

外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送

高志利宣*・藤原建紀**・住友寿明***・竹内淳一****

紀伊水道における栄養塩輸送は、瀬戸内海の栄養塩収支を明らかにする上で重要である。現地観測の結果、夏季の栄養塩濃度は、上層は常に低いのに対し、下層では黒潮が離岸しているときは高く、接岸しているときには低い値となった。栄養塩輸送は、黒潮が離岸状態のときは外洋から流入し、接岸状態のときは流入量がその輸送量は小さい。黒潮の流路が接岸状態から離岸状態に転じたときは、大量の栄養塩が外洋から流入する。反対に離岸状態から接岸状態に転じたときは、大量の栄養塩が外洋へ流出する。一方、冬季には、栄養塩濃度は、内海から外洋側に向かって減少しており、栄養塩は外洋へ流出する傾向にあった。

1. はじめに

大阪湾、伊勢湾、東京湾などの内湾には、後背地に大都市が控えているため、海域に人間起源の栄養塩が大量に流入している。内湾に流入した栄養塩は、赤潮の発生や貧酸素水塊の形成の原因となるため、海域の栄養塩収支を見積もることは重要である。従来、大阪湾に流入した窒素・リンは、紀伊水道を通じて外洋へ輸送されると考えられてきた。その根拠となる見積もりは、内湾の窒素・リン収支を計算し、その残差を外洋との交換量にあてはめる方法や、ボックスモデルによる算定法で求められた結果であった(門谷ら, 1991; 柳ら, 1985 など)。しかしながら、近年、瀬戸内海には外洋からも栄養塩が流入していることが明らかになっている(藤原ら, 1997)。このときの紀伊水道での窒素・リン輸送量は、陸上から大阪湾に負荷される量と同程度であった。そのため、外洋起源の窒素・リンが大阪湾などの内海にも流入して、内海の水質や生態系に陸上起源と外洋起源、両方の窒素・リンが影響を及ぼしている可能性がある。

紀伊水道における夏季の窒素・リン輸送には、上層で流出、下層で流入するエスチュアリー循環流(淡水流入に伴う密度流)が重要であることが指摘されている(藤原ら, 1997)。しかしながら、竹内ら(1997)は、33年にわたる定線観測データから、黒潮が離岸(潮岬からの離岸距離が20海里=37km以遠)している時は、紀伊水道の下層に低温・高塩分の水塊が進入すること、水温が低いほど窒素・リン濃度が高くなることを明らかにしている。また、笠井ら(2001)は、紀伊水道の流動構造は黒潮の流路によって異なることを示している。そのため、紀伊水道の窒素・リン輸送は、黒潮の流路により大きく変化することが予想される。一方、冬季の栄養塩輸送に関する研究は行われていない。海洋構造に関しては、冬季の紀伊水道の入口付近に熱塩フロント(水温・塩分の

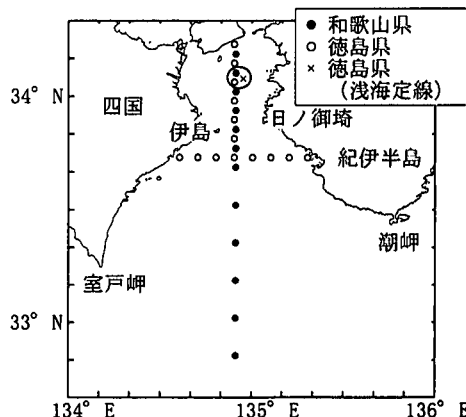


図-1 観測海域、○はCTD観測および採水地点、●と×はCTD観測のみ

不連続面)が形成されることがわかっている(吉岡, 1983)。そのため、この熱塩フロントの存在が、窒素・リン輸送にどのように影響しているのかを明らかにする必要がある。そこで本研究では、紀伊水道において一ヶ月間隔で3年間にわたる観測を行い、窒素・リンの時間・空間的な変動を調べると共に、栄養塩輸送とその機構についても考察した。

2. 現地観測および解析資料

徳島県立農林水産総合技術センター水産研究所(以下、徳島県)は、漁業調査船「とくしま」により、1999年4月から2001年12月までの各月に、紀伊水道の縦断面と横断面でCTD及びSTDによる水温・塩分の測定、ADCP(超音波ドップラー流速計)による流速の調査、栄養塩分析のための水深10mごとの採水を行った(図-1)。採水試料は船上で直ちに濾過し、分析まで凍結保存した。分析項目はアンモニア態窒素($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)である。また、和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場も漁業調査船「きのくに」により、紀伊水道から

* 生修 京都大学大学院 農学研究科海洋生物環境学
** 正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究科海洋生物環境学
*** 農修 徳島県立農林水産総合技術センター水産研究所
**** 水修 和歌山県立農林水産総合技術センター水産試験場

沖合までの縦断 CTD 調査を長年にわたって行っている(図-1)。本研究では、これらのデータに加えて、徳島県の浅海定線調査の水温データも使用した。黒潮の位置の指標としては、潮岬から黒潮までの離岸距離を用いた。

3. 結果と考察

3.1 水温・栄養塩の季節変動・年変動と黒潮の離接岸

図-1 の丸で囲んで3点の観測結果を使用して、1999 年から 2001 年の紀伊水道中央部における水温のイソプレスを示す(図-2)。紀伊水道の水温が、最低となるのは上層、下層ともに2月から3月である。一方、最高水温を示すのは、上層では8月から9月であるが、下層では年によって異なり、1999 年は8月で、2000 年は11月、2001 年は9月下旬となっている。春～夏～秋にかけての下層における水温変動様式は年によって大きく異なる。1999 年の下層の水温の変動は、9月上旬まで23°Cで推移していたが、9月の中旬から突然22°C以下の冷たい水塊が出現した後、再び上昇している。一方、2000 年、2001 年の下層では7月まで水温が若干上昇しているが、その後20°C以下の低温な状態が継続している。特に2001 年7月中旬から8月下旬にかけては、15°C以下の水塊が下層に存在しているが、8月の中旬から下旬に突然水温が25°Cまで上昇し、上層から下層まで高温化している。

次に、図-1 の丸で囲んだ徳島県の測点における溶解態窒素(以下、DIN: アンモニア態窒素+硝酸態窒素+亜硝酸態窒素)とリン酸態リン(以下、 $\text{PO}_4\text{-P}$)のイソプレスを図-3、図-4に示す。冬季は欠測が多いため年ごとの詳細な比較はできないが、窒素・リン濃度は、鉛直的にはほぼ一様で、窒素で5 μM 以上、リンで0.5 μM と比較的高濃度となっている。一方、夏季の DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は上層では低く下層で高い傾向にある。上層で栄養塩濃度が低いのは、栄養塩が植物プランクトンにより消費されて枯渇しているためと考えられる。2000 年9月は全層で DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が高くなっているが、これは出水の影響である。一方、夏季の下層の窒素・リン濃度は、1999 年と2000 年、2001 年とでは大きな差がある。1999 年の窒素・リン濃度は、8月までは DIN では概ね5 μM 以下、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では0.5 μM 以下で推移している。しかし、9月の観測時には、DIN で7 μM 以上、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で0.6 μM 以上と上昇しており、10月には再び減少している。一方、2000 年と2001 年は、冬季から継続して高濃度の栄養塩が下層から中層にかけて存在しており、時には DIN で15 μM 以上、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では1.2 μM 以上とかなり高濃度になっている。しかし、2001 年9月は、前月まで高濃度で推移していた栄養塩が急激に減少していた。夏季の水温変動と窒素・リン濃度の変動を比較すると、両者はよく一致している。すなわち、紀伊水道の下層が低温であるとき

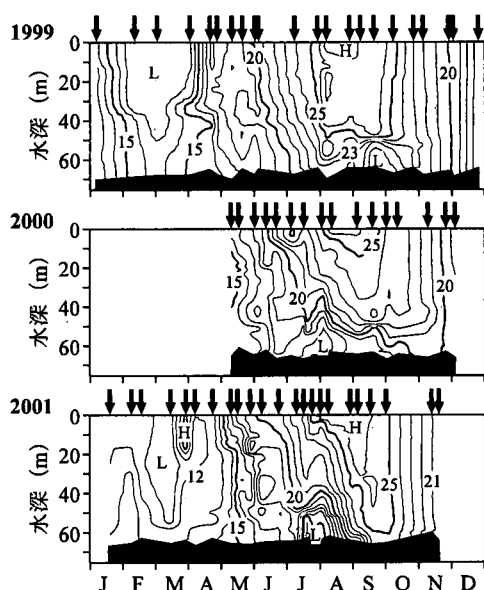


図-2 紀伊水道中央部における水温の季節変化、図上の矢印は観測日を示す

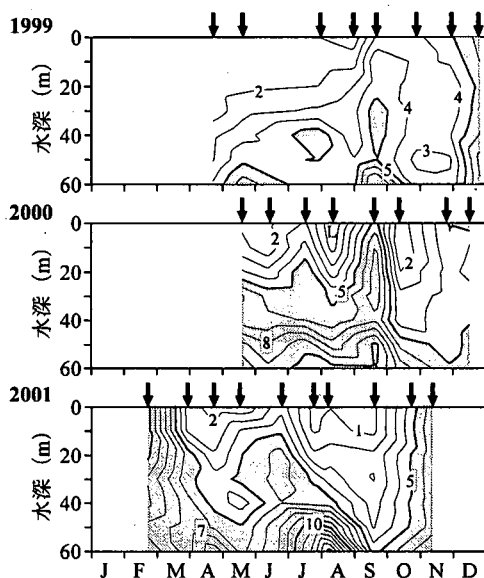
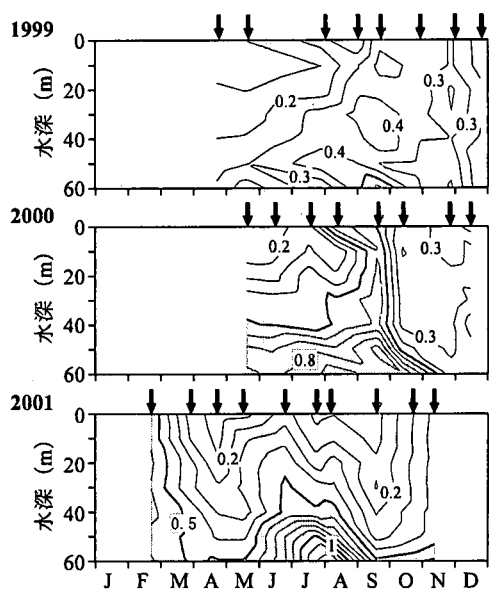


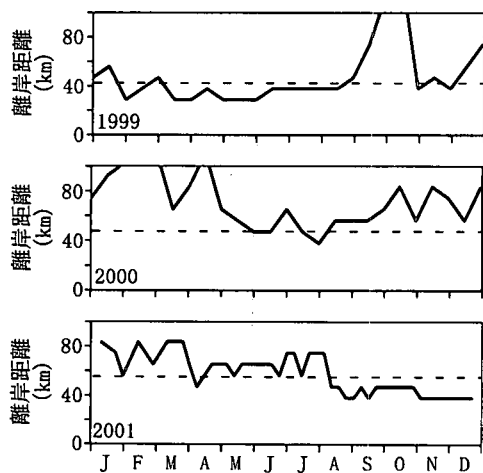
図-3 紀伊水道中央部における DIN の季節変化、陰影部は5 μM 以上、図上の矢印は観測日を示す

栄養塩は高濃度であり、高温であるときは低濃度となっている。

紀伊水道における水温・DIN・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変動(図-2, 図-3, 図-4)と黒潮の潮岬からの離岸距離の時間変化(図-5)を比較する。各年の夏季に着目すると、黒潮が接岸しているときは、紀伊水道の下層の水温は高く、栄養塩の濃度は低くなっている。一方、黒潮が37 km(20



図一四 紀伊水道中央部における $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変化、陰影部は $0.5 \mu\text{M}$ 以上、図上の矢印は観測日を示す



図一五 潮岬からの黒潮の離岸距離、破線は離接岸の指標

海里)より離岸しているときは、紀伊水道の下層は低温化し、栄養塩は高濃度となっている。これは、竹内ら(1997)が、黒潮離岸距離と紀伊水道底層の低温、高栄養塩の水塊との関係を指摘していることと一致する。一方、冬季には、黒潮が接岸しているときに水温が高くなり、黒潮が離岸しているときに低くなる傾向にあるが、今回の観測では、黒潮が接岸していた時の栄養塩のデータが不足しているため栄養塩濃度の変動は不明である。

3.2 黒潮の離接岸と陸棚水の応答

黒潮が離岸していた2001年7月と接岸していた9月の、紀伊水道とその沖合いにおける水温の縦断分布を示

す(図一六)。一般に、陸棚上層水は高温で栄養塩が枯渇しているのに対し、陸棚下層水は低温で栄養塩を豊富に含んでいる。黒潮が離岸していた7月は、水温 20°C 以下の陸棚下層水が紀伊水道に進入している。一方、黒潮が接岸していた9月には、 20°C 以上の陸棚上層水が紀伊水道を占めている。つまり、紀伊水道の水温や、栄養塩濃度が変動するのは、黒潮の離接岸によって紀伊水道に進入する水塊が異なるからである。

黒潮が接岸していた9月の紀伊水道沖合の水深200 m付近に等温線の盛り上がりが見られる(図一六)。この構造は、紀伊水道沖合の強い低気圧性の渦(左旋渦)の存在を示すものであり、離岸時には見られないものである。この黒潮接岸時の低気圧性渦は ADCP の流速データによっても確かめられている(図省略)。この渦の存在は、永田ら(1999)が、黒潮が直進流路を取っている(潮岬に接岸している)ときには、紀伊水道沖で低気圧性の渦がほぼ恒常的に存在するとしていることとも一致している。以上のように、黒潮の流路の変動は、紀伊水道沖合の海洋構造の変化を引き起こしている。陸棚上層水・下層水のどちらが紀伊水道へ進入するかを決める要因は、黒潮の流路変動そのものよりも、むしろ流路の変動に伴う紀伊水道沖の海洋構造の変化が支配的であると考えられる。

3.3 夏季の栄養塩輸送

夏季の紀伊水道では、上層で低塩分水が流出し、下層で高塩分水が流入するエスチュアリー循環流が存在している(藤原ら, 1997)。しかし、陸棚水の流入・流出に伴う循環流も共存しているため、紀伊水道の流れは時間的に変動している。このため、栄養塩輸送の形態も変化する。まず、黒潮の流路が安定して離岸あるいは接岸状態を保っている場合について考察する。図一七に黒潮が離岸状態であった2001年8月の、図一八に黒潮が接岸状態にあった2001年9月の、水温・ DIN ・ $\text{PO}_4\text{-P}$ の縦断分布を示す。2001年8月は黒潮が離岸していたため、陸棚下層水が紀伊水道の下層を占めている。このとき、下層から中層にかけて低水温(22°C 以下)、高栄養塩($\text{DIN}: 5 \mu\text{M}$ 以上、 $\text{PO}_4\text{-P}: 0.5 \mu\text{M}$ 以上)であり、上層では栄養塩が枯渇した状態にある。他の観測でも黒潮が離岸しているときは、水温や栄養塩濃度の強弱はあるものの、ほぼ同様の分布となっていた。このような、水温や栄養塩の分布は、藤原ら(1997)が栄養塩輸送量を実測したときとよく類似している。黒潮が離岸しているときの栄養塩輸送は、上層で流出、下層で流入のエスチュアリー循環流と、栄養塩が上層で低濃度、下層では高濃度という分布が組み合わさって流入となり、その輸送量も大きい。一方、2001年9月は黒潮が接岸していた時期にあたり、紀伊水道内を陸棚上層水が占めている。そのため、全層

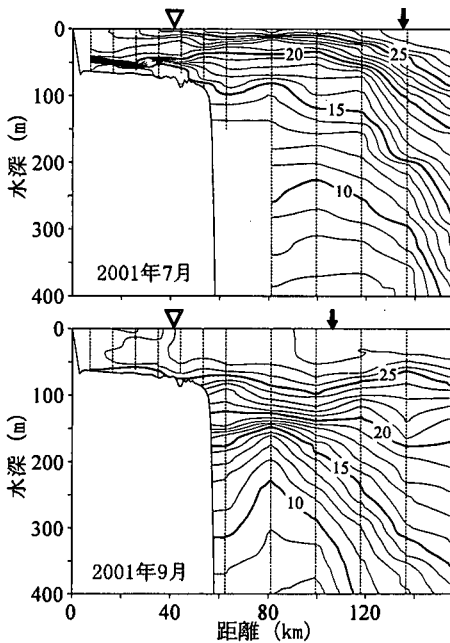


図-6 紀伊水道とその沖合の水温の縦断分布, 図上の矢印は黒潮の主軸の位置, ▽は伊島一日ノ御崎線

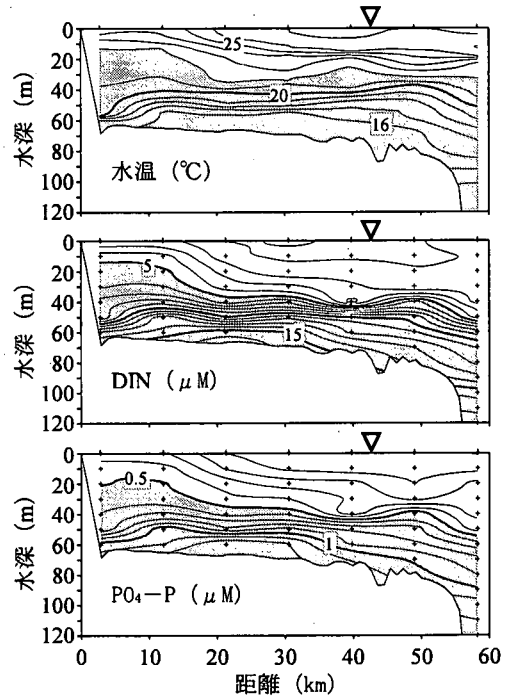


図-7 水温, DIN, PO_4-P の縦断分布, 2001 年 8 月, 図上の ▽は伊島一日ノ御崎線

にわたって $24^{\circ}C$ 以上の高温となり, 栄養塩濃度は全体的に低く下層でわずかに高いだけである。このため, 栄養塩輸送は, エスチュアリー循環流との組み合わせにより流入傾向となるが, その流入量はかなり小さいと考えられる。

次に, 黒潮の流路が変動して, 紀伊水道へ進入する水塊が変化したときの栄養塩輸送について考察する。黒潮が接岸から離岸に変わった場合 (たとえば 1999 年 8 月～9 月の期間: 図-2, 図-3, 図-4), 高栄養塩の陸棚下層水が紀伊水道の下層へ進入する。そのため, 水道内の栄養塩の現存量は増大し, 栄養塩輸送は流入となる。この場合の輸送量は, 他のパターンと比較して最も大きいと考えられる。一方, 黒潮が離岸から接岸に変わる場合 (たとえば 2001 年 8 月～9 月: 図-7, 図-8), 栄養塩を豊富に含んだ陸棚下層水が外洋へ流出するため, 栄養塩の現存量も大幅に減少し, 栄養塩は流出となる。

3.4 冬季の栄養塩輸送

図-9 に黒潮が離岸していた 2001 年 2 月の水温, DIN, PO_4-P の縦断分布を示す。紀伊水道入口に, 水温の不連続面が形成されている。塩分についても同じ場所に不連続面が形成されていた(図省略)。この水温, 塩分の不連続面は, 冬季の紀伊水道において水道入口から中央付近に形成される熱塩フロントである (吉岡, 1983)。フロントの内側では, 水道奥部で最も低温でありフロントにむかって徐々に水温が高くなっている。栄養塩の分

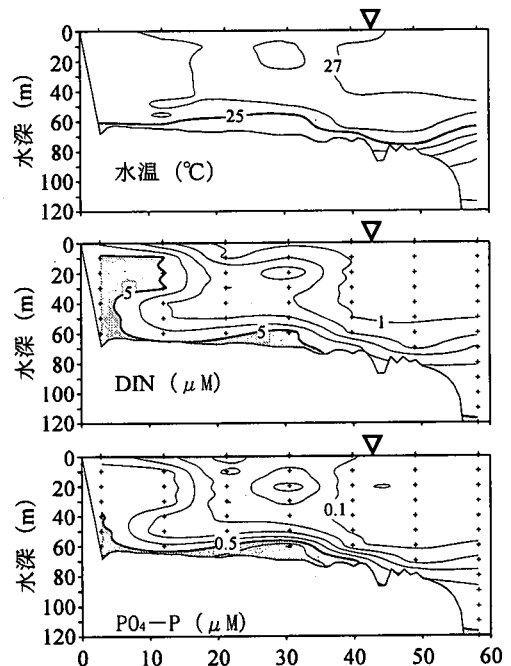
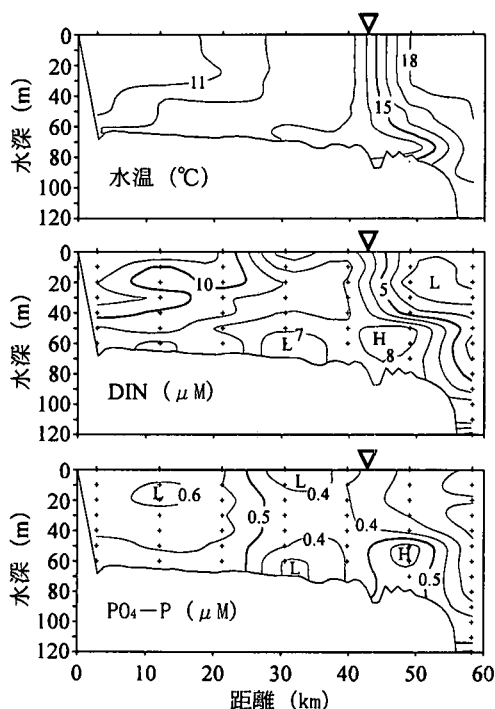


図-8 水温, DIN, PO_4-P の縦断分布, 2001 年 9 月, 図上の ▽は伊島一日ノ御崎線



図—9 水温, DIN, PO_4-P の縦断分布, 2001 年 2 月, 図上の
▽は伊勢一日ノ御崎線

布も水温の分布も良く類似しており、水道奥部で濃度が高く、フロントに向かって濃度が低くなっている。一方、フロント外は高温であり、栄養塩濃度はフロント内よりも低くなっている。また、フロント域では、フロントをばさんで、水温・栄養塩濃度ともに急変している。冬季の栄養塩の輸送は、フロントを通じての海水交換によって行われるので、栄養塩は流出となる。

フロントを通じての海水交換は、特にフロントの下部に見られる。フロント内側下層には周囲よりも高温・低栄養塩の水塊が見られる。この水塊はフロント外から入ってきた水塊と考えられる。逆にフロント外側下層には周囲よりも低温・高栄養塩の水塊がみられ、フロント

内の海水が出てきたものと考えられる。このような海水交換によってフロント内の高栄養塩水がフロント外に運ばれ、栄養塩流出となっている。

4. ま と め

本研究により、紀伊水道の窒素・リン輸送には海洋構造が大きな影響を及ぼしていることが分かった。夏季の紀伊水道における栄養塩輸送は、黒潮が安定して離岸しているときには流入、安定して接岸していると弱い流入となる。また、黒潮が接岸から離岸に転じるときには強い流入、逆に離岸から接岸に転じる時には流出となる。一方、冬季には、黒潮の流路とは関係なく栄養塩は流出となる。本報では、紀伊水道における栄養塩輸送を、黒潮の流路によって4つのパターンに分類して定性的に議論したが、今後 ADCP の流速データなども用いて、栄養塩輸送量を定量化していく計画である。

謝辞： 本研究にあたって、貴重な助言・議論をして頂いた徳島県水産課の上田幸男博士、京都大学大学院農学研究科海洋生物環境学分野の笠井亮秀助手に感謝いたします。

参 考 文 献

- 笠井亮秀・藤原建紀・多田光男 (2001): 紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送, 海岸工学論文集, 48 巻, pp. 436-440.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘 (1997): 紀伊水道の流れと栄養塩輸送, 海と空, 73 巻, pp. 63-72.
- 門谷 茂・三島康史・岡市友利 (1991): 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環, 沿岸海洋研究ノート, 29 巻, pp. 13-27.
- 永田 豊・吉田昭三・藤田弘一 (1999): 黒潮大蛇行の前駆現象としての小蛇行, La mer, vol. 36, pp. 119-130.
- 竹内淳一・中地良樹・小久保友義 (1997): 紀伊水道に進入する表層暖水と底層冷水, 海と空, 73 巻, pp. 81-92.
- 柳 哲雄・柴木秀之・武岡英隆・播磨灘・大阪湾の塩分, 窒素, リン収支 (1985), 沿岸海洋研究ノート, 22 巻, pp. 159-164.
- 吉岡 洋 (1983): 海面水温と海況変動およびその測定法—紀伊水道を例として—, 海と空, 58 巻, pp. 37-51.