

伊勢湾の物質循環に関する一考察*

新家 淳治**・西中 隆道**

キーワード ①伊勢湾 ②貧酸素化 ③エスチュアリー循環 ④外洋混合水 ⑤中層進入
⑥物質循環

要 旨

伊勢湾では、春季から夏季において、エスチュアリー循環により外洋水と湾口水の混合水が湾内中層に進入し、下層での貧酸素水塊の発生を助長すると言われている。三重県水産研究所が公表しているデータを用いて、湾奥、湾央および湾口における上層、中層および下層の Chl. *a*、塩分および DO の変化を考察した。春季から夏季において湾央の中層で Chl. *a* 濃度が上層よりも高値である場合が見られ、また、湾口では外洋水が鉛直混合していると推察された。湾内の物質循環については3次元の把握が重要と考えられた。

1. はじめに

日本南岸に面する伊勢湾(三河湾を含まない。)は、水域面積1,738km²、平均水深約20m、海水容積339億 m³の規模を持つわが国最大級の内湾である。湾底の中央域が盆状で、幅約20kmの狭い湾口部に島嶼が存在することから、外海との海水交換が少なく、汚濁物質が蓄積しやすい閉鎖性の海域となっている¹⁾。さらに、伊勢湾の特徴として、木曾川、長良川および揖斐川のいわゆる木曾三川が北部に集中し、その年間の総流入量は湾容積の約6割に達する²⁾。

伊勢湾では水質環境基準を達成することを目標として、水質総量規制により陸域からの汚濁負荷の削減が実施されている。三重県では、化学的酸素要求量(COD)の排出削減が1979年度から実施(第1次総量規制)され、全窒素・全リンの排出削減が1999年度から実施(第5次総量規制)されており、伊勢湾に排出される汚濁負荷量は、2009年度までに、削減開始時実績の51%(COD)、83%(全窒素)、59%(全リン)に削減された³⁾。2012年2

月に第7次総量削減計画が策定され、対策が継続されている。総量規制の効果により、伊勢湾の水質は、削減開始時から比べると規制水質項目の濃度は低下し、改善されてきた。しかし、近年の地先海域、湾央および湾口でのCODの経年変化は横ばいまたは微増傾向である^{1,4,5)}。

また、伊勢湾は平均水深が約20mと浅く、植物プランクトンの死骸などが海底に沈積し、底質の有機汚濁化が進行すると考えられている。底質の有機物が細菌によって分解されることで酸素が消費され、暖候期に海水の温度成層化が進み、下層に貧酸素水塊が形成される。さらに、エスチュアリー循環により湾口水と外洋水の混合水(外洋混合水)が湾内の中層から下層に進入し、進入層の下部で貧酸素水塊の生成が助長されるといわれている^{6,7)}。

筆者らはこれまで、水質汚濁防止法に基づく公共用水域常時監視結果や総量規制の効果を見るために環境省が実施している伊勢湾広域総合水質調査結果を用いて伊勢湾の水質を解析してきた^{4,5)}。

* A Study on the Material Cycle in Ise Bay

** Junji NINOMI and Takamichi NISHINAKA (三重県保健環境研究所) Mie Prefecture Health and Environment Research Institute

これらの調査は、上層調査が主(伊勢湾広域総合水質調査では下層も調査)であるため、伊勢湾の水質の鉛直方向の変化は把握していない。そこで、本研究は、三重県水産研究所が公表している浅海定線調査結果の海深別データを用いて、外洋水の湾内進入に関連し湾内での物質循環について、鉛直方向の変化も加味して考察したので報告する。

2. 使用データ

- 1) 三重県水産研究所が公表している伊勢湾浅海定線調査結果を利用した。
- 2) 対象とした観測点は図1に示す St. 2 (湾奥), St. 5 (湾奥と湾央の間), St. 10 (湾央), St. 11 (湾央), St. 15 (湾央と湾口の間) および St. 18 (湾口) である。
- 3) それぞれの地点において、水深 2 m (上層), 同 10 m (中層) および 同 (b-1) m (下層) (b: bottom の意) のデータを用いた。
- 4) 解析に用いたデータ期間、水質項目「クロロフィル *a* (Chl.*a*), 塩分および溶存酸素 (DO)」および評価に用いたデータ種を表1に、また、それぞれの観測点での平均海深を表2に示した。

3. 結果

図2に各観測点での Chl.*a*, 塩分および DO の月別変化を示した。本図から、各観測点での変化は次のとおりであった。

(1) St. 2 (湾奥)

保存的变化項目である塩分の月別平均値の範囲は、上層で 22.8~30.9 (PSU), 中層で 31.7~32.5 (同), 下層で 32.7~33.0 (同) であった。

Chl.*a* の月別平均値の範囲は、上層で 1.0~8.1 (μgL^{-1}), 中層で 0.29~3.1 (同), 下層で 0.20~4.1 (同) であった。

DO の月別平均値の範囲は、上層で 7.2~11 (mgL^{-1}), 中層で 2.6~8.6 (同), 下層で 1.0~7.6 (同) であった。下層で貧酸素化 (DO 2 mg/L 未満) が 9 月に認められた。

(2) St. 5 (湾奥と湾央の間)

塩分の月別平均値の範囲は、上層で 22.3~32.1 (PSU), 中層で 30.8~32.2 (同), 下層で 32.3~

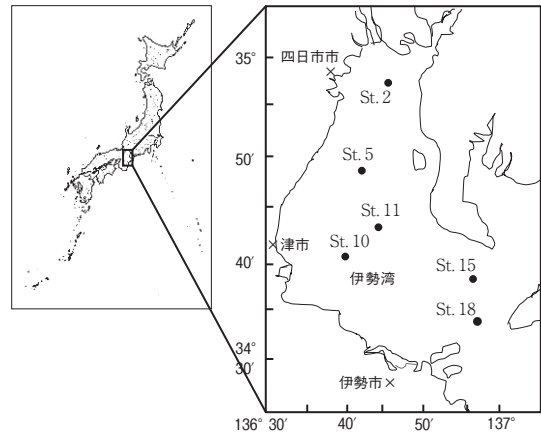


図1 伊勢湾浅海定線調査における対象観測点

表1 伊勢湾浅海定線観測結果からの使用データ

| データ期間 | 水質項目 | データ種 |
|------------|------------------------|----------------|
| 2011~2013年 | Chl. <i>a</i> , 塩分, DO | 月別および深度別の期間平均値 |

表2 伊勢湾浅海定線観測中の対象観測点の平均海深 (m)

| St. 2 | St. 5 | St. 10 | St. 11 | St. 15 | St. 18 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 24 | 25 | 32 | 36 | 21 | 57 |

33.0 (同) であった。

Chl.*a* の月別平均値の範囲は、上層で 0.44~12 (μgL^{-1}), 中層で 0.51~5.9 (同), 下層で 0.13~10 (同) であった。

DO の月別平均値の範囲は、上層で 6.5~11 (mgL^{-1}), 中層で 4.3~9.5 (同), 下層で 1.2~7.7 (同) であった。下層で夏~秋季 (7~10月) に貧酸素化が認められた。

(3) St. 10 (湾央)

塩分の月別平均値の範囲は、上層で 24.4~32.4 (PSU), 中層で 30.2~32.6 (同), 下層で 32.5~33.3 (同) であった。

Chl.*a* の月別平均値の範囲は、上層で 0.55~4.1 (μgL^{-1}), 中層で 0.63~2.8 (同), 下層で 0.15~1.8 (同) であった。

DO の月別平均値の範囲は、上層で 6.8~10 (mgL^{-1}), 中層で 4.9~9.7 (同), 下層で 0.23~8.4 (同) であった。下層で夏~秋季 (7~10月) に貧酸素化が認められた。

(4) St. 11 (湾央)

塩分の月別平均値の範囲は、上層で 24.6~32.3

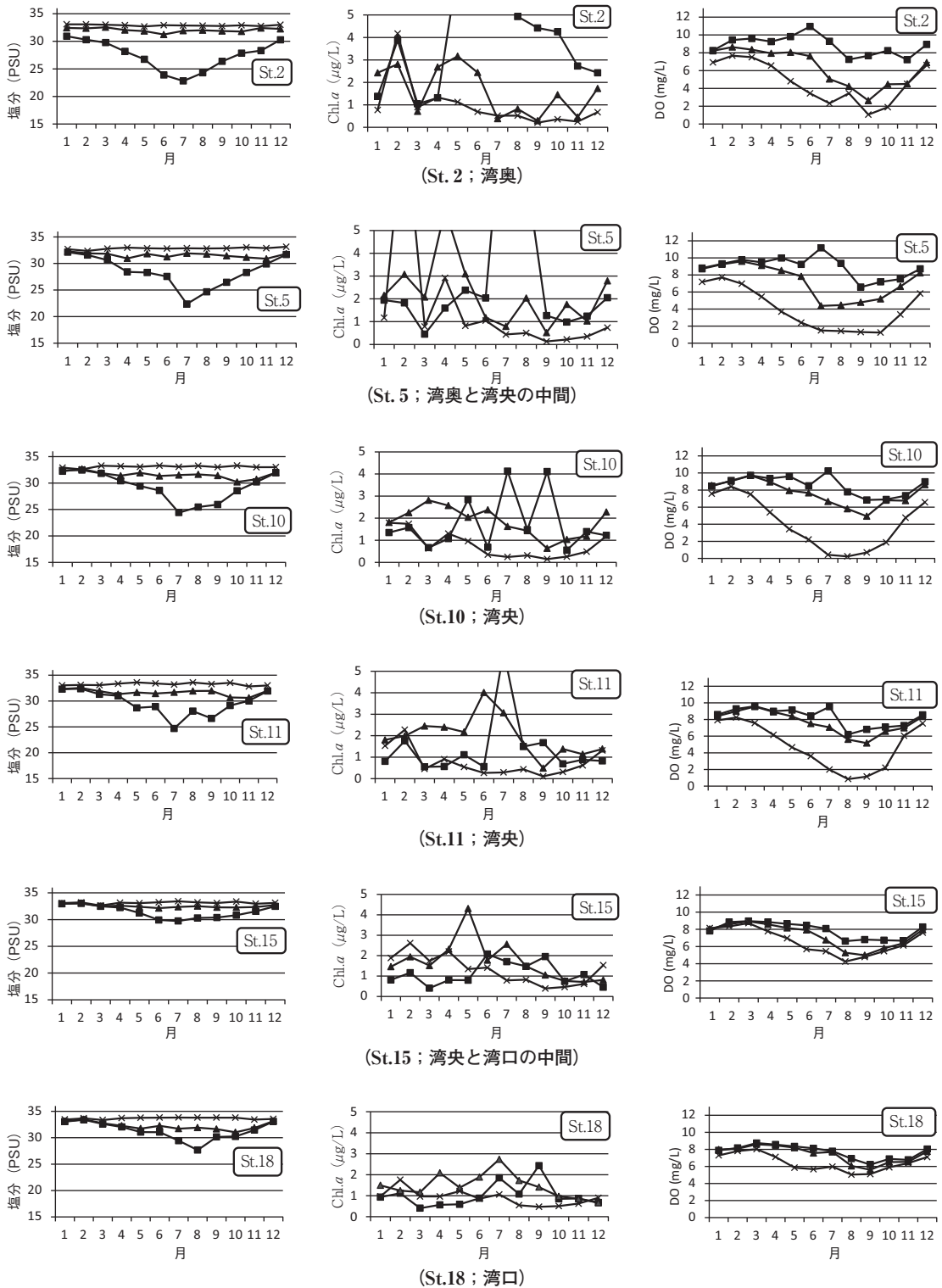


図2 伊勢湾浅海定線調査における対象観測点の塩分, Chl.a および DO の月変化
(上層: ■, 中層: ▲, 下層: ×)

(PSU), 中層で30.6~32.5(同), 下層で32.8~33.5(同)であった。

Chl.*a*の月別平均値の範囲は, 上層で0.54~5.9(μgL^{-1}), 中層で0.48~4.0(同), 下層で0.10~2.2(同)であった。

DOの月別平均値の範囲は, 上層で6.2~9.5(mgL^{-1}), 中層で5.1~9.5(同), 下層で0.84~8.2(同)であった。下層で夏季(7~9月)に貧酸素化が認められた。

(5) St. 15(湾央と湾口の間)

塩分の月別平均値の範囲は, 上層で29.7~33.0(PSU), 中層で32.1~33.0(同), 下層で32.6~33.4(同)であった。

Chl.*a*の月別平均値の範囲は, 上層で0.40~2.0(μgL^{-1}), 中層で0.71~4.3(同), 下層で0.39~2.6(同)であった。

DOの月別平均値の範囲は, 上層で6.6~8.9(mgL^{-1}), 中層で4.9~8.9(同), 下層で4.2~8.7(同)であった。下層での貧酸素化は認められなかった。

(6) St. 18(湾口)

塩分の月別平均値の範囲は, 上層で27.6~33.3(PSU), 中層で31.0~33.4(同), 下層で33.3~33.8(同)であった。

Chl.*a*の月別平均値の範囲は, 上層で0.67~2.4(μgL^{-1}), 中層で0.66~2.7(同), 下層で0.47~1.7(同)であった。

DOの月別平均値の範囲は, 上層で6.2~8.7(mgL^{-1}), 中層で5.6~8.6(同), 下層で5.0~8.0(同)であった。下層での貧酸素化は認められなかった。

4. 考 察

図2において, St. 2で春~夏~秋季(3~11月)の上層では保存的変化項目である塩分が22.8~29.7(PSU)と他層に比べ著しく低値であり, 河川水の影響を強く受けていると考えられる。同様に, St. 5でも上層で塩分が春~夏~秋季(4~10月)では22.3~28.4(PSU)と他層に比べ著しく低値であり, 河川水の影響を強く受けていると考えられる。St. 10において, 夏季(5~9月)の上層では塩分が24.4~29.4(PSU)と他層に比べ低値であり, 河川水の影響が及んでいると考

えられる。St. 11においても夏季(5~9月)の上層では塩分が24.6~28.9(PSU)と, St. 10と同様に他層に比べ低値であり, 河川水の影響が及んでいると考えられる。St. 15では夏季(6~9月)に上層の塩分が29.7~30.3(PSU)と他層に比べ少し低値であったが, St. 2~St. 11に比べ通年での上・中・下層の深度別差異は少なかった。また, St. 18においても夏季(7および8月)に上層の塩分が29.4および27.6(PSU)と, St. 15と同様に他層に比べ少し低値であったが, St. 2~St. 11に比べ通年での上・中・下層の深度別差異は少なかった。

笠井ら⁶⁾によれば, 伊勢湾は湾口部の伊良湖水道の地形が複雑で狭いため潮流が速く, 海水は混合される。これがエスチュアリー循環と相まって, 上層の軽い海水と下層から流入しようとする重い外洋水が混合しながら進入するとされている。今回, St. 15およびSt. 18では通年で上層から下層まで塩分濃度差が少ないことは, 海水の鉛直混合が行われているという上記笠井らの報告⁶⁾と調和的である。

図2のChl.*a*について, St. 2において, 春~夏~秋季(5~10月)の上層では4.2~8.1(μgL^{-1})と他層に比べ圧倒的に高値であり, 陸域からの栄養塩供給によるものと推察される。冬季では数値の差はあるものの上・中・下層とも特徴的な差異は無く, すなわち, 深度別による差異は少なく, 温度成層が解消され鉛直混合が起きていると推察される。St. 5のChl.*a*について, 2月では下層が10(μgL^{-1})と他層に比べ圧倒的に高値であった。春季(3~5月)では中層が2.0~5.9(同)と他層に比べ圧倒的に高値であった。夏季(6~9月)では上層が1.2~12(μgL^{-1})と他層に比べ圧倒的に高値であった。これは, 外洋混合水の進入深度について, 冬季は下層進入, 春~夏~秋季においては中層進入とされており⁷⁾, 外洋混合水中のChl.*a*が下層~中層へ進入したと考えられた。St. 10のChl.*a*について, 春季(3~6月)の中層では2.0~2.8, 平均2.4(μgL^{-1})と他層よりも大きく, 7月と9月では両月とも上層が4.1(同)と最も大きかった。秋~冬季(10~2月)では値の差はあるものの上・中・下層とも特徴的な差違はなかった。これは, 春季は外洋混合水が中層に進入しChl.*a*

の中層極大が存在し、夏季は上層の河川水の影響により上層で高値のChl. *a* が出現するものと推察された。秋～冬季では温度成層が解消され鉛直混合が起きていると推察された。St. 11のChl. *a* についても、St. 10と同様に、春季(3～6月)の中層が他層よりも大きく、7月では上層がもっとも大きく、秋～冬季(10～2月)では値の差はあるものの上・中・下層とも特徴的な差違はなかった。春季は外洋混合水が中層に進入しChl. *a* の中層極大が存在し、夏季は上層の河川水の影響により上層で高値のChl. *a* が出現するものと推察された。秋～冬季では温度成層が解消され鉛直混合が起きていると推察された。St. 15のChl. *a* について、中層での5月のみ高値(4.3(μgL^{-1}))であったが、それ以外は通年で大きな深度別差異はなかった。また、St. 18においても通年で大きな深度別差異はなかった。これは、先述した笠井らの報告⁶⁾による外洋水との鉛直混合が通年で生じていたと推察される。

以上のことから、塩分とChl. *a* の変化を見る限り、伊勢湾における河川水の影響は湾央あたりまでと考えられ、陸域からの汚濁負荷影響は湾央付近までと推察された。

図2のDOについて、St. 2で9月に、St. 5および10で夏～秋季(7～10月)に、St. 11で夏季(7～9月)にそれぞれ下層で貧酸素化していた。St. 15および18のDOは湾奥～湾央の地点に比べ通年で深度別差は少なく、下層での貧酸素化もなかった。このことは、湾央付近を中心に下層で夏季に貧酸素化が生じており、湾口付近では塩分やChl. *a* の変化で考察したように通年で鉛直混合が生じているため酸素が下層にまで供給されていると推察される。また、湾口で外洋水と鉛直混合されて下層から栄養塩が供給され、その混合水が湾央に進入するまでの過程で植物プランクトンが生産され、湾央に中層進入すると考えられる。進入水中の植物プランクトンは死骸となって海底へ沈積し、進入水よりも下層の海水は孤立化することにより貧酸素化が助長されると思われる。

筆者はこれまで、三重県による水質汚濁防止法に基づく公共用水域常時監視結果や総量規制の効果を見るために環境省が実施している伊勢湾広域総合水質調査結果を用いて伊勢湾の水質を解析し

てきた^{4,5)}。それによれば、近年、伊勢湾の透明度の経年変化が上昇しているにもかかわらず、地先海域や湾央・湾口で表層のCODの経年変化は横ばいまたは微増^{1,4,5)}であった。これは、粒状CODが減少(透明度上昇)しているにもかかわらず、全CODは横ばいまたは微増ということの意味している。すなわち、溶存態COD(D-COD)が増加していると考えられる。また、藤原⁸⁾も内湾で溶存態有機物が増加していることを述べている。D-CODの供給源としては、外洋水が湾口域から進入する際に、鉛直混合により下層の汚濁成分が上層に供給されること、さらには、この外洋混合水がエスチャリー循環における上層流の補償流として湾央から湾奥の中層～下層に進入することで、下層の貧酸素化した状況での底泥から溶出した汚濁成分を上層へ輸送することが考えられる。

総量規制により伊勢湾への陸域からの汚濁負荷は削減されており、相対的に、上述のような底泥からの汚濁寄与が顕在化してきたものと考えられる。

伊勢湾の水質を改善するためには、上層や下層の平面的な水質状況を把握するだけでなく、上層と下層をつなぐ中間での状況を把握すること、すなわち、水質の状況を水平方向だけでなく鉛直方向にも把握し、物質循環を考察することが重要と考えられる。

今後は、中層～下層に進入する外洋混合水中のChl. *a* の量的評価および上層でのCOD横ばい・微増の原因がD-COD増加であることの検証を行いたい。

5. ま と め

伊勢湾の水質の変化を3次元的に把握する目的で、三重県水産研究所が公表している浅海定線調査結果のうち、2011～2013年の年平均値を用いて、外洋混合水の湾内進入に関連し、湾内での物質循環について考察した。すなわち、伊勢湾の湾奥～湾央～湾口の6観測点において上層・中層・下層のChl. *a*、塩分およびDOについて解析した。

その結果、Chl. *a* および塩分の変化を見る限り、陸域からの影響は湾央付近まで及んでおり、DOの変化も含めて考えると湾口では外洋水との鉛直

混合が生じていると考えられた。また、夏季に湾中央を中心に貧酸素化していた。水質項目の観測点別および深度別変化から、湾口での外洋混合水がエスチュアリー循環により中層から下層に進入すると考えられた。すなわち、湾口における外洋水との鉛直混合により外洋混合水が生成され、また、エスチュアリー循環における上層流の補償流として外洋混合水が中層～下層に進入することにより底泥からの汚濁物質を上層へ輸送すると考えられた。

なお、本研究の一部は第49回日本水環境学会年会(2015.3.16～18, 金沢市)で発表した⁹⁾。

—参考文献—

- 1) 伊勢湾再生推進協議会：伊勢湾再生行動計画，平成19年3月。pp.2-3，国土交通省中部地方整備局，名古屋。

- 2007
- 2) 岩崎英雄，岩佐清和，阿弥一起，矢島勉：伊勢湾の海洋環境特性と赤潮。三重大学水産学部研究報告，**9**，57-67，1982
- 3) 三重県：平成26(2014)年版 環境白書。p.42，三重県環境生活部環境生活総務課，津
- 4) 新家淳治，大熊和行：三重県沿岸海域における長期パンの海水水質の解析。全国環境研会誌，**36**(1)，34-43，2011
- 5) 新家淳治，山口哲夫：伊勢湾の水質特性について。沿岸海洋研究，**51**，209-216，2014
- 6) 笠井亮秀，杉本亮，赤嶺里美：内湾域における中層クロロフィル極大の形成機構。海と空，**82**(3-4)，53-60，2007
- 7) 日本海洋学会 沿岸海洋研究会：詳論 沿岸海洋学。p.176，恒星社厚生閣，東京，2014
- 8) 藤原建紀：内湾の貧栄養化一窒素・リン負荷量削減が海域のCOD，栄養塩レベルにおよぼす影響一。沿岸海洋研究，**52**，11-27，2014
- 9) 新家淳治：伊勢湾の水質に関する一考察。第49回日本水環境学会年会講演集，p.551，2015