

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.41 NO.3 September 2002

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 41 卷 第 3 号 (Vol. 41, No. 3), 2002 年 9 月 (September 2002)

目 次 (CONTENTS)

1. 緩く堆積した地盤の波浪による液状化について
..... 鈴木高二郎・高橋重雄 1
(Liquefaction of Loose Deposited Sandbed due to Ocean Wave
..... Kojiro SUZUKI and Shigeo TAKAHASHI)
2. 河口域における溶存酸素濃度の動態
ー長良川河口堰下流部におけるモニタリングデータの解析ー
..... 中村由行・栗木秀治・藤野智亮 19
(Dynamics of dissolved oxygen in an estuary -Analysis based on monitoring data obtained in the lower reaches of a
rivermouth barrage of the Nagara River -
..... Yoshiyuki NAKAMURA, Hideharu KURIKI and Tomoaki FUJINO)
3. 海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上に関する研究
..... 渡邊弘子・岩波光保・濱田秀則・横田弘 49
(A Study on Durability Enhancement of Marine Structures Covered with Marine Aquatic Fouling Organisms
..... Hiroko WATANABE, Mitsuyasu IWANAMI, Hidenori HAMADA and Hiroshi YOKOTA)

河口域における溶存酸素濃度の動態 —長良川河口堰下流部におけるモニタリングデータの解析—

中村 由行*
栗木 秀治**
藤野 智亮***

要 旨

河口域は河川流域と沿岸海域の境界に位置し、物理的及び生物化学的要因が複合しながら、溶存酸素(DO)濃度が空間的・時間的に大きく変動する。物理的要因の中では混合強度の影響が大きいと予想されるが、河口域のDOの変動機構に関して、複合する要因を整理し、物理的な影響度を抽出した例は少ない。

本研究においては、長良川河口堰下流部においてモニタリングされたデータを用い、河口域におけるDO濃度の基本的な変動機構を解析した。特に、混合に大きな影響を持つと考えられる潮汐作用と河川流量という物理作用から、河口域の貧酸素水塊形成の基本的な過程を整理した。堰運用前後に共通した特徴は、底層DOの変動が大潮・小潮のサイクルに応じた変動を主体とし、河川流量変動に伴う攪乱が重なって生じている点である。大規模出水時には、底層DO濃度は増水時に一時的に増加するが、流量が低減した後は極端な高塩分化に伴った貧酸素化が生じることが多い。これは、伊勢湾奥部に形成された貧酸素水塊の遡上によって生じる。堰運用前後の違いは、主として混合形態の差によって生じている。堰の運用前では、大潮時には強混合であり、混合が活発化し貧酸素化が解消されていた。しかしながら、運用後には大潮時でも緩混合的であり、鉛直混合は不十分で、表層・底層の水質に差が見られ、貧酸素化の回復が不十分である。

キーワード：溶存酸素(DO)、貧酸素水塊、河口堰、潮汐サイクル、洪水流

* 海洋・水工部 沿岸生態研究室長

** 海洋・水工部 沿岸生態研究室 受託研修生

*** 前、海洋・水工部 沿岸生態研究室 受託研修生(現、東洋建設㈱)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

Tel: 0468-44-5047 Fax: 0468-44-6243 e-mail: nakamura_y@pari.go.jp

Dynamics of dissolved oxygen in an estuary
-Analysis based on monitoring data obtained in the lower reaches of a rivermouth
barrage of the Nagara River-

Yoshiyuki NAKAMURA*
Hideharu KURIKI**
Tomoaki FUJINO***

Abstract

Dynamics of dissolved oxygen(DO) of the bottom layer in the lower reaches of a rivermouth barrage of the Nagara River was investigated. The tidal action is a primary component to govern the temporal variation of the daily-averaged DO concentration of the bottom layer of the Nagara River estuary and river flow gives disturbances to this primary mode. Such fundamental feature remains unchanged before and after the construction of the Nagara Barrage. When we have a big flood in summer season, DO concentration in the bottom layer of the estuary increases rapidly during a rising stage of the discharge, but after the peak discharge DO becomes very low because of the intrusion of anoxic saline water from the inner part of Ise Bay.

The difference of DO variation in the estuary after the Nagara Barrage construction is caused by the difference in mixing regime associated with tidal action. The mixing regime in the spring tide changed from a well-mixed condition to a partially-mixed condition. Thus DO concentration of the bottom layer remains low even during the spring tide due to weaker vertical mixing with the Nagara Barrage in addition to the neap tide period.

Key words: dissolved oxygen(DO), anoxic water, rivermouth barrage, tidal cycle, river discharge

* Head of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department

** Trainee of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department

*** Former, Trainee of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department
(Present, Toyo Construction Co. Ltd)

3-1-1, Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan Port and Airport Research Institute
Phone: +81-468-44-5047 Fax: +81-468-44-6243 e-mail: nakamura_y@pari.go.jp

目 次

要 旨	19
1. まえがき	22
2. 用いた水質等の資料と解析の方針	23
2. 1 用いた水質等の資料	23
2. 2 解析の方針—底層DO変動をもたらす物理的要因	23
3. 結果と考察	28
3. 1 潮汐サイクルと混合形態の変化	28
3. 2 底層DOの潮汐サイクルに応じた変動	38
3. 3 河川流量の変化とDO濃度変動	39
3. 4 出水直後の貧酸素化と内湾水との相互作用	39
3. 5 河口堰の影響	43
(1) 混合形態の変化	43
(2) 大潮時における一潮汐周期間の混合の様子	44
3. 6 溶存酸素動態に影響を及ぼすその他の要因	46
4. 結論	46
謝辞	47
参考文献	47

1. まえがき

総合科学技術会議において、環境分野の中で特に重点的に取り組む課題とされた四分野の一つに、「自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシアティブ」がある。東京湾などの内湾域の水質管理・自然再生についても、流域圏という言葉が示すように流域との一体管理が求められている。そのような背景の中で、河口域は、河川流域の影響が沿岸域にまず現れる位置にあるとともに、沿岸海域との相互作用を受ける場でもある。河口域の水質変動の現象をまず理解し、その機構を解析することは沿岸域管理において重要な意味を持つ。

河口域は、河川流量や潮汐の影響を受け、特有の流れや混合の形態をとることが知られている（例えば、奥田1996；須賀1979）。また、河口域は河川流域と沿岸海域の境界に位置し、塩分などの環境条件が急激に変化する場である。このような環境勾配に適応した生物が生息し、特有の生態系が発達している。生物の生存にとって重要な環境条件は種々あるが、特に、溶存酸素（DO）濃度は季節的にも日単位でもしばしば大きく変動し、生物の生息場を規定する重要な因子となっている。DO濃度の低下は、流れや拡散などの物理的因子のほか、有機物濃度や生物活性など生物化学的過程に影響を受ける、複合的な要因によっている。特に河口域は凝集沈殿などによる物理的な有機物の堆積作用や、塩水の侵入と滞留による混合の低下などにより、しばしば貧酸素化しやすい。しかしながら、河口域のDOの変動機構に関して、複合する要因を整理し、物理的要因を抽出した例は極めて少ない。その大きな理由は、長期のモニタリングデータを取得することが困難であるためと考えられる。

多くの太平洋側の一級河川河口では、潮位差によって鉛直方向の混合の程度が変動し、大潮期では強混合ないし緩混合、小潮期には弱混合に混合形態が変化することが多い。鉛直混合は表層の高濃度のDOを底層に輸送する重要な役割を持つが、混合の強度が低下すると酸素の供給量が減少し、特に酸素消費量の高い夏期には底層水の貧酸素化が生じやすくなると考えられる（粕谷・山内1996；西條1996）。このような大潮・小潮サイクルの変動を把握するためには、そのサイクル以上にわたる長期観測が必要であるが、一般にそのような長期間に連続して観測を実施することは困難で実施例は乏しい。例外的な事例として、長良川河口堰周辺でモニタリングされている観測があるが、その貴重なデータは十分活用されているとは言い難い。さらに、河口が富栄養化した内湾に位置している場合には、貧酸素に代表される内湾の水質

が河道内の水質と相互作用を及ぼしている可能性があるが、このような河川水と内湾水の相互作用を詳細に調べた例は見あたらない。

そこで、本研究においては、長良川河口堰下流部においてモニタリングされたデータを用い、DO濃度の基本的な変動機構を解析する。特に、混合に大きな影響を持つと考えられる潮汐作用と河川流量という物理作用から、河口域の貧酸素水塊形成の基本的な過程を整理した。

長良川河口堰上・下流では長年にわたり詳細なモニタリング調査が実施されており、堰運用後の貧酸素水塊の形成過程に関して、既にモニタリング調査結果を解析したいくつかの報告がある（粕谷・山口1996；村上ら2001；西條1996；Saijo 1998；武田・松尾2000；武田ら2001）。既往の報告で述べられているように、淡水である堰の上流側と、海水が遡上する下流側では、密度成層の成因が異なり、貧酸素水塊の形成にも違いをもたらしている。堰下流部の貧酸素化については、例えば、村上ら（2001）は出現パターンを3つに類型化しているが、物理要因と生物化学的要因が混在しており、個々の要因の重要度が不明なままである。

一般に、河口域の底層DO濃度は、塩分成層の強度と相関が高い事が知られている（石川ら1997；粕谷・山口1996；西條1996；Saijo 1998；鈴木・石川1999）。河口域において塩分成層を規定する要因は潮汐と河川流量であり、混合形態の変化はこれらの大小関係によって変動する。従って、これらの物理因子と底層DO濃度変動には密接な関係があるはずである。しかしながら、長良川河口堰下流部での貧酸素化の機構を、混合形態や流動場から整理した研究は、著者らの知る限りほとんど行われていない（松尾ら2000）。さらには、河口域は内湾水との交換が行われるため、富栄養化した内湾につながる河口域では、内湾底層の貧酸素水が遡上し、DO動態に影響を及ぼしていることも予想される。このような、内湾水との相互作用の機構についても、研究例は極めて少ない。長良川におけるモニタリングの目的は、河口堰の影響評価にある。しかしながら、本研究における目的は河口堰の影響評価を行うことにあるのではなく、潮汐と河川流量という物理作用を主体として、底層DO濃度の変動をもたらす基本的な過程を解析し、再整理することである。

2. 用いた水質等の資料と解析の方針

2.1 用いた水質等の資料

長良川河口堰下流部における水質・流れの資料は、公表されている長良川河口堰モニタリング調査結果(建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社2001)を用いた。伊勢湾奥部の水質については、日本水産資源保護協会資料(日本水産資源保護協会1997)を利用した。さらに、長良川流量については、墨俣における観測流量(建設省河川局1995, 1996, 1997, 2000)を、潮位については名古屋港の潮位データをそれぞれ用いた。

利用した水質データの測点を図-2.1に示す。長良川については、河口定点から下流0.5 km 右岸地点の Stn. A (通称ジョー君)、及び3.0 km 上流側左岸 Stn. B (通称イーナちゃん)でのモニタリングデータを用いた。墨俣河川流量観測点は、河口定点から上流39 km 地点にある。また、解析に利用した伊勢湾における観測データは、図-2.1における Stn. 1~31におけるデータである。この調査地点は、伊勢湾全域における貧酸素水塊の発達過程を調べた調査地点(日本水産資源保護協会1997)のうち、長良川河口と湾口を結ぶ線上にあるものである。Stn. 1は、上述の河道内測点をほぼ等間隔で延長した地点にあり、長良川河川水と伊勢湾の海水との交換を調べる上で都合の良い場所にある。

以下、堰運用前の1994年と95年、及び運用後の99年の資料を基に、貧酸素化の機構を整理する。伊勢湾水と長良川底層水との関連については、伊勢湾における観測が重点的に行われた1996年の、それぞれのデータを用いた。

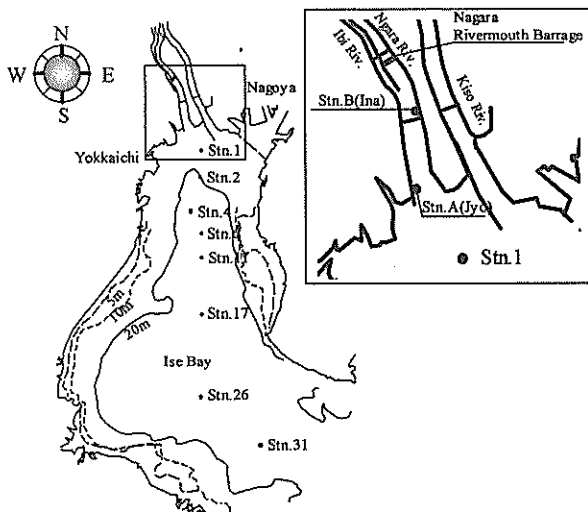


図-2.1 観測地点位置図

2.2 解析の方針—底層DO変動をもたらす物理的要因

内湾や湖沼における底層のDO濃度は、密度成層の発達に強く依存していることが知られている。河口域についても、塩分成層の発達に強く依存している事が知られている(例えば、西條1996;石川ら1997)。河口域において塩分成層の強度を規定する主要な要因は、潮汐による潮位差と河川流量であり、混合形態の変化はこれらの大小関係によって変動する。例えば、小松ら(1996)は、川内川河口域の塩分データ解析を行い、小潮時には弱混合、大潮時には強混合の形態をとることを示している。さらに、塩水遡上に関しては、大潮期よりも小潮の方が侵入長が長くなり、最大の侵入は若潮(小潮より2~3日後)時に見られ、侵入長に対しては河川流量の変動も大きな影響を及ぼすこと、さらには上流域に設けられた取水口での用水の塩水障害が、これらの物理因子の組合せによって生じる事を示した。これらの事実から、潮位差及び河川流量によって河口域の塩分成層の強弱に顕著な差が見られ、水質にも影響が及んでいることがわかる。従って、これらの物理因子と底層DO濃度変動には密接な関係があるはずである。

図-2.2.1~図-2.2.4は、長良川モニタリングデータのうち、Stn. Bにおける塩化物イオン(Cl)濃度およびDO濃度の変化を、各年毎に示したものである。河口堰の運用開始は、1995年7月から行われた。その前後のCl濃度の変動には顕著な違いがみられる。すなわち、堰運用前には底層Cl濃度はしばしば表層のそれと重なり、深さ方向に混合が活発であったことがわかる。両者の濃度がほぼ一致する現象は1ヶ月に2度程度の頻度で現れており、潮汐変動が影響していることが示唆される。しかしながら、運用後には表層と底層の濃度が一致することはきわめてまれである。一年に数度の頻度で、ほぼCl濃度がゼロ付近の時に表層・底層の濃度が一致する現象が現れている。表層Cl濃度は約2週間の周期で増減を繰り返しており、朔望周期の現象であることが示唆される。底層Cl濃度の変動も同じ程度(約2週間周期)の変動が観察されることがあるものの、変動幅はきわめて小さい。堰運用後の鉛直混合はきわめて不十分であることがわかる。図-2.2.3~図-2.2.4のDO濃度の変動も、Cl濃度変動のパターンと類似した変動を示している。堰運用前では、1994年の9-10月頃を除いて表層と底層の濃度差は小さく、ほぼ混合が行き渡っていたものと考えられるが、運用後では一年を通じて濃度の差がみられる。表層と底層の濃度差がなくなる時期は一年に数度みられるが、これは図-2.2.1~図-2.

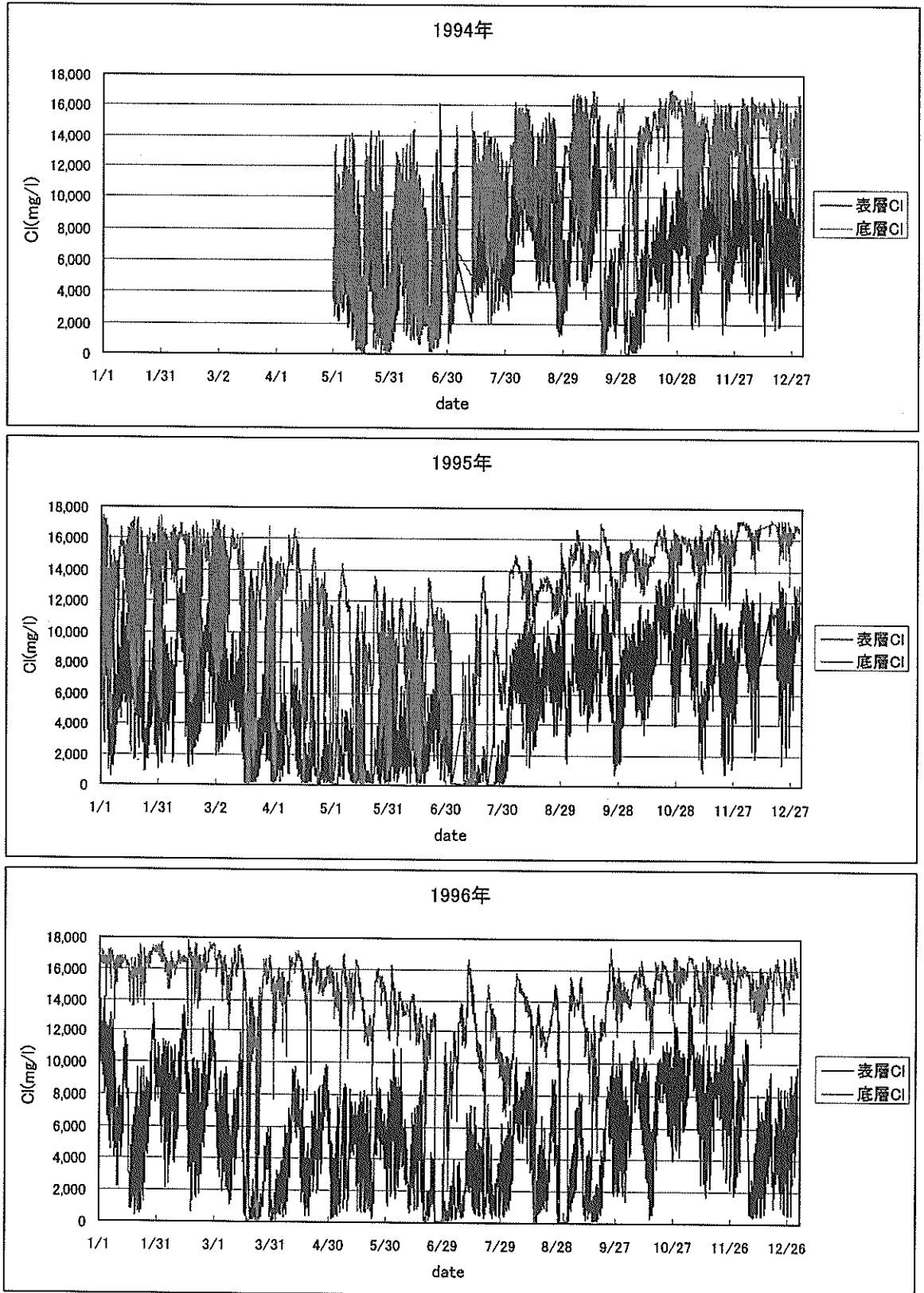


図-2. 2. 1 1994年～1996年の表層と底層のClの時系列変化

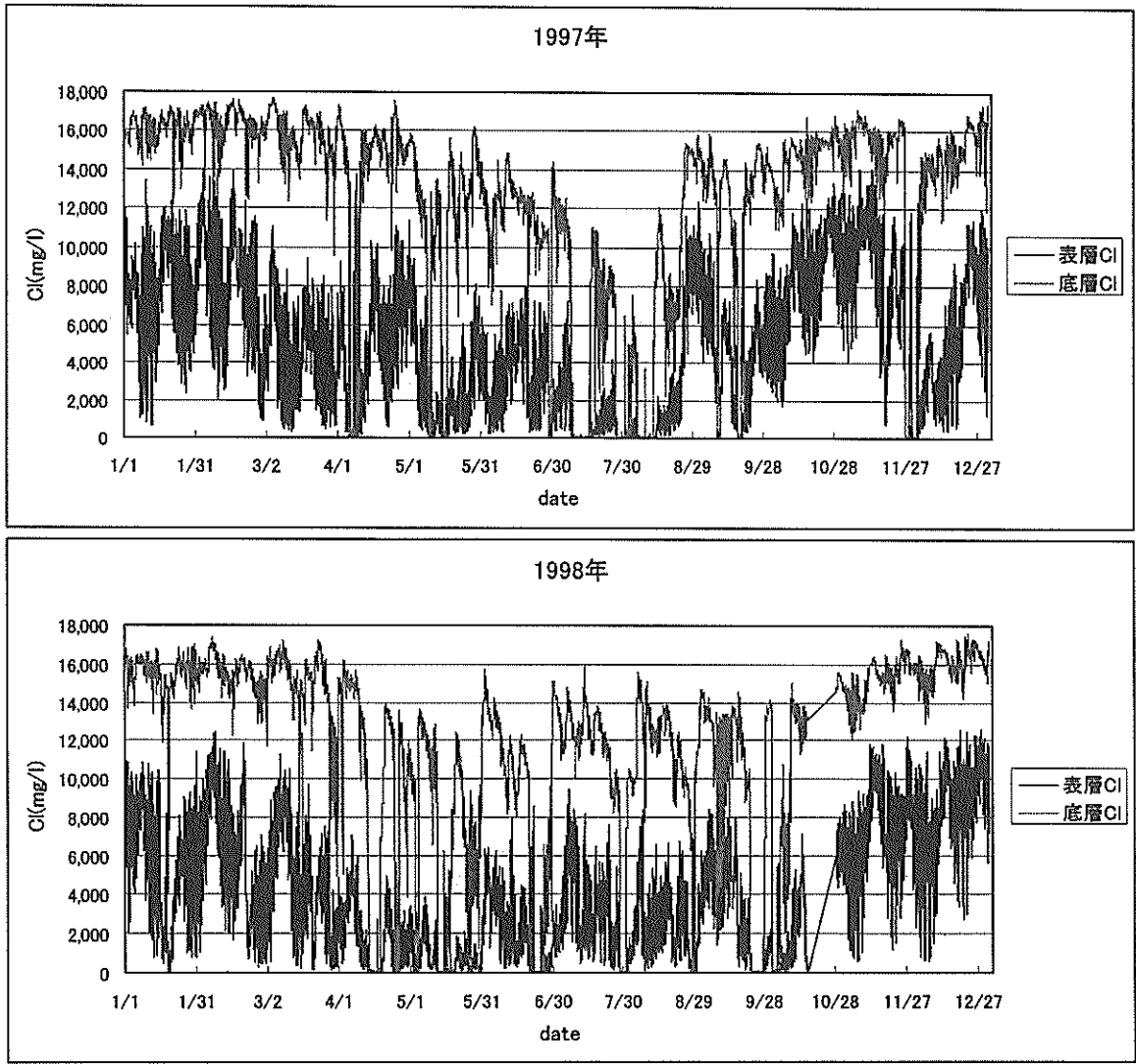


図-2. 2. 2 1997年～1998年の表層と底層のClの時系列変化

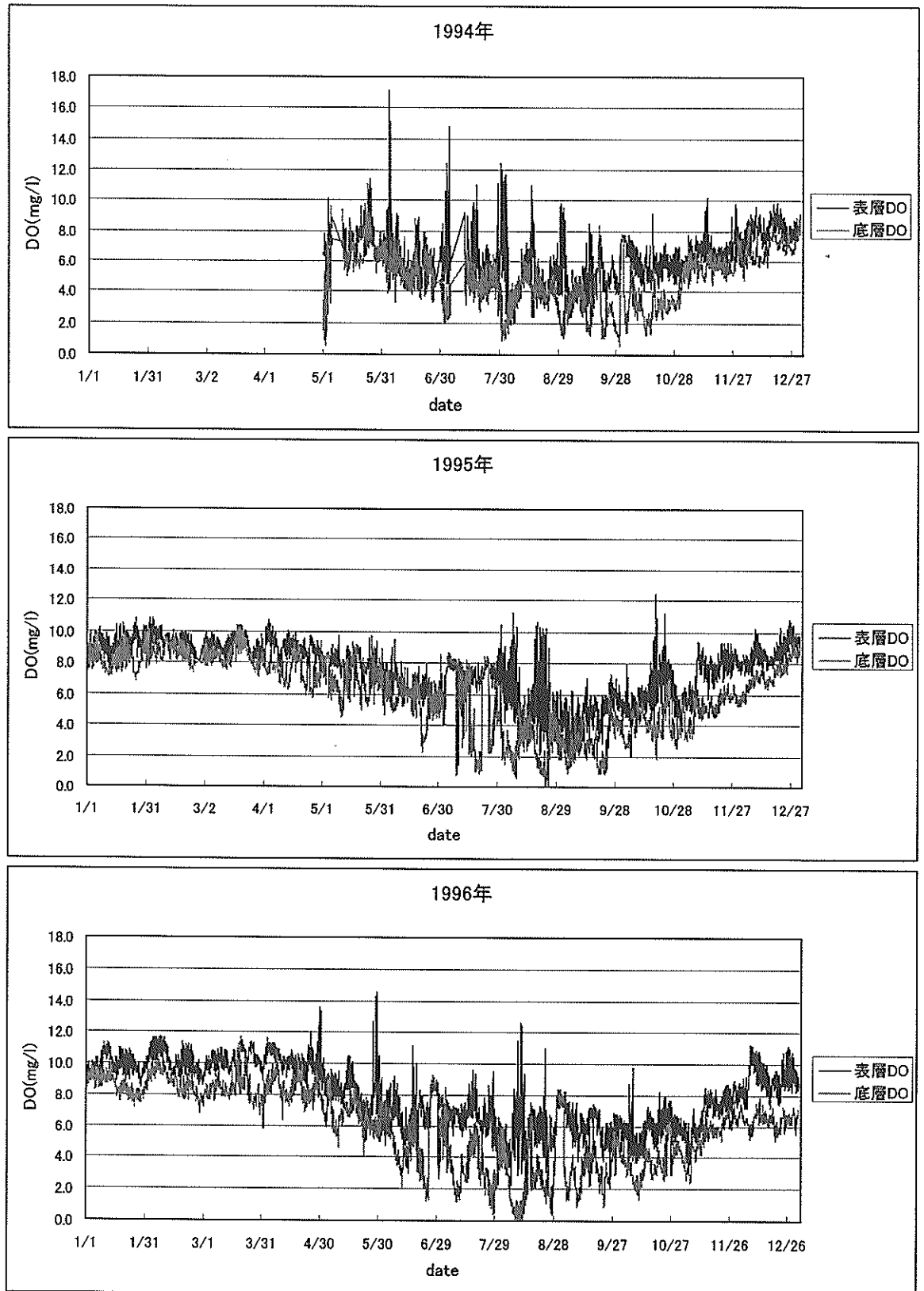


図-2. 2. 3 1994年～1996年の表層と底層のDOの時系列変化

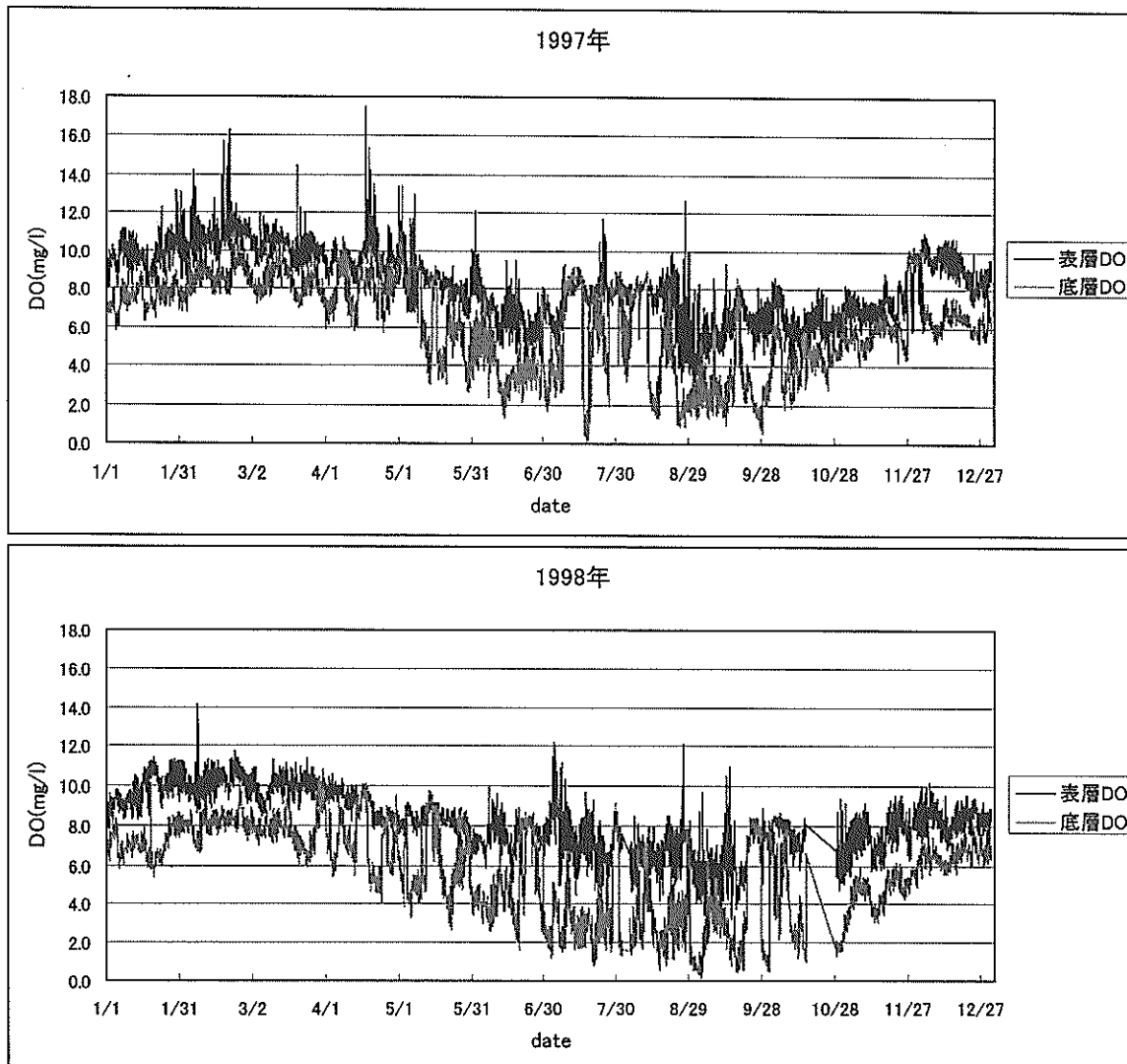


図-2. 2. 4 1997年～1998年の表層と底層のDOの時系列変化

2. 2のCl濃度変動と併せて見比べると、Cl濃度がほぼゼロの時に一致する。すなわち、大規模な出水時に一時的に貧酸素化が解消していることが示唆される。しかしながら、貧酸素化が解消される時間スケールは数日程度であり、特に夏期においてはすぐに貧酸素状態に戻っている。

以上のことから、DO濃度の変動は、干満に応じた半日及び一日周期の変動や、大潮・小潮という約2週間周期の潮汐サイクルに応じた変動、さらには1年周期の季節変動などが重なって生じているものと考えられる。これらの周期的変動のほか、河川流量変動に伴う突発的な変動が攪乱的に生じていると考えられる。本研究では、夏季における貧酸素化をもたらす物理的要因の解析を主目的とする。まず大潮・小潮の潮汐サイクルに応じた変動特性を調べ、次いで必要に応じて一日の中の干満の影響を議論する。また、河川流量の影響については、特にゲートの開放が行われるような大規模な出水時とそれ以外の時期に大別して現象を整理し、流量変動の影響を議論する。その理由は、平水時及び低水時には堰運用の影響で、長良川下流部について信頼性のある流量データが得られていない上に、合流する揖斐川流量の影響も無視できない(松尾ら2000)ことなどにより、厳密な影響評価を行うには、現資料の解析だけでは無理があるからである。

3. 結果と考察

3. 1 潮汐サイクルと混合形態の変化

河川感潮域における底層DO濃度の減少や回復は、混合形態の変化に大きく依存し、例えば大潮時に混合が促進されれば表層からのDOの供給によって、底層DO濃度が回復し、逆に弱混合状態では供給が阻害されるため貧酸素化が進行しがちである。つまり、潮汐サイクルの中で、対象水域での混合形態の変化、すなわちCl濃度変動の機構に着目する必要がある。混合形態の変化をもたらす物理的な駆動力は潮汐の潮位差であるので、ここでは、Stn. A及びStn. Bにおける表層と底層のCl濃度の差 ΔCl (1日平均)と1日の名古屋港における潮位差 $\Delta \eta$ との関係を1月毎に図にプロットし、相関関係を調べた。ここで、河口堰運用前及び運用後の任意の1~2年をそれぞれ抽出し、運用前については1994年及び1995年を、運用後については1999年のデータを採用した。また、河川流量が濃度差に影響を及ぼす可能性が大きいので、河川流量Qに応じて3つに分類した。

図-3. 1. 1~図-3. 1. 8は、横軸にイオン濃

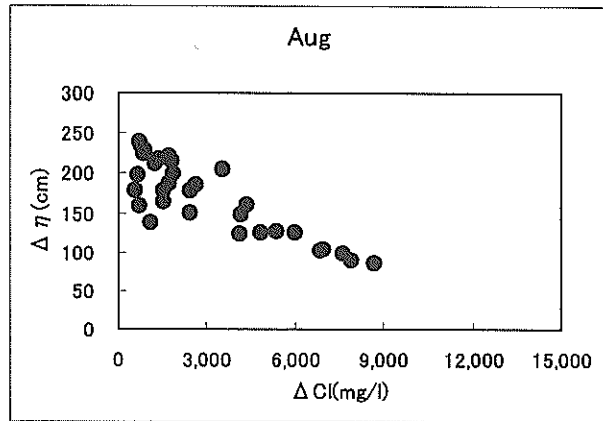
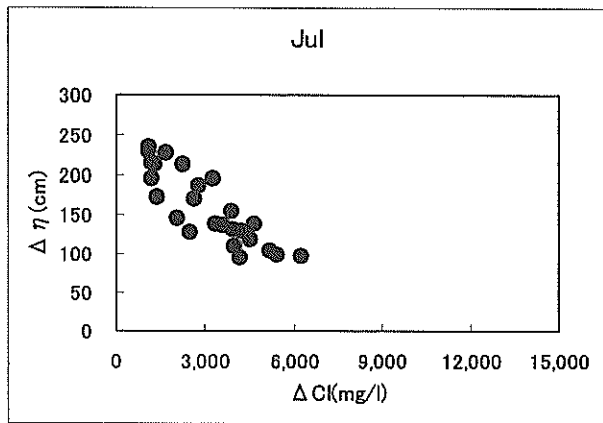
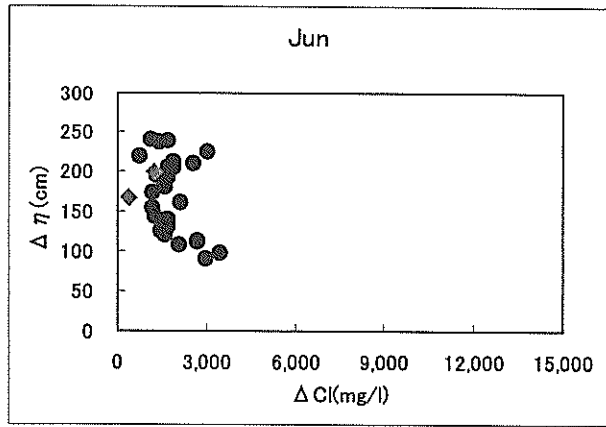
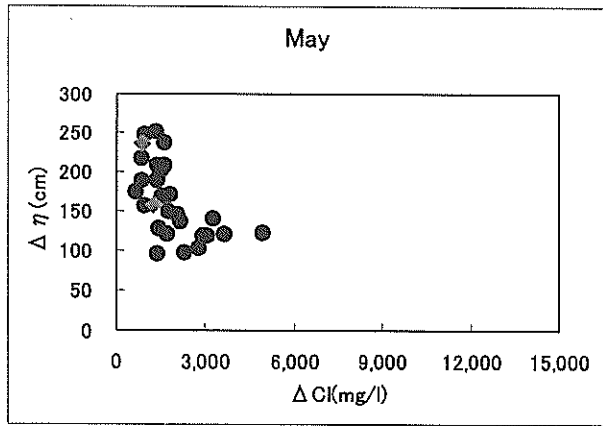
度差 ΔCl 、縦軸に潮位差 $\Delta \eta$ を取り1日毎にプロットした結果である。まずStn. Bについて見ると、堰運用前はCl濃度差と潮位差の間には負の相関が年間を通じて見られた。つまり、潮位差が大きくなるにつれ、底層と表層のイオン濃度差が小さくなる事を示しており、大潮時において表層水と底層水の混合が良く行われている事を示している。また、夏期(7月~9月)と冬期(1月~2月、11月~12月)の結果を比較すると、夏期の方が潮汐サイクルを通じて冬期よりイオン濃度差が小さい傾向にある。須賀(1979)は、詳細に長良川の混合形態や塩水遡上の季節変化について調べている。夏期には河川流量が増加するため伊勢湾水自体のCl濃度が冬季に比べて低下し、同じ潮位差で比べても夏期の方が混合が生じやすいこと、さらに冬季の小潮時には塩水遡上がもっとも上流にまで伸びることを示している。今回のデータもそれらを示唆する結果を示している。

一方、堰運用後(1995年7月運用開始)のStn. Bにおいては、Cl濃度差と潮位差の関係は、夏期には依然として負の相関関係が見られるが、冬期は正の相関を示している。これは、潮位差が大きくなるにつれ、底層と表層の濃度差が大きくなる事を示している。これは、一般に予想される関係、すなわち、潮位差が大きいほど混合が促進され、表・底層の塩素Cl濃度差は小さくなる、という予想に反している。また、同じ夏期においても運用前と運用後では、潮汐サイクルを通じて運用後の方が底層と表層のイオン濃度差は大きくなっている。

Stn. Aについては、堰運用前と運用後、及び夏期と冬期における混合形態は、1年を通じて負の相関が見られる。どちらの場合も季節変動による底層と表層のイオン濃度差は、潮汐サイクルの中で大きな相違は見られない。ただ、堰運用前と運用後のそれぞれの濃度差を比較すると、全般的に運用後の方が大きくなっている。

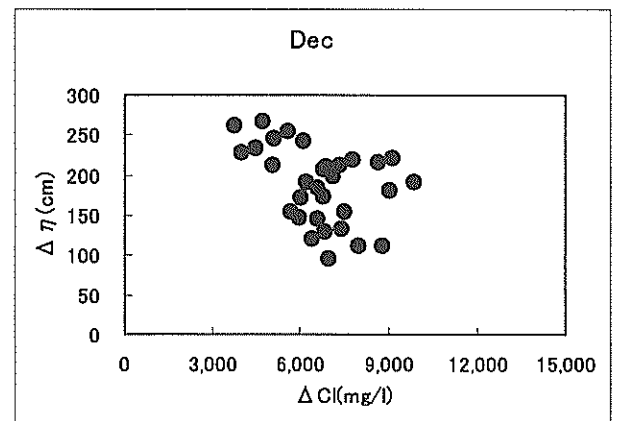
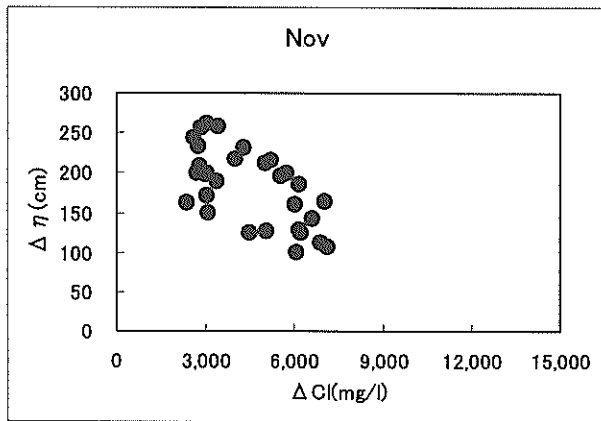
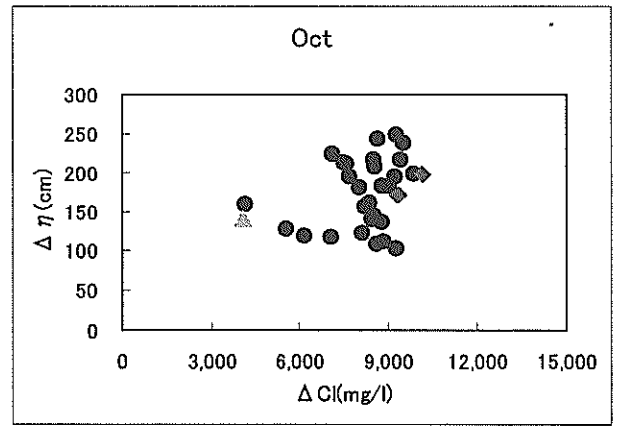
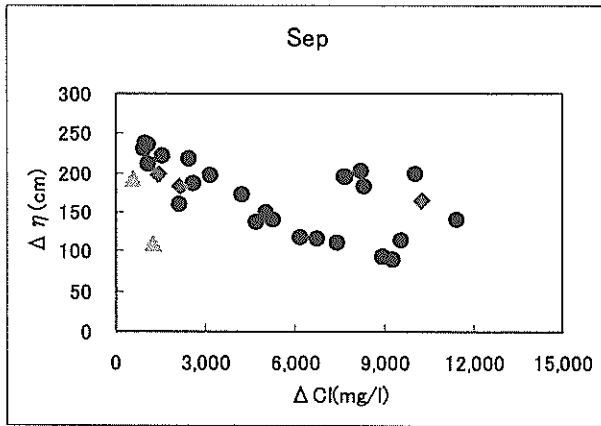
同一年度のStn. AとStn. Bを比較すると、Stn. Aつまり伊勢湾に近い方が底層と表層の濃度差がサイクルを通じて小さい事が示された。また、いずれの場合も400m³/sを越えるような洪水流が生じた場合、河道内全体が淡水により一時的に占められるため、底層と表層のイオン濃度差が著しく小さくなっている。

以上の結果をまとめると、堰の運用により堰の下流側近傍ではその影響を大きく受け、混合形態に運用前と比較して明らかな相違が見られるようになった。具体的には、運用後の冬期の潮位差と濃度差との相関が、運用前とは全く逆になった。河口部近傍においては、堰の運用による相関関係は運用前と比較して大きな相違は見られないが、底層と表層のイオン濃度差は運用後の方が大き



● : $Q < 200\text{m}^3/\text{s}$ ◆ : $200\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ ▲ : $400\text{m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 1 1994年5月～8月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関



● : $Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ◆ : $200 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ▲ : $400 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 2 1994年9月～12月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関

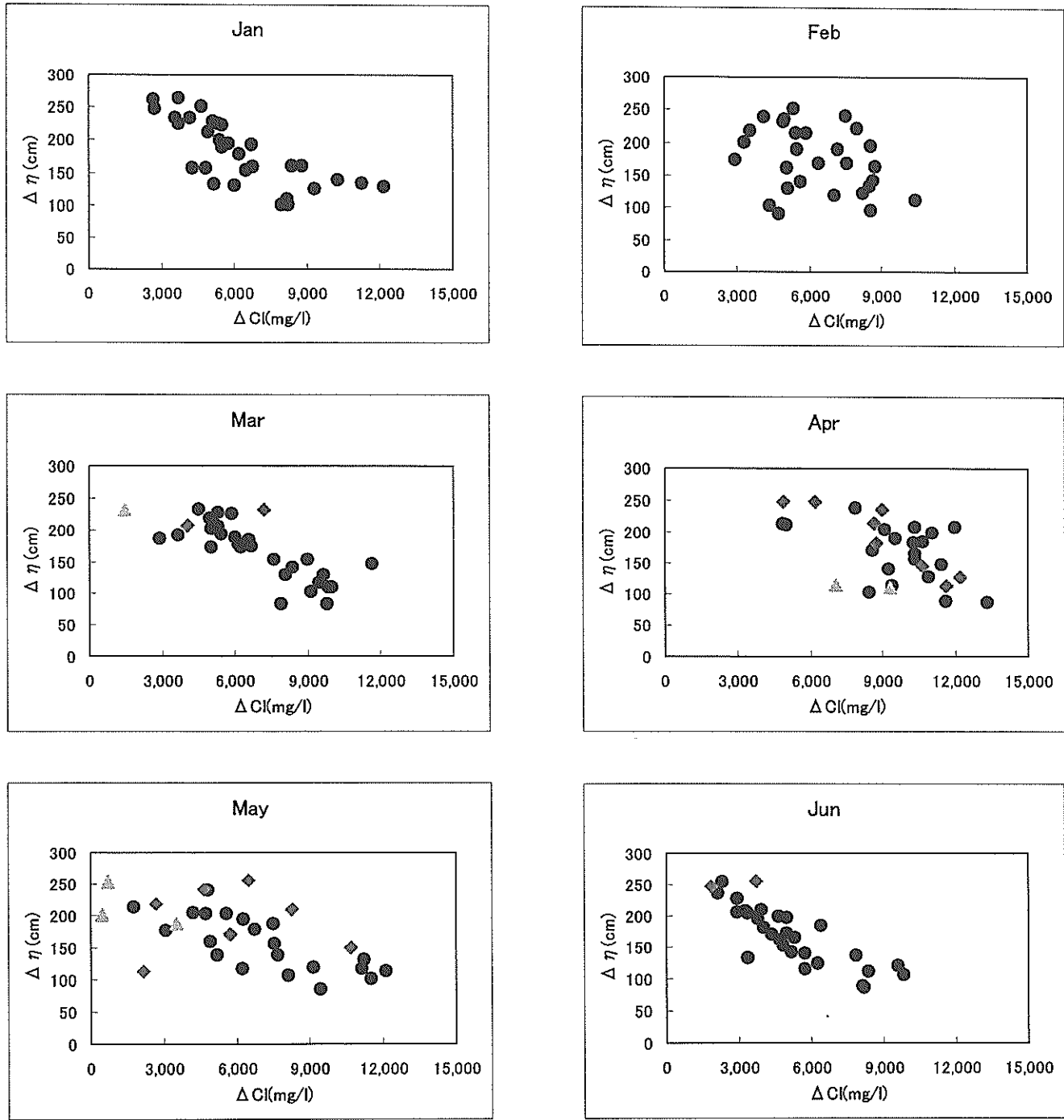
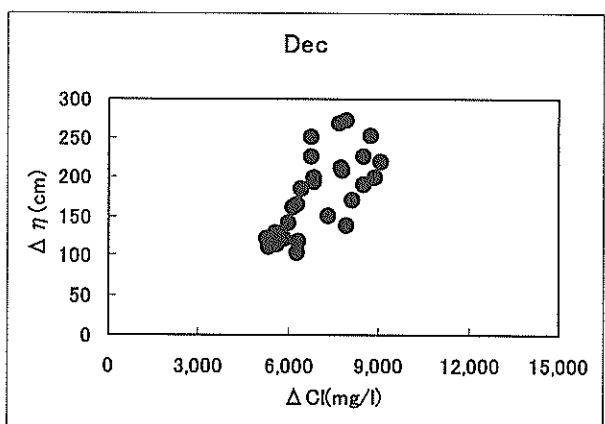
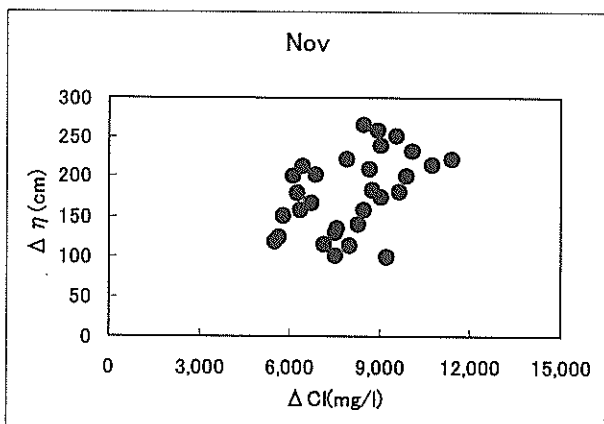
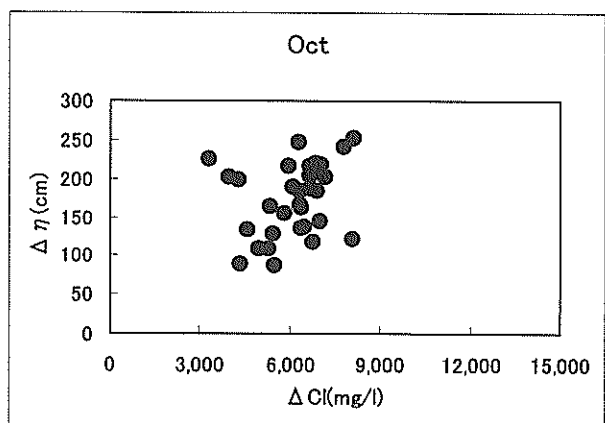
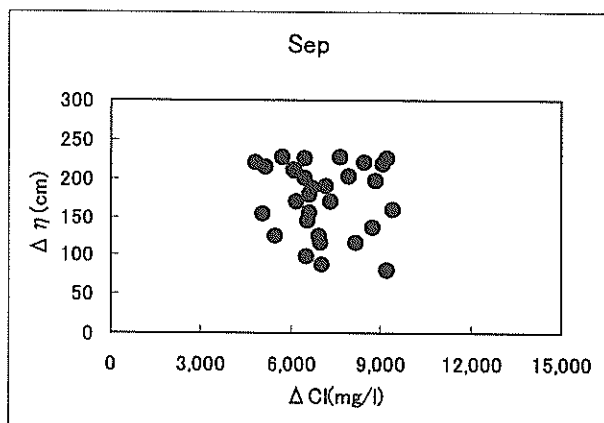
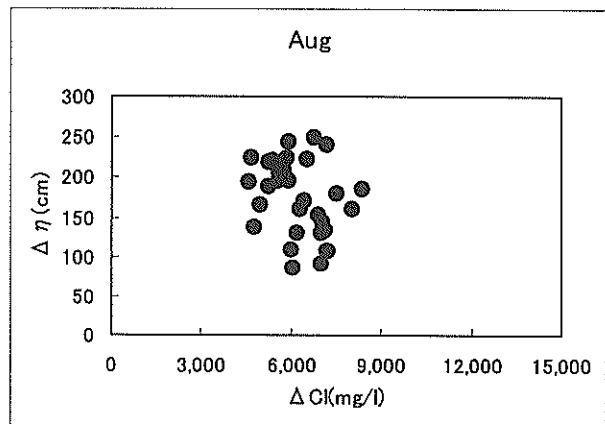
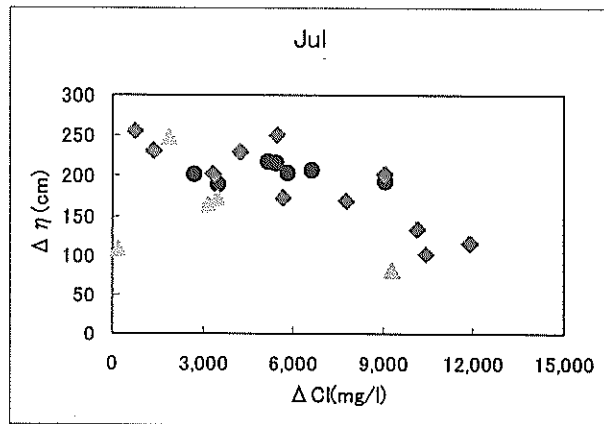
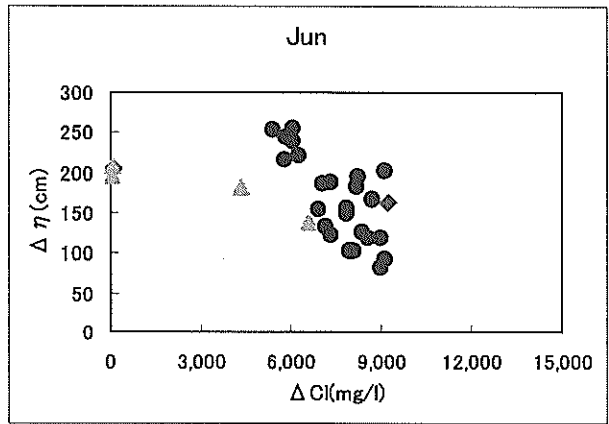
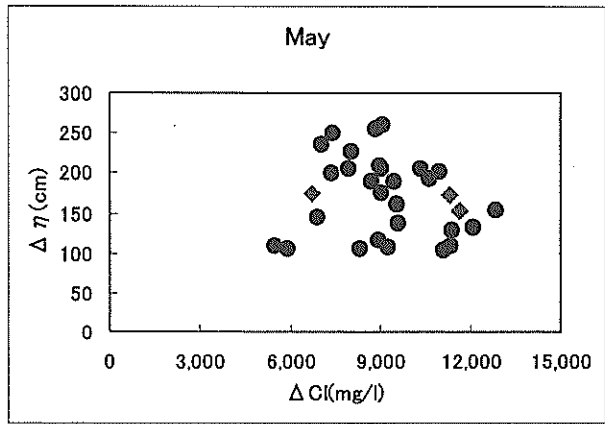
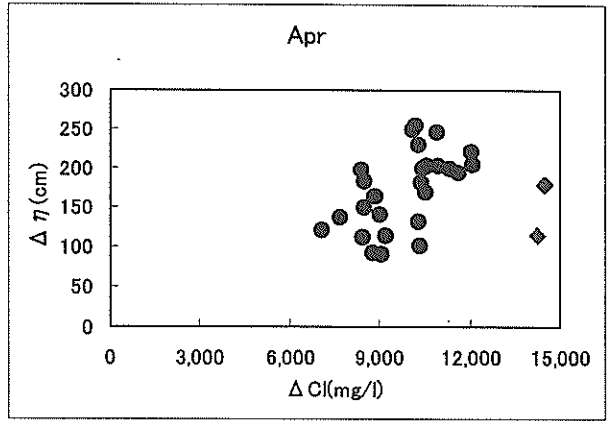
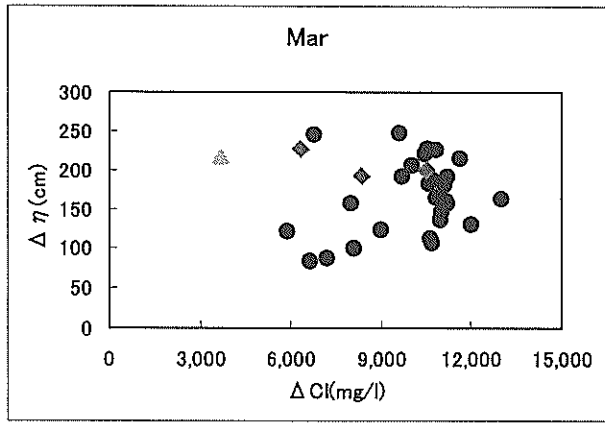
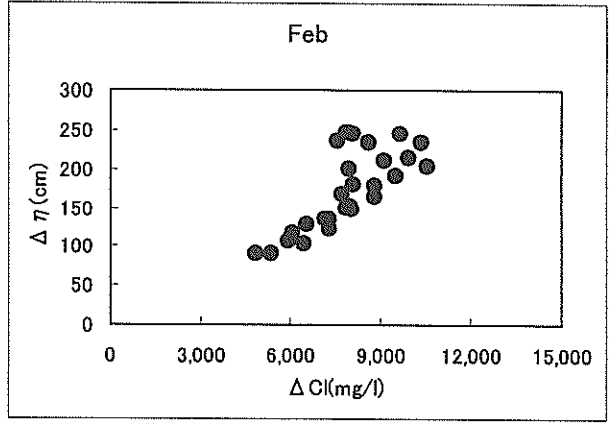
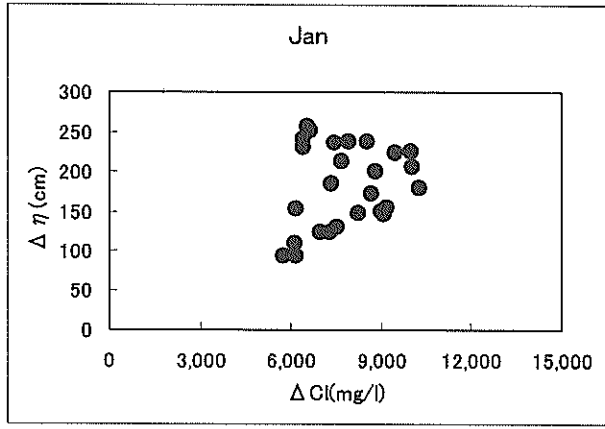


図-3. 1. 3 1995年1月～6月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関



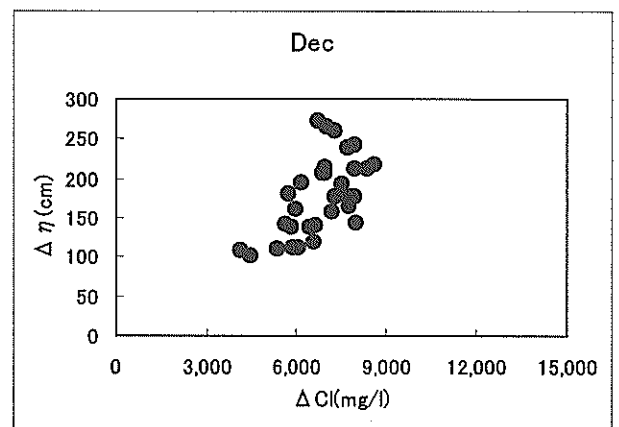
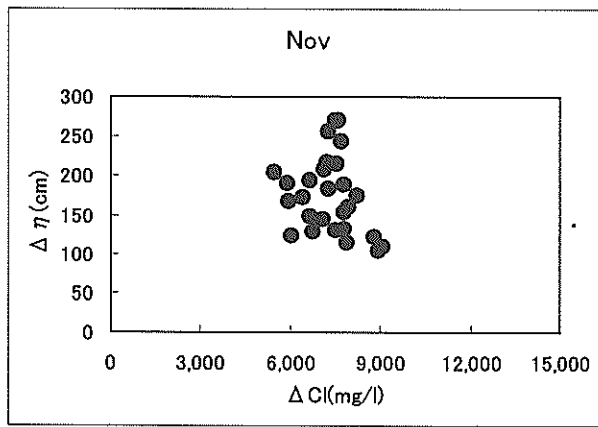
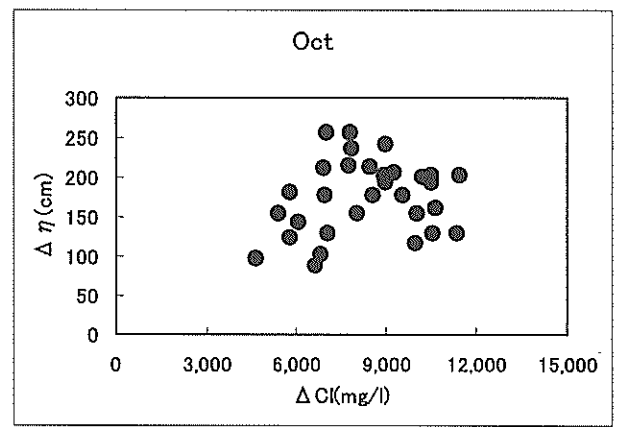
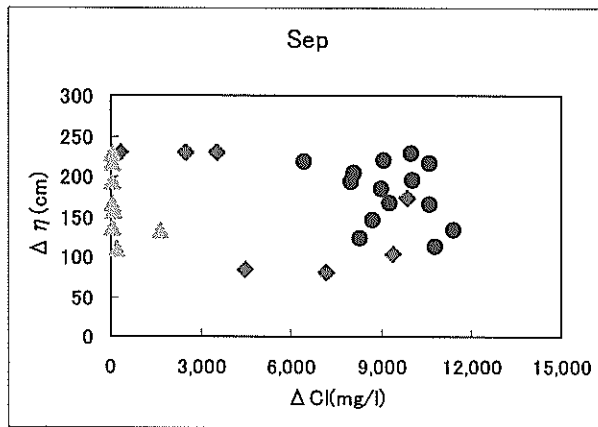
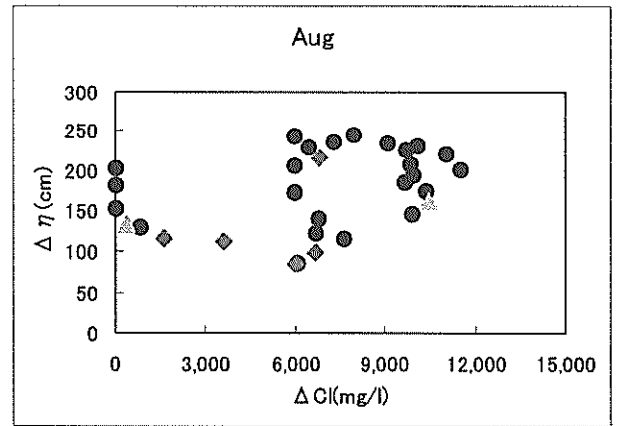
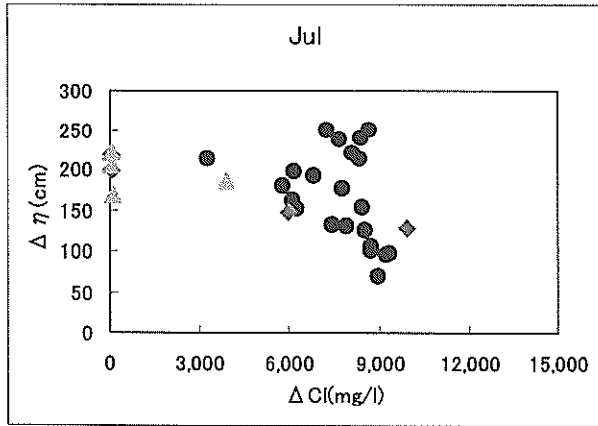
● : $Q < 200\text{m}^3/\text{s}$ ◆ : $200\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ ▲ : $400\text{m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 4 1995年7月～12月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関



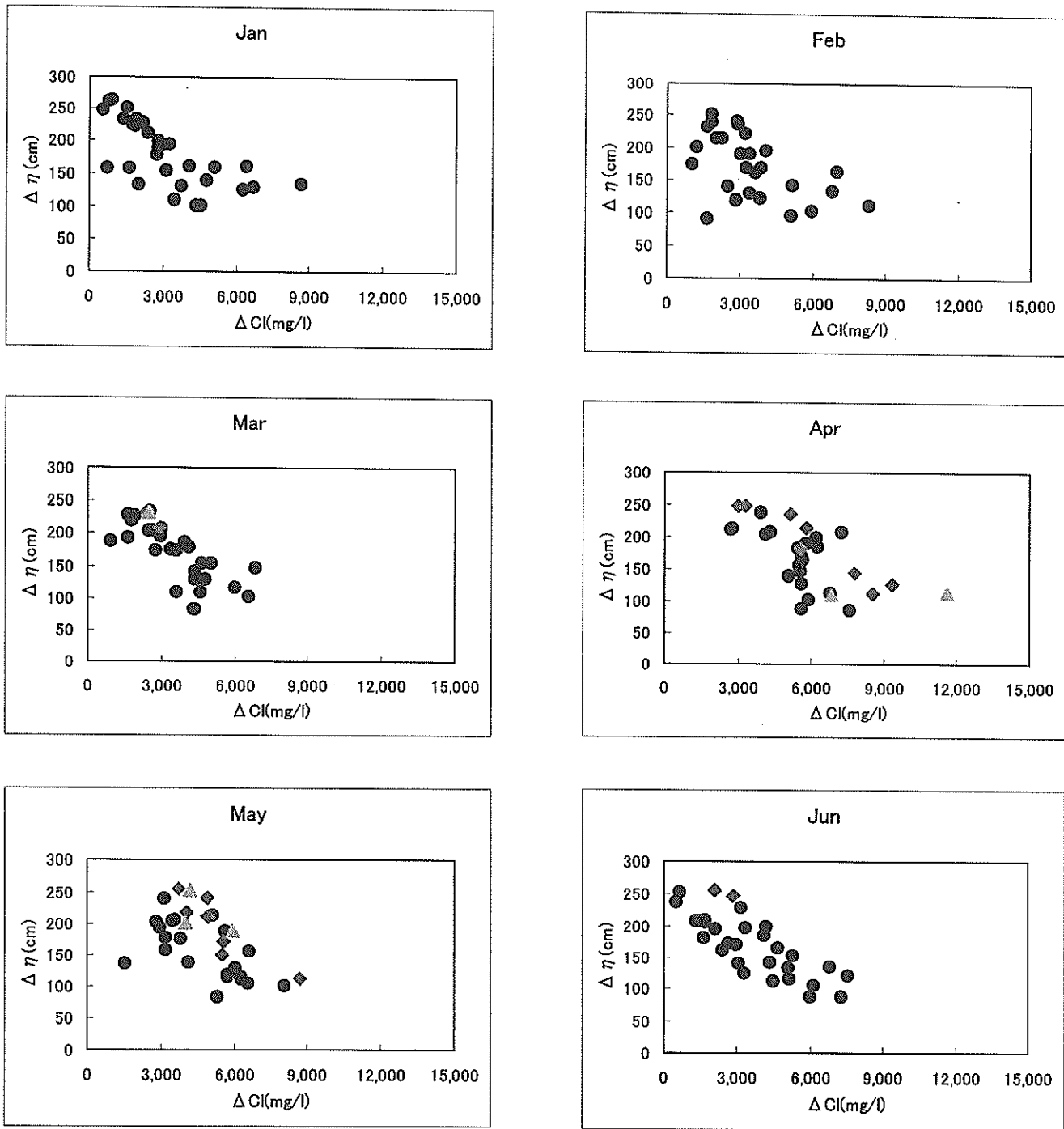
● : $Q < 200\text{m}^3/\text{s}$ ◆ : $200\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ ▲ : $400\text{m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 5 1999年1月～6月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関



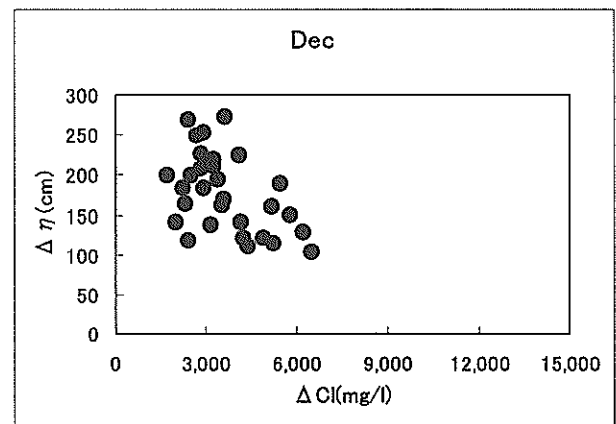
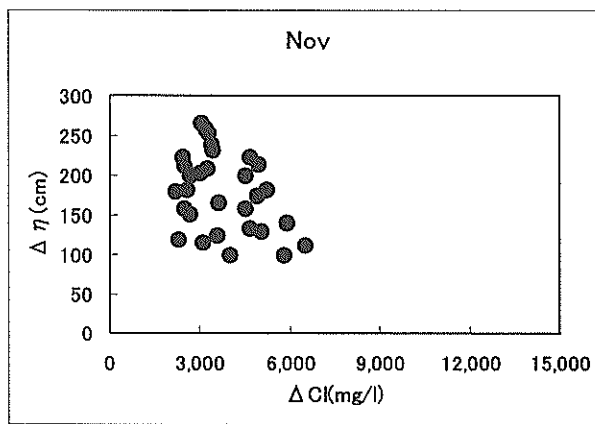
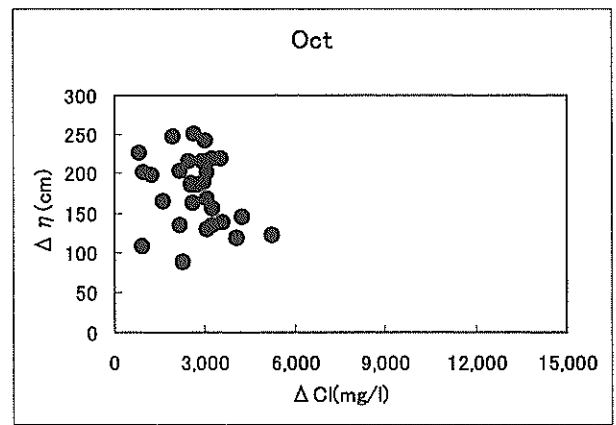
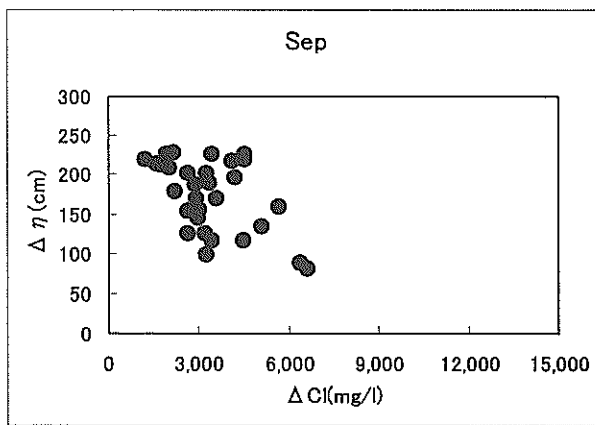
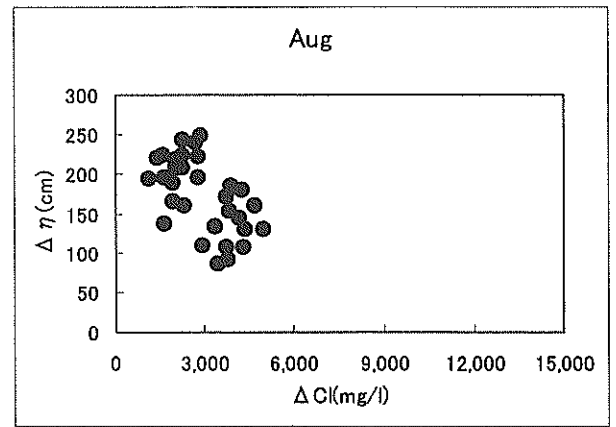
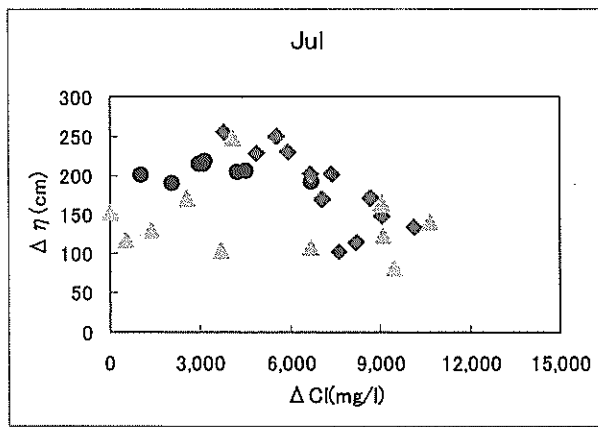
● : $Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ◆ : $200 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ▲ : $400 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 6 1999年7月～12月のStn. BにおけるCl濃度差と潮位差との相関



● : $Q < 200\text{m}^3/\text{s}$ ◆ : $200\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ ▲ : $400\text{m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 7 1995年1月～6月のStn. AにおけるCl濃度差と潮位差との相関



● : $Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ◆ : $200 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ▲ : $400 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q$

図-3. 1. 8 1995年7月～12月のStn. AにおけるCl濃度差と潮位差との相関

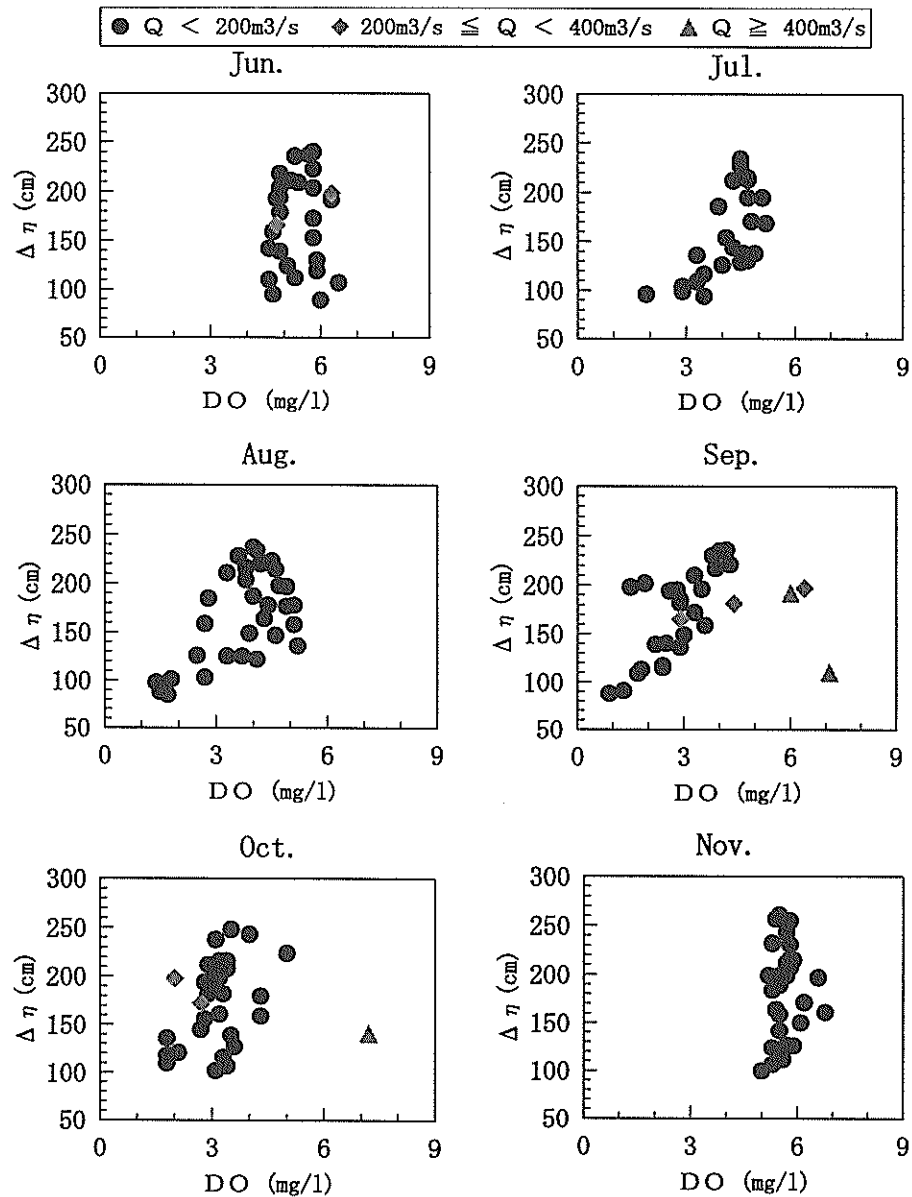


図-3. 3 1994年6月～11月のStn. Bにおける底層DOと潮位差との相関

3. 2 底層DOの潮汐サイクルに応じた変動

まず、大潮・小潮の潮汐サイクルに応じたDO変動特性を調べるため、DO濃度の日平均値を用いて解析を行う。

図-3. 3は、堰運用前1994年における6月から11月までのStn. Bにおける底層DO濃度日平均値と、一日の潮位差 $\Delta\eta$ (名古屋港での値) の関係を、月ごとに示したものである。6月には底層DO濃度は潮位差に無関係にほぼ一定値をとっており、4 mg/l 以下になることはなかった。7月からは、一日の潮位差が少ない、即ち小潮前後にDO濃度の低下が見られ始め、7月下旬には2 mg/l 以下の貧酸素化が生じた。8月及び9月には潮位差と底層DO濃度の相関関係が次第に明瞭になっていき、流量が多い数日を除いて、小潮の前後で最小、大潮の前後で最大の濃度

となっている。貧酸素化は10月まで間欠的に生じていた。11月には4 mg/l 以下になることはなく6月によく似た相関関係を示している。

図-3. 3では、底層DO濃度に及ぼす河川流量変動の影響をみるため、流量を3段階に分けて図示している。1994年は渇水年であり、流量が200 m³/s を超えた日は6月に2度のほか、9月及び10月にそれぞれ5日及び3日記録されたのみであった。さらに400 m³/s を超えたのは9月18日、同30日、10月1日の3日のみであった。図-3. 3において、9月及び10月にデータ群の中で大きくはずれている点は、すべて高流量時に相当していることがわかる。逆に、河川流量が200 m³/s 以下の場合には、7月から10月にかけて、一日の潮位差と底層DO濃

度の間に良い正の相関が見られる。潮位差の大きい大潮時にはDO濃度が高く、小潮時には低い。後述するように、大潮時には混合が促進されるためDO濃度が回復するが、小潮時には弱混合状態であり、底層DO濃度が下がり、特に夏期には貧酸素化する。

以上、図-3.3から、長良川下流部の底層DO濃度に影響を及ぼす物理的要因として、まず潮位差が支配的に作用している事、さらに河川流量の変動によって短期的に濃度が大きく変動する事がわかる。

さらに図-3.3から、堰運用前の1994年6月及び11月には、小潮時においてもDO濃度が高く、貧酸素していなかった事がわかる。1999年6月及び11月には小潮時に貧酸素化しており、堰運用後の他の年もほぼ同様の傾向にある(ここでは紙面の都合上図示していない)。このことは、堰運用後には貧酸素化が長期化している事を示唆しているものと考えられる(例えば、村上ら、2001)。ただし、DO濃度の絶対値は、河川流量の違いや、物理環境の変化以外にも気象条件や底質条件の違い、生物化学的条件の差異が影響する。1994年は渇水年であったことから、運用前の状態をどの程度代表しているかは不明である。従って、個々の要因の影響度を今後さらに検討した上で、堰の効果を明らかにする必要がある。

3.3 河川流量の変化とDO濃度変動

大潮・小潮のサイクルに応じた変動がDO濃度変動の基本パターンとすれば、河川流量の変化はDO濃度に対してどのような変化を及ぼすのであろうか。ここでは、ゲートが開放されるような大規模出水時前後におけるDO濃度の変化の軌跡に着目し、河川流量変動がDO濃度変動に及ぼす効果を調べる。

図-3.4は、底層DO濃度日平均値と一日の潮位差の関係を、流量変化(ハイδροグラフ)と共に示したものである。堰運用前については1994年9月のStn. Bでの関係(a)を、堰運用後については1999年9月におけるStn. Aでの関係(b)を示した。また、(c)、(d)においては、それぞれの時期における河川流量の変化(ハイδροグラフ)を示した。(a)、(b)中において、白丸(○)は出水期以外のデータを、黒丸(●)は出水時((c)、(d)において網掛けをした期間)でのデータを示す。出水時にはいったん貧酸素化が急速に回復し、底層DO濃度がかなり上昇する。しかしながら、出水のピーク後には、逆に急速に酸素濃度が減少する。出水前の酸素濃度よりも減少し、顕著な貧酸素化が生じる場合がある。以上のような、出水前後におけるDOの回復とその後の急速な貧酸素化という大きな濃度変動は、大潮時にも、小潮時にも共通に見ら

れ、潮位とは独立な現象であると考えられる。また、堰の運用前・後にも共通に生じている。

前述したように、河川流量が低い場合には、潮位差とDO濃度の間には良い正の相関関係が見られる。潮位差の大きい大潮時にはDO濃度が高く、小潮時には低い。この現象は、定性的には堰の運用前(1994年)および運用後(1999年)において変化はない。従って、河口域における底層DO濃度変動の基本構造として、低流量時には大潮・小潮のサイクルに即した濃度変動が生じているが、大規模出水時に攪乱的に大きな濃度変動が生じている、とまとめることができよう。

3.4 出水直後の貧酸素化と内湾水との相互作用

大規模な出水は、いったんDO濃度を回復させるものの、その後急速に貧酸素化を進行させるトリガーとなっているようである。この物理的機構を理解するため、長良川河道部のみでなく、伊勢湾奥部を含めた水質のデータを比較検討し、現象を考察する。

1996年8月末から9月始めに発生した出水期のデータを調べてみよう。図-3.5に、Stn. Bにおける同時期のCl濃度、DO濃度及び長良川流量Qのハイδροグラフを示す。ハイδροグラフのピークは8月29日に見られるが、同じ日に河道のCl濃度が底層においてもほぼ0となり、深さ方向に一律に淡水で満たされていることがわかる。同時に、DOはほぼ飽和濃度に回復している。このような河道淡水化とDO濃度の回復は9月2日まで続いている。9月2日には底層の急激な塩分上昇とDO濃度低下が同時進行し、9月3日午後にはCl濃度が約15000 mg/lにまで上昇した。同時期のDO濃度は、約1~2 mg/lであった。これらの濃度は伊勢湾下層水と同程度であった(後述の図-3.6及び図-3.7参照)。

出水前である8月26~27日の底層Cl濃度及びDO濃度と、出水後に再び塩水が遡上した9月3日~4日の底層Cl濃度及びDO濃度は、それぞれほぼ同程度の濃度である。そのため、図-3.5からだけでは、出水前に河道内に存在していた貧酸素水塊が出水で下流側に移流され、出水後に再び遡上した、という可能性も考えられる。しかしながら、以下に示す伊勢湾奥のデータと併せて考えると、出水前に河道内で生じていた貧酸素水塊は出水に伴う混合によっていったん解消し、出水後には別の、既に発達していた貧酸素水塊が遡上してきたものと考えられる。

伊勢湾縦断面の水質調査が、この出水と同時期に実施されている(調査地点は図-2.1参照)。水質データは約10日おきにとられており、出水のピークとほぼ重なる時期の8月30日、及び出水後の9月10日のデータを利用する

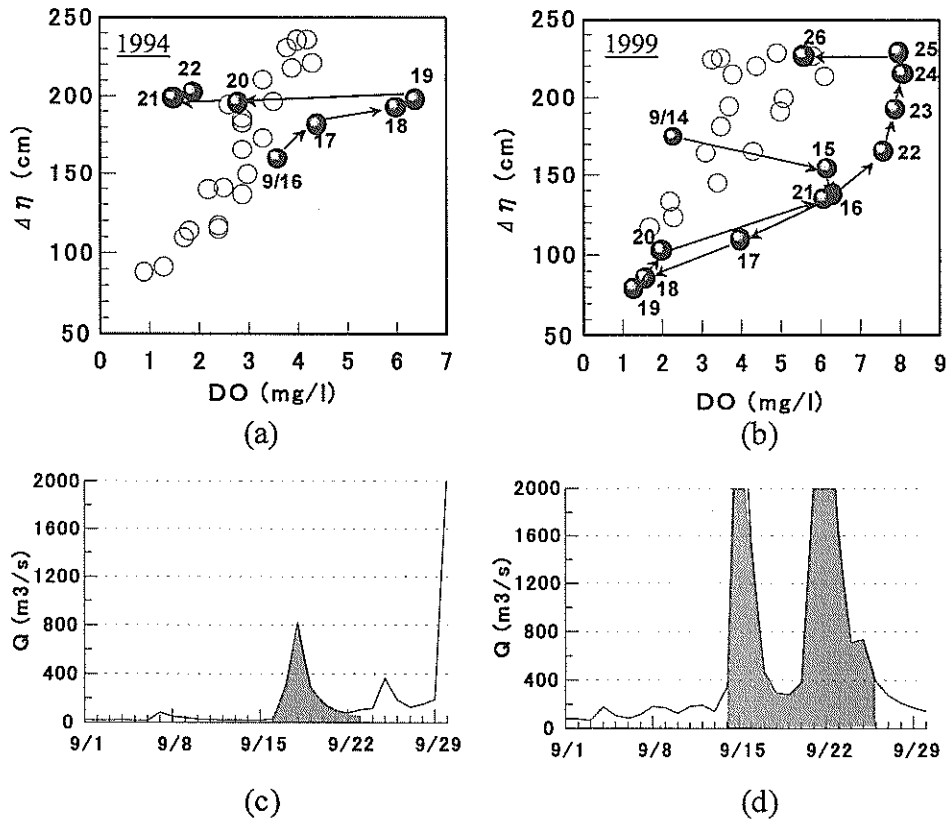


図-3.4 大規模出水時の底層DOの濃度変動(上段)とハイドログラフ(下段)((a), (c) 1994年9月, Stn. B (b), (d) 1999年9月, Stn. A)

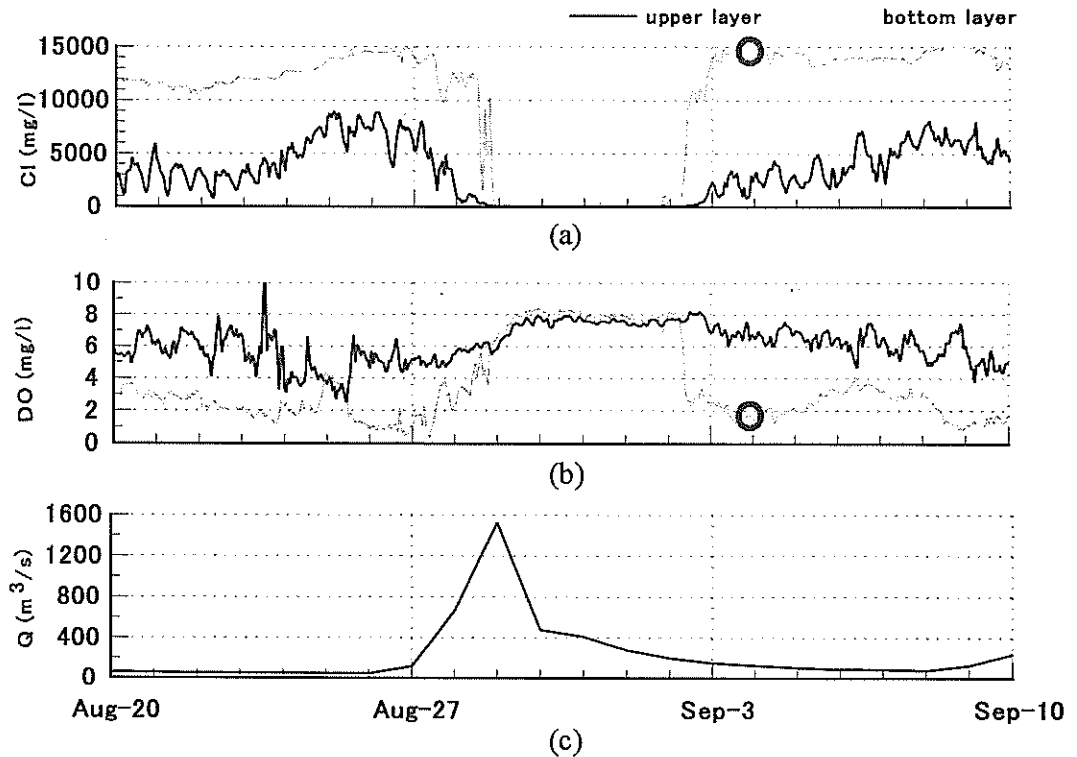


図-3.5 Stn. BにおけるCl(a), DO(b), 河川流量(c)の時系列変化(1996年)

ことができる。二つの測定日における, Stn. A および Stn. B での塩分(CIから換算)及びDO観測値と併せて縦断面で図示すると, 図-3. 6 のようになる。8月30日には河道がほぼ淡水で満たされ, 混合が十分に行きわたり, 貧酸素化は解消していることがわかる。河川起源の低塩分層が, 伊勢湾表層を沖合約30 kmまで広がっている。一方, 9月10日には, 塩水が河道底層を遡上しており, 塩分20 psu以上, DO濃度3 mg/l以下の低DO濃度水塊が遡上していることが明らかである。

伊勢湾の際奥部Stn. 2 における, 8月30日のDO・塩分鉛直断面図を見ると, 水深10 mでのDO・塩分値がそれぞれ約2 mg/l, 30 psuである(図-3. 7の白丸)。これは, 9月3日に観測されたStn. Bでの底層DO・塩分値にほぼ等しい(図-3. 5の白丸)。このことは, 伊勢湾奥に生じていた貧酸素水塊が河川水の大規模出水後に遡上し, 長良川河口堰下流部の貧酸素化を生じた原因であることを示唆している。出水時に河道がいったん淡水で満たされた後, 河川流量が減少すると, 開放交換型の密度流

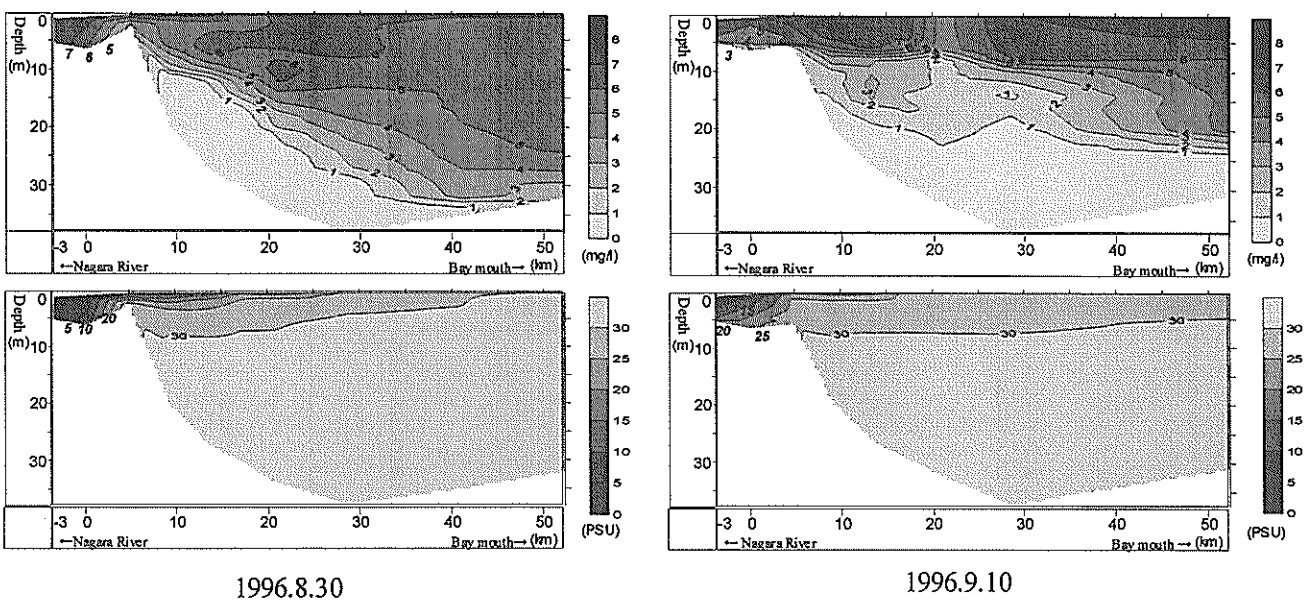


図-3. 6 河道から伊勢湾中央にかけてのDO(上段)及び塩分(下段)の鉛直分布

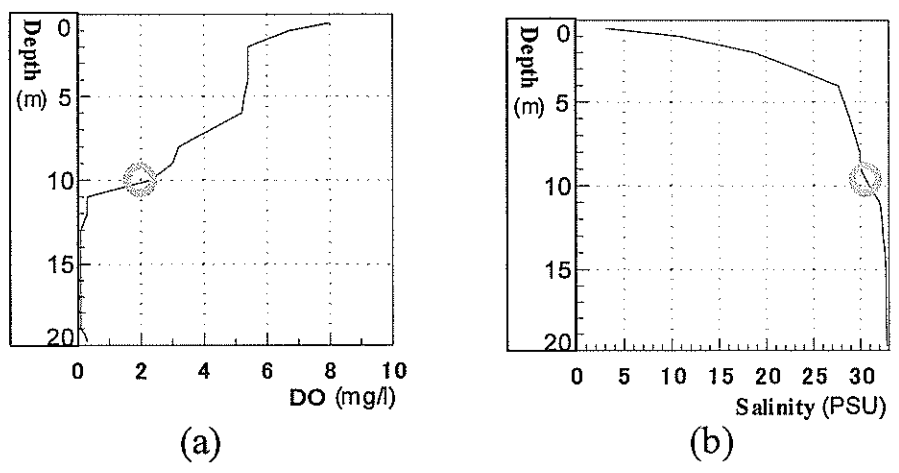


図-3. 7 Stn. 2におけるDO(a)及び塩分(b)の鉛直プロファイル(1996.8.30)

(例えば, Turner1973)が生じやすいものと考えられる。その時, 下流側で高塩分水が貧酸素化していれば, 河道内の底層DO濃度は急激に減少することになる。

河口堰運用前の1994年においても, 大規模出水の数日後(流量低下時)におけるDO濃度が, 出水開始直前の濃度よりもかなり低くなる現象が見られている。図-3.4の9月16日及び9月21日がこれに相当する。Cl濃度と比較しても21日のCl濃度の方が高くなっており, これは同じ水塊の往復運動では説明できない。むしろ, 伊勢湾奥部に既に発達していた貧酸素水塊が, 上述の機構によって遡

上したために生じた現象であると考えられる。

図-3.6より, 1996年8月30日のDO及び塩分の等濃度線が大きく傾いており, これは出水によって伊勢湾の鉛直循環流が強化された事を示唆している。鉛直循環流の流量は, 一般に河川水(洪水)の供給や離岸風によって増加する(藤原ら 1996)。この時期の風速・風向を調べると, ほぼ南寄りの緩やかな風であった(図-3.8参照)。従って, 図-3.6にみられるような大規模な底層水の湧昇は, 専ら出水によって引き起こされたものであると考えられる。

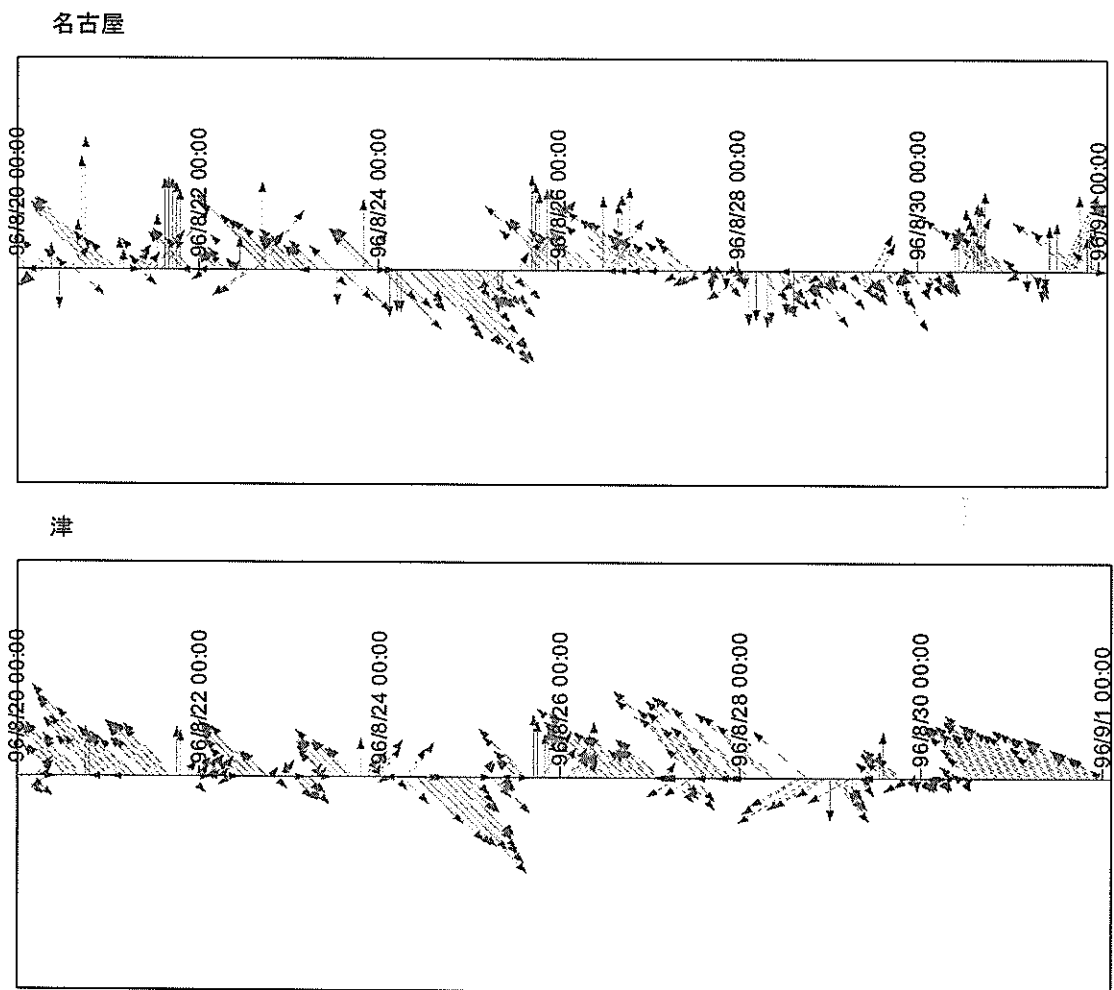


図-3.8 伊勢湾周辺の風向及び風速の時系列変化(1996.8.20~1996.8.31 上が北)

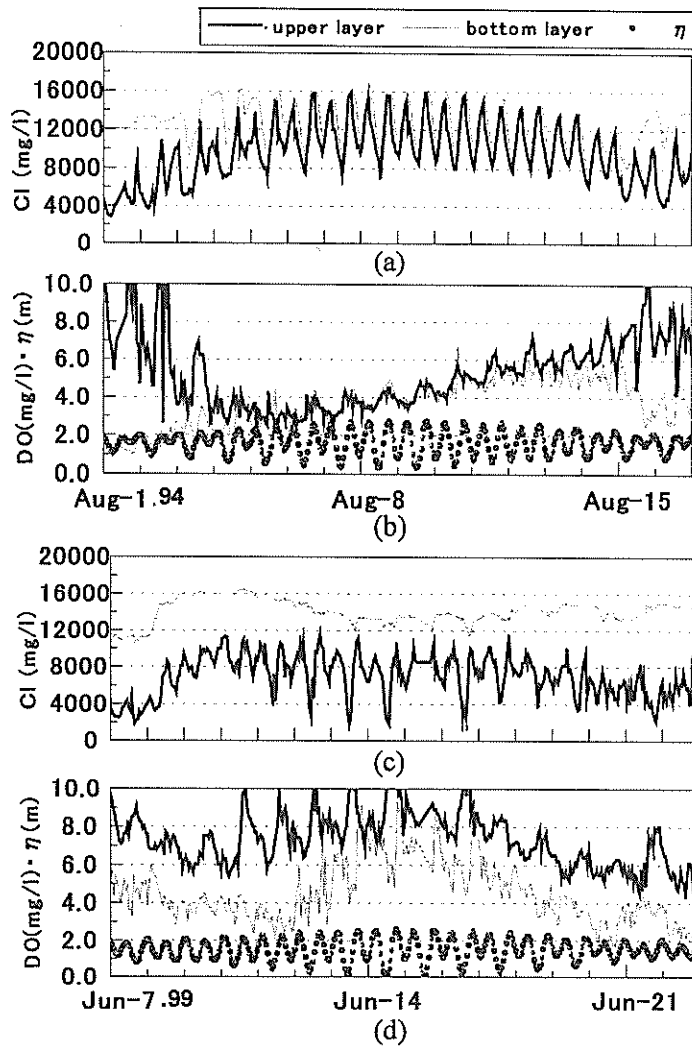


図-3. 9 Stn. Bにおける小潮～大潮～小潮における底層及び表層のCl濃度, DO濃度, 及び潮位の時系列変化

3. 5 河口堰の影響

(1) 混合形態の変化

底層DO濃度は, 河口域における混合の形態に強く依存する. 河口堰の運用は, 底層水の潮汐に伴う往復運動を強制的に遮断するため, 底層水の滞留性を増加させ, 混合の程度をかなり弱める可能性がある. 小潮時には堰運用以前から弱混合状態であったため, 運用前後の混合の程度は相対的に違いが少ないが, 大潮期においてはその差が顕著になる可能性があると考えられる. ここでは, 河口堰運用前後での, 潮汐サイクルに応じた塩分とDO濃度変動をより詳細に調べ, 堰の運用前後での差を明確にする.

図-3. 9は, 小潮～大潮～小潮サイクルでのStn. Bにおける表層と底層のCl濃度・DO濃度および潮位の変化を示す. (a), (b)は, 堰運用前の代表として1994年8月1日から16日における変動を示し, (c), (d)は, 運用後の一例として1999年6月7日～22日までの変動を

示す.

河口堰運用前の1994年におけるCl濃度変動を見ると((a)参照), 大潮時には表層と底層のCl濃度差は少ないが, 干満に応じて正弦的に変動していた. これは, 強混合の典型的な特徴である. また, 小潮時には弱混合であり, 底層Cl濃度の日変動は少なかった. また, 底層DO濃度((b)参照)は小潮時に最小, 大潮の数日後に最大であった.

一方, 堰運用後の1999年のデータを見ると((c), (d)参照), 大潮時においても表層と底層のCl濃度に有意な差が見られ, 底層Cl濃度の変動は少なく, 上げ潮時にわずかな濃度減少が見られるものの, 緩混合的であることがわかる. 小潮時には運用前と同様に弱混合の状態である. また, 底層DO濃度は小潮時近傍で最小である. 大潮時には満潮時前後にDO濃度が一時的に回復し, 表層水の濃度と大きな差がなくなるが, 干潮時には再び濃度が低下する.

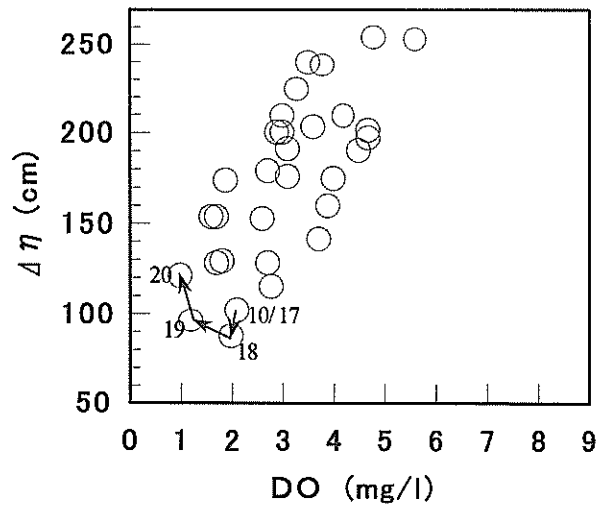


図-3.10 Stn. Bにおける底層DO濃度と1日の潮位差との相関(1999年10月)

堰運用前には底層DO濃度は小潮時に最小であった。運用後のデータを注意深く見ると、DO濃度は小潮時から数日後に最小となっている。図-3.10に、1999年10月における、Stn. Bでの底層DO濃度と一日の潮位差の関係を示す。DO濃度の最小は小潮(10月18日)ではなく2日後の若潮(10月20日)期に生じている。また、この時期の底層Cl値を調べると、上流側Stn. Bでの値の方が、下流側Stn. Aよりもしばしば大きい。これは、河道内の地形、即ちStn. B付近における窪地の影響により、高塩分水が滞留しているためと考えられる。

小潮時から数日後に底層DO濃度が最小になる現象は、村上ら(2001)も既に指摘している。一方、須賀(1979)は長良川河口域において塩水の遡上距離が小潮から数日遅れて最大となる現象を見いだしている。最近、小松ら(1996)は川内川の観測データ解析により、また安達ら(2001)は非定常的に潮位差を変動させた室内実験により、それぞれ同様な遅れ現象を見いだしている。底層DO濃度が最小となる時期と、塩水遡上が最大となる時期が、いずれも小潮時から数日後に生じているため、両者の間には密接な関係があるのではないかと予想される。

河道に侵入した塩水楔は、若潮期までは侵入後の経過時間が長くなる一方であり、混合も次第に弱まるため、底層DO濃度は減少傾向にあるはずである。若潮よりも時間が経過すると鉛直混合が促進されるため、底層DO濃度は上昇すると考えられる。結果として、若潮の前後でDO濃度低下が最も進む可能性がある。特に人為的な塩水楔の遮断がない、河口堰運用前の時期には、小潮から数日後に塩水楔先端部付近のDO低下が最も進行する現象が見られた可能性がある。しかしながら、同じ現象が堰運用後において

も上述のような機構で生じたかどうかは即断できない。河道地形を詳細にみると、河口堰下流部に窪地が存在することがわかる。このため、混合が極めて弱い小潮を中心とした時期に窪地に塩水が滞留し、貧酸素化が最も進行しやすい状況が生じていると考えられる。従って、長良川河口堰運用後のDO濃度低下の遅れは、窪地地形が影響した結果であると考えられる。

(2) 大潮時における一潮汐周期間の混合の様子

堰の運用前後において、最も混合の形態が変化するのが大潮期である。大潮期には、塩分や底層DO濃度が一潮汐周期の間はかなり変化する。従って、ここでは、大潮時における一潮汐周期間の混合の様子と、関連した底層DO濃度の変化をまとめる。

図-3.11に、堰運用前の例として1994年9月4日～9月9日の底層Cl濃度・潮位・底層DO濃度の変化を示す。Cl濃度については、上流側Stn. Bでの最小値が下流側Stn. Aでのそれよりも約1時間早めに生じているほかは、2地点での変動に大きな位相差はなく、いずれも潮汐変動に応じた周期で変動している。全体的に、下流側の方が1000～4000 ppm高濃度で推移しており、水平方向の濃度差は下げ潮時の方が大きいようである。鉛直方向にもほぼ濃度が一樣なことから(図-3.9参照)、堰運用前的大潮期には強混合状態であったと結論することができる。

底層DO濃度についてみると、日潮不等に対応して約1日の周期的変動がある事に気付く。特に下流側DOは最大上げ潮から満潮時にかけて高濃度となり、直前の干潮時、即ち最も水位低下が見られる最低潮時に低濃度である。これに対し、上流側では最低潮時に高濃度、最大上げ潮～満潮時に低濃度であり、位相が逆転している(図-3.11には、矢印で、最大上げ潮～満潮時において、上・下流でDO濃度差が拡大することを示す)。これは、両地点間に存在する低DO濃度の水塊が干満に応じて移動していることを示しているものと考えられる(図-3.12参照)。この事は、窪地の影響を示唆していると考えられる。

堰運用後における同様な時系列データの例として、1999年6月13日～17日までの時系列を図-3.13に示す。Cl濃度をみると、堰運用前に比べて濃度の変動がかなり抑制されていることに気付く。例えば、下流側Stn. Aでの濃度変動を見ると、約1日周期で、最低潮位時～最大上げ潮時を中心として明瞭な濃度低下があるほか、潮位の低下が少ない干潮時付近にも小さな極小が表れている。上流側Stn. Bでの濃度変動はさらに間欠的であり、最小値が表れるのは、一日に一度、最大上げ潮時付近のみである。鉛直方向のCl濃度差が明確に存在する(図-3.9参照)事

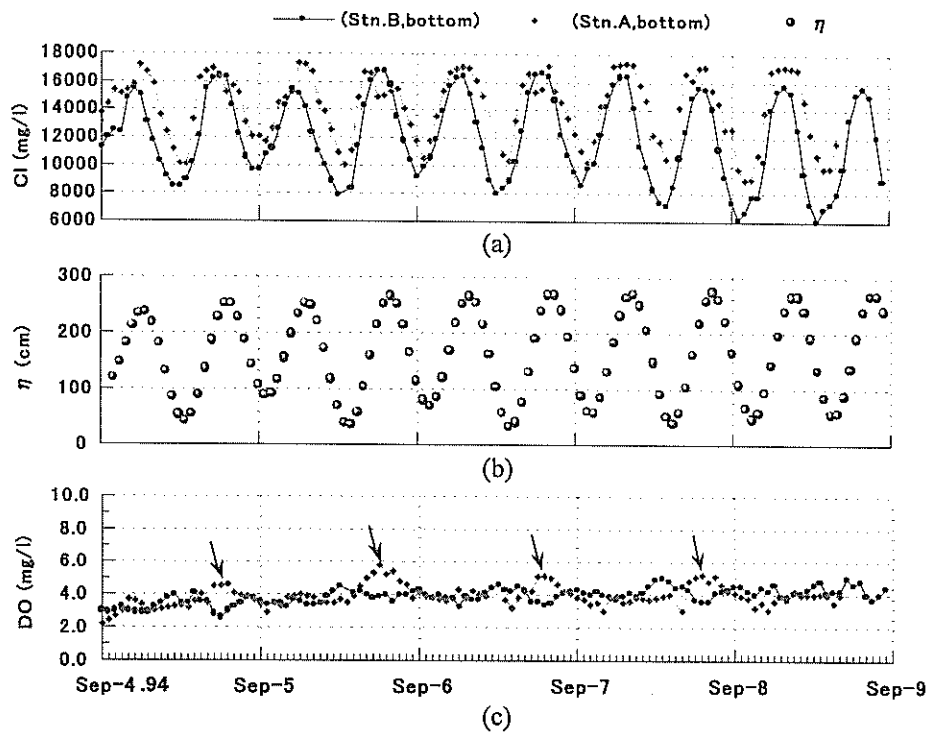


図-3.11 Stn. A, Stn. Bにおける底層のCl濃度(a), DO濃度(c)及び潮位(b)の時系列変化(堰運用前)

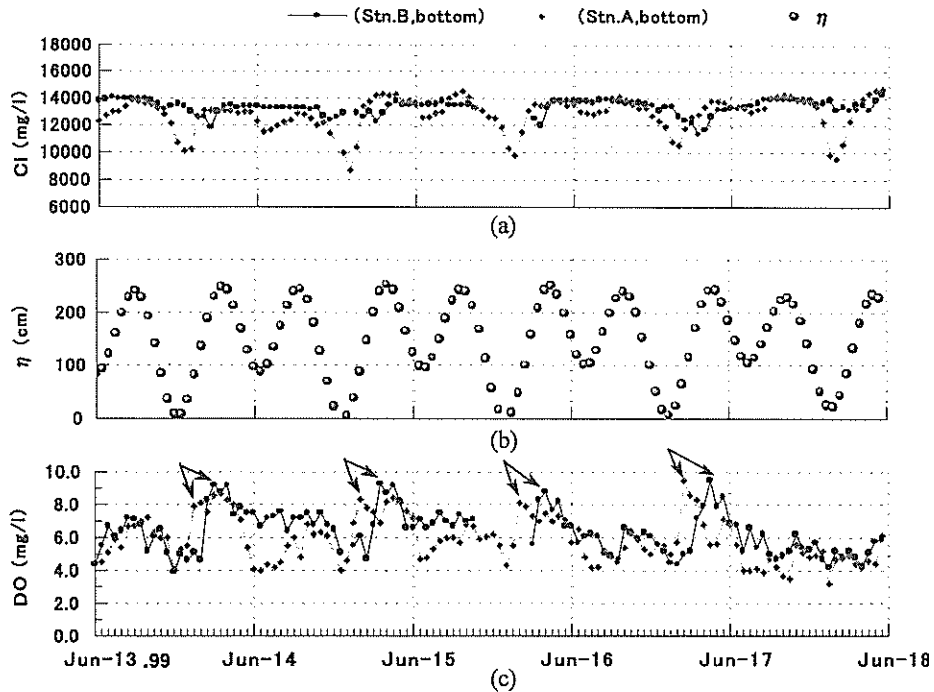


図-3.13 Stn. A, Stn. Bにおける底層のCl濃度(a), DO濃度(c)及び潮位(b)の時系列変化(堰運用後)

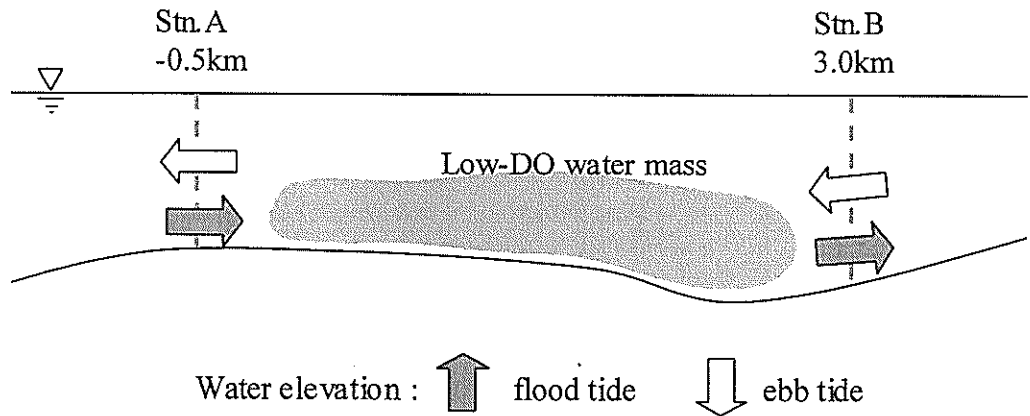


図-3. 12 貧酸素水塊移動状況図 (堰運用前)

からも、堰運用後の混合形態が緩混合的なものに変化していることを示している。

底層DO濃度についても明瞭な一日周期の変動が見られる。日潮不等の潮位変動に応じて、最低潮位から最大上げ潮時に最も混合が促進され、下流側 Stn. A からDOが回復している。上流側 Stn. B での濃度変動は、下流側の変動から約3～4時間遅れて極大となる(図-3. 13の矢印参照)。Cl濃度と同様に、下流側では高低潮位から上げ潮期にかけてもDO濃度のわずかな増加が見られるが、上流側ではその時期の変動はほとんど見られない。

3. 6 溶存酸素動態に影響を及ぼすその他の要因

DO動態には、本稿で採り上げた物理過程のほか、植物プランクトンや水生大型植物による光合成、水面での曝気、水中における呼吸や分解に伴う酸素消費、さらに底泥の酸素消費などが考えられる。これらのうち、特に堰上流側では、河川水の滞留化に伴い、河川棲植物プランクトンによる光合成やその死骸による分解がDO動態の支配要因であると考えられている。植物プランクトンの生産には、一般に日照・栄養塩濃度が影響するが、堰上流部の栄養塩濃度は高く、しばしばchl. a濃度の増大と、それに伴うDO濃度の増加が見られる(粕谷・山内1996: 武田・松尾2000)。一方、河口堰下流部では一般に表層塩分が高いため、汽水性あるいは海洋性の植物プランクトンが主体となると考えられる。Murakami et al. (1998)は堰下流部において汽水産浮遊藻類が集積する可能性を述べている。さらに、村上ら(2001)は、堰下流部における貧酸素水塊発生事例を3つのケースに類型化し、その内の一つとして、浮遊藻類の生産が大きい場合に底層DO濃度の低下が見られると指摘している。特に小潮期には、浮遊藻類が沈降することにより大量の有機物が底層に供給され、酸素消費を生じている可能性が指摘されている。本研究において

は物理過程で説明できる範囲の現象に限定しているため、彼らの指摘を検証できるまでには至っていない。

底泥の酸素消費は、底層水の酸素濃度を低下させる重要な因子である。堰運用後には底層の流動が以前よりも弱まり、懸濁物質が堆積しやすい可能性がある(村上1998: 村上ら1999)。モニタリング調査では、このような観点から、底質調査と底泥による酸素消費実験も行われている。本研究では長良川の貧酸素化に及ぼす底泥の役割、および堰運用前後の底泥の変化過程についての検討はできなかった。堰運用が貧酸素化に及ぼす影響を議論する際には、今後の重要な検討課題である。

4. 結論

継続して長期観測されている長良川河口堰下流部のモニタリングデータを用い、河口域におけるDO濃度の変動をもたらし、基本的な変動機構を解析した。

底層水のDO濃度の変動は、物理的な特性である潮汐及び河川流量から整理することができる。堰運用前後に共通な特性として、以下の点が挙げられる。基本的には、底層水のDO濃度は大潮・小潮のサイクルによく応じて変動し、大潮時にはDO濃度が増加し、小潮時には減少する。これは混合形態の変化によく対応しており、小潮時には弱混合のため貧酸素化は最もよく進行する。また、最下流と河口から3 km上流地点でのDO濃度を比較すると、一般に上流側の方が酸素濃度が低く、河道内で貧酸素化が進行していることが示唆される。

DO動態は、このような大潮・小潮のサイクルに応じた変動に、河川流量変動に伴う攪乱が重なって生じているといえる。大規模出水のような河川流量の増加によって河道内は一時的に淡水で満たされ、底層DO濃度の急激な増加が見られる。しかしながら、流量が減少した直

後には、逆に、極端な高塩分化に伴った貧酸素化が生じることが多い。

以上のような基本的な構造は、堰の運用前後に共通してみられる特徴である。一日の潮位差とDO濃度の相関を調べると、河川流量の変化が少ない場合（湧水期）ほど、明瞭な直線関係が見られる。また、出水直後の急激な貧酸素化は、伊勢湾奥部に形成される貧酸素水塊の遡上によって生じていることが、1996年の伊勢湾奥部および河口堰内の塩分・酸素濃度データから推定される。

DO濃度の動態において、堰運用前後の違いは以下のようにまとめられる。まず、堰の運用前では、塩分データから、大潮時には強混合、小潮時には弱混合であったことがわかる。そのため、小潮時には貧酸素化が進行するものの、潮汐の作用によって大潮時には混合が活発化し、河道内では貧酸素化が解消されていたことがわかる。しかしながら、運用後には大潮時でも緩混合的であり、鉛直混合は不十分で、表層と底層の水質（塩分・溶存酸素）に差が見られる。その結果、小潮から大潮時にかけてDO濃度の上昇は見られるものの、回復は不十分であるといえる。また、堰運用前のデータが不足しているため気象条件の違いなどの影響を除去することはできないものの、貧酸素化が生じる期間は、堰運用後に長期化する傾向にあるといえよう。

長良川河口堰下流部の貧酸素化の成因について、村上ら（2001）は三つの類型に分類している。第一の類型は、堰下流部にて浮遊藻類の生産が大きい場合であり、第二は大潮の期間の短期的な貧酸素化であり、第三は小潮又はそれに続く長潮・若潮の時期に見られるやや長期的な貧酸素化である。彼らの類型化は、生物化学的要因と物理的要因が混在しており、むしろ、本論文で述べたような、物理的な特性である潮汐及び河川流量から整理し直した方が特性を理解しやすいと考えられる。第二の類型に関して言えば、大潮期には通常の河川流量ではむしろ貧酸素化が解消する。大潮期に貧酸素化が進行するのは、河川流量が増大する場合に限定され、しかも大規模出水時には大潮・小潮にかかわらず、貧酸素化した伊勢湾水を遡上させる引き金となり、河道内の急激な貧酸素化が進行する。

堰の運用前後では流動や混合条件という物理的特性に大きな違いが見られ、DOの低下が頻発するなどの影響が見られている。本研究は長良川という特定の河川におけるDO濃度の変動解析を行っているにすぎないが、物理環境に大きな変化が見られた堰の運用前後に対して、共通の特性が抽出できたことから、一般的な河口域のDO濃度の変動機構を記述できたものと考えられる。特

に、大潮・小潮サイクルで混合形態が変動する我が国の太平洋側の一級河川河口域については、同様なDOの動態を示しているものと考えられる。

なお、本研究では、物理的要因に絞った資料解析を行ったが、今後、村上ら（2001）が示した第一の要因を含め、他の複合した生物化学的要因の解析を行う予定である。

（2002年5月30日受付）

謝辞

本研究の一部は、文部科学省補助金基盤研究A「長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究（研究代表者：東京大学玉井信行）」の補助を受けた。特に玉井信行教授には、本研究のきっかけを与えて頂いた。また、東海大学中田喜三郎教授には、伊勢湾の観測値の所在をご教示いただいた。お二人の熱心なお誘いと親切なご教示がなければこの研究はあり得なかった。ここに謝意を表す。

参考文献

- 安達貴浩・小松利光・橋本彰博・久保幸範・田吹泰孝（2001）潮差の非定常変化が河口部塩水侵入に及ぼす影響について。水工学論文集，45：943-948。
- 石川忠晴・若岡圭子・鈴木伴征（1997）利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について。東京工業大学土木工学科研究報告，No. 55：55-60。
- 粕谷志郎・山内克典（1996）汽水域の破壊。「長良川河口堰事業の問題点—第三次報告—長良川河口堰運用後の調査結果をめぐって」。日本自然保護協会。東京。
- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社（2001），長良川河口堰モニタリング年報CD-ROM版。建設省・水資源開発公団。
- 建設省河川局（1995）平成6年度流量年表，東京。
- 建設省河川局（1996）平成7年度流量年表，東京。
- 建設省河川局（1997）平成8年度流量年表，東京。
- 建設省河川局（2000）平成11年度流量年表，東京。
- 小松利光・上杉達雄・孫双科・安達貴浩・松岡弘文・大和則夫・朝位孝二（1996）川内川河口部における塩水遡上について。水工学論文集，40：493-498。
- 松尾直規・武田誠・加藤幹人（2000）長良川河口堰下流部の流動特性。水工学論文集，44：1029-1034。
- 村上哲生（1998）利根川河口堰付近の堆積物の状況。「利根川河口堰の流域水環境に与えた影響」（日本自然保護協会編），pp. 83-88。日本自然保護協会。東京。
- Murakami, T., Kuroda, N. and Tanaka, T. (1998)

Effects of a rivermouth barrage on planktonic algal development in the lower Nagara River, Central Japan. *Japanese Journal of Limnology*, 59 : 251-262.

村上哲生・黒田伸郎・吉田正人・山内克典 (1999) 長良川河口堰周辺の堆積物の性状と分布—シルト・粘土の堆積と有機物の起源について—。「長良川河口堰が自然環境に与えた影響」(長良川河口堰事業モニタリング調査グループ・長良川研究フォーラム・日本自然保護協会編), pp. 29-35. 日本自然保護協会. 東京.

村上哲生・服部典子・藤森俊雄・西條八東 (2001) 夏季における長良川河口堰下流部の貧酸素水塊の形成と解消. *応用生態工学* 4 : 73-80.

日本水産資源保護協会 (1997) V 貧酸素水塊調査「中部新国際空港の漁業に関する調査報告書」(平成 8 年度調査報告).

奥田節夫 (1996) 感潮河川における堆積環境. 「河川感潮域—その自然と変貌—」(西條八東・奥田節夫編), pp. 85-105. 名古屋大学出版会.

西條八東 (1996) 貧酸素水塊の形成. 「河川感潮域—その自然と変貌—」(西條八東・奥田節夫編), pp. 173-194. 名古屋大学出版会.

Saijo, Y. (1998) Formation of oxygen deficiency in lower reaches of barrage estuary dam on the Nagara River, Japan. *International Review of Hydrobiology*, 83 : 651-656.

須賀堯三 (1979) 感潮河川域における塩水くさびの水理に関する基礎的研究. 土木研究所資料, No. 1537.

鈴木伴征・石川忠晴 (1999) 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値計算. *水工学論文集*, 43 : 881-886.

武田誠・松尾直規 (2000) 統計的手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析. *環境工学研究論文集*, 37 : 369-378.

武田誠・松尾直規・酒井孝典・吉戸嘉浩 (2001) 長良川河口堰の流動特性とDO変動に関する研究. *海岸工学論文集*, 48 : 426-430.

Turner, J.S. (1973) *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press, Cambridge.

藤原建紀・福井真吾・杉山陽一 (1996) 伊勢湾の成層とエスチャリー循環の季節変動. 雑誌「海の研究」, Vol. 5 No. 4 : 235-244.