

河口汽水域における塩水滞留時間の 算定手法開発

DEVELOPMENT OF A METHOD TO ESTIMATE THE RETENTION TIME OF SALT WATER IN RIVERINE ESTUARIES

天野邦彦¹, 遠藤希実², 大沼克弘²

Kunihiko AMANO, Maremi ENDOH and Katsuhiro OONUMA

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

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所 環境研究部河川環境研究室 (同上)

We have developed a numerical model to elucidate the retention feature of salinity in riverine estuaries. The model has a feature to partition a physically conservative water quality index variable (e.g. salinity) into several components and calculate concentration change of each component by mass balance model which is consistent with conventional water quality model. Using this model, we have estimated the spatial distribution of the age of salinity that penetrated into an estuary from the mouth of a river. Also estimated was the residence time of salinity which was present inside of the estuary at a certain time. Simulation results have shown that the age is highly heterogeneous within the estuary spatially implying that morphology is important in estimating the salinity retention in estuaries. This model has a good potential in assessing the impact of physical alternation such as flow change and excavation on the salinity retention which often control the occurrence of bottom anoxia in riverine estuaries.

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

1. はじめに

河口に形成される河川汽水域は、河川から供給される淡水と潮汐に伴い出入りする海水が混合すると共に常に変動しているという複雑な水環境を有している。河口における淡水と塩水との混合や循環については、過去より多くの研究が行われてきている。日本における河川汽水域研究は、取水障害や導流堤建設などの河口処理についての研究が主なもので、塩分以外の水質や土砂動態、汽水域生物についての研究は十分でなかったという指摘もあり¹⁾、これら研究の充実が喫緊の課題であることは論を俟たないが、汽水域生物についての研究を実施する際にも、塩分濃度の変化は極めて重要な検討対象である。

本研究は、汽水域における塩分に着目したものであるが、単に塩分濃度変化を追跡するものではなく、海側から河川汽水域に浸入した塩水の滞留時間を定量的に評価することが可能となる新たなモデルを開発し、このモデルにより汽水域における塩水滞留時間についての検討を行うものである。塩分濃度変化のみでなく、その滞留時間も評価することで、河川汽水域においてしばしば問題

となる河川汽水域底層における貧酸素水塊発生機構の理解にもつながることから、河川汽水域における水質および生態系保全の一助になると考えられる。

2. 滞留時間の評価

水域内のある地点における水質変化は、その地点においてその中では水質が一樣と見なして良い微少な水塊内における生化学的変化と移流拡散に伴うその周辺の水塊との相互作用(入れ替わりや混合などの物理的過程)に伴う変化を総和した変化により決定される。すなわち、水域における水質変化は上述の2つの変化(①領域内変化、②領域外との相互作用による変化)により規定される。滞留時間は、ある水域に同一の水が留まる時間スケールを示す指標であるが、滞留時間の変化は領域内変化が進行することを許す時間の変化を意味することから、生化学的水質変化の進行の程度に影響すると共に、その結果として領域内の水質状況に影響を与える。

栄養塩類濃度の高い河川水が、ある程度滞留時間が長い一つの水塊としての単位で見ることのできる湖沼など

の領域に流入すると、水質変化が顕著になるのは、その場所で領域内変化が十分生じる滞留時間があることを示している。このように滞留時間は水質に影響を与える重要な指標であり、特に生化学的反応による変化の影響が大きい水質項目の変化に強い影響を与えることが理解できる。このような水質項目の中には、特に生物にとって重要な溶存酸素濃度なども含まれており、滞留時間は水質変化のみならず、その結果として生物の生息環境にも影響する極めて重要な指標である。

このように水環境を評価する上で重要な滞留時間であるが、湖沼の富栄養化に関する経験的モデルの古典とも言えるVollenweiderモデル²⁾に始まり、滞留時間あるいはフラッシング時間といった指標を用いた多くのモデルが、湖沼や汽水域における環境解析に用いられてきている³⁾。Monsenら³⁾は、水の滞留時間に関係する3つの輸送時間スケールとして、Flushing Time, Age, Residence time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。本稿では、Monsenら³⁾が整理した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。ここでは、まずこれら水の滞留時間の評価に関係する輸送時間スケールについて概略をまとめる。

(1) Flushing Time

Flushing Time (T_f) は、「ある貯留領域の中にあるスカラー量に対するこのスカラー量の更新率に対する比」と定義される⁴⁾。

$$T_f = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

ここで、V:領域の体積、Q:体積流量

水量ではなく、水を媒介にして輸送される物質を対象とするのであれば、式(1)の分子を領域内の物質質量、分母を領域を通過するフラックスと置き換えたものがその物質のFlushing Timeになる。この定義は、一般的に滞留時間として使用されている指標であり、湖沼や貯水池などの閉鎖性水域における水質特性を簡便に評価する指標として広く利用されている他、日本の貯水池における成層形成の可能性に関する簡易指標として利用されている⁵⁾。この指標は、簡便であるという利点があるものの、領域内は完全に混合されている、また一般的に定常であるという仮定が暗黙のうちに存在していることから、汽水域のような場所においては、適用に制限が存在する。汽水域においては、このFlushing Timeの代わりにタイダルプリズム法が代わりに用いられる。この方法は、潮汐のみが汽水域の物質を流し去るという仮定⁶⁾で式(1)の流量を潮汐による流れに置き換えた方法である（式(2)）。

$$T_f = \frac{VT}{(1-b)P} \quad (2)$$

ここで、P:タイダルプリズム（満潮位と干潮位の間の汽水域体積）、T:潮汐時間、b:再帰流係数(=0.0~1.0)

タイダルプリズム法は、システムがよく混合していること、潮汐流に比べて河川流が少ないこと、海側は十分に大きく、汽水域からの流出水を希釈できること、システムが正弦曲線波により定常であることという仮定に基づいている³⁾。

(2) Age

Zimmerman⁷⁾によるAgeの定義は、「ある水塊が一つの境界を通過して汽水域に流入してから経過した時間」というものである。Ageは、「流入後経過時間」あるいは「経過時間」と呼ぶべき指標である。この指標は、空間的な不均一性を認識したものであり、汽水域における塩分であれば直感的に上流側に存在する塩分の方が下流の河口付近のものよりも長いAgeを持っていることが理解できる。

(3) Residence Time

Residence Timeは、Ageと相補の関係にある指標であり、対象領域内のある場所に存在した水塊が領域から出るまでにどれだけの時間がかかったかというものである³⁾。Residence Timeは「残留時間」と呼ぶべき指標である。AgeとResidence Timeは境界の設定、領域内における検討対象地点、汽水域を対象とする場合は、計測開始のタイミングにより変化するものであると共に、系内における輸送時間を意識したものになっている³⁾。

本章では、滞留時間の評価という表題で水の滞留時間に関係する3つの輸送時間スケールについて整理した。一般に広義に使用されている滞留時間（Retention Time）という概念は、狭義の滞留時間（Flushing Time）、経過時間（Age）、残留時間（Residence Time）に明確に分離して使用することが適切であると考えられることから、これらを分けた上での定量的評価を以下で行った。

3. 方法

実存する汽水域における塩分の経過時間および残留時間の時空間的分布について、定量的に評価することが可能な流動水質モデルを汽水域を対象として新たに開発した。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^{3,8)}があるものの、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処理を行っており、汽水域のように複雑な循環混合が生じる場においては、流動計算結果と仮想粒子による流れのフ

ラックス量が一致することを担保できない。本研究では、このような問題を解決するために、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。

(1) モデル概要

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モデル⁹⁾ (Blumberg and Goodrichモデル¹⁰⁾ に基づく連続、運動量、塩分および乱流モデル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、このうちの塩分について、通常のモデルの様に塩分の時空間的变化を計算するのみではなく、「経過時間」の算定のためには、予め設定した河道の横断面を通して湾から河道に流入した時間により分画し、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を、また「残留時間」の算定のためには、ある時刻において河道内に存在する塩分について分画し「経過時間」計算モデル同様の計算を実施するモデルを開発した。

基本となった塩分解析モデルは、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。塩分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、塩分濃度について、通常と同じ移流拡散方程式を適用しつつ計算変数を分画した塩分毎に独立の変数として個別に分割して計算すれば、設定した境界のある時点に通過した塩分や設定した領域内にある時点において存在した塩分の濃度を他の属性を持つ塩分と個別に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をとれば、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と一致する¹¹⁾。

(2) 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

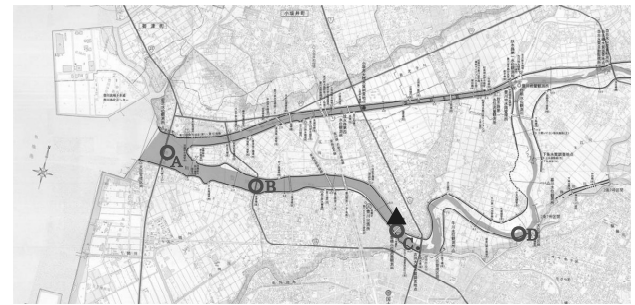
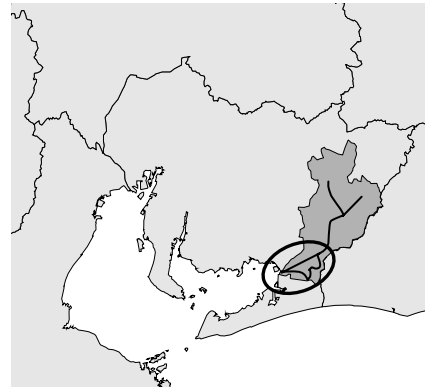


図-1 豊川流域および河口図(水位観測点(▲)と塩分連続観測点(○:測点A~D))

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、河道に浸入した塩水の「経過時間」が強く規定していると考えられる。このように考えると、豊川河口域のような条件下の河川汽水域において、本モデルを適用することで、塩水の挙動を詳細に知ることが、環境保全上意義がある。

(3) モデル計算条件

a) 地形条件

汽水域における潮汐を正確に再現することと、今後の発展性を考慮して、計算領域は、伊勢湾、三河湾、そして豊川汽水域を含めた範囲を対象としている。伊勢湾、三河湾の地形条件の作成には、海上保安庁発行の海図を利用した。また、豊川汽水域の地形条件は、豊川河道の横断測量結果(国土交通省豊橋河川事務所)および2007年度に(独)土木研究所により実施された河口域の深浅測量結果をもとに作成した。

b) 格子条件

計算格子は、鉛直方向に5層(σ 座標)、伊勢湾および三河湾の中央部から知多半島側を水平方向に500m×500mに区分し、残る三河湾の渥美半島側から豊川河口部にかけては段階的に格子サイズを小さくし、最小50m×50m格子となる不等間隔格子とした。なお、豊川河道内

は50m×50mで区分した。

c) 河川流量条件

モデルで淡水供給源として設定した河川は、豊川、矢作川、庄内川、木曽川、長良川、鈴鹿川、雲出川、櫛田川、宮川の9河川であり、各河川流量は国土交通省が水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) で公開している値を使用した。

d) 気象条件

モデルで設定した気象条件は、気温、風向・風速、降水量は豊橋観測所、湿度、全天日射量、雲量は名古屋測候所で観測された結果を使用した。

e) 水温、塩分条件

(外海条件)

伊勢湾湾口部から流入する外海水の水温、塩分条件は、愛知県水産試験場が毎月実施している沿岸定線調査で実施された調査結果を収集して、設定した。

(河川水温)

海域に流入する河川水温は、過去10カ年に各河川で実施された公共用水域水質調査結果の水温と気温の関係による回帰式を求めて設定した。

f) 潮位条件

伊勢湾、三河湾内の海水流動の主要な駆動力となる伊勢湾湾口部の潮位条件は、海上保安庁により整理されている三重県矢と愛知県赤羽根の潮汐調和定数 (K_2, M_2, S_2 : 半日周期成分, O_1, P_1, K_1 : 1日周期成分, SA : 年周期成分) を設定した。

g) 検証計算

土木研究所により豊川汽水域で塩分の連続観測が実施された2007年5月の1ヶ月間を対象に、上記の諸条件に基づき、計算モデル自体の精度検証を行った。

h) 経過時間及び残留時間の集計

経過時間および残留時間の集計に際しては、集計の対象とする領域（河道領域）を図-2に示した断面を最下流端として設定した。すなわち河道に浸入した塩分の経過時間を集計する場合には、この断面を上流側に向けて流入する時点を記録することで塩分を分画して計算を進める。また残留時間の集計の際には、この断面より上流側で、ある時点において存在する塩分を分画して計算を進める。

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干潮時に下流へ一旦流れ出た塩分のうちいくつ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多い。そこで図-2に示すようにケース1～4と示された箇所を断面を設けて、それぞれのケース毎に示された箇所の断面と河道領域の最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

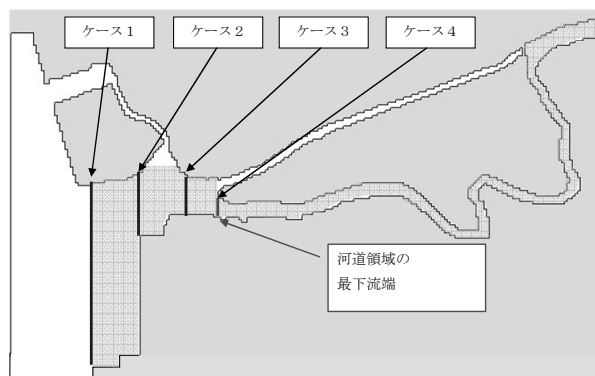


図-2 経過時間及び残留時間の集計領域

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。例えば、ケース1であれば、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で、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ことになる。ケース4の場合は、河道領域から流出した塩水は、速やかに湾内の海水により希釈されてこれと同様の水質に変化すると考えていることになる。ケース2、3はこれらの中である。

これら4ケースの集計方法で、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手法でモデル計算を行った。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1/21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。

3. 結果

(1) 水位検証結果

実測水位（図-1中▲地点で測定）と計算結果水位の比較結果を、図-3に示す。両者は良好な一致を示しており、水量のフラックスが精度高く再現されている。

(2) 塩分濃度検証結果

塩分の実測値（図-1中地点A～Dで測定）と計算結果の比較を図-4に示す。計算結果は、測点Aおよび測点Bで実測値と同程度の濃度で変化していた。しかし、上流側に位置する測点Cの計算結果は、実測値と同様の変動傾向を示したものの、約5～10psu低い値で変動する結果となった。また、測点Dの計算結果は、表層は実測値と同様に低濃度で推移したが、河床の微地形を計算格子で再現しきれなかったためか、底層で生じた5月22日以降の濃度上昇は再現できなかった。

(3) 経過時間算定結果

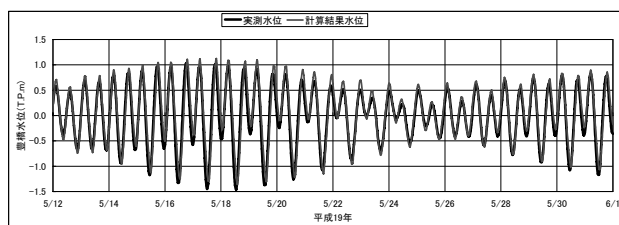


図-3 豊橋水位の実測値と計算値との比較

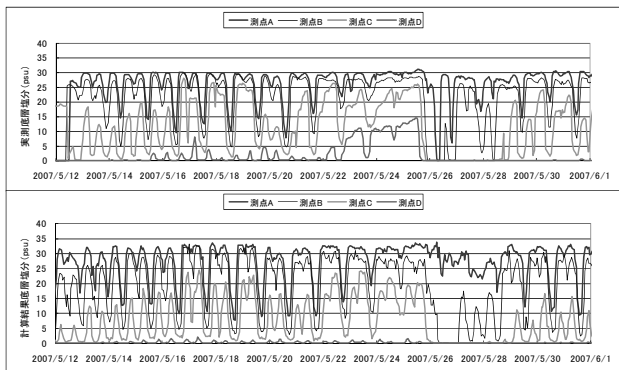


図-4 塩分濃度の実測値(上段)と計算値(下段)の比較

一例として2007年1月23日（大潮）の0時における底層塩分濃度の縦断方向分布と、異なる経過時間を持ちこの塩分を構成している各分画毎の占有率（存在割合）の縦断分布を示す。河口に近い地点ほど当日に流入した塩水の存在割合が高く、上流ほど浸入からの経過時間が長い塩水の存在割合が高くなる結果となっている。

図-5に示した時刻における河道内塩分濃度と平均経過時間算定結果の縦断方向コンターを図-6に示す。図-5同様に上流ほど平均経過時間が長い塩水が多い傾向が見て取れる。水深方向を見ると、河口からの距離が同じ場所で比較すると底層よりもむしろ表層の方が塩分濃度は薄いものの経過時間は長い傾向が見られる。

(4) 残留時間算定結果

2007年1月の大潮，中潮，小潮の3時点における所定の時刻に河道内に存在した塩分が，その後の時間経過と共にどれだけの割合が残留しているかについて計算した例を図-7に示す。バッファー領域を大きくしたケースほど潮汐に伴う塩分残存率が大きく変化すると共に，残留時間も長期化する傾向が見られる。ケース1の変化パターンを見るとバッファー領域に一旦出るものの再度満潮時に河道に戻る塩分割合が相当存在していることが分かる。隣り合う残留率の高い値のピークの差に相当する割合の塩分がこの間に湾へ流出したと考えて，この塩分割合と流出が終わるまでの時刻までの経過時間の積をとり，これらの値を総和すれば，平均残留時間を得ることが出来る。ケース1の大潮時について試算した結果約1日となった。同条件でタイダルプリズム法で計算した場合，式(2)中の $b=0.5$ で同程度のFlushing Timeが得られた。図-7の残留率変動からも一旦バッファー域に流出したうちの50%程度が再度流入している結果となっている。

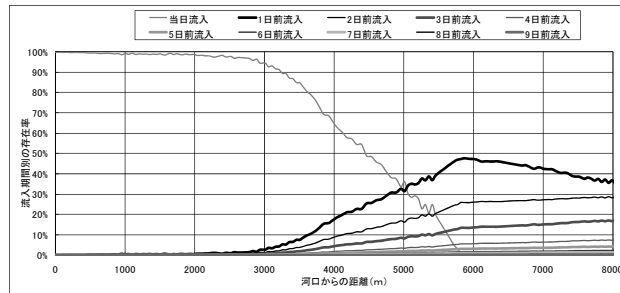
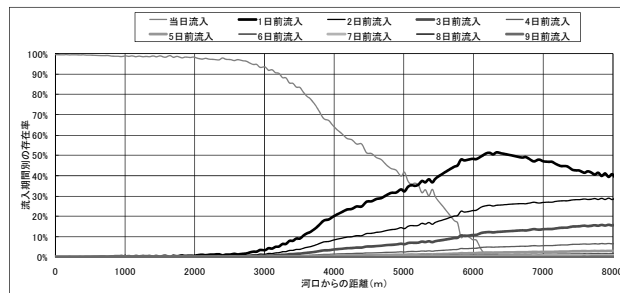
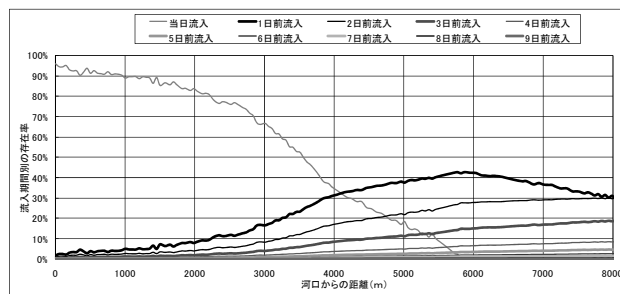
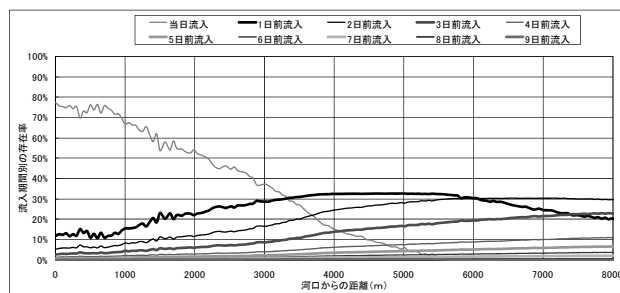
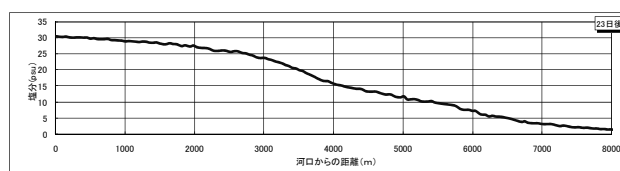


図-5 総塩分濃度および塩水の経過時間別存在割合の縦断分布（上から総塩分濃度，ケース1，2，3，4）

4. 考察とまとめ

今回開発したモデルによって，河川汽水域における塩分の滞留時間に関する定量的評価が可能となった。すなわち，河口から浸入した塩分がどの程度の時間を経て河川汽水域内に分布しているのか（経過時間の空間分布），また河川汽水域内の任意の地点において現在存在する塩分がどの程度の時間にわたって河川汽水域内に残留するのか（残留時間の空間分布）を知ることが可能となった。

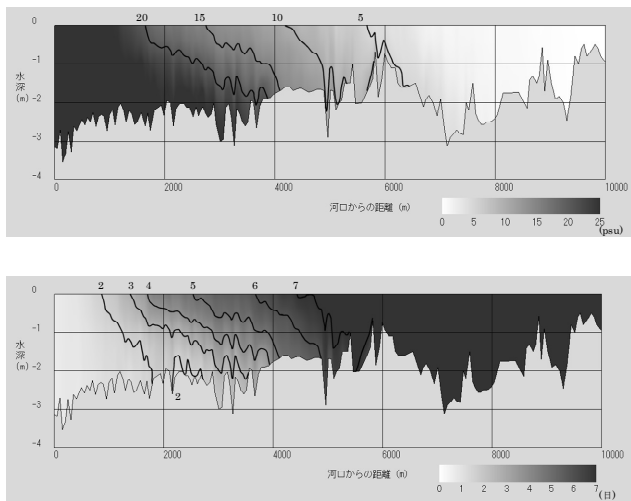


図-6 塩分濃度 (PSU) と塩水の平均経過時間(日)のコンター

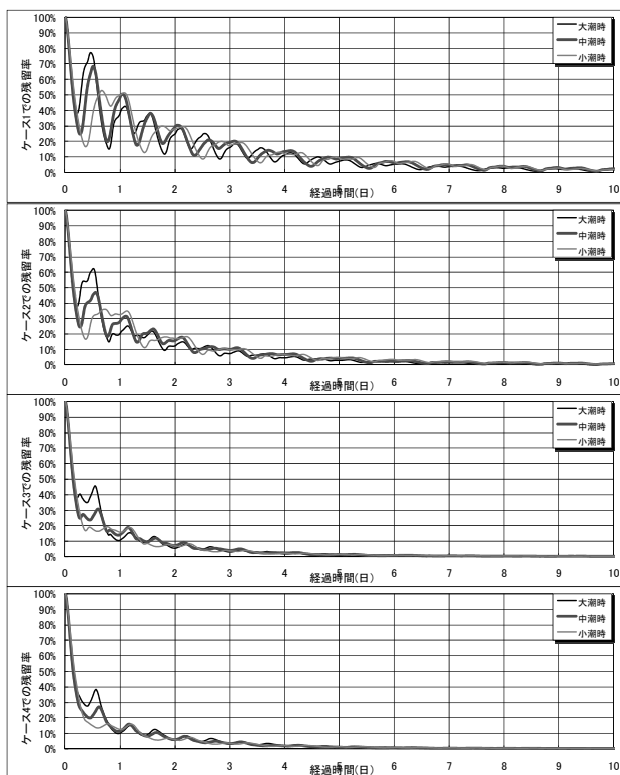


図-7 塩水の残留率の時間変化 (上からケース 1, 2, 3, 4)

河川汽水域における塩分の滞留は複雑な流動を反映して、空間的にも時間的にも不均一性の高い現象であることが示された(図-5~7)。また図-6が示唆するように河川汽水域に浸入してからの経過時間が長くなると、淡水との混合を長く経験していることになるので塩分濃度自体は減少する傾向にあることから、貧酸素水塊発生のリスクについて考えると、経過時間と塩分濃度の両者について複合的に検討する必要があることが分かった。今回開発したモデルによる計算時間は富栄養化関連の水質項目の計算に比較して短いこと、また海由来の塩分の挙動を経過時間および残留時間という2つの視点から評価できることから、例えば河川汽水域における貧酸素水塊発生やその長期化が潜在的に高い確率で起こる場所の抽

出や、河川流量や河道形状、構造物設置などの改変が生じる場合に、そのような場所の変化を評価することに利用できる。今回の計算でもバッファ域を大きくしたケースでは、塩分がより長く滞留する結果が得られたが(図-5, 7)、これは河口を広げた場合に、河口汽水域全体に塩水が滞留しやすくなることを示唆している。

また、今後潮汐、河川流、河道形状を種々に変化させて経過時間や残留時間の変化を整理することで、タイダルプリズム法のような簡便な指標を用いる際に問題となる再帰係数 b (式(2))の設定方針を提案できる可能性がある。これが可能となれば、複雑な計算をせずに河川汽水域における塩水滞留時間の簡易な比較も可能となると考えられ、本モデルと併用することで、今後河川汽水域の環境類型化を行う際の有力なツールとなると考えられる。通常のモデル同様、解析結果の信頼性は水質変化の再現精度に支配されるが、海水の滞留時間を明示的に解析できる点は、本モデルの有利な特徴である。

参考文献

- 1) 楠田哲也, 山本晃一(監修), 財団法人河川環境管理財団 編: 河川汽水域, 技法堂出版, 2008.
- 2) Vollenweider, R.A.: Advances in defining critical loading levels of phosphorus in lake eutrophication, Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 33, pp. 53-83, 1976.
- 3) 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 transport time scales, Limnol. Oceanogr., 47(5), pp. 1545-1553, 2002.
- 4) 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.
- 5) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第182号, pp.1-109, 1991.
- 6) Dyer, K. R.: *Estuaries: A physical introduction*, 2nd ed., John Wiley, 1973.
- 7) Zimmerman, J.T.F.: Estuarine residence times, In B. Kjerfve [ed.], *Hydrodynamics of Estuaries*, V.1, pp. 75-84, CRC Press, 1988.
- 8) Oliveira, A. and Baptista, A.M.: Diagnostic modeling of residence times in estuaries, Water Resources Research, v.33, n.8, pp. 1935-1946, 1997.
- 9) 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.
- 10) Blumberg, A. F. and Goodrich, D. M.: Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay, Estuaries, 13, pp. 236-249, 1990.
- 11) 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.

(2010. 4. 8受付)