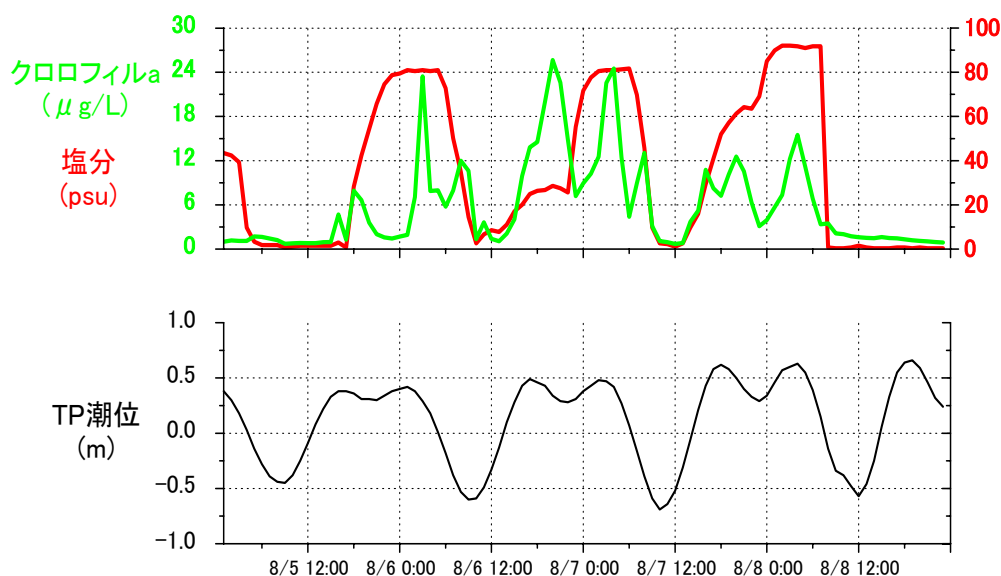


図 5.1.3 クロロフィル a, 塩分 潮位

図 5.1.3 は St.2 における塩分、クロロフィル a と St.3 の TP 潮位を示したものである。クロロフィル a が急増した 8 月 5 日から 8 月 8 日までの塩分とクロロフィル a の挙動について考察する。

塩分の増減に合わせてクロロフィル a も増減し、塩分上昇の一周期においてクロロフィル a のピークは 3 回見られることがわかる。8 月 8 日においては、クロロフィル a のピークは 2 回しかみられなかったが、これは塩水がフラッシュされたためと考えられる。

一般的に、プランクトンは日中において表層にいるが夜間は沈降するものが多いと言われている。また淡水と塩水は密度成層が形成されている。そのため密度境界においてクロロフィル a 濃度が高くなると考えられる。塩水フロントが St.2 を潮汐に連動して通過するたびにクロロフィル a が増加したためピークが 3 回見られたと可能性が高い (図 5.1.4)。低低潮から高潮に通過し、低潮時には塩水フロントは St.2 周辺に停滞 (図 3.1.1 参照)、高潮時から低低潮にかけて最後通過したものであると考えられる。

図 3.2.1, 3.2.2 より貧酸素化した時には DO が過飽和状態になり図 3.2.2 ではクロロフィル a の急増も確認された。酸素消費のプロセスとして植物プランクトンによる呼吸作用を考慮する必要がある。

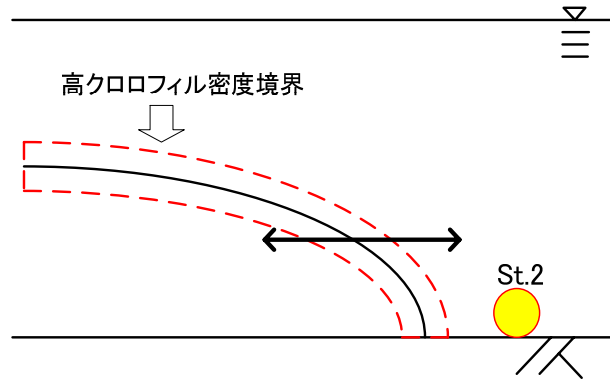


図 5.1.4 塩水フロント通過のイメージ図

5.1.4 流量, DO, 塩分相関

図 5.1.5 は St.2 における DO・塩分とそれらを計測した時の流量をプロットし, 分布状況を表したものである. また図 5.1.6 は DO を濃度に応じて分けたもので, 各 DO 濃度の全体に対する割合, その濃度時の平均流量および平均塩分を示したものである.

図 5.1.5 より塩分は流量が $20\text{m}^3/\text{s}$ であれば殆ど 0psu に近いことがわかる. ここで流量の低水量は $8\text{m}^3/\text{s}$ であり, それ以下にはならないことを付記しておく. 次に DO であるが, 流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下である時は濃度が $0\text{mg/L}\sim 13\text{mg/L}$ の分布を示し, 流量が大きくなるに従って $6\text{mg/L}\sim 9\text{mg/L}$ に漸近していくことが図 5.1.5 の右図よりわかる.

塩水の遡上は, 基本的には潮位と流量のバランスによって成り立っている. 相模川においては $20\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量であると St.2 (河口より 3.5km 上流) より上流には塩水が遡上しないことがわかる. また $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下であると塩水は河口より 6.0km 程度まで遡上することを 3.1.1 で既に記述してある.

今回の観測において, DO が 3mg/L 以下に低下した割合は全体において 10%程度であった (図 5.1.6 参照). 特に無酸素状態にまで低下したのは 3%と非常に割合が低い. DO が低い時の条件として, 平均的に流量が低く塩分が高い. 逆に DO が 5mg/L 以上の高い時の条件は流量が平均的に大きく, 塩分に至っては 0psu に近い値であることがわかる.

淡水の DO は飽和状態であることが多いが, 下水処理場の処理水の DO が低いため流量が $20\text{m}^3/\text{s}$ 以上である時は, DO が $6\text{mg/L}\sim 9\text{mg/L}$ のある程度幅広い値をとるものと思われる. 河川内に侵入したまま停滞している塩水は, 淡水との成層によって DO の供給が断たれ, また底質等に消費されるため基本的に DO が低い. 塩分が高いものほど DO の高い淡

水との混合が少なく,そのため DO が低いほどに結果的に塩分が高くなったと考えられる.

相模川は少量の流量変化によって塩水の遡上距離が大きく変わり,河川内の塩分環境も大きく変化することがわかった. また塩分環境の変化に伴い DO 環境も大きく変わり貧酸素状態になることもある. 今回の観測において貧酸素化している割合は全体の 10%程度であり,決して高い割合とは考えられない. しかしこれは St.2 より上流だけであり,更に下流において DO 環境がどうなっているかはわかっていない. また貧酸素化による生物へのダメージは非常に大きい.

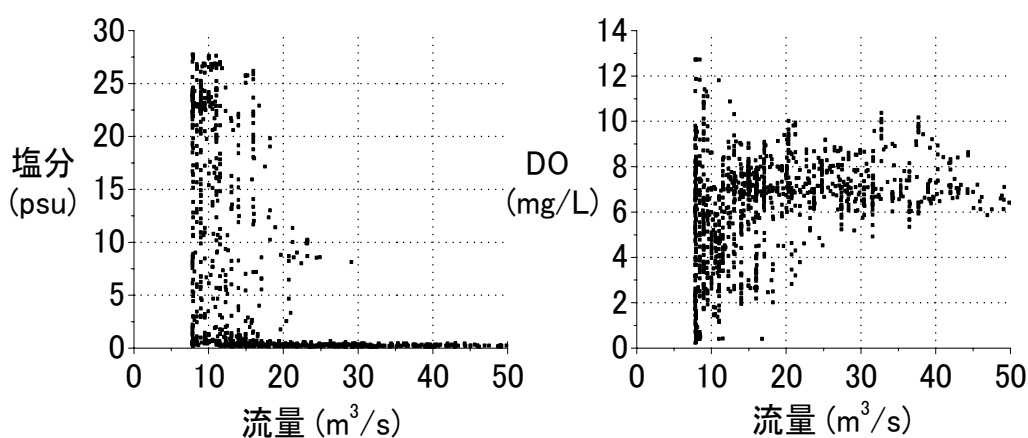


図 5.1.5 流量と塩分, DO 相関

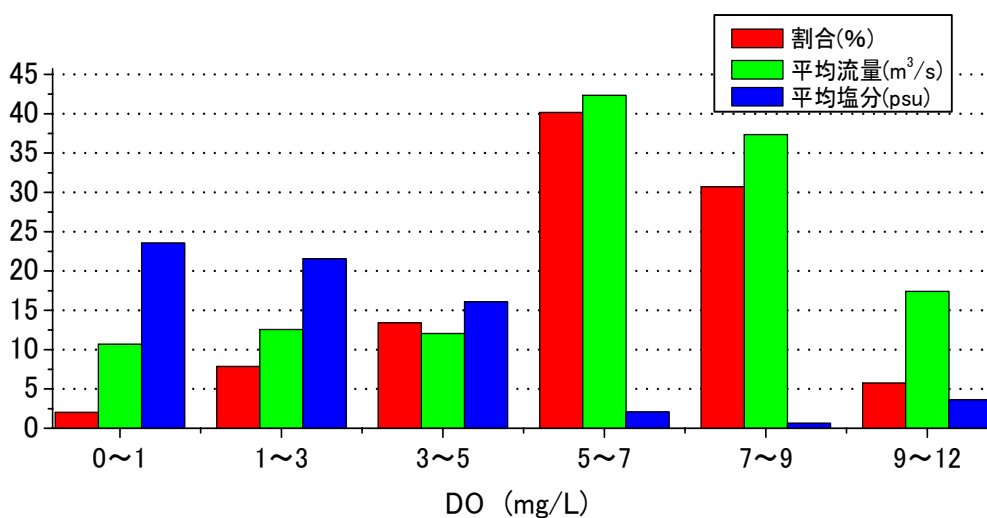


図 5.1.6 DO の割合, その時における平均流量, 平均塩分

5.2 酸素消費検討

表 5.2.1 各地点の消費日数

No.	地点	水深 m	溶存酸素量(g)	SOD(g/day)	BOD(g/day)	chl-a(g/day)	日数
1	馬入水質観測所	1.5	13.26	4.63	0.45	-	2.61
2	馬入水質観測所	1	8.84	4.63	0.3	-	1.79
3	1.0km 上流	1	8.84	1.6	2.4	-	2.30
4	2.0km 上流	0.5	4.42	1.85	0.33	0.001	2.03
5	2.0km 上流	1	8.84	1.85	0.66	0.001	3.52

SOD や BOD による酸素消費により、どの程度の期間で貧酸素化になるか概算する。移流拡散による DO 収支は複雑であり時間が足りなかったため今回は底面積が 1m² の円柱状の水塊を考え、その水塊の酸素消費を見積もることとする。SOD, BOD は 4.3 で得られた結果の平均値を用い、1.0km 上流の BOD は他の 2 地点の平均値とした。各水柱の水深、溶存酸素量(g)、消費項目、酸素消費日数を表 5.2.1 に示す。ここで水柱が飽和していることを初期条件とし、消費日数は DO が 0mg/L になるまでの日数である。また、2.0 km 上流ではプランクトンによる呼吸量も加味し、その量は $chl-a(=80 \mu g) \times K(=0.025) (\mu g / L \cdot day)$ で示した。ここで chl-a は観測期間中で最も高くなった値を代入した。

水柱の水深が同等(1m)の場合、酸素消費日数は馬入水質観測所が 1 番早く、上流に行くにしたがって日数は延びていった。これより酸素消費速度は河口付近が一番速く、上流程遅くなるのがわかる。

次に各地点における実際の水深を考慮した酸素消費を考える。図 3.1.1 より成層構造が最も強く形成されている 2005 年 11 月の図から馬入水質観測所(0.5km 上流)は水深 1.5m、1.0km 上流は 1.0m、2.0km 上流は塩水フロントと同等とし 0.5m とした。正確には水深は違うが塩水フロントの消費を検討するために 0.5m とし、河口より 2.0km 以上上流は底質が砂質であることから SOD は同値と考えた。結果、半日程度の違いが見られるものの酸素消費日数は 2~3 日となり、日数に大きな差が見られなかった。

概算では酸素消費日数に大きな違いがなかったが、現地観測では塩水楔の先端において最も DO が低くなる結果となっている。この理由として塩水楔内のエスチャリー循環が考えられる。一般的に塩水楔内部においては、河口底層から進入してくる塩水により図 5.2.2 のような流れが生じる。そのため進入した塩水の底層を考えると、塩水フロントが最も古い塩水であり、逆に河口付近は外海から進入したばかりの新鮮な塩水である。

塩水フロント付近の水塊は河口より進入し、塩水先端に達するまで数日に日数がかかるはずである。その時間差により各地点における消費日数は同等であっても、現地での観測結果では塩水フロント先端において DO の減少が激しかったと考えられる。

塩水内部における酸素消費速度を概算した結果、各地点における酸素消費速度は河口付近が最も大きく、上流の方における酸素消費速度は小さいことがわかった。また水深を現地に対応させた場合、酸素消費日数は各地点において同程度である。しかし本検討では移流拡散を考慮していないため、塩水が河川内で停滞する日数を無視している。現実には時間差や淡塩水との混合による酸素供給、移流拡散等があるため、正確なシミュレーション若しくは現地観測が必要とされる。

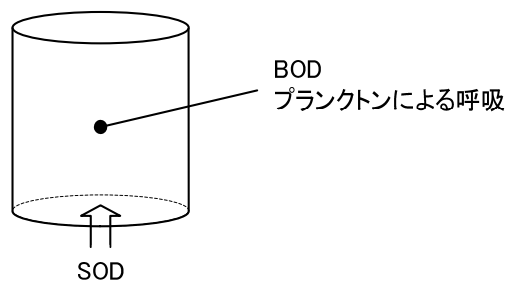


図 5.2.1 酸素消費イメージ

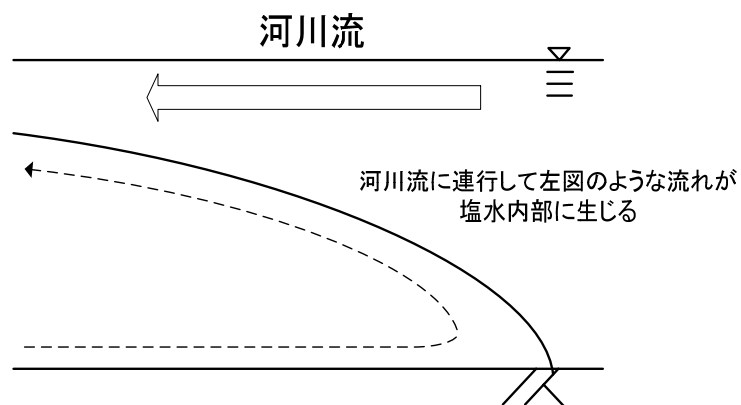


図 5.2.2 エスチャリー循環図

5.3 塩水フラッシュの検討

7月2日に少量の降雨により流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ から $25\text{m}^3/\text{s}$ に増加した結果、遡上していた塩水が下流に押し流され塩分は 26psu から 0psu に低下し、逆にDOは 1mg/L から 8mg/L に増加した。しかし7月4日には再び塩水が遡上し、DOは 0.4mg/L まで低下した。また、8月30日においても流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ に急増し、DOは 2mg/L から 6mg/L まで上昇し後日も 3mg/L 以上の値を保っていたが、9月1日の観測時には 2mg/L まで再度低下していた。

河川内に進入した塩水が貧酸素化した場合、河川流量の増加によるフラッシュが有効であるが、前述のように中途半端なフラッシュでは貧酸素化を解消できないことが観測結果から示された。(尚これらは図3.2.1, 3.2.2を参照されたし)

図3.1.1の10月の図は流量が $70\text{m}^3/\text{s}$ であり、また過去5日間の流量平均がおおよそ $100\text{m}^3/\text{s}$ であったことから(表3.1.1参照)、流量が $70\text{m}^3/\text{s}\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 程度である場合は河川内に侵入した塩水は殆ど全てがフラッシュされると考えられる。そこで流量と馬入水質観測所のECの時系列から塩水をフラッシュできる流量が $70\text{m}^3/\text{s}\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 程度であるかどうかの是非を検討する。

図5.3.1~5.3.6は馬入水質観測所におけるEC, TP水位, 寒川取水堰からの放流量を示したものである。またSt.2における塩分も観測期間中においては追加してある。

図5.3.1において6月9日に流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ まで増加しECは0まで低下した。翌日10日には低潮→高潮時にかけてECが増加し、この時の流量は $25\text{m}^3/\text{s}$ であった。図5.3.2では6月16日に流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ 近くまで増加し、三日間ECは増加せず塩水の進入は見られなかった。しかし流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ まで低下するとECの増加が見られ塩水が進入したと考えられる。また図5.3.2の期間中は 3.5km 上流まで塩水が遡上することはなかった。図5.3.3では7月2日に流量が $25\text{m}^3/\text{s}$ まで増加し、 3.5km 上流地点の塩分が次第に低下し、遡上していた塩水が下流に押し戻されたことが伺える。この時、同時刻においてECに変化は見られないことから馬入水質観測所は流量増加の影響を受けていないといえる。その後7月5日において流量が $120\text{m}^3/\text{s}$ まで増加しECが 0psu まで低下した。図5.3.4においても図5.3.2と同様に、流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ まで低下した7月23日にECが上昇した。図5.3.5においても同様の結果であり、やはり流量は $60\text{m}^3/\text{s}$ であった。8月17日から8月19日において、流量が $30\text{m}^3/\text{s}$ 以上の値が数日続き、結果ECは 0psu にまで低下する事態が見られた(図5.3.6参照)。

これらの結果より、流量約 $60\text{m}^3/\text{s}$ が河川水によるフラッシュと塩水遡上の力を拮抗させる値であると考えられる。すなわち流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ 以上である場合、少なくとも外海から塩水の進入はないことが観測結果より示された。また流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ 以下であっても数日の期間続くと塩水の進入が抑えられることが示唆される。これにより塩水をフラッシュできる流量が $70\text{m}^3/\text{s}\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 程度であることは妥当であると考えられる。今後は物理的、水理学的な検討を重ね理論的に数値を求めることが必要であると考えられる。

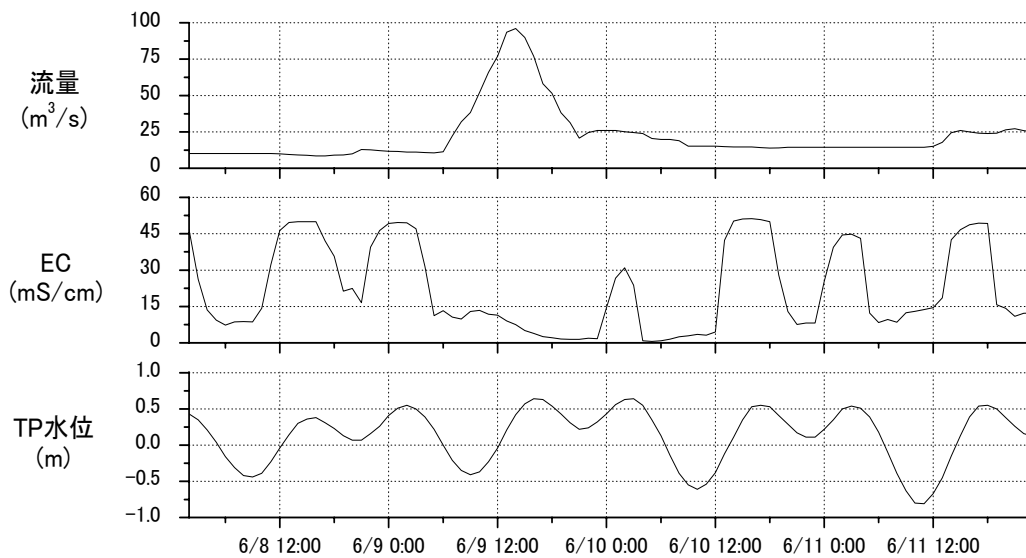


図 5.3.1 時系列 (6/8~6/11)

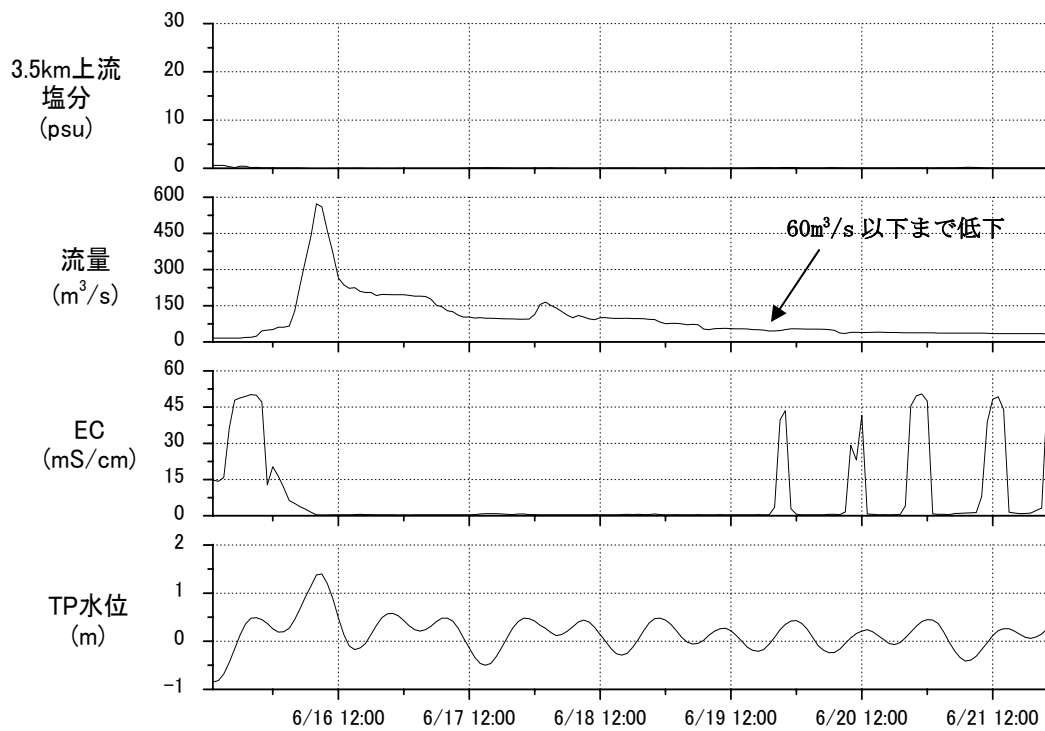


図 5.3.2 時系列 (6/15~6/21)

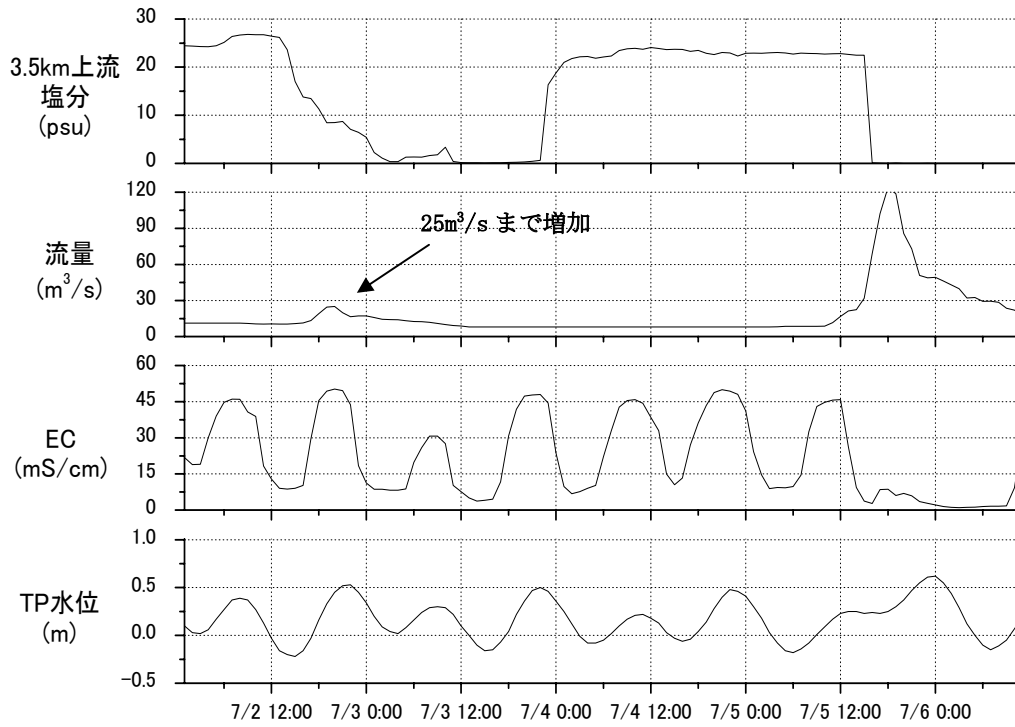


図 5.3.3 時系列 (7/2~7/6)

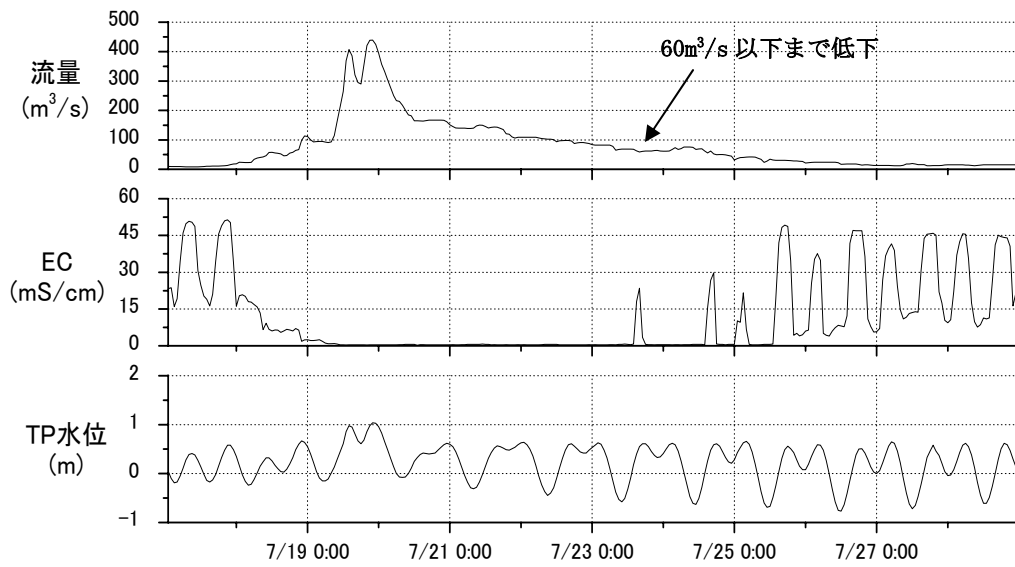


図 5.3.4 時系列 (7/17~7/29)

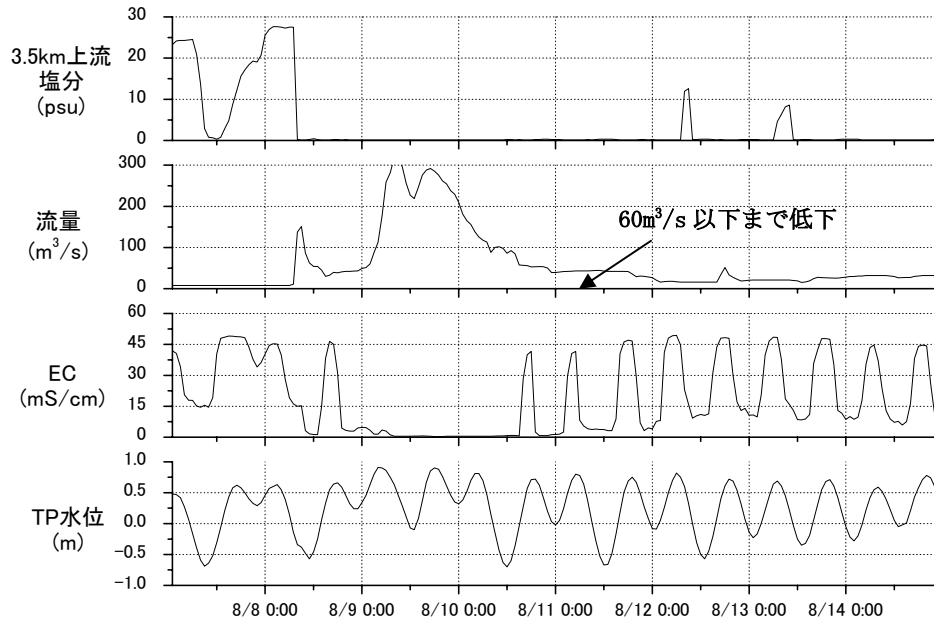


図 5.3.5 時系列 (8/7~8/14)

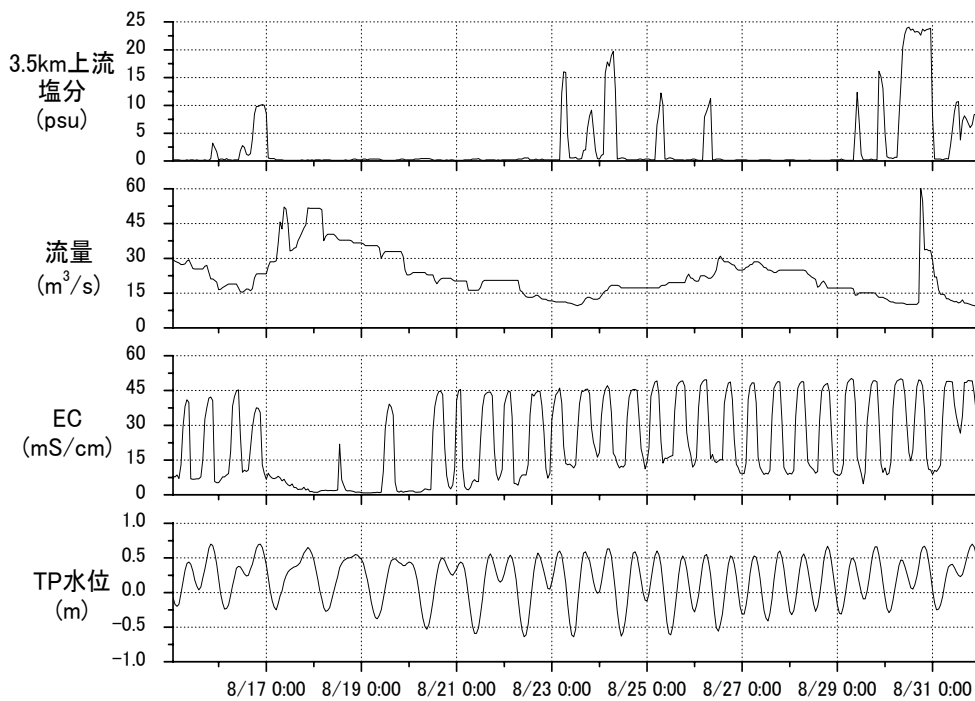


図 5.3.6 時系列 (8/15~8/31)

第 6 章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本研究で得られた知見を以下に要約する。

- ・流量の低下と塩分による成層化

相模川下流部では水温ではなく塩分による成層が卓越していることが明らかになり、水温成層は不安定となることがわかった (5.1.1 および 3.3 より)。また、塩水フロントにおいては、塩分による成層に加え、淡水中においても水温成層が形成されていた (3.3 より)。

- ・潮汐・河川流量に起因する塩分と DO の挙動

今回の観測により、相模川における河川流量と塩分・DO の関係を明らかにすることができた。流量が概ね $20\text{m}^3/\text{s}$ 以下であるときは少なくとも St.2 まで塩水が遡上し、塩分の上昇に連動して DO が低下することがわかった。

- ・進入した塩水の貧酸素化

観測期間中、大潮時・小潮時の両方において、河川の底層が貧酸素化することがわかった (3.2.1 より)。特に無酸素状態に陥る場合は、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ を下回っている時に限定される (5.1.4 より)。また河口付近よりも塩水フロントの方が DO の低下が著しかった。

- ・酸素消費

水、底質の共に酸素消費能力があり、水に関しては塩水フロントの BOD は河口付近の海水に比べ約 2 倍あることがわかった。特に下水処理水の BOD が高く、1 年を通して栄養塩濃度、BOD、SOD 等の水質は河川水に比べ卓越している。相模川の水質を考える上で下水処理水が大きな指標になると示唆される。底質においては河口付近の SOD が高く、また 2km 上流の砂状の底質においても酸素消費能力を有していることが明らかとなった (5.2 より)。

- ・貧酸素化の解消に関して

少量の降雨による流量増加により、遡上した塩水は即時 St.2 よりフラッシュされるという現象を捉えた (3.2.1 より)。また河川内に進入した塩水を完全にフラッシュするには、おおよそ $70\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が必要であり、 $60\text{m}^3/\text{s}$ 以上であれば外海から塩水の進入が抑えられることが観測結果より判明した (5.3 より)。

6.2 今後の課題

- ・ 下水処理水が水質・底質に与える影響

本研究において下水処理水が河川水に比べ水質等の濃度が高く一般的な河川負荷の強度を明らかにすることはできたが、水質や底質に影響をダイレクトに与える事は明らかにすることができなかった。今後は植物プランクトンの増加と栄養塩消費の関係を明らかにするなど下水処理水の環境へのインパクトを定量的に見積もる必要がある。

- ・ 複数地点における水質連続観測

今回の観測では移動する塩水楔を 1 地点でしか捕らえることができなかった。複数地点において、自記式水質計を用いて河川内の水質変化を時系列で捉えることで時空間変動を更に明確に捕らえることができるはずである。

- ・ 数値シミュレーションによるフラッシュの最適化

今回の観測結果から貧酸素化した塩水をフラッシュできる量を出すことができた。しかし現在の利水状況を考慮すると、 $70\text{m}^3/\text{s}$ もの放流をすることは現実性が無い。そこで、もっと少ない量で効果的にフラッシュができるかどうか数値計算を用いて検討することが必要であると言える。

参考文献

- 1)工藤健太郎, 鈴木伴征, 石川忠晴:鉛直二次元モデルによる相模川感潮域の塩水流動解析, 水工学論文集, 第 45 卷, pp949-954, 2001
- 2)福山貴子, 松田武久, 佐藤慎司, 田中晋:湘南海岸流砂系の土砂動態と相模川河口地形の変化, 海岸工学論文集, 第 50 卷, pp576-580, 2003.
- 3)神奈川県土木部河港課:相模川河口調査報告書, 1961
- 4)本間仁, 堀川清司, 景山正樹, 鮮于澈:相模川河口について, 第 8 回海岸工学講演会講演集, pp202-210, 1961
- 5)三村信男, 他:河口・沿岸海域におけるシルトの凝集と沈降に関する研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集
- 6)鈴木伴征, 石川忠晴, 銭新, 工藤健太郎, 大作和弘:利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と挙動, 水環境学会誌, 第 23 卷, 第 10 号, pp624-637
- 7)鈴木伴征, 若岡圭子, 石川忠晴:利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について, 水工学論文集, 42, pp769-774
- 8)田中仁:河口域のながれと地形, ながれ 24(2005), pp37-46
- 9)有田正光, 橋本彰博, 南澤公太郎:感潮域の塩水侵入の混合形態分類に関する研究, 水工学論文集, 第 49 卷, pp1375-1380
- 10)有田正光, 橋本彰博:長良川河口域の塩水侵入と水質変動の特性, 水工学論文集, 第 49 卷, pp1381-1386
- 11)水野俊輔, 藤原広和, 杉田尚男, 沢本正樹:高瀬川感潮部の混合特性について, 水工学論文集, 第 49 卷, 2005 年 2 月, pp1387-1392
- 12)山本浩一, 末次忠司:筑後川河口部における底質中の形態別栄養塩の分布特性に関する研究, 水工学論文集, 第 49 卷, pp1417-1422

- 13)酒井新吾, 真野明 : 河口塩水混合層における浮遊物質の分布特性, 水工学論文集, 第 49 卷, pp1423-1428
- 14) 西田修三, 佐野俊幸, 中辻啓二 : 汽水湖における流動構造と物質循環過程, 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.1116-1120
- 15) 安達貴浩, 小松利光, 橋本彰博 : 河川河口域における塩水遡上の鉛直 2 次元数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.411-415
- 16) 田中陽二, 磯部雅彦, 鯉淵幸生, 五明美智男, 大野嘉典 : 閉鎖性海域での微細気泡による水質改善効果の数値解析, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.1126-1130
- 17) 信岡尚道, 鈴木学, 長谷川慎一, 三村信男, 鯉淵幸生, 須能紀之 : 塩分浸入に着目した涸沼の環境解析, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.881-885
- 18) 深山顕寛, 磯部雅彦, 鯉淵幸生 : 有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.951-955
- 19) 呉海鍾, 磯部雅彦, 佐藤 慎司, 鯉淵幸生, 安熙道, 鄭甲植, 趙珍亨 : 韓国始華湖における排水門開門後の水質・底質変化の現地観測, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.976-980
- 20)河川環境管理財団 : 感潮河川の水環境特性に関する研究
- 21)松尾友矩 : 水環境工学
- 22)有田正光 : 水圏の環境
- 23)土木学会 : 水理公式集
- 24)日本分析化学会北海道支部 : 水の分析
- 25)汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会 : 汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書

謝辞

本論文の執筆，大学院の2年間の生活を通じ，多くの方の御指導・御協力を頂きました。

まず，いつもぐずぐずとしていて先に進まない私に叱咤激励，アドバイスをしてくださった指導教官である黄先生に感謝申し上げます。先生自らが学生に指示を与えるのではなく，学生の自主性を尊重し考えさせる先生の指導方針は私にとって大変貴重な経験となりました。結果的に考えが至らず，先生の御指示に従うことが殆どでしたが水工論文集に登載が決まったことも先生の御陰であると思います。

入学当初，他大学からの編入ということもあり，また学部時代は研究活動をしなかった私に主に沿岸環境学演習を通じて御指導してくださった鯉淵先生には大変感謝をしております。演習だけでなく，その後の研究の考え方，そして実際に学生に対して細かい作業方法まで指導していただき2年間を通じて最も御世話になったと思っております。田島先生には当時修了を控えていたSさんのためにプログラムを書かなければならない中，現地観測の手伝いをして頂き本当にありがとうございました。直接御指導を受けることは多くありませんでしたが，学生に対する真摯な御指導の噂は海岸研の皆から聞いております。

そして磯部先生と佐藤先生にはゼミにおいて，多くのご指摘・指導を受けました。磯部先生と佐藤先生の指導スタイル，物事の考え方は修了した後の社会人として生きていく上にも大変参考になるもので私にとって最も大きい経験になったと思います。特に佐藤先生には国交省の方との交渉や研究資金面においても全面的にバックアップして頂き，先生の御陰で研究が進んだといっても過言ではありません。秘書の山上さん，長田さんにも書類提出の件や連絡事項などで大変御世話になり，周りの方のサポートがなければ物事が進まないということを実感させていただきました。

新領域，海岸研の学生の皆様には常に御世話になりました。特に，いつもどこでもお世話になった田中さん，一緒に困難を乗り越えた小野澤君，神野君，藤原君と2年間一緒に研究できた事は本当に嬉しかったです。たった一年間ですが，唯一嫌な思いを共感してくださった佐藤さん，色々お手伝い&相談にのってくださった寺田さん，疲労困憊になる現地観測を何度も何度も手伝ってくれた國分君・吉田君，本当にありがとうございます。M1のころからお世話になった伊津野さん，呉さん，木村さん，鈴木さん，平塚さん，Deepackさんにもお世話になったこと感謝申し上げます。

余談ですが，きよすみに乗った回数は当時M2の方を除くと結局私が一番多く，時には嫌なことに対し自分の主張をすべきであると学びました。またマイクロバブルの実験は大変辛いものであり，思えば実験を通じて自分なら何が出来るかをかんがえておけばよかったと思います。どんな時でも最善の事をして楽しくなるようにしなければなりません。

最後に，四半世紀にわたり私の援助をしてくれた両親に感謝の意を記します。