

河川汽水域への海水浸入後経過時間および 海水残留時間の数値解析による評価

天野邦彦^{1*}, 大沼克弘², 遠藤希実³

¹国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 室長 (〒3050804 茨城県つくば市旭一番地)

²国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官 (同上)

³国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 研究官 (同上)

* E-mail: amano-k92ta@nilim.go.jp

水域における水や物質の滞留時間は、水環境を規定する重要な要素である。本研究は、水質の数値計算において、物質濃度変化計算の仕組みを工夫することで、計算対象水域中の任意の範囲における計算対象物質の当該範囲流入後の経過時間や、範囲内に存在していた物質の残留時間の計算が可能となる様に改造した数値解析モデルを、潮汐による往復流をはじめとして複雑な流動・混合状態を有する河川汽水域に適用して、考察したものである。

汽水域上流のくぼみにおいて、浸入後の塩分経過時間が長い傾向が示され、貧酸素水塊発生機構との関連が示唆された他、河道形状の違いや河川流量の変化に応じた塩分残留時間の変化特性が明らかになった。

Key Words : Retention time, age, residence time, flushing time, salinity, estuary

1. はじめに

河川汽水域は、上流から流入する河川水と潮汐によって下流から流出する海水が混合する領域である。潮汐による流れは、一日に概ね2周期の水位変動を示す潮汐により駆動される往復流であると共に、密度の異なる海水と淡水が遭遇することで生起する密度流である。

日本では河口部の河川汽水域における海水と淡水の混合状態を、塩分濃度分布により強混合型、緩混合型、弱混合型という様に分類することが多い¹⁾。しかし大潮、小潮といった潮位差が異なる時期により塩水と淡水の混合形態が異なることが知られている他、満潮に向けて水位が上昇する期間と干潮に向けて水位が下降する期間を比べても塩分濃度の分布に違いが見られるように、河川汽水域での海水混合は空間的に不均一かつ時間的変動が大きいものであり、海水と淡水の混合状態についての解析にはより詳細な視点が必要と考えられる。

河川汽水域においては潮汐だけでなく河川流量変動も影響して複雑な流動場が形成されており、この複雑な流動場と汽水域地形が組み合わさることで、塩分濃度分布が決定されている。このように河川汽水域における潮汐による海水の混合や滞留は非常に複雑である。

河川汽水域における塩分濃度は、それ自身が汽水域環境の状態を示す極めて重要な指標であると同時に、水の密度を規定し流動に影響を与えるため、他の水質にも強く影響する。特に弱混合や緩混合の状況下では、塩分濃度の形成に伴い鉛直方向の混合が抑制されるため、滞留時間が長くなると底層における嫌気化などの問題が生じやすくなる。このため、複雑な塩分濃度分布の変化を知るとともに、その滞留時間についても知ることができれば、塩分自体の影響のみでなく、他の水質項目への影響や生化学的反応への影響も同時に推定することが可能となり、河川汽水域の環境解析に大いに役立つと考えられる。

本稿では、このような考えにのっとり、海洋から潮汐流により供給された塩分や集積する赤潮形成プランクトンが、河川汽水域における時空間的に複雑な流動の影響を受けて、どのように混合滞留するかについて、滞留時間も解析可能となるように新たに開発した数値解析モデルを用いた検討を行う。さらに、河川改修を念頭に置いた地形条件の改変や、気候変動を念頭に置いた潮位や河川流量の変化に応じた海水滞留状況の変化の影響についても定量的な評価を実施した。

2. 研究方法

(1) 滞留時間の概念

滞留時間という概念を適用する場合、まず滞留する場所を設定する必要があるのは自明であるが、滞留時間の概念を水環境の文脈で検討する場合、検討したい内容によって滞留する場所の設定は異なる。例えば滞留する場所として流れがほぼ一方向と考え得る湖沼や貯水池を対象にする場合、最も単純な場所の設定方法は、湖沼や貯水池全体を一つの場として捉えるものである。すなわち湖沼や貯水池全体を滞留時間評価の対象として設定する方法である。これは湖沼や貯水池の水環境を滞留時間の観点から概略検討する際にしばしば執られる方法で、簡便かつ実用的であり、概略検討の方法としては妥当なものと言える。

しかし、湖沼や貯水池では地形、気象、水温成層などにより複雑な流動が発生することで、底層部の嫌気化や、入り江などにおける植物プランクトンの集積といった局所的な水質問題が発生することがある。このような現象は、局所における滞留時間が強く影響する現象であり、これらを検討対象とする場合は、湖沼や貯水池全体を対象にした滞留時間の検討は、ほとんど意味をなさないもので、現象が生起する局所を対象に滞留時間を検討しなければならない。この例から、流れがほぼ一方向と考え得る湖沼や貯水池を対象としても、任意の水域に対して滞留時間の検討が行えると有益であることが分かる。さらに滞留時間の空間的な分布が評価できれば、より高度な水環境解析が可能であることをこの例は示唆している。

ただし、ある水域における水や物質の滞留時間は、流れと地形により決定され空間的な分布を持つものであるため、滞留時間の空間的な分布を正確に算定するには、流れを解析するモデルを利用する必要がある。これは、水環境の解析において対象となるのは、水や溶存物質のように連続的なものである場合がほとんどであり、固形物とは違い対象物を周囲から分離して滞留時間を評価するのが困難なためである。特に潮汐による往復流が常に存在する河川汽水域においては、流れの解析を正確に行った上でないと、滞留時間を正確に評価することができない。

水や溶存物質の滞留時間については、いくつかの概念が存在する。Monsenら²⁾は、一般に広義に使用されている滞留時間 (Retention Time) という概念に関係する3つの輸送時間スケールとして、Flushing Time³⁾、Age⁴⁾、Residence time²⁾を取り上げて、それぞれの定義、適用性について議論している。汽水域における滞留時間の評価を実施するにあたっては、狭義の滞留時間 (Flushing Time) とは別に、例えば貧酸素水塊の形成について評価

する際には、海側から汽水域に流入した水塊の経過時間 (Age) 、赤潮藻類の挙動について評価する際には、汽水域のある領域に存在する藻類の当該領域における残留時間 (Residence Time) と明確に区別して使用することが可能になれば、より適切な評価が可能になると考えられることから⁵⁾、本稿では、新たに開発した数値モデルを河川汽水域を対象に適用することで、水の滞留時間に関係するこれらの輸送時間スケールについて算定し、潮汐による循環や混合といった複雑な流れが生じている河川汽水域における水の滞留に関する検討を行う。

(2) モデル概要

経過時間や残留時間について数値解析モデルを用いて実施した研究は、流動モデルから得られた流速場に仮想粒子を流して行われたものがあるものの^{2,6)}、仮想粒子の運動を計算格子上の流速場を内挿して与える等の処理を行っており、移流と拡散による輸送量を正確に評価することが困難なことから、特に汽水域のように複雑な循環混合が生じる場への適用においては、精度に不安がある。そこで本研究では、このような問題を解決するために、移流拡散方程式に工夫を加えて計算結果はそのまま、経過時間と残留時間を正確に解析することが可能な数値解析モデルを開発して、検討を実施した。

開発したモデルの概要、評価対象とした汽水域の概要、モデル計算条件、経過時間及び残留時間の集計方法について以下に記述する。汽水域における流動は、河川流、潮汐流、吹送流、塩分に基づく密度流により駆動される。このような領域における流動を解析することが可能な準3次元モデル⁷⁾ (Blumberg and Goodrich モデル⁸⁾において採用されている連続式、運動量式、塩分収支式および乱流計算モデルは踏襲した上で、これらに水温モデルを加えて、全体モデルを構築している。) を基本として、河川汽水域において任意の水域における塩分と懸濁物の「経過時間」と「残留時間」の分布についても計算できるモデルを開発した。

本モデルでは、通常の水質解析モデルの様に塩分や懸濁物濃度の時空間的な変化を計算するのみではなく、「経過時間」の算定のためには、予め設定した境界を通過して境界内に流入した時刻により塩分や懸濁物を分画して、分画毎の濃度変化を追跡しながら計算することが可能なモデルとなっている。例えば塩分の河川汽水域への流入後の経過時間を計算するのであれば、河道の横断面を通して湾から河道に流入した時刻により塩分を分画し、分画毎の塩分濃度変化を追跡しながら計算することが可能なモデルとなっている。また「残留時間」の算定のためには、ある時刻において任意の境界内に存在する塩分や懸濁物について分画し、「経過時間」計算モデル同様の

計算を実施することが可能なモデルである。

基本となった塩分および懸濁物解析モデルは、計算対象領域を格子により区分して、移流拡散方程式を解くことでオイラー的に時空間的水質変化を求めている。流速場は別途解析して値が与えられるため、塩分や懸濁物濃度の変化を記述する移流拡散方程式は、線形微分方程式として表される。このため、分画した各々の塩分や懸濁物を独立の計算変数として扱い、通常と同じ移流拡散方程式を適用しつつ、個別に分割して計算すれば、設定した境界をある時点に通過した塩分及び懸濁物や設定した領域内にある時点において存在した塩分及び懸濁物の濃度を他の属性を持つ塩分及び懸濁物と区別して計算することが可能である。また各計算格子において分画毎の塩分濃度の総和や分画毎の懸濁物濃度の総和をとれば、方程式は線形なので、このような分画を行わない通常の計算における塩分濃度や懸濁物濃度と一致する⁹⁾。

(3) 計算対象汽水域の概要

計算対象とした汽水域は、愛知県豊川河口域である。豊川は流域面積 724km²、幹川流路延長 77km、段戸山（標高：1,152m）を源流に設楽町、新城市、豊川市および豊橋市を通り三河湾へ流れる一級河川である。豊川下流域は昭和 40 年代より放水路・護岸・埋め立てなどによる人為的な地形変化を受けている（図-1）。豊川が流入する渥美湾においては、富栄養化により夏季に底層の溶存酸素が欠乏するために、水深の深い場所では、底生生物が生息することができないといった問題が生じている。また、強い離岸風が生じた場合に貧酸素の底層水が沿岸に湧昇し、苦潮とよばれる現象が生じると、沿岸においても魚介類のへい死を招く。豊川河口部は、浚渫により河床が掘削されたという経緯があり、水深が深くなっている箇所が存在するため、湾の底層部分において貧酸素水塊が発達している場合、満潮時には溶存酸素濃度が低い塩水が侵入することがあり、このような場合には底生生物の生息には厳しい環境となりうる。

これほど条件が悪い場合以外でも、河口部の河川汽水域において、塩分成層が形成されるような場合、湾においては貧酸素化が進行していなくても、河道内の底層における貧酸素化が進行する可能性がある。このような状況下で、どの程度まで溶存酸素濃度が低下するかは、河道に侵入した塩水の「経過時間」が強く規定していると考えられる。

また、放水路においては、赤潮の発生がしばしば見受けられる。本川においては、赤潮が集積することはないことから、放水路における「残留時間」が赤潮発生に影響していることが予想される。

この様な条件下の豊川河口汽水域において、これらの

現象解明を試みるには、塩水や懸濁物の滞留時間（経過時間や残留時間）を評価し、これらの挙動を詳細に知ることが必要であるため、滞留時間を含めた水質計算が実施可能な本モデルの適用は環境保全上大きな意義がある。

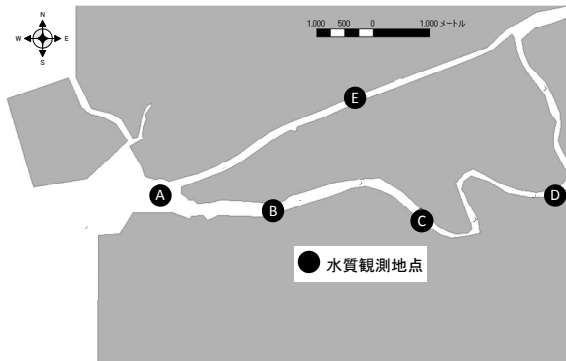


図-1 豊川河口図

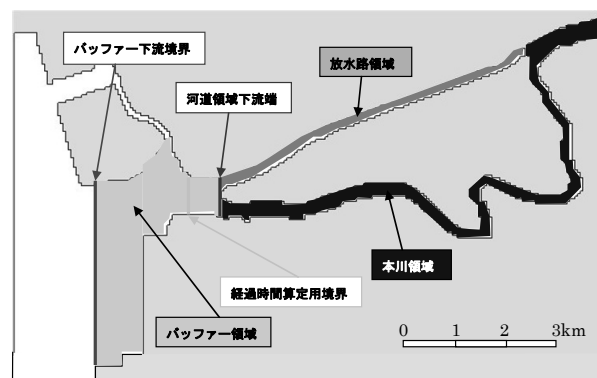


図-2 計算領域と境界

(4) モデル計算条件

a) 設定条件

モデルへの入力データなどの設定条件と検証結果については、既報⁹⁾と同様であるため、紙面の都合上割愛する。また、計算モデル自体の精度検証に関しては、妥当な再現結果を得ている。これらについては、既報⁹⁾を参照のこと。

b) 塩分経過時間及び残留時間の集計

湾から河道に侵入した塩分の「経過時間」の計算は、図-2 に示した経過時間算定用境界を横切って上流側に向けて流入する塩分を流入時点記録した変数として他と分画する（例えば、 S_1, S_2, \dots, S_n ）。今回の検討では分画の時間は日単位とした。塩分の経過時間の分布は、計算中の任意の時刻に任意の水塊に対して求めることが可能である。手順としては、まず経過時間の分布を求めたい時点を設定して、この時点において河道内に存在する、流入時点により分画された塩分量を任意の水塊を対象に集計する。各分画に記録された流入時点と経過時間を求めたい時点の時間差が各分画毎の経過時間なので、各分画毎にこの経過時間と塩分量を乗じて総和した後に総塩分量で除することで、この水塊における塩分の平均

経過時間が得られる (式(1)) .

$$\overline{T_{age}(x_i, y_j, z_k, t_n)} = \sum_{A=1}^n \frac{(n-A)S_A(x_i, y_j, z_k, t_n)}{S_A(x_i, y_j, z_k, t_n)} \delta t \quad (1)$$

ここで、 S_A : 分画 A に対応する塩分濃度 (本稿では集計計算開始日を $A=1$ として、経過時間を求めたい時点の n 日目まで、一日ごとに A を 1 増加させて分画している。), δt : 分画の時間単位 (本稿では 1 日) である。

経過時間および残留時間算定の際に問題となるのは、潮汐に伴う流れは往復流であり、**図-2** に示した河道領域の最下流端から下流へ干潮時に一旦流れ出した塩分のうちいくらかの部分については、満潮時に再度河道領域に浸入する可能性があることである。

汽水域における塩水滞留時間の評価が順流域でのそれに比較して特に複雑なのは、この往復流の存在に帰因するところが大きい。そこで**図-2** に示すバッファ下流域に断面を設けて、この断面と河道領域下流端断面で挟まれた領域をバッファとして設定し、河道領域から下流へと流出しても、このバッファ内に存在する間は経過時間、残留時間共に中断せずにカウントし続け、バッファ下流の断面から海側へ流出した際にカウントを終了した。河道領域から下流へと流出しても、比較的閉鎖性が高いと考えられる河口部分より陸側では湾を循環している海水とはあまり混合が進まないため、この境界より陸側では河道側に浸入した塩水として存在し続けると考えている。

「残留時間」の集計に際しては、本川河道と放水路について別々に評価するために、**図-2** に示した河道領域下流端断面を最下流端として集計の対象とする領域 (河道領域) を本川領域と放水路領域として区別して設定し、この断面よりも上流側の本川領域と放水路領域においてある時点に存在する塩分を記録し分画して塩分濃度の計算を進めた。今回の検討では、残留時間の計算は、河道領域で計算開始日の塩分量が最大となる時点において本川領域と放水路領域それぞれに存在した塩分総量を 100% (初期値) として、その後の時間経過とともに分画された塩分総量の変化を集計することで求めた。たとえば、本川領域を対象に検討する場合であれば、検討を開始する時点において本川領域内に存在する塩分をまず記録し、一つの計算変数として分画する。これは、通常の塩分濃度変化計算を行い、検討開始時点における本川領域内の塩分濃度分布をもって、分画される塩分濃度分布とすることで実施される。検討開始時点において分画された塩分と、それ以外の塩分は、それぞれ別の変数として、移流拡散による変化が計算される。分画された塩分とそれ以外の塩分の和は、通常の塩分濃度計算による塩

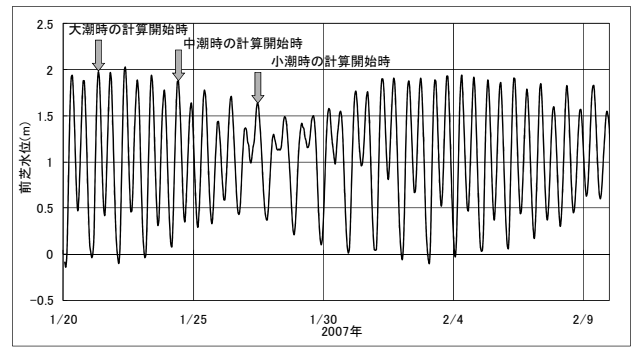


図-3 経過時間と残留時間の集計計算開始時間

分と一致する。モデル計算においては、所定の時間間隔毎に、最初に分画された塩分の総量を本川領域を対象に集計して、出力した。この本川領域中の分画塩分総量を時系列的に並べて、満潮時の塩分濃度ピークごとにこの分画分について本川領域内の存在量を再度集計する。時系列的に見て一つ前の塩分濃度ピークから当該ピークまでに減少した塩分量に、計算開始から当該ピークまでの時間を乗じたものを総和し、初期値の塩分総量で除することで、平均残留時間を求めた。

c) 塩分経過時間及び残留時間の変化解析

上記の集計方法で、経過時間、残留時間の評価を、2007年1月1日から2月28日までの2ヶ月間について検証計算同様の条件でモデル計算を行った。この期間には、放水路において赤潮の発生が見られており、今回の計算期間として選定している。計算集計は、初期値の影響が低減しており、かつ河川流量が少なかった1月21日以降の10日間 (大潮と小潮を含んでいる) を対象に行った (**図-3**) .

このケースに加えて、環境変化が生じた場合の塩水滞留状況の変化を評価する。まず、河道地形を変更した場合の影響について見るために、現状地形の元で計算を行った検証ケースと比較して、本川河道を TP=0m からの深さを 20% 深く掘削した河道と、本川河道の低水路を 20% 広く拡張した河道における経過時間および残留時間について、潮位と流量は現状のままですべて計算を行った。また、気候変動に伴う潮位の上昇が生じた場合に、河川流量変化により河川汽水域における塩分滞留状況の変化がどのような特性を持つかについて検討するために、潮位について現状および現状から 10, 20, 40cm 上昇させた場合の合計 4 ケースの潮位を想定すると共に、それぞれの潮位の下で本川流量として 4 つの定常値 (5, 10, 20, 40 m^3s^{-1}) を与えた合計 16 ケースについて経過時間および残留時間の計算を行った。潮位の変化については、潮位の変動量はそのままで、水位全体を 10, 20, 40cm 上昇させる設定とした。

d) 仮想懸濁物残留時間の集計

塩分の残留時間と同様に仮想懸濁物の残留時間について計算を行った。放水路においてしばしば発生が確認される赤潮の集積を模擬するため、浮力を持たせるために仮の浮上速度を 0.5 m d^{-1} として与えた仮想懸濁物を本川および放水路の河口より 3~3.5km の範囲に分布させた後、塩分の残留時間計算同様の手法で、仮想懸濁物の残留時間を集計した。

3. 結果

(1) 河道形状変化が塩分の経過時間に及ぼす影響

本川と放水路について、それぞれ河口から浸入した塩分濃度および経過時間を横断方向に平均して求めた値の縦断分布を図-4、5 に示す（本川と放水路で横軸の距離スケールが異なることに注意）。図-4、5 では、河道形状変化として、本川河道を 20%深く掘削した想定河道と、低水路を 20%広く拡張した想定河道を対象に、現状河道との比較を行った結果を示している。

図-4 は、2007 年 1 月 29 日の 6 時時点（小潮の満潮時）の塩分濃度の分布を示している。塩分濃度を見ると、本川では満潮時ということもあり、やや強混合に近い緩混合の分布形状を示している。これに対して放水路では、河川流量がほとんど無いために、全体的に塩分濃度が高く、混合状況は弱混合の形状に近いものになっている。これに対応する時点における経過時間を見ると（図-5）、どのケースにおいても上流に行くほど平均経過時間が長い結果を示しているが、現状河道に比べて拡張、掘削の両ケースとも特に本川において河口から 8000m 以上上流の部分で平均経過時間が長くなる傾向が強くなる。

満潮時には新たな塩分の浸入があるため、特に河口において経過時間が短くなる傾向にあることが容易に想像されるように、平均経過時間の縦断分布は、潮位や流量の変化により常に変化する結果を示した。掘削したケースの本川における平均経過時間分布である図-5 (c) に顕著に表れているが、河口付近では新たに湾側から浸入した海水の影響により、底層部の方が表層部に比べて平均経過時間が短いものに対して、河口から 7000~8000m 程度上流にある深掘れ部では、浸入した海水が滞留しやすいためと考えられるが、底層部で表層に比べて平均経過時間が長くなる結果となった。

各計算ケースにおいて放水路は形状を変えていないため、間接的な影響を受けるにとどまっている。計算対象とした期間において、放水路への放流はなく、計算条件としては放水路上流からの淡水供給は $0\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ としていることも相まって、放水路においては、本川の河道形状変化の影響はほとんど見られなかった。

(2) 潮位と河川流量が塩分の残留時間に及ぼす影響

潮位 4 ケース、河川流量 4 ケースの組み合わせによる 16 ケースについて、本川領域と放水路領域全体の平均残留時間を集計した結果を図-6 に示す。図-6 は、縦軸に潮位上昇による変化、横軸に河川流量による変化を示しており、平均残留時間に与える潮位上昇と流量変化の複合的な影響が面的に示されている。

今回の計算条件の範囲においては、本川領域では、潮位変化による変化より河川流量変化による影響の方が顕著に表れているのに対して、放水路領域では、潮位変化による影響がより顕著に表れる結果となった。

また、図-6 の上部 3 段の図を比較することで潮汐差による違いについて見ると、本川領域において、大潮時に比べて潮位差が小さくなる中潮時に残留時間が短くなる傾向が見られるが、さらに潮位差が小さくなる小潮時には、逆に残留時間が長くなるという結果であった。放水路においては、大潮時に残留時間が最も短く、中潮、小潮と変化するにつれて残留時間が長くなる結果であった。

(3) 仮想懸濁物残留時間の放水路と本川での比較

赤潮藻類を模して所定の時刻に発生させた仮想懸濁物質が放水路と本川の両方において、当該領域に残留する割合の時系列変化を図-7 に示す。干潮時に相当部分がフラッシュされて減少するが、満潮時に上流に押し戻されることで若干の増加をも示す残存量変化特性が定量的に示された。放水路における平均的残留時間は、本川に比べて 6 倍程度長くなる結果となった（表-1）。赤潮発生日から残留時間を計算し始めたケースでは、30 日を過ぎても放水路では 15%程度の仮想懸濁物が残留している。ここに示された数字自体は、仮想の浮力を持った仮想懸濁物の残留時間であり、直接赤潮藻類の残留時間を評価するものではないが、この時期の放水路における流動は、浮力をもった懸濁物を長時間残留させる状況であった。

4. 考察

(1) 河道地形改変による塩分混合への影響

本川において低水路を掘削するケースと拡張するケースを比較すると河道容積の変化はほぼ同様であるが、鉛直方向に広げたことになる掘削ケースの方が、河口付近の底層を除いて経過時間の増加が大きかった（図-5）。これらの結果は、河道地形改変による海水滞留が河道容積のみで決定されるものではないことを示している。

掘削による影響を見たケース（図-5(c)）と現状ケース（図-5(a)）との結果を比較すると、特に河口から

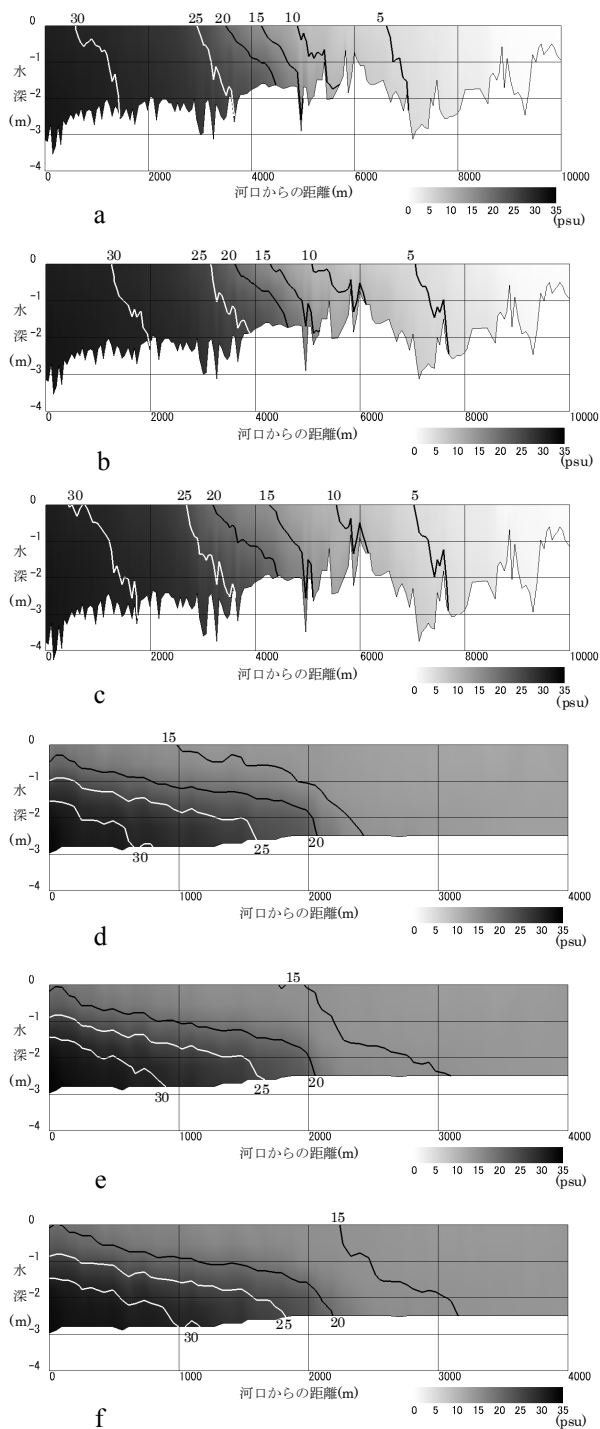


図-4 本川河道地形の違いによる塩分濃度 (psu) の縦断分布 (a~c:本川河道での分布, d~f:放水路での分布, 現状河道での結果を a, d に, 20%拡幅河道での結果を b, e に, 20%掘削河道での結果を c, f に示す)

6,000m~9,500m にかけての凹部での経過時間の増加が顕著である。凹部がなく, 上流に行くにつれて河床高が上がっていく河道形状であれば, 掘削により河道容積が増加しても, 潮汐に伴う流動による塩分の輸送量は, 満ち潮時も, 引き潮時も同時に増加するため, 経過時間には大きな変化が生じない。しかし, 掘削により凹部の規模

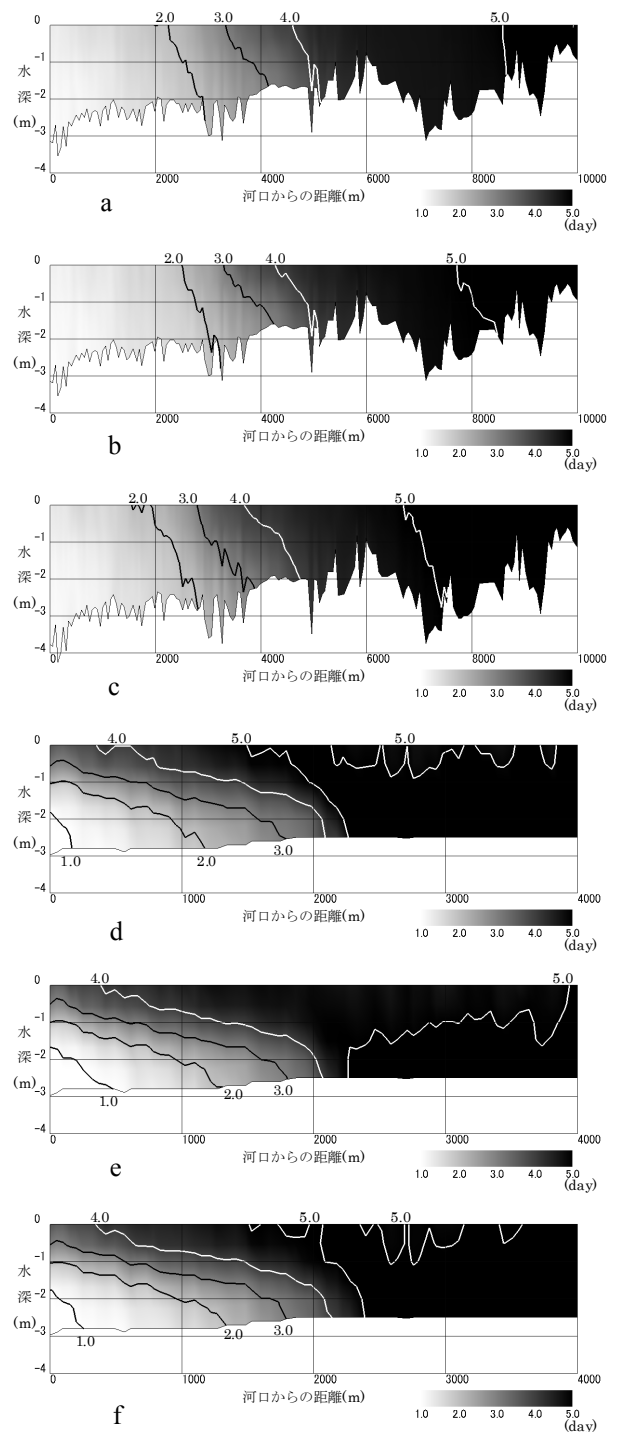


図-5 本川河道地形の違いによる横断平均経過時間 (日) の縦断分布 (a~c:本川河道での分布, d~f:放水路での分布, 現状河道での結果を a, d に, 20%拡幅河道での結果を b, e に, 20%掘削河道での結果を c, f に示す)

が大きくなると, 密度の大きい塩分濃度の高い水は, 相対的に引き潮時に下流向きに輸送されにくくなることから, このような結果になったと考えられる。

塩分成層が形成される汽水域において窪地で貧酸素水塊が形成されやすいのは, 凹部において, このよう経過時間が長くなるためである。しかし, 2,000m より下

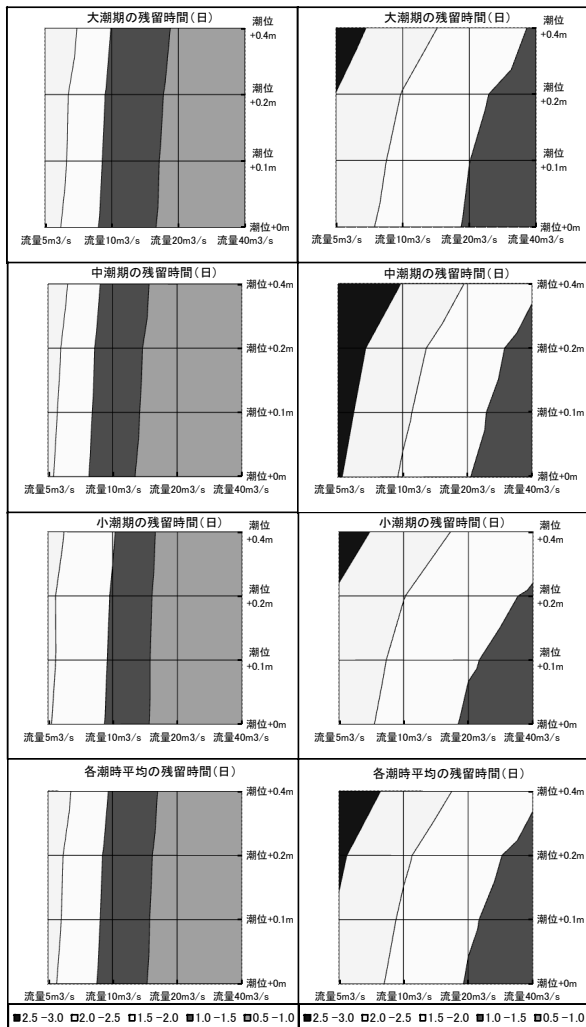


図-6 本川領域(左側)と放水路領域(右側)における平均残留時間(日)(上から、大潮時、中潮時、小潮時の平均残留時間と、全ての平均)

流の河口付近における小規模の凹部では、経過時間の長期化は顕著ではない。今回開発したモデルの使用により、流動と地形を正確に反映した経過時間の詳細な検討が可能となり、河口汽水域における河道地形変化が、塩分滞留の分布特性に与える影響を評価できるようになった。

(2) 潮位と河川流量が塩分の残留時間に及ぼす影響

平均残留時間は、小潮期の算定において中潮期より長くなる傾向が見られた。この理由としては、今回検討対象とした小潮期間の日潮不等による高低潮が高めであり(図-3)、干潮時の下流への流出が少なかったためであると考えられる。また、逆に中潮時の残留時間が大潮時のそれよりも短くなった原因は、中潮時の計算開始直後の干潮位が大潮時の計算開始直後の干潮位より低くなっていたためであると考えられる。

潮位上昇の影響がより大きい放水路で、平均潮位が40cm上昇するとしたケースにおいても、平均残留時間

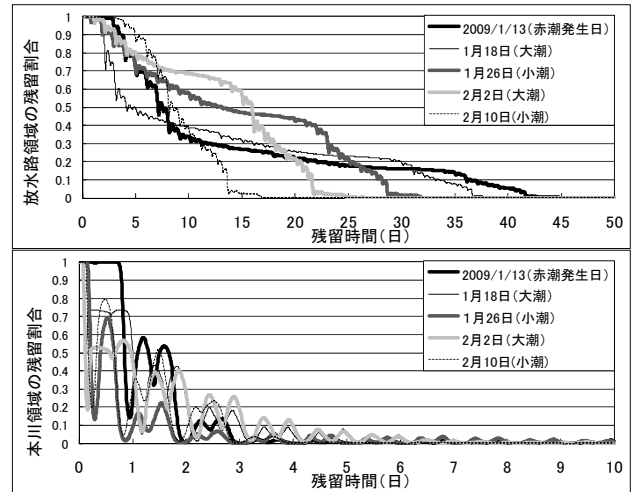


図-7 放水路領域(上)本川領域(下)における仮想懸濁物の領域内残留割合の経時変化

表-1 放水路領域と本川領域における浮力を持った仮想懸濁物の領域内平均残留時間

設定日時	赤潮発生日	大潮日	小潮日	大潮日	小潮日	平均	
	1月13日0時	1月18日3時	1月26日7時	2月2日4時	2月10日5時		
平均残留時間(日)	放水路	13.32	12.18	15.14	13.48	9.48	12.72
	本川	2.49	2.12	1.58	2.10	1.84	2.02

は小潮時でも2時間程度の増加にとどまっている(図-6)。今回対象とした豊川の潮位差は大潮で2m、小潮で1m程度であることから、たとえ40cm程度の潮位上昇があっても、平均的に見た場合の残留時間の変化はさほど大きくはない結果になったと考えられる。

(3) 仮想懸濁物残留時間の放水路と本川での比較

豊川においては、放水路で冬季に赤潮の集積が見受けられる。浮力を有する仮想懸濁物の残留時間変化を見ると、平均して、放水路において本川よりも6倍程度長くなる傾向が見られた。今回の検討では、仮想の浮上速度を与えることで、仮想懸濁物の浮力を表したことなど、実際に発生する赤潮藻類の特性とは異なる可能性がある仮定の下に計算を行ったために、仮想懸濁物の解析に関しては、残留時間の絶対値よりも相対的な差異に着目して結果を解釈するべきであるといえる。しかし、塩分の残留時間は放水路も本川もそれほど大きな差はなかった。浮力を持つ仮想懸濁物質は、表層に集まるために、密度が大きいために底層付近を中心に移動する塩分とは異なる滞留特性を示したものと考えられる。

放水路における仮想懸濁物の2月2日を集計開始とした時の残留割合(図-7)を見ると、2月16日、21日頃に急激に残留割合が減少している。この期間は豊川の流量が増加した期間であり、本川における出水に伴い、放水路内の入れ替わりが促進されたものと推察される。赤

潮の集積は、平均残留時間により表される滞留時間の逆数を、比増殖速度が上回る際に可能になると考えられることから、より現実的な評価を今後行うことで、赤潮発生の必要条件の評価が可能となると考えられる。

5. まとめ

今回開発したモデルにより、河川汽水域のような複雑な流動場における海水滞留特性を、海水の河道への浸入後経過時間や河道内の汽水の残留時間として定量的に評価することが可能となった。さらにこのモデルにより河道形状の改変、潮位や河川流量変化に伴う河川汽水域における海水や仮想懸濁物の滞留特性への影響評価ができた。

時空間的不均一性が考慮されたモデルを適用した結果を見ると、河道を掘削する影響を見た場合の例に見られるように、一見同じような影響が出そうな河床の凹部であっても、河口からの縦断距離の違いにより影響が異なったり、塩分と浮力を持つ仮想懸濁物の残留時間について見ると、本川と放水路とで仮想懸濁物のそれが大きく異なるという結果を示すなど、単純に河道容積や潮位の変化のみから想定される影響評価とは異なることが示された。本モデルを適用することで、今後想定される汽水域における河道形状の人為改変や気候変動に伴う潮位や河川流量の変化が河川汽水域における海水滞留へ与える影響を的確に評価することができる。

参考文献

- 1) 山本晃一, 高橋晃, 深谷渉: 感潮河川の塩水遡上実態と混合特性, 土木研究所資料, 第3171号, 1993.
- 2) Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L. V. and Monismith, S.G.: A comment on the use of flushing time, residence time, and age as a transport time scales, *Limnol. Oceanogr.*, 47(5), pp. 1545-1553, 2002.
- 3) Geyer, K.R., Morris, J.T., Pahl, F.G. and Jay, D.A.: Interaction between physical processes and ecosystem structure: A comparative approach, In Hobbie, J.E. [ed.], *Estuarine science: A synthetic approach to research and practice*, pp. 177-206, Island Press, 2000.
- 4) Zimmerman, J.T.F.: Estuarine residence times, In B. Kjerfve [ed.], *Hydrodynamics of Estuaries*, V.1, pp. 75-84, CRC Press, 1988.
- 5) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘: 河口汽水域における塩水滞留時間の算定手法開発, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 283-288, 2010.
- 6) Oliveira, A. and Baptista, A.M.: Diagnostic modeling of residence times in estuaries, *Water Resources Research*, v.33, n.8, pp. 1935-1946, 1997.
- 7) 渡辺正孝, 天野邦彦, 石川裕二, 木幡邦男: 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集第7部門, No.608, VII-9, pp.13-29, 1998.
- 8) Blumberg, A. F. and Goodrich, D. M.: Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay, *Estuaries*, 13, pp. 236-249, 1990.
- 9) 天野邦彦: 湖沼への流入時期で分画した栄養塩類の動態解析モデルの開発と試算, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1459-1464, 2010.

(2011. 5. 30 受付)

Numerical analysis of environmental effects on the retention time of sea water in riverine estuaries

Kunihiko AMANO¹, Katsuhiro ONUMA² and Maremi ENDOH³

¹ Head, River Environment Div., National Institute for Land and Infrastructure Management

² Senior researcher, River Environment Div., National Institute for Land and Infrastructure Management

³ Researcher, River Environment Div., National Institute for Land and Infrastructure Management

Since retention time of sea water is one of the most important factors that control the environment in riverine estuaries, it is necessary to assess it accurately to understand the riverine estuary environment. However; complicated hydrodynamics driven by the combination of several influential factors make it difficult to estimate the retention time. Both temporal and spatial heterogeneity of saline water distribution enhance the complexity of the estimation. We have developed a numerical model that can analyze the temporal and spatial distribution of age and residence time of sea water in riverine estuaries. The model can differentiate salinity by the time when it enters river mouth and by the place where it exists at certain time, while the summation of the differentiated salinity is in agreement with conventional model results. We have shown the quantitative influence on the age and residence time of sea water in estuaries caused by changes in river channel, sea level and the river flow.