

伊勢湾における年齢を用いた湾内の海水流動と赤潮の関係性の検討

東京都市大学 学正会員 ○原 貴志

東京都市大学 正会員 田中 陽二

1. 序論

伊勢湾は海水交換能力が悪い閉鎖性内湾である。閉鎖性内湾は汚濁が進行しやすい海域とされており、赤潮や貧酸素水塊の形成、青潮といった水質問題が発生しやすくなっている。これらの水質問題が発生すると、魚介類の斃死を引き起こすため、漁業被害や生態系に悪影響が生じる。伊勢湾では海域の物質循環健全化計画や伊勢湾再生推進会議など国や県、周辺の自治体が海域環境改善の取り組みを行っている。しかし、依然として水質問題が発生している。

既往の研究¹⁾では、海水交換を可視化する指標として年齢と滞留時間²⁾が多く用いられている。田中ら¹⁾は閉鎖性内湾における貧酸素水塊の形成に要する年齢を示し、年齢が水質変化を解析する指標として有用であると評価した。以上より、年齢とクロロフィル-*a*(chl-*a*)の関係から赤潮発生が解析可能であると考えられた。本研究では伊勢湾を対象に、年齢と赤潮の関係性を解析することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 研究手順

本研究は以下の手順で進めた。(1)伊勢湾における水質の再現計算の検証。(2)水質と年齢の関係性を解析。(3)赤潮と年齢の関係性を解析。(1)では比較地点をN-6, N-8, N-9とした。比較地点および計算範囲を図-1に示す。比較要素として、chl-*a*, 全窒素(TN), 全リン(TP)を用いた。(2)では河川水由来および外洋水由来の年齢を算出し、chl-*a*, 溶解無機体窒素(DIN), リン酸態リン(PO₄)と年齢の関係性を確認した。(3)では伊勢湾において赤潮の発生が確認された時期および地域に着目し、年齢を用いて赤潮の発生の要因について解析した。

本研究は数値モデル伊勢湾シミュレーター^{3) 4)}を用いて水質の再現計算および年齢の算出を行った。計算条件を表-1に示す。

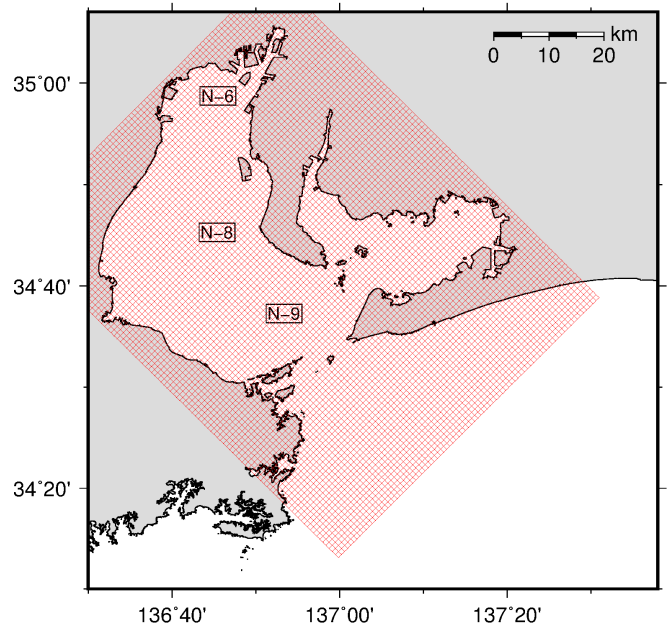


図-1 計算範囲および比較地点

2.2 年齢の定義

年齢とは、ある水塊が領域内に流入してから現在までに経過した時間を示す指標である。図-2に年齢の概念図を示す。年齢は移流拡散方程式を用いることで算出することが可能である。式(1)に水塊*i*の仮想濃度*C_i*を算出する移流拡散方程式を示す。

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

ここで、*C_i* : 水塊の仮想濃度[1/m³]、*u* : 流速[m/s]、*D* : 渦動拡散係数[m²/s]である。式(2)に年齢要素*α_i*を算出する移流拡散方程式を示す。

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (u \alpha_i) = \nabla \cdot (D \nabla \alpha_i) + S_{\alpha_i} \quad (2)$$

ここで、*α_i* : 年齢要素[day/m³]、*S_{α_i}* : 年齢要素*α_i*の増加速度[1/m³]である。年齢要素の増加速度*S_{α_i}*は対象領域内*Ω*で水塊の仮想濃度分増加する。水塊*i*の年齢*α_i*の算出に用いる式を式(3)に示す。

$$a_i = \frac{\alpha_i}{C_i} \quad (3)$$

キーワード 伊勢湾, 数値計算, 海水交換, 年齢, 赤潮

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 E-mail : g1218072@tcu.ac.jp

表-1 伊勢湾シミュレーターの計算条件

項目		設定項目
計算期間		2010年1月1日～2010年12月31日
計算領域	格子	水平方向：400 m 正方格子 鉛直方向：28層(5, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4, -5, -7, -11... [m])
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 ⁵⁾ の水位データより算出
	水温	国交省 水文水質データベース ⁵⁾ より観測所のデータを与えた
	栄養塩	河川流量より算出した
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 ⁶⁾ 定点観測データを与えた
気象		気象庁 ⁷⁾ の観測データを1時間毎に与えた

3. 結果

3.1 再現計算結果の検証

水質項目の再現計算し、観測値と計算値の誤差の修正を行った。再現計算結果の一例としてN-8における計算値と観測値の時系列変化を図-3に示す。

chl-aは3月、5月、7月、8月、11月では観測値と計算結果が近い結果が得られた。それ以外の月では計算結果と観測値の誤差が確認された。TN、TPでは1年を通して計算結果と観測値の誤差が少なく良好な結果が得られた。誤差を確認するため各要素の修正前と修正後で平均二乗誤差(RMSE)を算出した。誤差修正前のRMSEはchl-a = 10.22 µg/L, TN = 0.1815 mg/L, TP = 0.02359 mg/Lである。修正後ではchl-a = 8.292 µg/L, TN = 0.1419 mg/L, TP = 0.01214 mg/Lである。各要素の修正前に対して修正後の方が誤差は少ないことから、再現性が向上したと言える。

3.2 年齢と chl-a の関係

赤潮が発生した2010年8月2日における表層部に着目する。河川水年齢の分布、外洋水年齢の分布、chl-aの分布を図-4に、8月2日に赤潮が発生した地点⁸⁾を図-5に示す。伊勢湾湾奥の名古屋港では底層からの栄養塩の溶出の影響が大きいと推察される。計算結果と実際に赤潮が発生した地域がわずかに異なるため、赤潮判定基準をchl-aが20 µg/L以上として計算結果に着目し考察を行うこととした。図-4より伊勢湾湾奥の名古屋港付近から伊勢湾湾央部にかけて赤潮の地域に着目すると、河川由来の年齢は15日以上、外洋水年齢は40日以上であることが確認された。

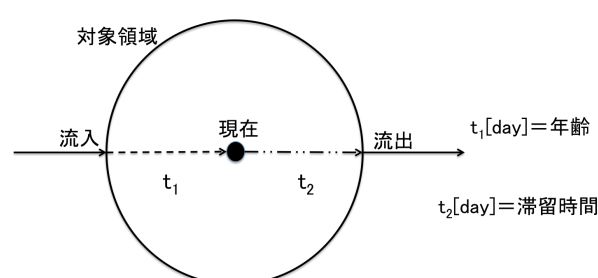
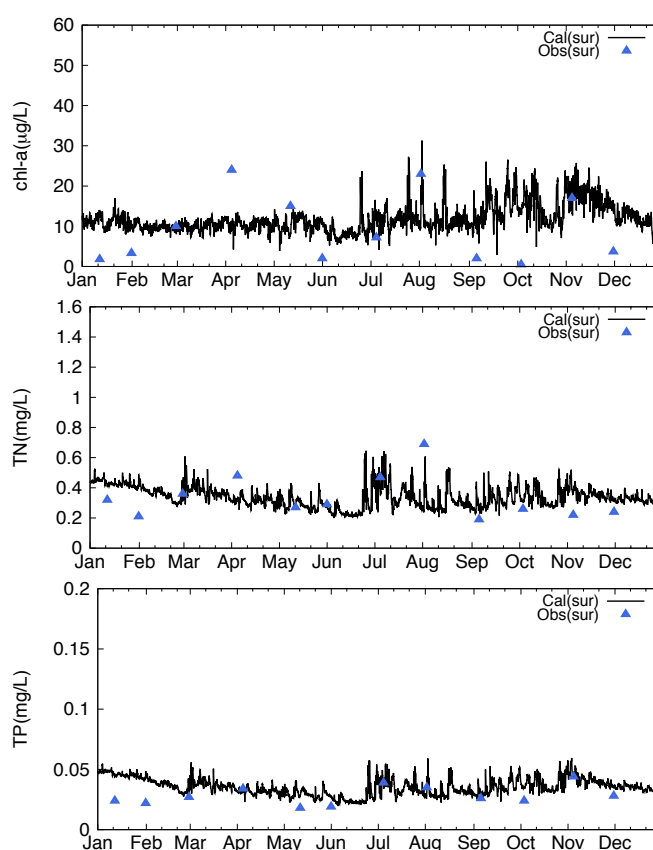
図-2 年齢の概念図²⁾

図-3 N-8における時系列変化（上：chl-a、中：TN、下：TP）

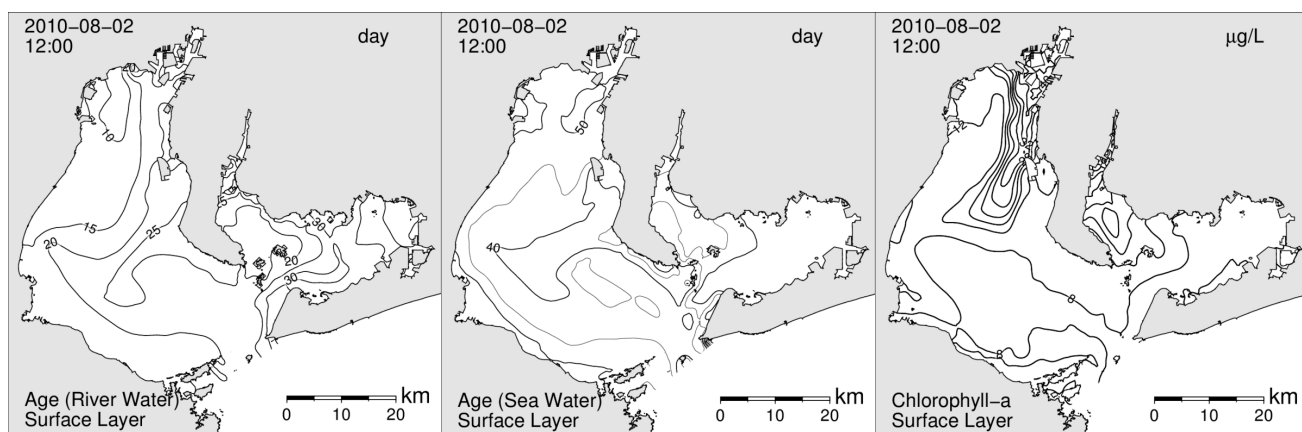


図-4 2010年8月2日における分布（左：河川水年齢，中：外洋水年齢，右：chl-a）

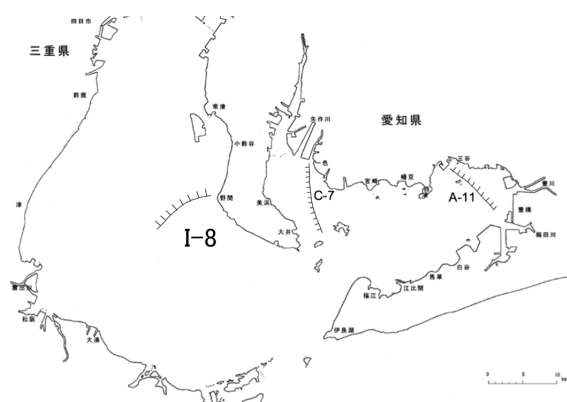


図-5 8月2日の赤潮発生地域(I-8)⁸⁾

4. 考察

4.1 水質と河川水年齢の関係

赤潮が発生した地域の河川水年齢は 20 日程度であることから、8月2日から20日前の7月13日に流入した水塊であると考えられる。図-6に7月13日に流入した水塊における水質の時系列変化を示す。chl-aの時系列変化では、年齢10日程度まで上昇し、その後はほぼ変動しない場合（傾向 1）と、まとまりがなく高い値に分布している場合（傾向 2）が見られた。前者の場合に対応するように DIN, PO₄ は年齢 10 日程度まで減少する傾向が確認できた。河川由来の栄養塩による chl-a の増加は年齢 0 日から 10 日の間で生じたことが示唆された。

4.2 水質と外洋水年齢の関係

赤潮発生地域の外洋水年齢は 40 日程度であることから 40 日遡った 6月23日に流入した水塊に着目する。図-7に6月23日に流入した水塊における水質の時系列変化を示す。外洋から湾内へ流入してか

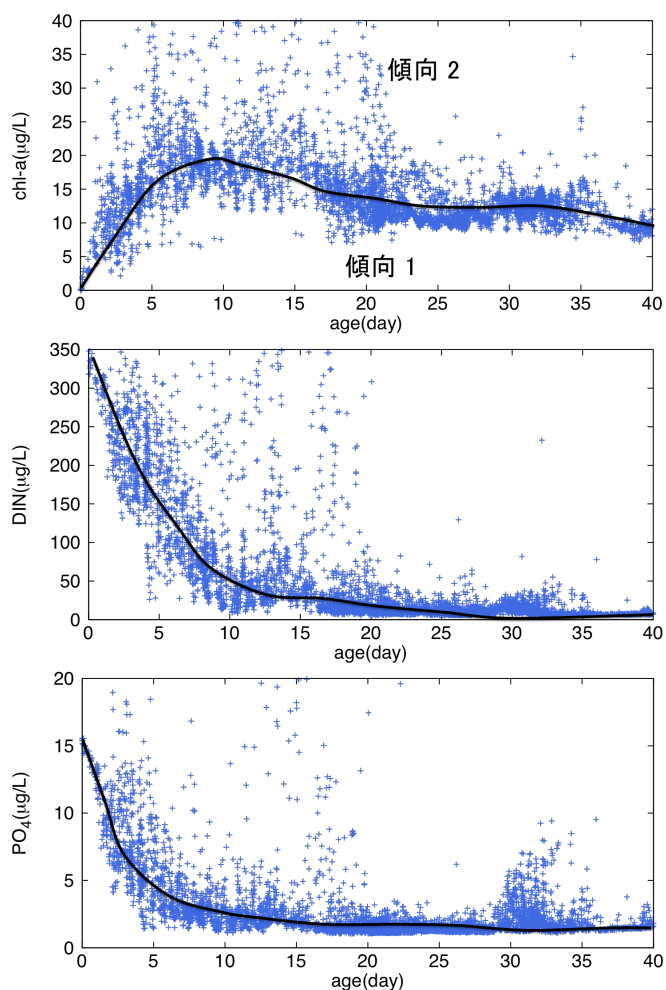


図-6 7月13日に流入した水塊における水質と年齢の相関（上：chl-a，中：DIN，下：PO₄）

ら 30 日程度で表層に湧昇し、年齢 40 日経過後で各要素とも上昇を開始した。要因としては、年齢 40 日程度で名古屋港付近に到達するため、各要素とも値が上昇したと考えられる。

4.3 赤潮と年齢の関係

図-6より赤潮が発生した年齢20日において、chl-a

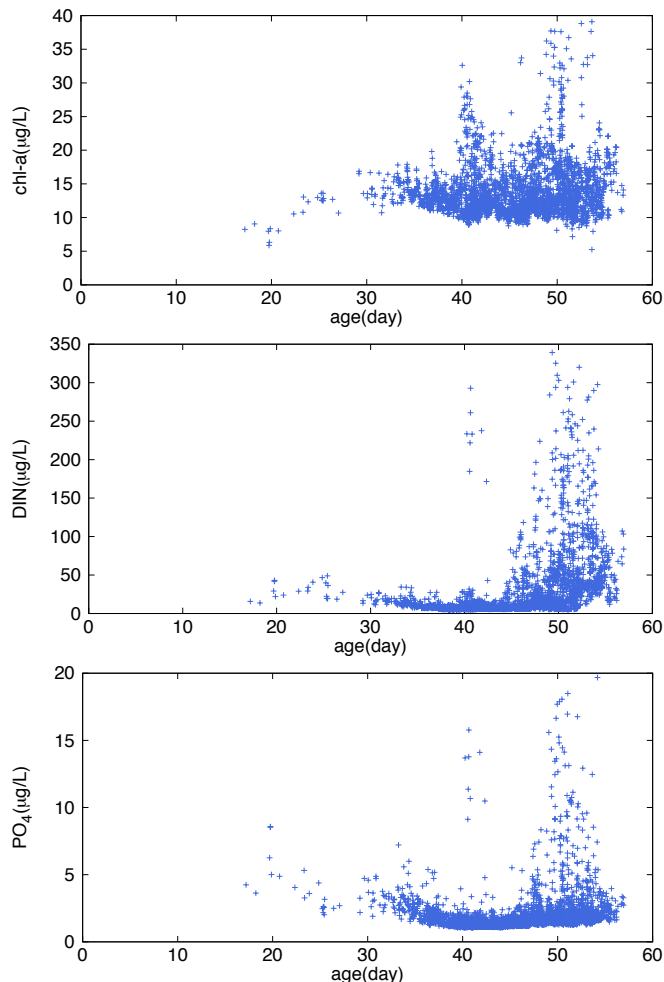


図-7 6月23日に流入した水塊における水質と年齢の相関（上：chl-a，中：DIN，下：PO₄）

が 20 μg/L 以上であるのは傾向 2 の場合である。赤潮発生の要因としては、河川由来の栄養塩が要因ではなく、名古屋港付近で滞留し、増加した chl-a が伊勢湾湾央に流出したためと考えた。

5. 結論

本研究では数値モデル伊勢湾シミュレーターを用いて水質の再現計算を行った。chl-a では誤差は改善されたが、今後には誤差の修正が必要である。TN, TP は良好な再現結果が得られた。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 河川より流入した水塊は年齢 10 日まで chl-a が増加する。
- 2) 外洋由来の水塊は 30 日かけて表層に湧昇し、40 日経過すると栄養塩の底層からの溶出が多い名古屋港付近に到達するため、chl-a や栄養塩が豊富な水塊となる。
- 3) 赤潮の要因は 2 つに場合分けができ、河川由来の栄養塩をもとに chl-a が増加する場合と、名古

屋港に滞留する栄養塩の豊富な水塊が伊勢湾湾央まで流出する場合である。

謝辞

本研究を行うにあたって、東京都市大学大学院池田香澄様より有益なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中陽二・池田香澄(2015)：伊勢湾における数値解析手法を用いた貧酸素水塊と年齢の関係性の把握，土木学会論文誌 B2（海岸工学），Vol.71, No.2, pp.1261-1266.
- 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) 田中陽二・鈴木高二朗(2010)：密度流・優勝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, No1, pp.3-25.
- 4) 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.
- 5) 国土交通省水文水質データベース：<http://www1.river.go.jp>
2015 年 11 月 19 日閲覧
- 6) 愛知県水産試験場：<http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/>
2015 年 11 月 16 日閲覧
- 7) 国土交通省気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
2015 年 11 月 19 日閲覧
- 8) 愛知県：<http://www.pref.aichi.jp>
2015 年 12 月 15 日閲覧
- 9) Fujiwara.T .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.