

水工学シリーズ 09 - A - 2

汽水域の河道計画について

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授

石川 忠晴

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

汽水域の河道計画について

On Channel Designing in Estuaries

石 川 忠 晴
Tadaharu ISHIKAWA

1. はじめに

新河川法に基づく河川整備計画では、河川改修における「治水」・「利水」・「環境」の調和性を今まで以上に重視しているが、氾濫防除のための河道容量確保が河道計画の眼目であることに変わりはなく、また多くの利水施設は既成事実として個別に設計され実現されてきている。これらにより河道の骨格は概ね決定され、その上に環境配慮が上乘せされているのが実情である。この基本的図式は、上中流部の“純粋な”河川と特に区別なく汽水域にも適用されている。

しかし河川汽水域では、通常の河道に比較して、平常時と出水時の水理状態の質的变化が大きい。出水時には、通常の河道区間と同様に一方向的流れが卓越し、全層淡水化するとともに底質の大規模な移動が生じる。一方、平常時には底層に塩水が浸入し汽水状態が形成されるとともに潮汐による非定常運動が存在し、水域の物質輸送や水質分布および生態環境の基盤を形成している。また汽水域では一般河道に比べて水産活動が盛んであり、要求される環境状態の質やレベルも異ならざるを得ない。

本稿では、まず汽水域に特有の塩水流動の性質について解説する。次にそれらが水質や底質に及ぼす影響について概説し、汽水域の河道計画における基本事項をとりまとめる。最後に汽水湖に関する事項を補足的に述べる。なお、汽水域の性状は千差万別であり、筆者の知識ではそれらを一般的・網羅的に述べることができない。そこで本稿では、筆者が現地調査を行ってきた利根川、北上川および小川原湖のデータをもとに記述する。それらを参考として各位の仕事を発展させていただきたい。

2. 塩水流動の基本的性質

現在の河道計画においては、平常時の流量と低水路容量の較差がかなり大きい。一つの理由は高い治水安全度を確保するために計画洪水を大きめにしていることである。もう一つは、利水施設の高度化による取水量の増大に伴い、平常時の流量が自然状態より減少していることである。このため、改修工事実施後には塩分成層が安定化して塩水楔を形成しやすくなる。本章では、利根川の観測データをもとに、塩水楔が発達した際の塩水流動特性について述べる。

2.1 利根川汽水域の概要

図-1 に利根川汽水域の堤防法線形状を示す。図中の点線は濬筋を、黒丸は後に示すデータ採取地点を示している。堤防法線間隔は約 1,000m で大きな屈曲部はない。河口より 18.5km 上流に河口堰があり、平常時は高潮位で全閉、低潮位で放流とされている。環境維持のための最低流量は日平均 $30\text{m}^3/\text{sec}$ とされており、夏期には最低流量になることも多い。この流量を流域面積で除した比流量は $0.18\text{ m}^3/\text{sec}/100\text{km}^2$ であり、また利根川東遷以前の流域面積に対する比流量でも $0.8\text{ m}^3/\text{sec}/100\text{km}^2$ と、わが国直轄河川の自然的な平水比流量である $2.6\text{ m}^3/\text{sec}/100\text{km}^2$ よりかなり小さい。

図-2 に代表的な低水路横断形状を示す。低水路幅は約 600m、水深は 5～6m である。平均潮位以下の断面積は約 $3,000\text{ m}^2$ であるので、前述の $30\text{m}^3/\text{sec}$ という流量で生じる断面平均流速は $0.01\text{ m}/\text{sec}$ となり、平均

滞留時間は 21.4 日である。一方、水位変動から計算される平均入退潮量は流速換算で約 0.3 m/sec である。したがって平常時の利根川汽水域は、河道というより細長い入り江と考えたほうがよい。

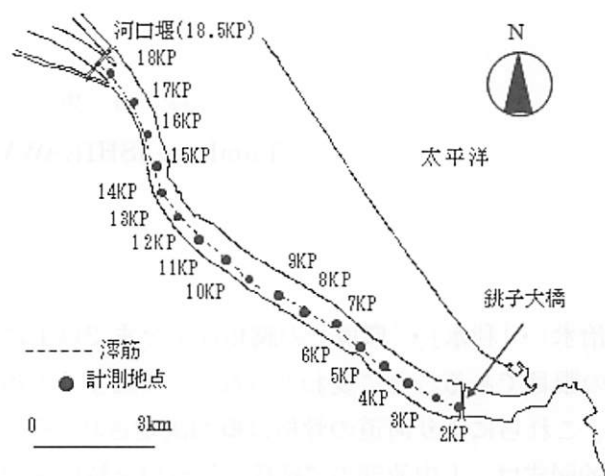


図-1：利根川汽水域の平面図

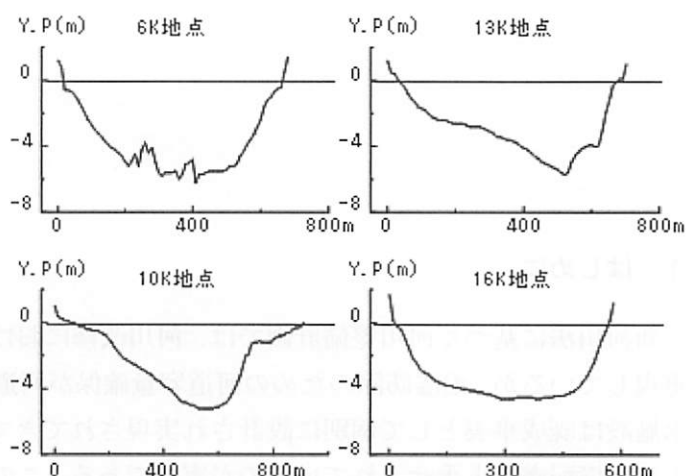


図-2：利根川汽水域の低水路横断面形状

2.2 塩水楔の運動

以上から推測されるように、利根川汽水域における流動の主要因は河川流よりも潮汐流である。図-3 は 2008 年度の布川（利根川下流の流量基準地点で河口堰より 58km 上流）における流量時系列と、河口堰下流の 16.5KP（河口堰より 2km 下流）における底層塩分濃度を示している。この図より、布川流量が 250 m³/sec 程度までは塩水楔が河口堰付近まで遡上しており、それ以上の流量になると河口に向かって後退することがわかる。

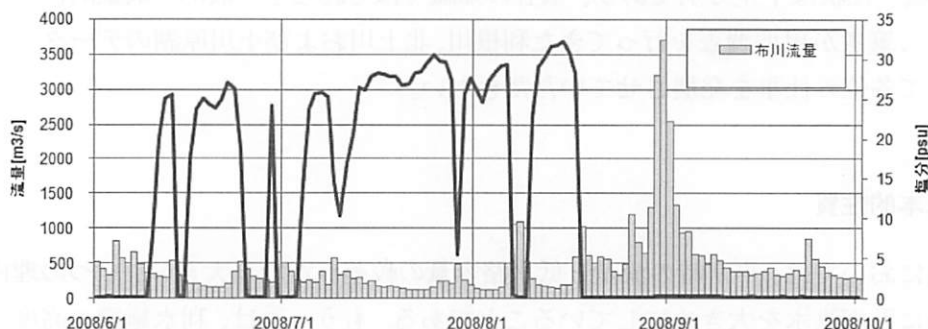


図-3：利根川流量（布川）と 16.5KP 底層塩分（2008 年 8 月）

図-4 の丸印は、塩水楔が汽水域中流部まで後退した期間における、潮汐に伴う楔先端位置の移動状況を示している。図中の実線は下記の経験式である。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \{Q - (\delta - \beta x)\} + \gamma h \quad (1)$$

ここに、 x ：河口から塩水楔先端までの距離(km)、 Q ：流量(m³/sec)、 h ：潮位(TP(m))、 α 、 β 、 γ 、 δ ：経験パラメータである。塩水楔の移動速度は最大で 0.73 m/sec に達することがわかる。

塩水進入は潮汐波形にも依存する。一般に、潮位変動が小さい場合は弱混合になるため塩淡水境界が明瞭になる。また密度勾配が大きいために塩水楔の浸入長が大きくなることが知られている。図-5 の上段は 1997 年の夏期の水理諸量の時間変動を示しており、見方は図-3 と同じである。この間に 5 回の現地調査が行われているが、8 月 11 日、18 日、25 日の流量はほぼ等しかった。一方潮汐条件は、11 日と 25 日が小潮、18 日が大

潮であった。このときの潮位波形を同図の中段に示す。また塩分縦断分布を等濃度線で下段に示している。これから、小潮のときに塩淡水境界が明瞭になっていることがわかる。

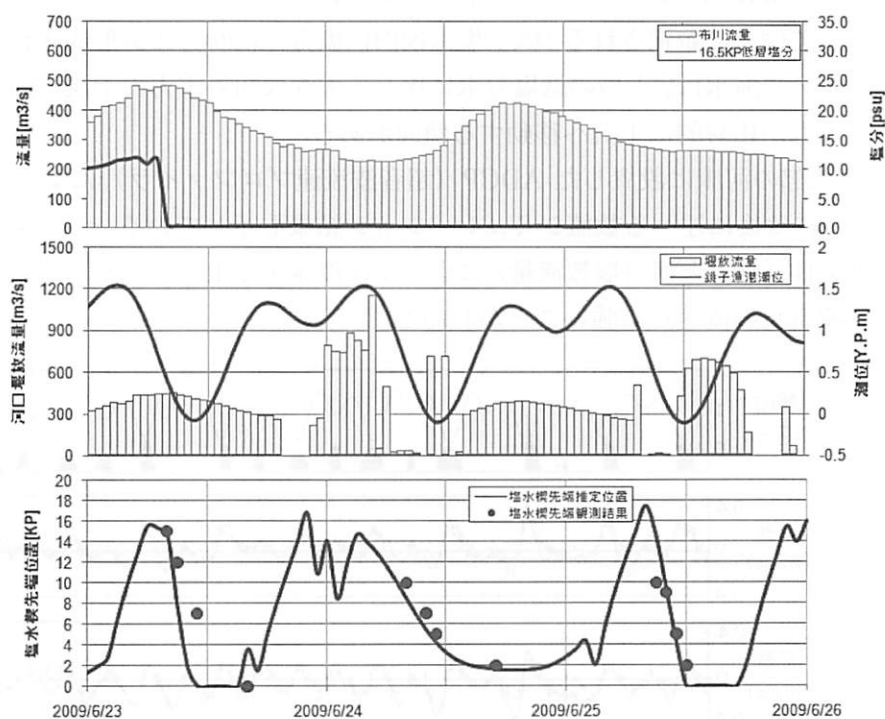
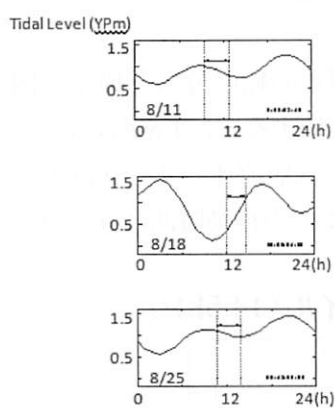
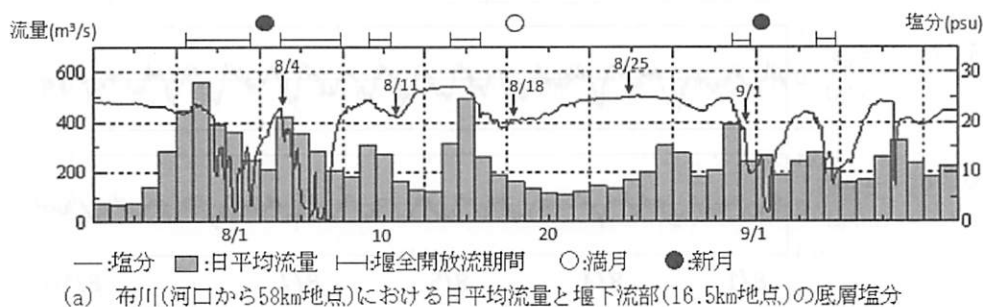
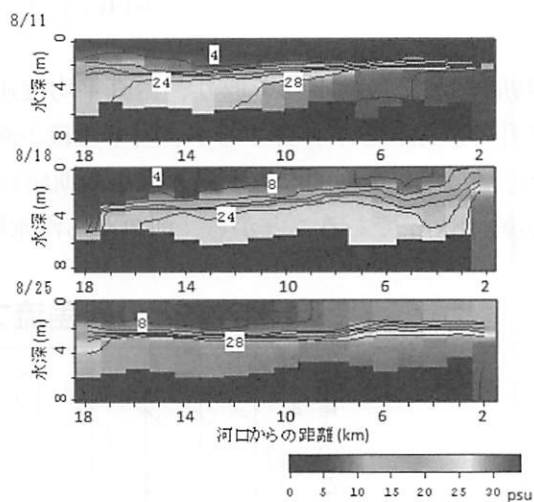


図-4：潮汐変動と塩水楔先端位置（2009年6月）



(b) 観測日の潮位変動と計測時間帯



(c) 塩分の空間分布(コンターの間隔:4psu)

図-5：潮位条件と塩水楔の性状（1997年8月）

2.3 Estuary 循環

塩水楔の内部には“estuary 循環”と呼ばれる鉛直循環流が発生することが知られている。河道に進入した海水は乱流混合によって徐々に希釈されるので、塩水楔内に塩分の縦断分布が形成される。したがって底層に入った相対的に高い塩分の海水は、上層の低塩分水に比べて大きな相対重力の上流方向成分を持つ。このため底層水が上流へ、上層水が相対的に下流へ移動する傾向がある。

図-6 は、汽水域中流部の河床に設置した ADCP（超音波流速プロファイラ）によって得られた各深度の流速時系列である。図中には後に述べる数値シミュレーション結果も示している。どの深度においても、基本的には上段に示す水理条件（潮汐と河口堰放流量）によって往復流が発生している。しかし上層では順流（正の流速）が底層では逆流（負の流速）が強いことがわかる。

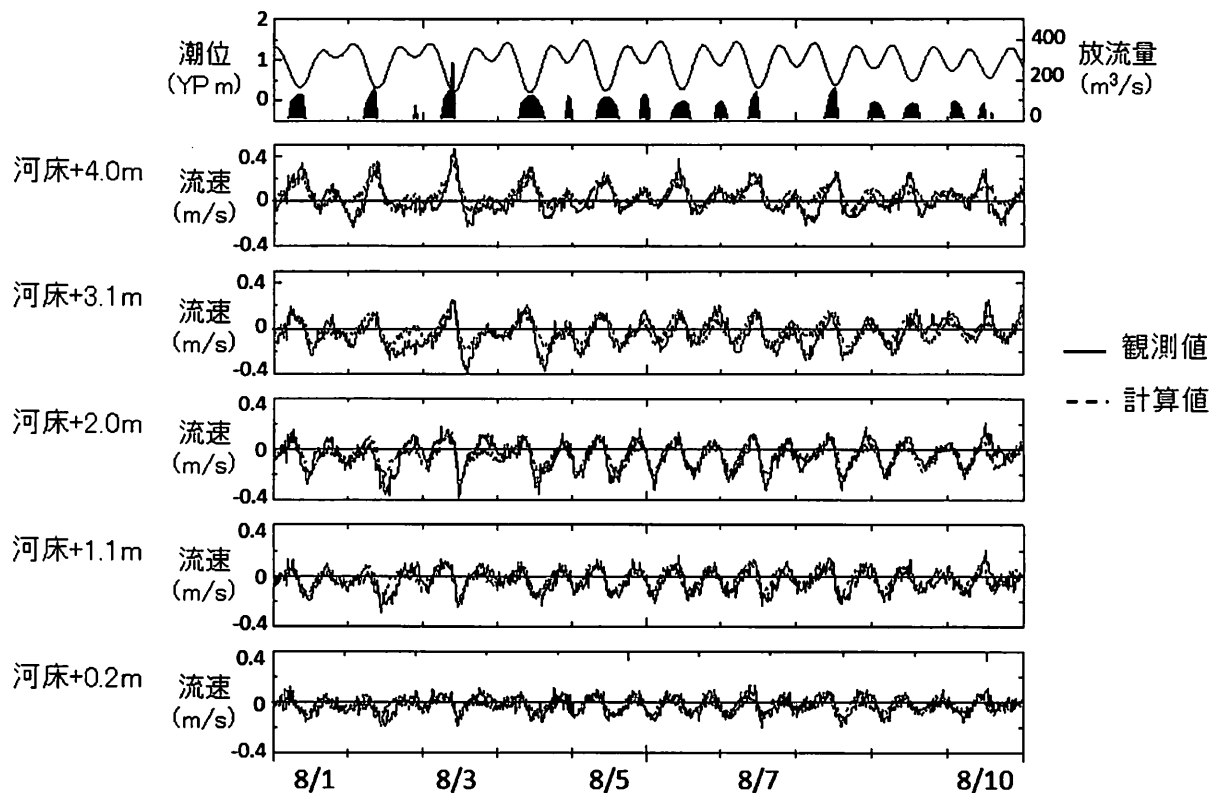


図-6：汽水域の流速変動

そこで 24 時間ごとに移動平均を取り、鉛直平均流速からの偏差の鉛直分布を描くと図-7 が得られる。estuary 循環は月齢に係わらず存在するが、図-6 上段の潮位図と比較すると、小潮時に比べて大潮時に増大することがわかる。（ただし全層的な塩水侵入は小潮期始めに多い。）底層流速のオーダーは 0.05cm/sec であり、汽水域の全長が約 18km であることから、河口から汽水域上流端までの移動時間は 4、5 日となる。

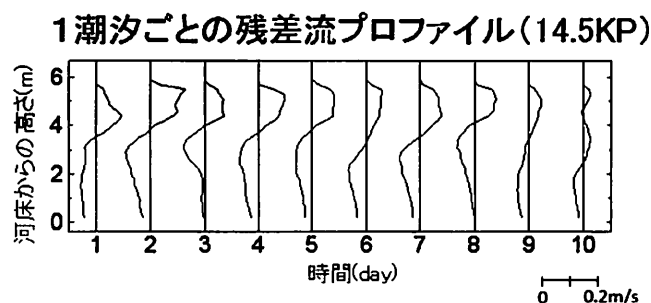


図-7：塩水楔内の流れ（estuary 循環）

3. 汽水域の溶存酸素

溶存酸素 (DO) は、水中及び底質中に生息する生物の活動に必須である他に、水中の生化学反応をコントロールする重要な要素である。塩分成層が発達すると密度躍層付近で乱流混合が抑制されるので、鉛直方向の物質輸送が不活発になり、表層から底層への酸素の供給が減少する。一方、汽水域では懸濁物質が凝集沈殿するため、上流から懸濁態有機物などの供給が多いと、底層での酸素消費が増大する。このため塩水楔内は貧酸素化しやすくなる。

3.1 塩水楔内の溶存酸素の分布特性

図-8 は 1996 年に観測された塩分と DO の空間分布である。上層の半水深の塩分(上段の図)はゼロに近く、DO (下段の図) は飽和値に近くなっている。下層半水深に塩水楔が発達しているが、DO は河口 (図の右側) 付近で高く、上流に向かって徐々に減少している。また塩淡水界面に沿って DO の低い層が帯状に分布していることがわかる。

この特異な DO の分布は、図-9 に示すように estuary 循環と密接な関係がある。DO を豊富に含んだ新鮮な海水が河口から汽水域に流入し、estuary 循環に乗って上流に遡上する間に、塩水楔内の被酸化物が DO を消費するため徐々に DO 濃度は減少する。一方、図-7 に示したように塩水楔上端では順流が存在し、相対的に DO の低い下層水が連行されて河口に向かうため、底層 DO 濃度の高い河口近くでは中層の DO 濃度が最も低くなる。このことから、塩水楔内の DO 空間分布が estuary 循環にコントロールされていることがわかる。

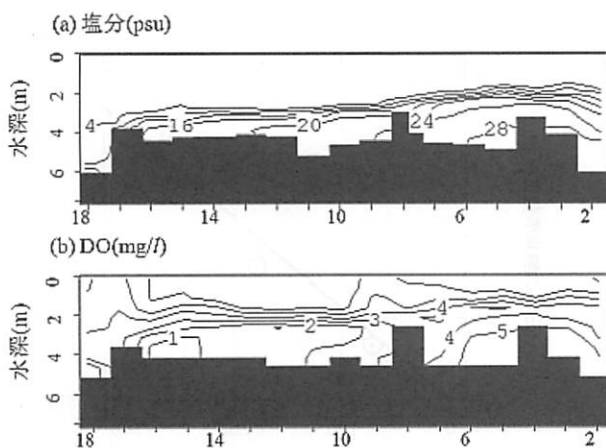


図-8：塩水楔内の溶存酸素分布

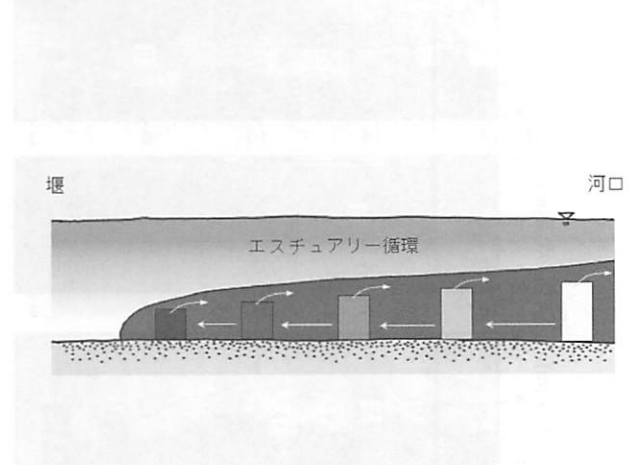


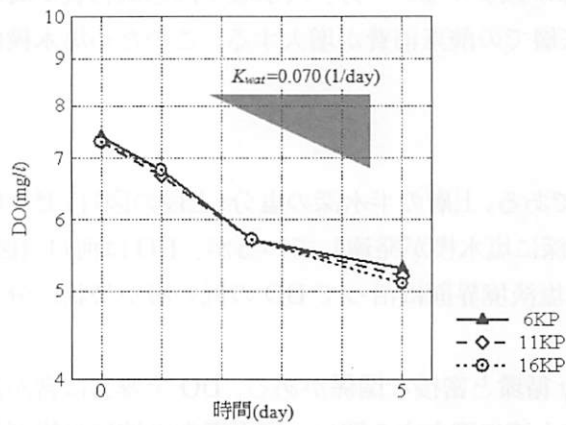
図-9：estuary 循環と溶存酸素の関係

3.2 塩水楔内の酸素消費

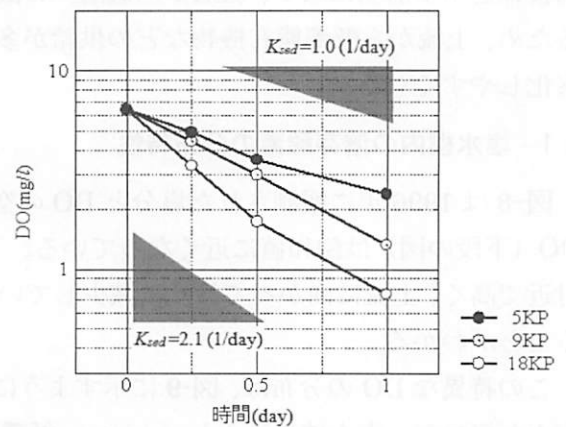
塩水楔内での DO 消費の原因は 3 種類に大別される。第一は溶存態の被酸化物、第二は底質中の被酸化物、第三は水中に懸濁した被酸化物である。図-10 は塩水楔内からポンプ採水した塩水に対して行った酸素消費実験の結果である。汽水域全長 18km の上流、中流、下流の 3 地点での結果を示しているが、地点ごとの差はあまり見られない。一方、図-11 は 3 地点において採取した表層 5cm の底質について行った酸素消費実験の結果である。上流地点ほど酸素消費量の大きいことがわかる。

以上の 2 つの酸素消費は定常的に生じているが、第三の懸濁物質による酸素消費は非定常性が強い。図-12 は、図-5 に示した観測において同時に取られた濁度の空間分布である。8 月 18 日と 9 月 1 日は大潮、8 月 25 日は小潮である。大潮の時に塩水楔先端付近で高濁度が発生している。これは turbidity maximum と呼ばれる現象で、estuary 循環が強い場合に発生すると考えられている。一方、図-13 は、採取した懸濁物質を浮遊させた状態で実施した酸素消費実験の結果であり、SS と酸素消費速度が概ね比例関係にあることがわかる。

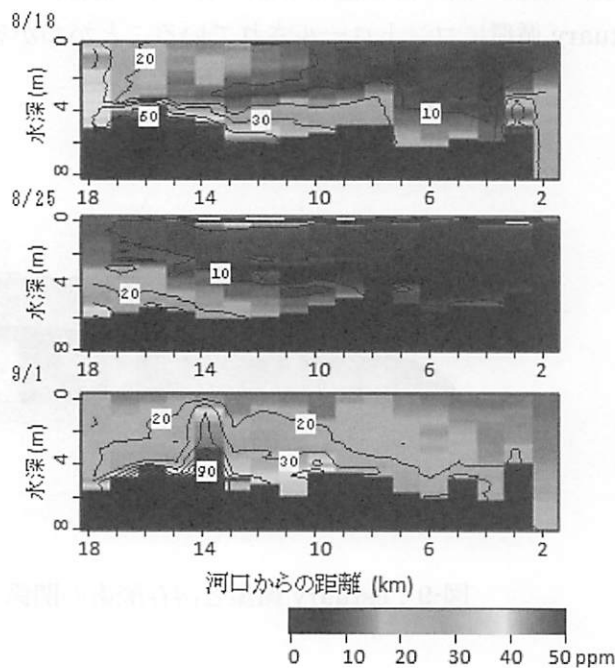
現地における状況（塩水楔の層厚、濁度の濃度別発生頻度など）を考慮して各原因の影響度を評価すると、利根川汽水域の場合、[溶存態：底質：懸濁態] = 2 : 1 : 1 程度であった。塩水楔内の水が貧酸素化するに要する時間のオーダーは5日であり、2-3 で述べた“塩水楔内の水が河口から楔先端まで移動するに要する時間”と同程度である。つまり貧酸素化現象は estuary 循環の強度の変動に敏感に反応している。



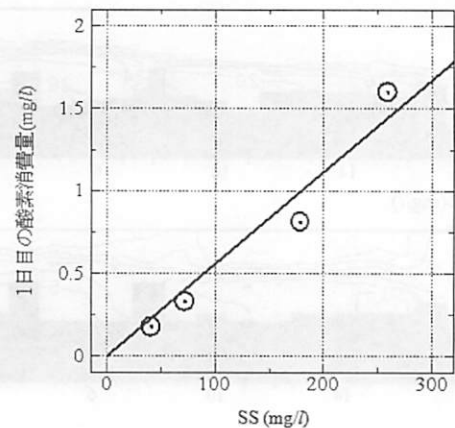
図・10：塩水楔内の溶存物質による酸素消費



図・11：塩水楔内の底質表面における酸素消費



図・12：濁度の空間分布



図・13：水中酸素消費速度に及ぼす SS の影響

3.3 塩水楔内の溶存酸素の変動

以上の知見を総合すると、塩水楔の運動と DO の時空間変化をシミュレーションする数値モデルを構築することができる。ここでは鈴木らの計算結果を紹介する。このモデルは、塩分成層が河道横断方向にはほぼ水平であると仮定し、三次元 $k-\varepsilon$ 乱流モデルの方程式を水深ごとに横断方向に積分し、これをスタガード格子の有限体積法で離散化し、SIMPLE 解法を用いて解くものである。詳しくは参考文献を参照いただきたい。

以下では 1997 年 6 月 10 日～10 月 27 日のシミュレーション結果を示す。流動シミュレーションの結果と ADCP 観測（14.5KP）の結果の比較については既に図・6 に示した。図・14 は計算のほぼ中間時点（8 月 4 日）

における 1 潮汐の間の塩分鉛直分布の比較である。数値拡散のために計算結果の分布がやや滑らかになっているが、概ね一致していることがわかる。また図-15 は 10 潮汐平均の流速鉛直分布で、estuary 循環の分布に対応する。先に述べたように、estuary 循環は汽水域の DO および水質変化をコントロールする主要素の一つであり、その再現性が汽水域環境をシミュレーションする上で非常に重要である。

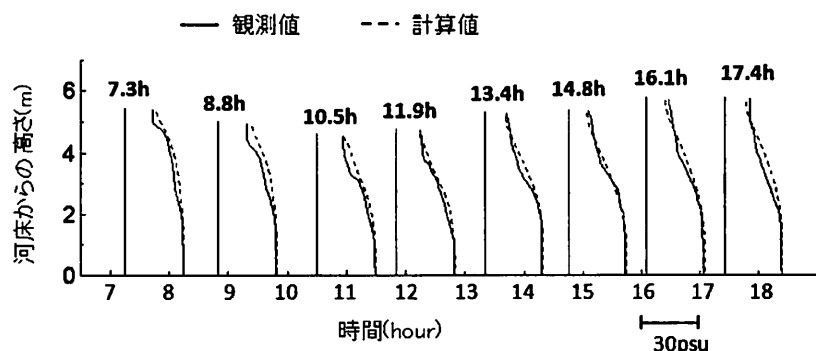


図-14：塩分成層状態のシミュレーション結果

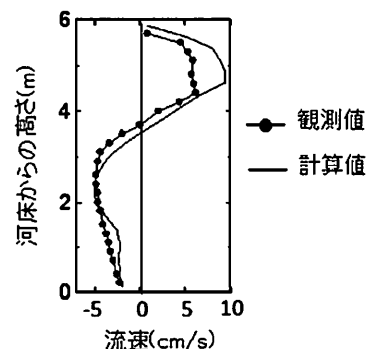


図-15：estuary 循環のシミュレーション結果

溶存酸素のシミュレーション結果を図-16 に示す。上段は河口堰からの放流量時系列、下段は 16.5KP（塩水楔先端付近の最も貧酸素化しやすい地点）の底層 DO の時系列である。なお水中および河床における酸素消費速度は、3.2 に示した実験結果にもとづき設定している。貧酸素化が顕著になった 8 月 4 日以降の DO 変動は概ね良好に再現されていることがわかる。一方、6 月～7 月にかけては観測値と非常にかげ離れた値となっている。この原因として、次に述べる底質の移動が考えられている。

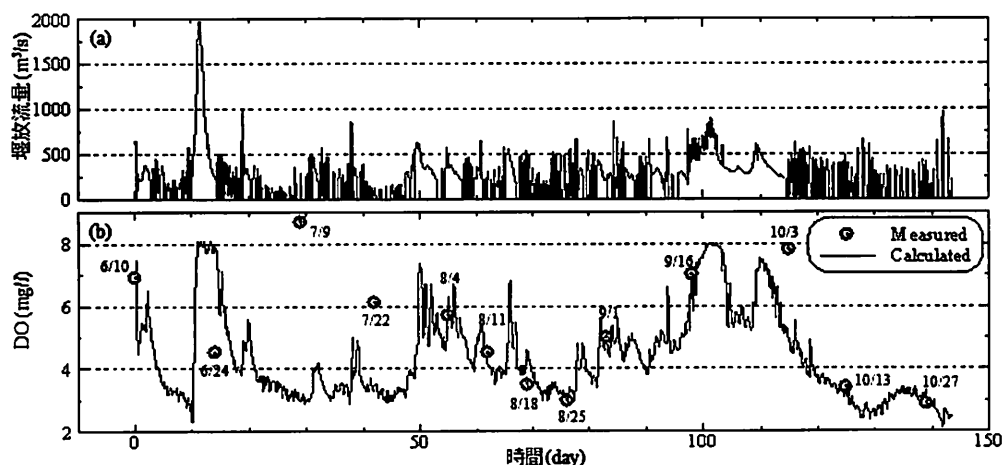


図-16：河口堰放流量と塩水楔先端の貧酸素化

4. 汽水域の底質移動

はじめに述べたように、わが国の河川汽水域の多くは、平常時には内湾に近い状態であり、出水時には純然たる河川となる。このため底質状態が時間的に大きく変化する可能性が高い。図-16 によれば、出水末期の 6 月 24 日の観測 DO は非常に低く、その後一ヶ月の観測 DO は非常に高い。前者では被酸化物を含んだ底質の巻き上がり、後者では河床の被酸化物質がフラッシュされていた可能性がある。ただしこのことは 1997 年の時点では確認されていない。

そこで、2001 年から 2002 年にかけて、利根川汽水域の底質空間分布について調査が行われた。図-17 上段に調査期間の布川流量と調査時を、下段に 16.5KP 底層の塩分時系列を示す。この年は 3 回の出水があり、ピーク流量はそれぞれ 3,400 m³/sec、8,300 m³/sec、2,600 m³/sec であった。以下では便宜的に 8 月出水、9 月出水、10 月出水と呼ぶことにする。

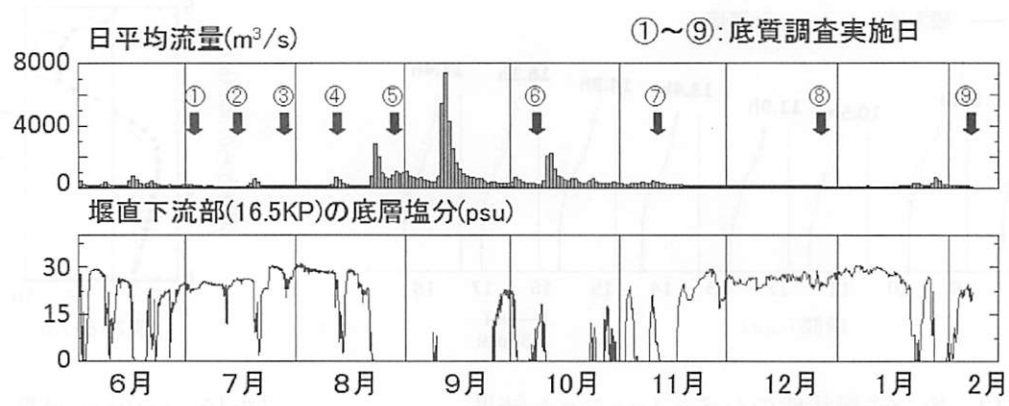


図-17：2001 年度底質観測の概要

表-1 に 8 月出水以前の 4 回の底質調査で得られた表層 5cm 厚さの平均粒径と強熱減量を、写真-1 にコアサンプルの性状を示す。また 7 月 30 日のサンプルの粒度分布を図-18 に示す。表層底質はシルトを主体とした 1~100μm の比較的広い粒度を持っており、4 回の調査でほぼ同じであった。なお 2008 年度にも同様の調査が行われたが、出水の影響のない期間の粒度分布はほぼ同じであった。

	調査日 (2001年)	18KP		16.5KP		15KP	
		dm (μm)	IL (%)	dm (μm)	IL (%)	dm (μm)	IL (%)
①	7月3日	—	—	9.8	7.8	8.9	6.1
②	7月16日	7.2	13.0	8.3	9.6	8.9	9.4
③	7月30日	8.2	10.2	7.7	5.9	7.9	9.8
④	8月13日	—	—	7.3	12.0	—	—



表-1：2001 年出水期前の底質特性

写真-1：底質コアサンプルの性状

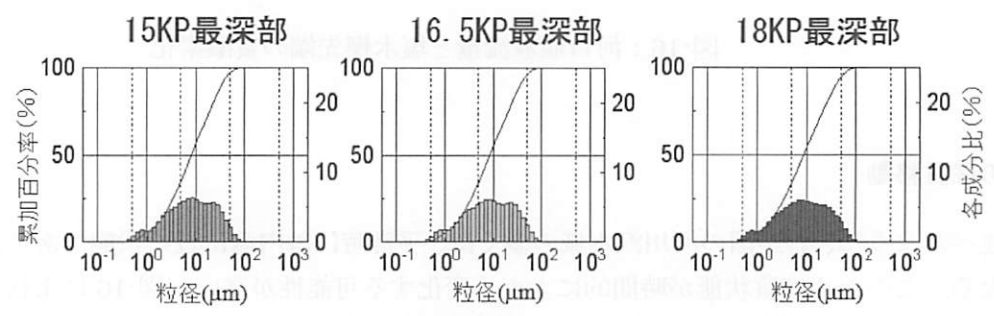


図-18：平常時の底質粒径分布（2001 年 7 月 30 日）

図-19の左側に、8月出水後の調査における平均粒径の縦断分布を、右側に8KPにおける粒度分布を示す。8月出水の後では、上流域を除けば平均粒径は $10\mu\text{m}$ であり、出水前とほとんど変わっていない。9月出水以降は河道の広い範囲で粗粒化が生じ、比較的均一な砂が主体となっている。10月出水から1ヶ月後には河道の一部で細粒化が見られ、4ヵ月後には12KPより下流で以前と同様のシルト主体の状態に戻っている。

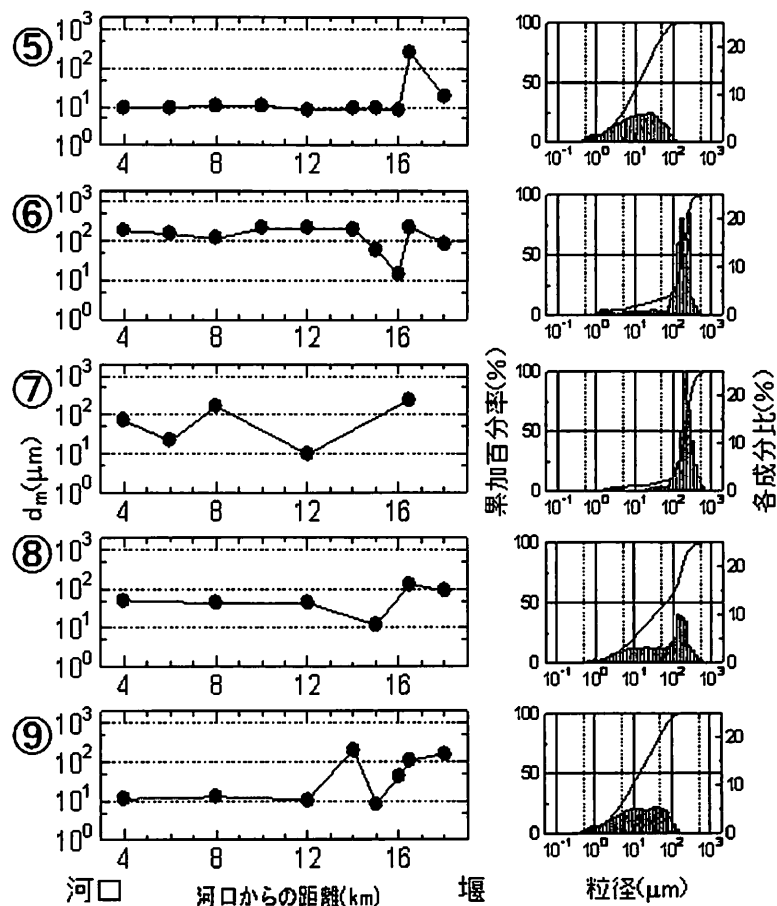


図-19：出水後の底質の変動

このような底質の細粒化は、底質の酸素消費を介して汽水域の水質全般に影響を及ぼすものと考えられる。また、このデータからは、細粒化が下流側から生じているように見える。この点については十分確認されていないが、estuary 循環とそれに伴う turbidity maximum の発生から、十分考えられうることである。つまり、河床への被酸化物質の堆積と河口からの DO の供給が密接にリンクしている可能性がある。しかし一方で、細粒土砂の起源を考えれば、出水時に供給される懸濁物質である可能性も高く、出水時と平水時の流況の総合的考察が必要とされるであろう。

5. 河道形状の不整の影響

利根川のデータをもとにして汽水域における現象の概要を述べてきたが、利根川汽水域の河道形状は、図-1、図-2 に示したように比較的単純である。一方、河道計画の策定において最も重要な事項は河道形状の決定である。そこで本章では、河道形状の不整の影響について北上川汽水域を例として考察する。北上川は石巻市を流れる旧北上川と、放水路として開削された新北上川に分かれるが、以下に示すデータは新北上川について得られているものである。

新北上川の汽水域の延長は、図-20 に示すように、北上大堰から下流の約 17km であり、縦断長は利根川と同規模である。ただし低水路幅は 300～400m とやや狭い。また以下に示す現地観測の時点では最低流量は 3 m³/sec とされていた。これは平常時の流水を旧北上川に送るためである。その余剰分（すなわち出水の際はほとんどの流量）が新北上川を流れる。したがって流量変動が極端であり、平常時には塩水楔が堰下流の全区間に達していることが多い。なお現在では、汽水域の環境維持のために最低流量は日平均 10 m³/sec に修正されている。

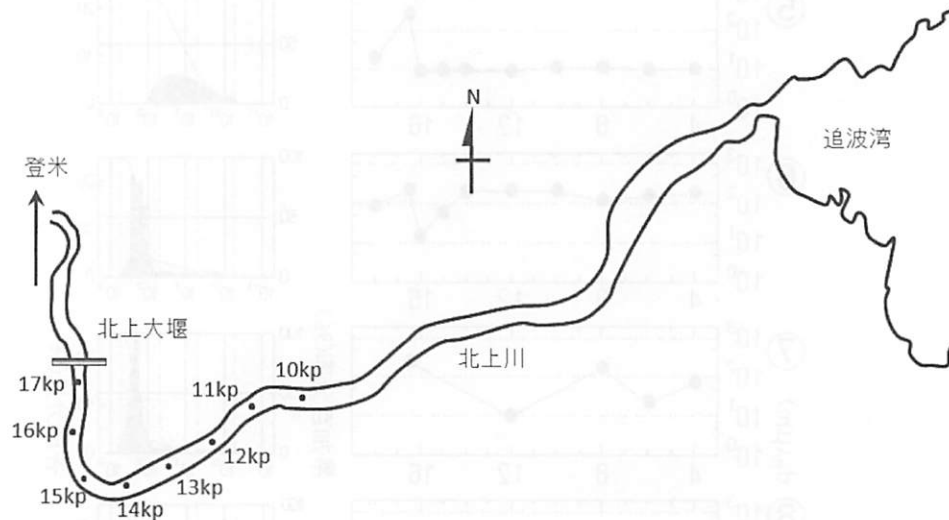


図-20：北上川汽水域の平面図

北上川と利根川には地形的にもう一つ大きな違いがある。北上川汽水域の 14KP 付近には大きな屈曲部があり、低水路外岸（右岸）側が深く掘れていることである。図 21 は 9KP～16KP の横断面図を合成し下流側から俯瞰的にみた河道地形だが、14KP において周囲に比較して 4m 程度の深掘れの存在することがわかる。塩水は底面に沿って流入するので、このような地形の不整によって運動を拘束される。

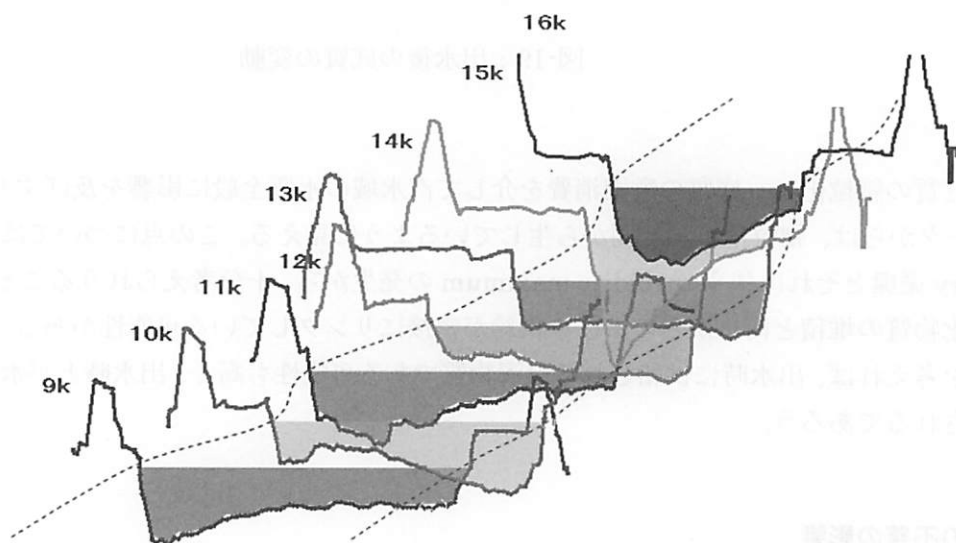


図-21：北上川河道地形

図-22 は 2007 年夏の渇水期に実施された現地調査の結果を示している。上段には潮位変動と大堰放流量を、下段には深掘れのある 14KP とその上流 2 地点での DO を示している。なお横軸の日付はその日の午前 0:00 である。観測期間のほとんどは最低流量に近く、したがって塩水楔が大堰付近まで遡上していた。一方、溶存

酸素はかなり大きく変動している。まず、大潮期（満月）から小潮期に移行する 8 月 2 日に、14KP～16KP の 3 地点とも DO が急激に回復し、その後は数日にわたって高い DO の状態にあった（期間①）。8 月 5 日以降はほぼ一定速度で低下し、約 6 日で 1mg/l まで減少した（期間②）。次の大潮期（新月）には 14KP の DO が低レベルであるにも拘らず 15KP と 16KP の DO は増加している（期間③）。また 8 月 17 日～19 日の小潮期には逆に 14KP のみで DO が回復し（期間④）、その後の長潮期に 15KP→16KP と上流に向かって DO の回復が伝播している（期間⑤）。

以上の変動の機構は次のように考えられる。期間①：大潮期から小潮期への以降に伴い塩水楔内を相対的に濃い塩水が河口遡上し、14KP の深掘れ部に滞留していた貧酸素化した塩水を排除し、さらに上流に遡上した。この濃い塩水の遡上は小潮期を通じて維持されたために高い DO の状態が数日にわたって継続した。期間②：長潮期にあたるが、小出水により 100 m³/sec 前後の流量が数日間継続した。この流量では塩水楔は痩せるもののフラッシュされない。しかし estuary 循環は弱められ、下流からの酸素供給が途絶えた。期間③：出水が終了した後、塩水楔の回復のために河口から新鮮な海水が遡上する。ただし大潮期であるため遡上水の塩分は若干低い。このため 14KP の深掘れ部に滞留する濃い塩水を排除することではなく、その上層を通して 15KP→16KP と上流へ遡上した。しかし遡上量は少なく、広い範囲で DO を回復することはなかった。期間④：小潮期に入り、塩分が高濃度化したため、遡上塩水は 14KP の深掘れ部に流入し DO を回復させた。期間⑤：高塩分・高 DO の塩水の遡上が長潮期にも継続し、15KP→16KP の DO も回復した。なお 8 月 23 日には比較的大きな出水があったため塩水楔はフラッシュされた。同日の急激な DO 上昇は底層まで淡水化したためである。

以上のように、地形の不整があると、底面付近の塩水流動は複雑化し、DO の状態の非定常性が強くなる。このことはシジミなどの底生生物に大きなストレスを与えることになる。実際、北上川汽水域におけるヤマトシジミの区間別個体数は、14KP を境にして上流側で大きく減少している。

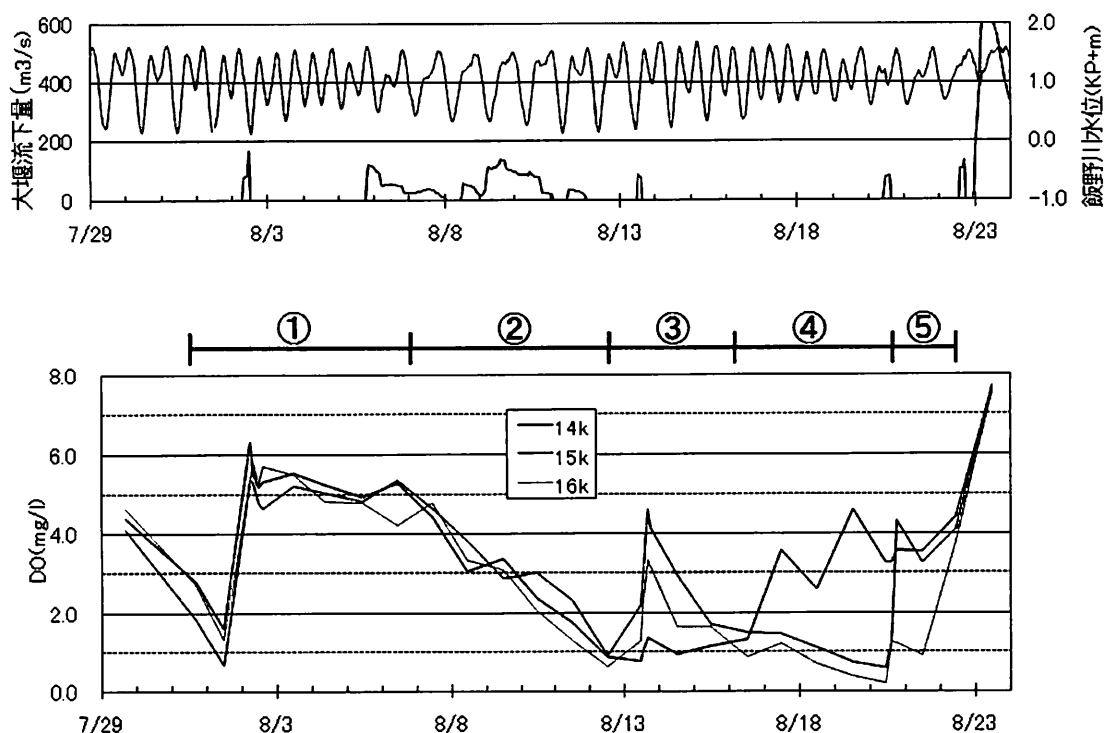


図-22：溶存酸素の変動

6. 汽水湖が存在する場合

汽水域の中上流部に湖が存在する場合がある。国の直轄管理の湖としては、網走湖、小川原湖、中海、宍道湖があり、これらは河川汽水域の一部として管理されている。汽水湖に接続する河川の改修が進むと、汽水湖の環境も変化する。その典型は網走湖である。図-23 は網走湖における塩淡水界面の推移を示している。昭和60年以降は水面下6m付近で安定し、それに伴い青潮の発生が著しくなっている。この現象の直接的原因は下流河道の改修であると考えられている。河道改修により湖からの排水が速やかになり洪水災害は減少する一方、平水時に下流からの塩水遡上が活発になるため、総塩分量が増加する。流入塩水は湖水との密度差のために底層に浸入するため、塩淡水界面が上昇するわけである。

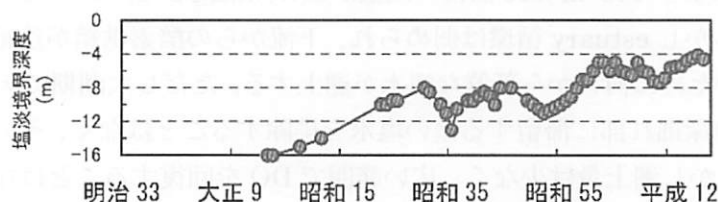


図-23：網走湖における塩淡水界面の変化

図-24 に COD、全リン、全窒素の鉛直分布を示す。塩淡水境界を境に水質が著しく異なり、底層水の物質濃度は富栄養化の常識的範囲を逸脱するほど高い。そもそもの原因は流域から流入する自然的・人為的汚濁負荷の沈積である。汽水湖では懸濁物質が凝集沈殿しやすいために底層の物質含有率が高くなる。加えて密度躍層によって DO の鉛直輸送が妨げられるため、底層は貧酸素化しやすい。実際網走湖の塩水層の DO は常時ゼロとなっている。塩淡水境界が浅い状況で強風が作用し表層水が風下に吹き寄せられると、底層水が水面に現れ、いわゆる青潮となるわけである。

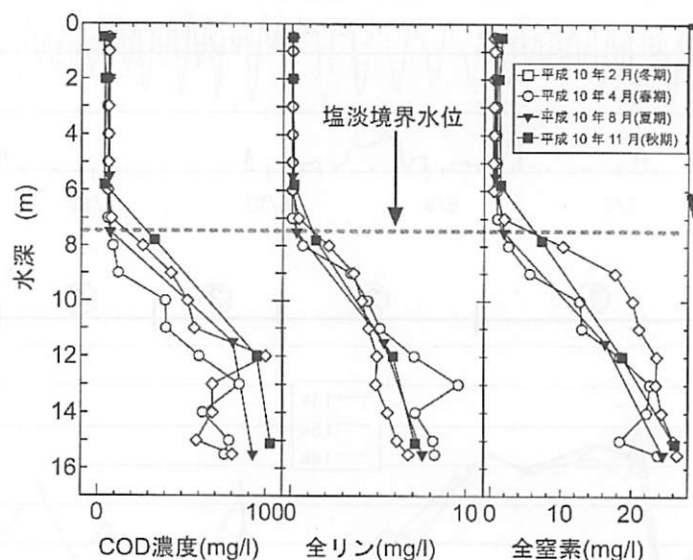


図-24：湖心における COD、全リン、全窒素の鉛直分布

多くの汽水湖がこのような危険性を内在している。まず近年は流域からの汚濁負荷が増大する傾向にある。溶存態は表層を通過して流出するが、懸濁態および枯死植物などの大部分は底層に沈積する。このため表層水が比較的清澈な汽水湖においても、底層の水質が悪化している場合が多い。一方、湖沼沿岸の浸水被害を軽減・防除するために河道改修により下流河川の疎通能力増大が計画されることも多く、加えて地球温暖化に伴い海

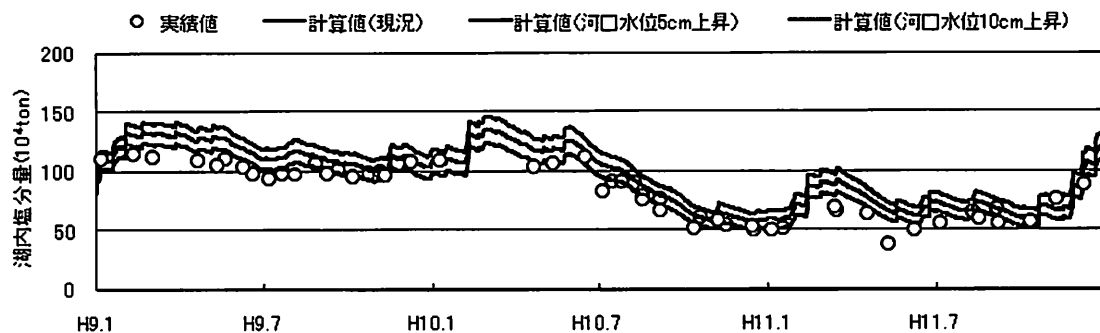
水面が上昇傾向にあることから、どの汽水湖においても塩淡水境界面が上昇する可能性は高いといえる。

ここでは筆者が過去に研究を行ってきた小川原湖を例にして、今後の塩分量の増加可能性について数量的に検討してみる。小川原湖は青森県北東部に位置する汽水湖で、湖面積（63.2km²）ではわが国で 11 番目にランクされる湖である。常時の水面標高は 0.3～0.4m(TP)、平均水深は約 11m、最大水深は約 26m である。塩淡水境界面は、以前は水深 19m 付近にあったが、最近では 17m 付近まで上昇している。ただし、この上昇が海水面変動によるものか一時的なものかは明確でない。

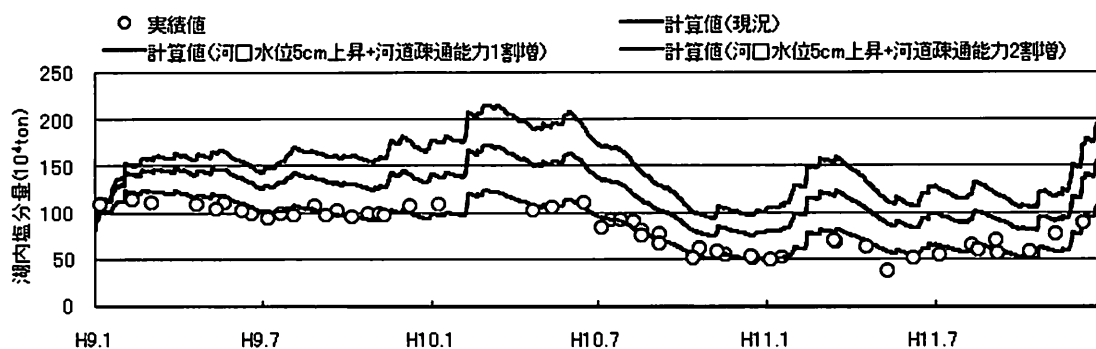
過去のデータから求められた高瀬川流量算定式を用い、平成 9 年～11 年の 3 年間の水理条件のもとで小川原湖の塩分収支が検討された。また定期的に実施された湖内成層調査から、湖内塩分総量が求められている。図・25 の○印が観測値であり、3 本の実線のうち下段が再現計算の結果である。観測結果とよく一致していることがわかる。また 2 倍以上の幅で時間的に変動することもわかる。小川原湖の平均水位と海水面の差は小さいので、大潮時に高潮や高波浪が偶発的に重なる場合などにより、塩水侵入の確率性はかなり高い。

さて、同図の上の 2 本の実線は、海水面が現状より 5cm および 10cm 高くなった場合である。海水面以外の水理条件は実際のものを使用している。これから、海水面が多少上昇しても小川原湖の塩分状態それほど大きく変化しないことが予想される。

一方、図・26 は、河道の疎通能力を向上させた場合のシミュレーション結果である。なお海水面については現状より 5cm 高く設定している。また最下段の実線と○印は図・25 と共通である。中段の実線は流量算定式の係数を 1.1 倍した場合、上段の実線は 1.2 倍した場合である。後者では小川原湖の総塩分量が約 2 倍になっている。河道疎通能力を 1.2 倍にするという程度の河道改修は、比較的小規模の部類であり、これより大きなケースも十分考えられる。すなわち河道改修が汽水湖の環境状態に与える影響は非常に大きいといえる。なお、現状では、小川原湖の排水河川である高瀬川を拡張する予定はなく、放水路の増強によって治水安全度の向上が計画されている。



図・25：小川原湖の総塩分量の変化（海面上層）



図・26：小川原湖の総塩分量の変化（海面上層＋河道改修）

7. おわりに

冒頭に述べたように、汽水域の河道計画手法というものは現在のところ存在しない。したがって、本稿では確定的な結論を何も用意していない。受講者が今後係わる具体的な事業において、本稿に述べた事項を参考として具体的に考えていただくことを期待している。その際に重要と思われる点を、筆者の個人的意見を主体に以下にまとめておく。

- ・ 汽水域は海に接続しているので、下流端水位が海水面に拘束されている。このため洪水時にも水位が極端に上昇することは少なく、その意味では通常の河道部に比べて治水安全度の確保は容易である。なお、砂州による河口閉塞の問題については、本研修の「河口の水理・土砂移動」で述べられる。
- ・ 一方、平常時における汽水域の流動および水質変化は、潮汐とそれに伴う塩分進入現象により、水域の環境および水産資源に大きな影響を与える。このため、汽水域の河道改修は、常に水産業資源維持の問題と背中合わせである。
- ・ したがって、洪水疎通のための河道容量確保もさることながら、汽水域においては平常時の現象を十分把握した上での環境管理を主体とした河道計画を行っていく必要がある。
- ・ 塩水は河床に沿って遡上するから、河道断面積だけでなく深淺偏差に注意を払った計画が必要とされる。特に最深河床高の連続性は、*estuary* 循環を維持するために重要である。
- ・ 中上流部に汽水湖が存在する場合には、河川と湖を一体とした改修計画を立て、汽水域の環境を大きく損なわないよう配慮する必要がある。

謝辞：

本稿を作成するにあたり、筆者自身が収集したデータの他に、国土交通省、(財)河川環境管理財団、(株)建設技術研究所、三井共同建設コンサルタント(株)から資料を提供していただいた。記して謝意を表する。

参考文献：

1. 利根川関連：

- ・ 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流動、水環境学会誌、Vol.23、No.10、pp.624-637、2000.
- ・ 鈴木伴征、大作和弘、石川忠晴：洪水に伴う利根川感潮域の底質変化、河川技術論文集、9 巻、pp.265-268、2003.
- ・ Ishikawa, T., Suzuki, T. and Qian, X.: Hydraulic Study of the Onset of Hypoxia in the Tone River Estuary, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol.130, No.5, pp.551-561, 2004.

2. 北上川関連：

- ・ 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所「北上川下流流況検討業務報告書」、作成者：三井共同建設コンサルタント株式会社、2008.

3. 網走湖関連：

- ・ 湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術、河川環境管理財団、6-2、2007.

4. 小川原湖関連

- ・ 長尾正之、西部隆宏、石川忠晴、山浦勝明：小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的考察、水工学論文集、Vol.40、pp.583-588、1996.
- ・ 鶴田泰士、石川忠晴、西田修三、藤原広和、村井貞美：小川原湖への海水侵入現象に関わる水理データの整備と復元、水文・水資源学会誌、Vol.14、No.1、pp.13-26、2001.
- ・ 湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術、河川環境管理財団、6-3、2007.