

長期現地観測データに基づく伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性

川崎浩司¹・村上智一²・大久保陽介³

半閉鎖性水域では、陸域からの栄養塩の過剰流入による富栄養化、植物プランクトンの異常発生による赤潮、風作用下での貧酸素底層水塊の湧昇による青潮など水環境問題が深刻化している。そこで、本研究では、半閉鎖性海域の一つである伊勢湾を対象にこれまで長期かつ広域にわたり実施されてきた三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査の観測データを活用し、伊勢湾の密度構造と水質構造の季節変動特性を議論した。その結果、夏季に成層化が発達し、冬季で水温成層の鉛直逆転が顕在化すること、夏季の湾底層全域では DO 値が 3.0 mg/l 以下となっており、貧酸素化していることなどが明らかになった。

1. 序 論

東京湾、大阪湾と並ぶ日本三大湾の一つである伊勢湾は、水域面積が 1738 km²と三大湾の中で最も大きい内湾である。湾奥部には、木曽川、長良川、揖斐川の木曽三川を始めとする主要河川が集中しており、湾奥部水域への淡水流入の影響が大きいといった特徴を有している。また、伊勢湾は、図-1 に示すように、狭い湾口部に大小の島々が存在する上、湾内の中央域の海底地形が盆状であるため、外洋との海水交換性が悪く半閉鎖性水域となっている。一般に、半閉鎖性水域は多種多様な生態系を有している一方、陸域からの栄養塩の過剰流入による富栄養化、植物プランクトンの異常発生による赤潮、風作用下での貧酸素底層水塊の湧昇による青潮など深刻な水環境問題を抱えている。半閉鎖性水域の一つである伊勢湾においてもこれらの問題が懸念されている。したがって、伊勢湾の水質環境の悪化を改善し、豊かな生態系を保全・回復するためには、湾内の流動・密度・水質構造といった物理環境場の現状を把握することが必須である。

伊勢湾の流動構造を検討した既往の研究例として、杉山ら (1994) は、15 昼夜連続現地観測の結果より、伊勢湾北部海域において、上層水が南下、下層水が北上するエスチュアリー循環が存在することを明示した。また、杉山ら (1995)、藤原 (2002) によると、津の沖合表層では三重県側で北上、愛知県側で南下する時計回りの循環流が形成している。藤原ら (1996) は、三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査データと河川流量データを用いて伊勢湾におけるエスチュアリー循環の季節変動を検討した。その結果、河川流量が少ない冬季にお

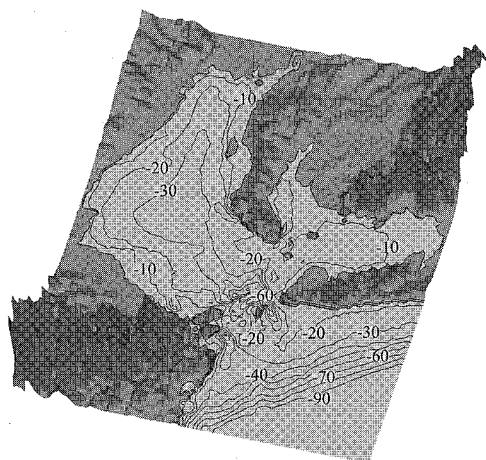


図-1 伊勢湾の海底地形図 (等深線は10m 間隔)

いても、成層の維持と北西風の影響により、エスチュアリー循環が卓越していることを示した。伊勢湾の密度構造と栄養塩輸送に関する研究例では、観測結果に基づき、夏季に 32 psu 以下の低塩分水が外洋まで張り出している可能性を示唆した関根 (1996) の研究がある。また、笈ら (2002) は、診断モデルの結果から、伊勢湾の密度構造が河川流量と加熱・冷却の大きさに支配されていること、藤原ら (1996) は湾奥部のクロロフィル a が河川からの栄養塩の流入に関連していることを明示した。一方、山尾ら (2002) は、伊勢湾北部海域における下層から上層への栄養塩輸送量が河川流量と下層の栄養塩濃度の増大に伴い増加すると述べている。青潮の発生原因となる貧酸素水塊の発生・動態に着目した研究として、高橋ら (2000) は、4 月～10 月の期間における湾中層部への外洋系水の進入が貧酸素水塊の発生原因であると結論づけている。また、大島ら (2005) は、貧酸素水塊が 5 月～6 月に発生し、成長と変動を繰り返しながら 10 月～11 月に消滅する傾向があることを示した。

このように、伊勢湾で観測されたデータを基に、湾内

* 正 会 員 博(工) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

** 正 会 員 博(工) 名古屋大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

*** 学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

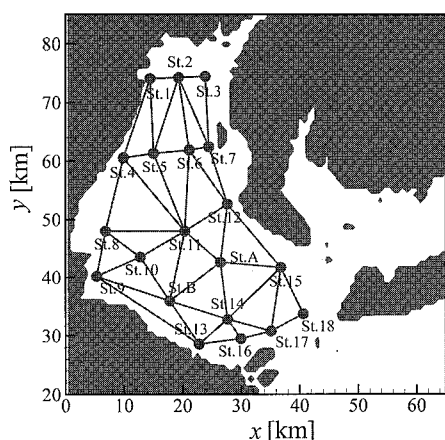


図-2 浅海定線調査の観測点

の流動構造・密度構造・水質特性に関する研究が様々な視点から実施されてきた。しかし、長期かつ広域に観測された多項目のデータを用いて、伊勢湾の内部構造や水質特性を検討した研究はあまりされていないのが現状である。

本研究では、半閉鎖性海域の一つである伊勢湾を対象に、これまで長期かつ広域にわたり実施されてきた三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査の観測データを活用することにより、湾内の密度構造と水質構造の季節変動特性を検討することを目的としている。

2. 観測データの解析

1972年4月から現在に至るまで、伊勢湾内の20地点(図-2参照)で三重県科学技術振興センターが毎月現地観測している浅海定線調査のデータを使用して、伊勢湾における平均的な水温・塩分構造と水質特性について検討した。解析対象期間は1972年4月～2005年12月の34年間である。データ項目は、水温、塩分、溶存酸素DO、化学的酸素要求量COD、クロロフィルa、溶存無機態窒素(アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、亜硝酸態・硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ である。また、ここでは、海表面、海面下5m、10m、海底面から上方1m(B+1m)の4水深を対象とした。

伊勢湾の密度・水質構造は年毎に変動するが、本研究では湾内の平均的な海況を把握するために、得られたデータを用いて各観測点に対する月毎、水深毎に34年間の平均値を算出した。また、各データ項目の水平分布図を作成するため、図-2に示すように、3点の観測点から構成される三角形の内部に対し、データ間の距離に依存した分散に基づいて各データに重みをつけ、加重平均を行うことで任意地点でのデータ値を推定可能であるクリギング法を使用して、内挿補間を行った。また、伊勢湾

の内部構造は主に季節毎に変化するため、3～5月を春季、6～8月を夏季、9～11月を秋季、12～2月を冬季と定義し、季節毎に着目して密度・水質構造を検討した。

3. 伊勢湾の内部構造の季節変動特性

(1) 水温・塩分構造

図-3、図-4に夏季および冬季の平均水温の水平空間分布をそれぞれ図示する。なお、(a)、(b)はそれぞれ表層と底層を示す。図-3から、夏季には表層と底層の水温差が顕著に認められ、特に湾中央部では7～8℃にもなっており、海域の水温成層が発達していることがわかる。一般に、夏季は、気温が高く日射量が多いため、表層水温が底層に比べ上昇しやすいことが水温成層化の主な要因として挙げられる。さらに、図-1に示すように、伊勢湾の湾中央部は水深の深い凹地状で、低温水塊が停滞・発達しやすくなっているため、表層と底層の水温差がより助長されたと推察される。ここでは図示しないが、秋季には、全層において、水温が低下するとともに、夏季に比べ表層水温と底層水温の差が小さくなっている。しかし、11月には底層の方が表層より水温が高くなるといった水温成層の逆転が生じ始め、図-4からわかるように、冬季では水温成層の逆転現象が顕著に現れている。この主な要因としては、湾口部から高温な外洋水が底層から湾内に進入することが挙げられる。高橋ら(2000)によれば、11月～3月にかけて伊勢湾湾口部から高温な外洋水が底層に沿って湾内に進入する。図-4からも、冬季の底層において湾口部に高温水塊の存在が確認でき、湾内への高温水塊進入が水温逆転の一因であるといえる。

図-5、図-6は、それぞれ表層および底層の平均塩分の水平空間分布を季節毎に示したものである。表層塩分は冬季から夏季にかけて徐々に低下していることがわかる。特に夏季の湾奥部表層では低塩分化が進行している。これは木曾三川からの淡水流入の増加が主な原因である。一方、図-6に示す底層塩分は季節変動が小さく、年間を通じて約33psuと高塩分である。図-1に示すように、湾中央部の海底地形が凹地状となっていることから、湾口部から湾内に進入した高塩分外洋水が湾中央部で停滞し、底層で高塩分化となっていると考えられる。図-5と図-6を比較すると、夏季では、表層の低塩分化に伴い、表層と底層の塩分差が増大している。特に湾奥部の表層と底層の塩分差は約15psuと年間最大である。秋季では、湾奥部表層の塩分が徐々に増加し、表層と底層の塩分差が小さくなっている。湾奥部表層の高塩分化の原因として、河川水の流入が夏季に比べて少ないこと、気温の低下により成層化が弱まり上下層の鉛直混合が促進されたことなどが挙げられる。一方、冬季では、秋季より

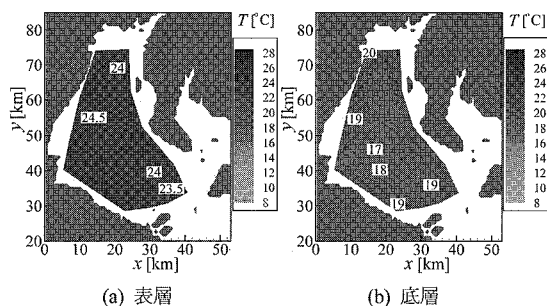


図-3 夏季(7月)における平均水温の水平空間分布

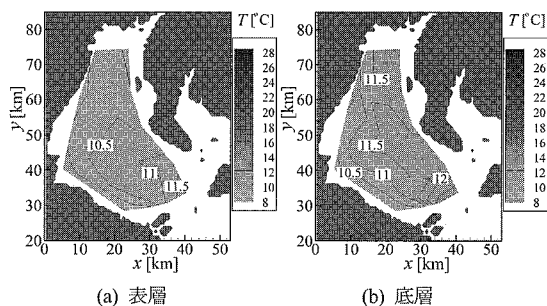


図-4 冬季(1月)における平均水温の水平空間分布

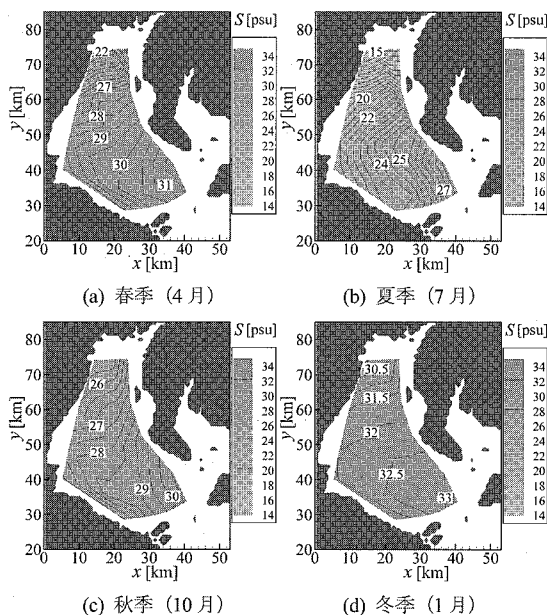


図-5 表層における平均塩分の水平空間分布

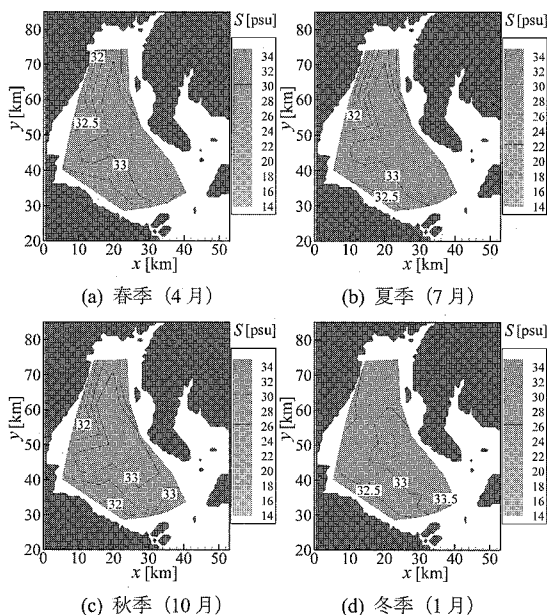


図-6 底層における平均塩分の水平空間分布

塩分の鉛直勾配が小さくなっていることがわかる。ここでは図示しないが、平均密度 σ_t の水平分布は、図-5と図-6に示す平均塩分の特性とほぼ一致しており、水温より塩分に伊勢湾の密度構造が強く起因している。

(2) 水質構造

図-7は、底層における季節毎の平均溶存酸素DOの水平空間分布を示す。同図より、春季では、DO値が5.5 mg/l以上で、一般に魚介類が生存するために必要なDO値3 mg/lを維持しており、貧酸素水塊は確認されない。しかしながら、夏季には、DO値が3 mg/l以下となる貧酸素水塊が湾口部を除く広範囲で存在していることがわかる。また、湾中央部の凹地状の地形と底層の低DO値の分布が一致しており、水温、塩分と同様、海底地形の影響により底層で貧酸素水塊が停滞していると判断される。一方、秋季になると、夏季に存在していた底層の貧酸素水塊が徐々に解消し、11月では湾全域

で消滅している。冬季では、7 mg/l以上と高いDO値が認められるとともに、DOの等値線も疎になっており、平面的な空間変化が小さい。前節で述べたように、冬季は表層と底層の密度差が小さく、鉛直混合されやすいため、冬季のDO値は安定して高い値を維持していると推察される。なお、図示しないが、表層におけるDOは、年間を通じて7 mg/l以上であり、底層に比べ極めて高い値となっていた。その理由として、表層では、空気混入による再曝気や植物プランクトンによる光合成等により酸素の供給が行われているためと考えられる。

図-8に赤潮発生の指標であるクロロフィルaの表層水平空間分布を示す。図-8(a)と(b)の比較から、クロロフィルa値は夏季で増大し、冬季で減少していることがわかる。特に夏季の湾奥部でクロロフィルa値が大きい。これは、河川流量の変化との密接な関係が考えられ、河川からの流入負荷の影響が大きく及ぼしているといえ

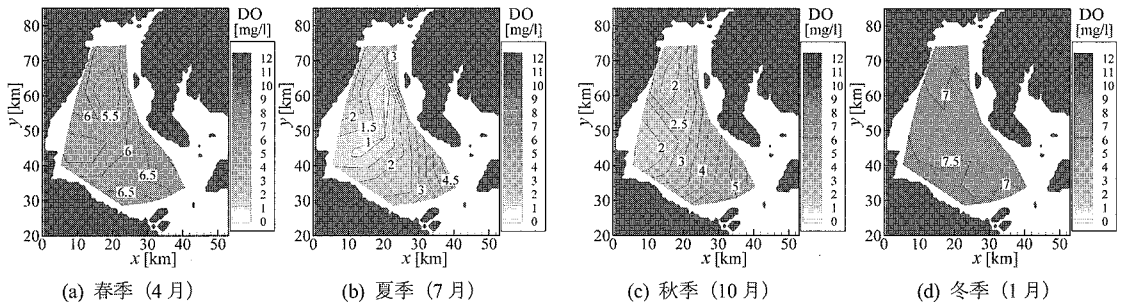


図-7 底層における季節毎の平均 DO の水平空間分布

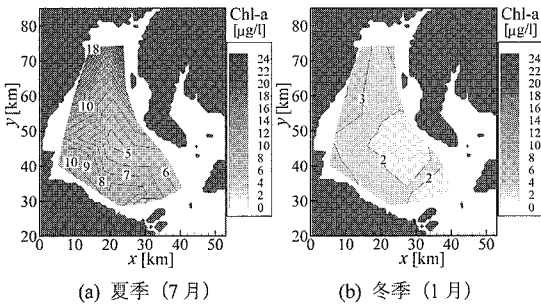


図-8 表層における平均クロロフィル a の水平空間分布

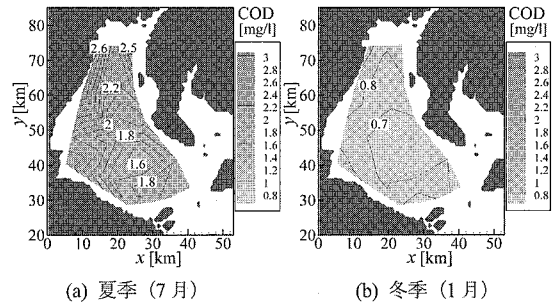


図-9 平均 COD の水平空間分布

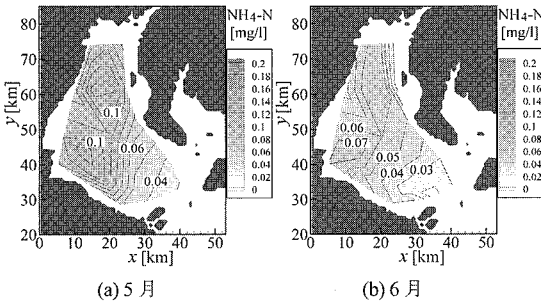


図-10 底層における平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ の水平空間分布

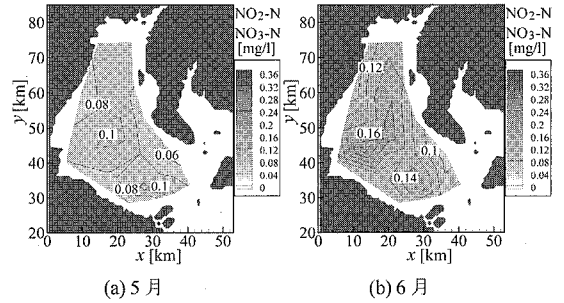


図-11 底層における平均 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ の水平空間分布

る。

図-9 に例示する有機汚濁の代表的な指標である化学的酸素要求量 COD の表層における水平空間分布をみると、COD が夏季で増加、冬季で低下しており、クロロフィル a とほぼ同じ傾向であることが認められる。また、夏季の湾奥部表層で特に COD 値が高いことから、COD に関しても、クロロフィル a と同様、河川からの流入負荷の影響が大きいと考えられる。

ついで、海域の栄養塩の一つである無機態窒素を、アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ と亜硝酸・硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ の 2 つに分類して、それぞれの季節変動を検討する。図示しないが、表層では、河川からの流入負荷の影響により、底層に比べ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ ともに季節変動が小さいことを確認している。底層での

$\text{NH}_4\text{-N}$ 値は春季から夏季にかけて高い値を示し、底層の $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ は夏季から秋季に高くなっている。また、底層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の変動幅は $\text{NH}_4\text{-N}$ よりも小さいこともわかる。ここで、無機態窒素の特徴について述べておくと、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は好気性で亜硝酸細菌によって酸化され、さらに硝酸細菌により $\text{NO}_3\text{-N}$ に酸化されるという硝化作用が生じる。一方、嫌気性の場合、その逆の反応が起こる。この化学的要因から、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は溶存酸素量の高い好気性水域では、硝化が進行するため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 値は低く、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ 値は高くなる。一方、溶存酸素量の低い嫌気性水域では、逆に $\text{NH}_4\text{-N}$ が高く、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ が低くなると予想される。この視点から、図-10 と図-11 に示す底層における平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ と平均 $\text{NO}_2\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ の水平空間分布をみると、 NO_2

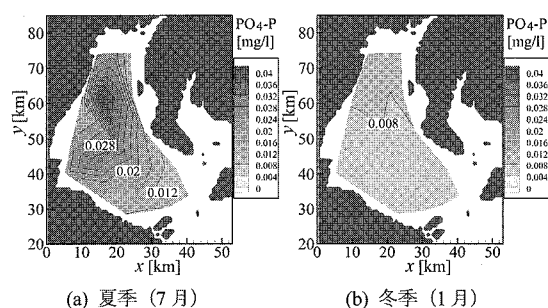


図-12 底層における平均 $\text{PO}_4\text{-P}$ の水平空間分布

$\text{-N} \cdot \text{NO}_3\text{-N}$ は溶存酸素が比較的高い5月から6月にかけて上昇し、硝化作用が進行していると考えられる。これは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が5月から6月にかけて減少していることから確認できる。しかし、8月以降、その傾向が顕著に認められなかった。これについては、更なる検討が必要で、今後の課題である。

無機態窒素と同じく海域の栄養塩の一つであるリン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変動を調べた結果、表層では、河川流入負荷の影響により、湾奥部の $\text{PO}_4\text{-P}$ 値が全季節で高い傾向を示した。一方、底層に関しては、図-12に示すように、夏季の湾中央部で $\text{PO}_4\text{-P}$ が高く、冬季には湾全域で低くなっている。高橋ら (2000) によれば、伊勢湾への外洋水の流入は外洋水と湾内の密度が等しくなる位置で生じることから、4月～10月では、20 m 付近の中層から外洋水が進入していると考えられる。したがって、外洋水の中層貫入により底層水塊が取り残され、図-7からわかるように、底層水塊は溶存酸素量が低く、また光も届かないため、光合成等の生化学的反応が生じにくい状況となり、湾中央部で $\text{PO}_4\text{-P}$ が増大したものと推察される。

4. 結 論

本研究では、伊勢湾を対象に、これまで長期かつ広域にわたり実施されてきた三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査の観測データを整理・解析し、伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性について検討を行った。その結果、水温に関しては、夏季における海域の成層化の発達、冬季における水温成層の鉛直逆転の顕在化が明らかになった。塩分に関しては、底層では年間を通じて

変動が小さく、表層では河川からの淡水流入による影響から季節変動が大きいことが明示された。また、夏季では伊勢湾底層全域にわたり貧酸素化していること、表層におけるクロロフィル a、COD は河川からの流入負荷の影響が大きいことがわかった。さらに、溶存無機態窒素に関しては、DO が多い好気性水域では硝化が進むことから、 $\text{NO}_2\text{-N} \cdot \text{NO}_3\text{-N}$ が増大する傾向となり、一方、DO が少ない嫌気性水域では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が増大することを示唆した。また、リン酸態リンを含む栄養塩輸送は、外洋水からの影響が強く関連していることがわかった。今後は、観測データの更なる解析を行い、伊勢湾の物質循環特性について詳細に検討を進めていく予定である。

謝辞：三重県科学技術振興センターより、観測データを提供頂いた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 大島 徹・鶴飼亮行・赤石正廣・青井浩二・黒田伸郎 (2005)：伊勢湾・三河湾における貧酸素水塊の長期間の挙動とその要因，海岸工学論文集，第52巻，pp. 901-905.
- 笥 茂穂・藤原建紀・山田 浩 (2002)：伊勢湾における密度・流動構造の季節変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 386-390.
- 国土交通省河川局編：流量年表 (1993～2002 年)，(社)日本河川協会.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水島雅文 (1994)：伊勢湾北部海域の密度成層と残差流，海岸工学論文集，第41巻，pp. 291-295.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995)：ADCP による伊勢湾の流動構造調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1096-1100.
- 関根義彦 (1996)：伊勢湾，沿岸海洋研究，第34巻，第1号，pp. 45-51.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000)：伊勢湾における外洋系水の進入進度と貧酸素水塊の季節変動，海の研究，Vol. 9, No. 5, pp. 265-271.
- 藤原建紀・福井真吾・杉山陽一 (1996)：伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動，海の研究，5巻4号，pp. 235-244.
- 藤原建紀・福井真吾・笠井亮秀・坂本巨・杉山陽一 (1996)：伊勢湾の栄養塩輸送と亜表層クロロフィル極大，海と空，第73巻，pp. 55-61.
- 藤原建紀 (2002)：伊勢湾の生態系を支配する流動構造，日本プランクトン学会誌，第49巻，第2号，pp. 1-9.
- 山尾 理・笠井亮秀・藤原建紀・杉山陽一・原田一利 (2002)：河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 961-965.