

伊勢湾における数値計算手法を用いた外洋水と河川水の年齢の把握

東京都市大学 学生会員 ○池田 香澄

東京都市大学 正会員 田中 陽二

1. 序論

伊勢湾は、かつて多くの生物種を有する美しい環境の海であった。近年、自然海岸の埋め立て等により沿岸海域の環境が破壊され、赤潮や貧酸素化といった水質問題が発生している。伊勢湾では、以前の環境を取り戻す様々な施策が行われてきたが、依然として漁業被害等が発生している。

伊勢湾は特に閉鎖性の強い海域である。その地理的特性から海水交換の能力は低く、河川流入による栄養塩負荷の影響を受けやすい。水質問題と海水交換との関係は密接であるが、今日においても未解明な点は多く存在しており、これらを定量的に把握することは環境改善の面で重要である。

既往の研究によると、海水交換能力の把握には数値モデルによる解析が有効¹⁾だと述べられており、海水交換能力の有用な指標として滞留時間や水塊の年齢²⁾が挙げられている。これらの値は、小さいほど水が湾外へ早く押し出されることを意味し、海水交換の能力が高いことになる。滞留時間や水塊の年齢を用いた研究¹⁾³⁾から、滞留時間を連続した時間で算出することが困難であるのに対し、年齢は連続して算出することは容易であることも見つけられた。したがって、水質問題と海水交換との関連性を今後解明するに当たって、年齢の把握は必要となりうる。

本研究では、伊勢湾における海水交換の能力を年齢という指標を用いて解析することを目的とした。

2. 研究方法

(1) 計算方法

本研究では数値モデル STOC-LT（別称：伊勢湾シミュレーター）⁴⁾⁵⁾を用いる。本モデルを用いて伊勢

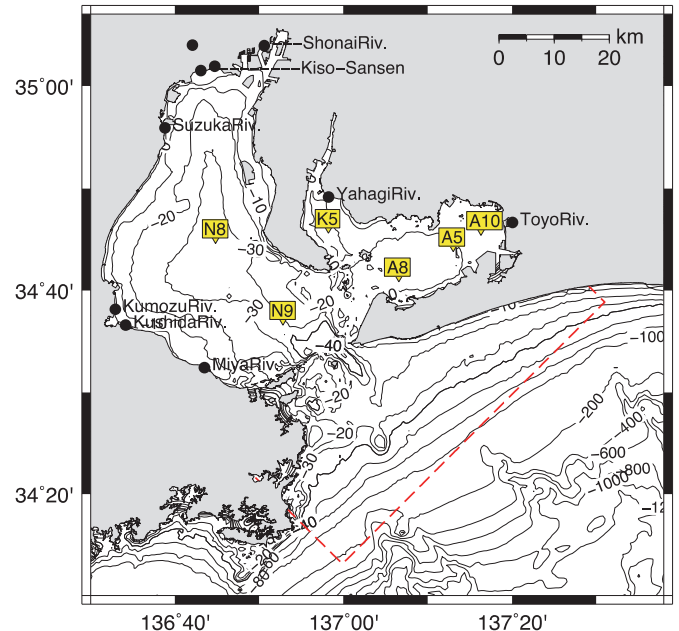


図-1 計算領域と観測地点

湾内の長期的な水質再現計算を行い、再現性について検証を行う。また、河川水や外洋水といった由来の異なる水塊に分け、それぞれの年齢を算出し、結果を考察することで本研究を進める。

本研究における計算領域は、三河湾を含む伊勢湾全域であり、計算に与えた条件は次の表に示す通りである（図-1、表-1）。

(2) 年齢の定義

年齢とは、「ある時刻に流入した水塊が対象領域内で経過した時間」⁶⁾を指す。領域内での対象の水塊*i*における年齢濃度 α_i の時間変化は、移流拡散方程式を解くことにより以下の式(1)で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_i + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha_i) = \nabla \cdot (\kappa \nabla \alpha_i) + C_i \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ ：水平方向の流速、 κ ：拡散係数、 C_i ：全海水に対する水塊*i*の濃度である。また、水塊*i*に

キーワード：年齢、海水交換、伊勢湾

連絡先：〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 E-mail: tanakay@tcu.ac.jp

表-1 水質再現の計算条件

項目		設定方法
計算期間		2010 年 1 月 1 日～12 月 31 日
計算領域	格子	水平方向:800m 正方格子(北へ 45°傾けた方向, 図-1)
		鉛直方向:全 28 層(5m,1m,0m,-1m,-2m,-3m,-4m,-5m,-7m,-9m,-11m...)
河川	流入河川数	一級河川:10 河川, 中小河川:38 河川
	流量	国交省 水文水質データベース ⁷⁾ より水位データから算出
	水温	国交省 水文水質データベース ⁷⁾ より観測所のデータを与えた
	栄養塩	河川流量から算出
開境界	潮位	主要 14 分潮を与えた
	水温・塩分	愛知県水産試験場 定線観測データ ⁸⁾ を与えた
気象		気象庁 ⁹⁾ の観測値を一時間毎に与えた

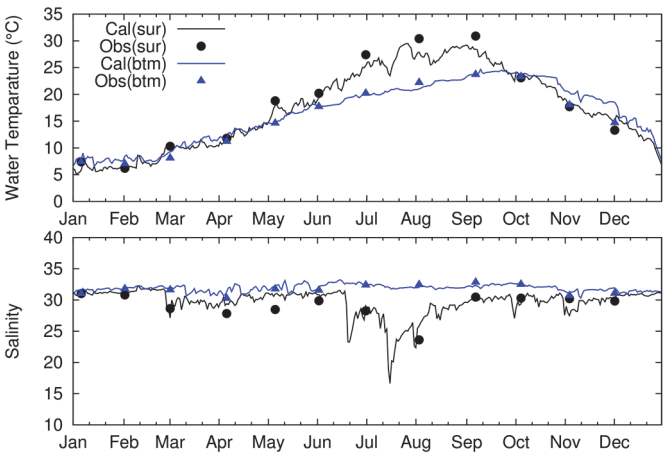


図-2 A5 地点での計算値と観測値の時系列変化(上段:水温, 下段:塩分)

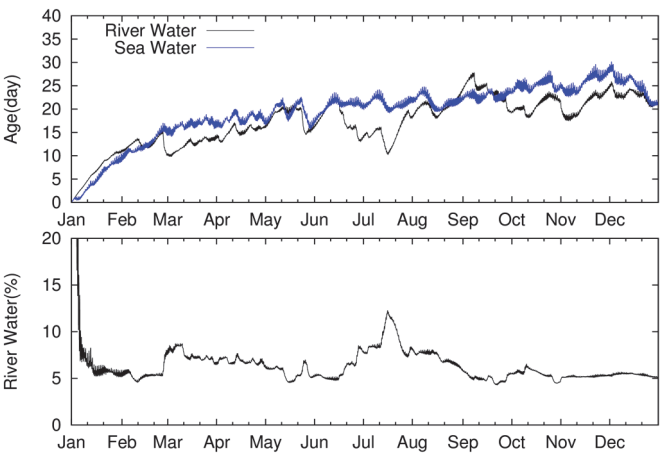


図-3 平均年齢(上段)および河川水の染料濃度(下段)の時系列変化

おける年齢 A_i は以下の式(2)で算出される.

$$A_i = \frac{\alpha_i}{C_i}$$

(2)

3. 結果

(1) 伊勢湾シミュレーターの再現性検証

伊勢湾シミュレーターを用いた水質再現の精度を検証するため、観測値を用いて比較を行った。検証には、愛知県公共用水域水質調査¹⁰⁾による現地の観測値を使用し、計算値と観測値を比較した。計算値と観測値の比較として、A5 地点での水温および塩分の時系列変化を一例として示す(図-2)。表層・底層

の全計算期間において、観測値と計算値には大きな差は見られなかった。よって、今回の計算条件での水質再現の計算結果には概ね良好な再現性があることが示された。

(2) 水塊の年齢の時系列変化

式(1)、式(2)を用いて対象の水塊(河川水、外洋水)ごとに平均年齢を算出した(図-3)。年齢の計算が安定するまでに、おおよそ3~4ヶ月を要している。これは田中¹⁾の研究報告においても、安定に要した期間はほぼ同程度であった。

河川水の平均年齢は15日~20日を推移しており、外洋水の平均年齢は20日前後を推移していた。この

結果は、田中¹⁾の研究報告にあった平均滞留時間（河川水 33.7 日、外洋水 38.7 日）よりも短い。この理由としては算出方法の違いによるものだと考えられた。具体的には、田中の研究では水塊が流出するまでに必要とする時間の平均値であるのに対し、本研究ではその時点における全体の経過時間の平均値を算出しているためと推測される。

7 月中旬において、河川水の平均年齢は急速に若くなっていた。全海水に対する河川水濃度が同時期に特出して大きくなっており、河川からの大規模な出水があったと考えられる。

4. 考察

(1) 河川水の分布の特徴

年齢および染料濃度の水平分布を水塊別にして図に示す（図-4）。伊勢湾表層では河川水が多く分布しており、若い年齢だけではなく 20 日以上の年齢も見られた。特に伊勢湾湾奥部から三重県沿岸にかけて染料濃度が高かった。三河湾表層においては河川水の染料濃度は低く、伊勢湾より 10 日ほど大きい年齢の水塊がよく見られた。これは、流入した河川水の多くは三重県沿岸を流れ、徐々に外洋水に薄められて移流していくため、三河湾では年齢が高くなったと考えられた。

伊勢湾内の水深 20m 層では、河川水の染料濃度はほとんど存在しておらず、三河湾湾口付近において年齢 10 日未満の河川水が比較的多く見られ、伊勢湾湾奥部の一部では 45 日を超える水塊が見られた。これは、密度の小さい河川水が密度成層よりも上層を移流し、三河湾湾口付近で河川水が潜り込んだことにより、若い年齢が中層に流入したためだと考えられる。よって、伊勢湾内で大きく鉛直混合が行われているのは、三河湾湾口付近であると推測された。

(2) 外洋水の分布の特徴

外洋水の年齢に関して、伊勢湾中層においては比較的若い年齢が見られる一方、伊勢湾表層では 30 日前後の年齢がよく見られた。伊勢湾表層での外洋水

の染料濃度は 0.8~0.9 といった値を推移しているのに対し、伊勢湾中層では常に 1 に近い値を維持していた。よって、伊勢湾における流入水に占める割合として、中層から流入する外洋水が卓越していることが示された。

流入する外洋水は伊良子水道の東半分程度を入り口とし、約 10 日をかけて伊勢湾中央部に向かって直線的に移流していく様子が多く見られた。伊勢湾湾奥部の手前にて、年齢の等値線の間隔が狭まっており、このライン以北の外洋水は 40 日を超える年齢が多く移流してくる傾向も見られた。

三河湾内では、外洋水の染料濃度が高く、年齢も高いことから、外洋水が三河湾内の海水を支配している可能性がある。また外洋水の流入経路としては、湾口付近の鉛直混合により三河湾底層に近い水深から少しずつ流入しているものと見られた。

(3) 伊勢湾内の流動

水深 20m 層の湾奥の西側沿岸域において、河川水でも外洋水でも年齢が 40 日以上となることが多かった。これは一度底層まで沈降した水塊が湧昇流に乗って出現したものであると考えられ、湾奥西側の海水交換が悪いことが示された。

年齢の等値線を若い順に追っていくと、伊勢湾中央部では反時計回りの流動があることも確認された。これは柳ら¹¹⁾の研究結果からも報告されている。特に、伊勢湾中層の湾央部においては、反時計回りの流動が顕著に表れており、渦を形成する様に流れていることがわかった。

表層における平均の年齢は、30~35 日の水塊が多く分布していた。また、水深 20m 層では年齢 5~15 日の水塊が比較的によく分布していた。このことから、河川水の移流ルートとして、伊勢湾内の表層に流入してから短期間で底層付近まで沈降し、再度表層へ浮上している可能性が示唆された。この再浮上するまでに要する時間はおおよそ 30~35 日であることがわかった。

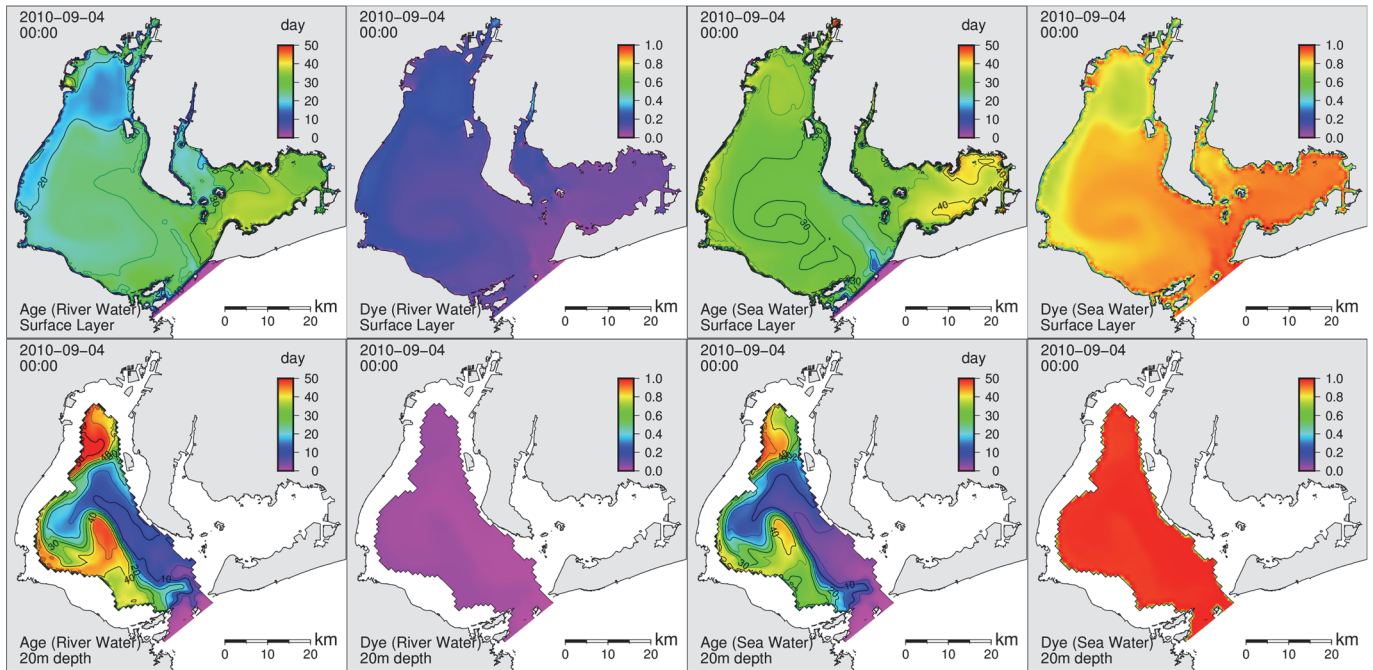


図-4 河川水・外洋水の年齢および染料濃度の水平分布（表層，水深20m）；2010/9/4 0:00 時点

5. 結論

数値モデル STOC-LT を用いた流動再現計算を行い、河川水および外洋水の年齢を算出した。本研究では以下の知見が得られた。

- ① 水塊の年齢を算出し、結果安定するまでに計算開始時から3ヶ月程度を要した。平均年齢は、河川水で15～20日、外洋水で20日前後を推移しており、田中¹⁾の研究によって算出された平均滞留時間よりも短かった。
- ② 水塊別の年齢の算出によって、伊勢湾内において反時計回りに渦を巻きながら流動している結果が得られた。
- ③ 外洋水においても河川水においても湾内に流入した後、三重県沿岸の湾奥付近において年齢が高くなりやすく、水質問題の発生場所の可能性が高い可能性がある。
- ④ 河川水の移流ルートとして、表層に流入した水塊が、底層に沈降してから表層へ再浮上している可能性があり、再浮上までに約30～35日程度要することがわかった。

参考文献

- 1) 田中陽二 (2013)：閉鎖性内湾における海水交換の季節変化に関する考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, I_1061-I_1065.
- 2) 武岡英隆 (1984)：沿岸海域の海水交換，沿岸海洋研究ノート，Vol.20, pp.169-182.
- 3) T.Fujiwara et al. (2002)：The Role of Circulation in the Development of Hypoxia in Ise Bay, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.54, pp.19-31.
- 4) 田中陽二・鈴木高二朗 (2010)：密度流・湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について，港湾空港技術研究所報告，Vol.49, No.1, pp.3-25.
- 5) 田中陽二・鈴木高二朗 (2011)：微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築，港湾空港技術研究所報告，vol.50, No.2, pp.42-63.
- 6) 柳哲雄 (2001)：沿岸海洋学〔第2版〕—海の中でのものはどう動くか—，pp.112-120.
- 7) 国土交通省水文水質データベース：<http://www1.river.go.jp>，2014年9月29日閲覧。
- 8) 愛知県水産試験場：<http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/>，2014年9月30日閲覧。
- 9) 国土交通省気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>，2014年10月1日閲覧。
- 10) 愛知県：<http://www.pref.aichi.jp/0000063715.html>，2014年9月29日閲覧。
- 11) 柳哲雄・黒田誠・石丸隆・才野敏郎 (1998)：伊勢湾の夏季の残差流，沿岸海洋研究，第35巻，第2号，pp.185-191.