

# 大阪湾・紀伊水道において観られるもう一つの密度流系

The Other Density Current System in Osaka Bay and Kii Channel

金 漢九<sup>1</sup>・中辻啓二<sup>2</sup>・前田瑛美<sup>3</sup>・西田修三<sup>4</sup>

H. G. KIM, Keiji NAKATSUJI, Emi MAEDA and Shuzo NISHIDA

In order to clarify nutrient transport processes around the Kitan Strait, field surveys have been carried out every August from 1999 to 2004. The field surveys provided two very interesting results. The first is the development of stratification in the Kitan Strait. The upper residual current flows southward, while the lower does northward. As a result, there is a possibility that the lower nutrients in the Kii Channel intrude into Osaka Bay. The second is that such phenomena depend on the Kuroshio meandering. Although there are various conjectures about that matter, there are few researches. In the present study, the three dimensional baroclinic flow model with Lagrangian particles tracking method was used.

## 1. はじめに

瀬戸内海の水質汚濁の原因となる栄養塩の流入は陸域からのみならず、外海からも大量に供給されていることが最近分かってきた(武岡, 2006; 藤原ら, 2003). これが事実とすれば, 水質汚濁の元凶が人間起源の栄養塩にあることを前提に展開されているCODの削減, 窒素やリンの水質総量規制などの富栄養化対策をもう一度根本的に検討し直す必要がある.

藤原ら(1997)や中辻ら(2002)はそれぞれ紀伊水道と紀淡海峡において, 栄養塩フラックスの横断面分布の現地観測を行い, 外海起源の栄養塩である窒素やリン(以下, N, Pと称する)が大阪湾に流入すること, またそれらの流入量は陸域から大阪湾へ放流される汚濁負荷量に匹敵する量であることを示した. さらに, 紀淡海峡は完全な強混合ではなく, 塩分成層があり, 紀伊水道の高塩分水が海峡の底層から大阪湾に流入していること, その流入は黒潮の流路によって大きく異なることを金ら(2003)は明らかにした.

紀伊水道においてプランクトンや魚類などの生物生産の観点から興味を持たれている流動構造に, 外海の亜表層水が紀伊水道の下層に進入して起こる底層進入がある. 竹内ら(1997)は33年間の定線観測データから, 黒潮の離岸(潮岬から30海里=56km以遠のときを指す)時には, 低温・高塩分の水塊が紀伊水道の底層に進入していること, 水温が低いほど窒素やリンなどの栄養塩の濃度が高いことを指摘した. また, 高志ら(2002)は4年間毎月1回の観測から, 外海から紀伊水道に流入する窒素やリンの

分布が黒潮の経路によって変動することを示した.

著者らは1995年に閉鎖性海域の大阪湾を対象としてエスチュアリー循環をとりあげ, 内湾の生態系を考えるとときの鉛直循環の重要性を現地観測と数値シミュレーションにより指摘してきた. 紀伊水道に観られるいくつかの複雑で特異な現象も密度差(重力差)に誘起される単純な現象の複合である. 本研究では密度流を共通する外力として認識し, 大阪湾ならびに紀伊水道の流体運動, さらにそれらの流れによって輸送される外海起源の栄養塩の分布について総合的に検討する.

## 2. 数値計算の概要

### (1) 数値モデル

採用した3次元バロクリニック流れのモデルコードは大阪湾の流動解析のために開発されたODEMである. モデルは連続方程式, 運動方程式, 水温・塩分の拡散方程式, 海水面での熱収支式および密度の状態方程式から構成される. 大阪湾・紀伊水道の流れを対象とすることから, 計算領域は, 紀伊水道側を北緯33°40', 播磨灘側を東経134°25'に設定した(図-2参照). 今後, それぞれを沖合境界I, IIとする. 後者は徳島県の浅海定線調査の地点と一致している. 水平方向の格子間隔は1kmとし, 格子数は南北・東西に125×98とした. 鉛直方向には2m×5層, 4m×22層の27層位とした.

### (2) ラグランジェ流粒子追跡モデル

放流された粒子群の3次元追跡は水理公式集例題プログラム集 例題 6-9(土木学会編, 2002)を用いた. 時間ステップ $\Delta t$ 毎の粒子の移動量は, 流速と, そのせん断による移流, そして乱れがマルコフ過程にしたがった時の乱流拡散で表される. 計算ステップで格子間隔を超えないという制約から $\Delta t=5$ 秒に設定した. 渦拡散係数はSGSの概念を採用した(中辻(1994)参照).

### (3) 境界条件

1 正 会 員 博(工)(株)アイ・エヌ・エー事業本部  
2 フェロー 工博 大阪大学大学院 教授 地球総合工学専攻  
3 学 生 員 修(工)大阪大学大学院 地球総合工学専攻  
4 正 会 員 工博 大阪大学大学院 教授 地球総合工学専攻

境界条件は以下のように与えた.

- ・潮位(沖合境界); 沖合境界の両端 I・II で得られる変動の6分潮の線形和で与え, 海上での値は計算ステップ毎に線形補間する.
- ・水温・塩分・密度(沖合境界); 沖合境界 I, II 上にある定線調査測点での観測値を内挿する.
- ・河川流量(河口); 一級河川から流入する河川流量, 水温と塩分を与える.
- ・日射量, 気温(海面); 8月の典型的な日変化とする.

#### (4) 黒潮の動態の取り扱い

黒潮が潮岬に接近するか, あるいは遠ざかるかによって, 紀伊水道の縦断面の水温や塩分分布が大きく変化すること, 紀伊水道および紀淡海峡の成層化と黒潮の経路に相関性があることが最近になって分かってきた. しかしながら, 数値シミュレーションの精度に相応する黒潮の力学的条件の設定は難しい.

竹内ら(1997)の定義にしたがって, 黒潮の位置によって接岸時(潮岬からの離岸距離が30海里=56km以内)と離岸時(56km外)に分類したときの典型的な水温・塩分・密度の鉛直分布を図-1に示す. 旧徳島県水産試験場が実施した浅海定線調査の観測値を用いて作図した. 観測位置は, 紀淡海峡から南へ約68kmの調査地点(E16)である.

1999年8月10日の黒潮は, 潮岬から37kmの位置にあり, 一様に混合した水塊(水温28℃, 塩分34.0~34.3psu)が紀伊水道の陸棚部を占めている. 一方, 2000年8月8日の黒潮離岸時では, 黒潮は潮岬から65kmの位置にあり, 表層の水塊は水温27℃, 塩分31.9psuである. 水深30mでは, 水温22.0℃, 塩分34psuとなる. 50m以深は深層水であり, 両者の分布は同じである. 竹内ら(1997)から, 黒潮が離

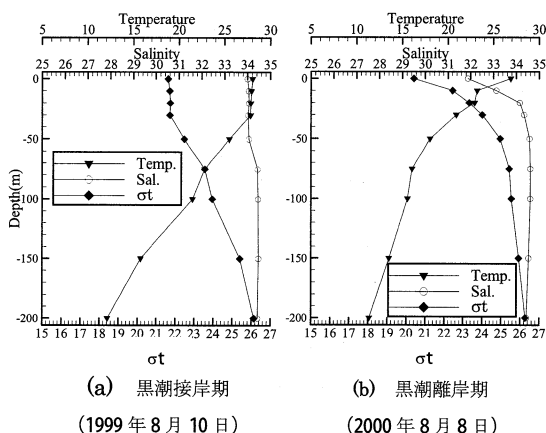


図-1 紀伊水道沖合の水温・塩分・密度差の鉛直分布

岸傾向になると, 表層から流出した海水を補うように, 外海の中層水が上昇しながら紀伊水道内の底層に進入したものと推測される. 沖合境界 I おける境界条件は, 旧徳島県水産試験場および和歌山県水産試験場が観測した水温と塩分の観測値を与えることにした. 沖合境界 II に関しても同様に, 旧兵庫県水産試験場および徳島県水産試験場の観測値を与えた.

#### (5) 数値実験の内容と実験結果の検証方法

紀淡海峡における流動構造の解明のために実施した現地調査(金ら, 2003)のうち, 1999年と2002年の夏季観測を黒潮接岸期, 2000年と2002年の夏季観測を黒潮離岸期として数値実験結果の検証に利用した.

数値実験の妥当性は既往の公表データとの比較から検証した. その内容は, ①8箇所の検潮所における潮位変化, ②26箇所の潮流楕円, ③残差流系(沖ノ瀬環流, 西

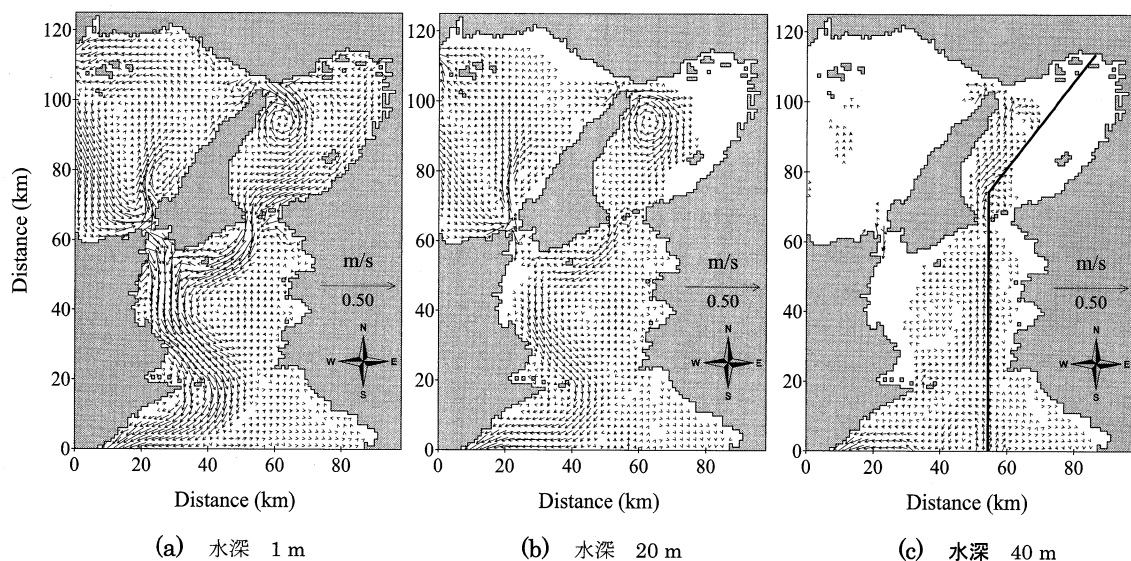


図-2 夏季の15日間積分により得られた残差流の計算結果

宮沖環流, エスチュアリー循環)である。

### 3. 数値実験結果とその考察

#### (1) 黒潮離岸時における残差流系

図-2に15日間積分で得られた残差流の水平方向成分を表層, 中層, 底層別にベクトルで示す。沖合境界における潮位変動を6分潮の線形和として与えたことから, 潮汐残差流は15日間の積分した値を採用した。

表層に関しては, 紀淡海峡を通る流れは大阪湾南部の東岸恒流帯や沖ノ瀬環流の影響を受けて南下するが, 北緯34度付近に存在する時計廻りの渦により流れは西に曲げられ, 徳島県の海岸に沿って太平洋に向かうのが明瞭にわかる。また, 中層(約20m水深)でも表層と同じ傾向であるが, 流速は相対的に小さい。興味を引く流動は水深40mにおいて紀淡海峡から大阪湾, さらに明石海峡に向かう流れである。紀淡海峡を越えて大阪湾に流入する流動が残差流系に認められた。数値実験で得られた紀伊水道における流動および残差流系特性は藤原ら(1997)のADCP観測ならびに診断モデルを用いた数値実験によっても確認されている。

#### (2) 紀淡海峡横断面における潮汐残差流系と一潮汐間積分した密度分布

黒潮の離岸時には, 紀淡海峡においては上層が南流, 下層付近では北流が卓越する傾向を示し, 密度成層の影響を受けて上下層で流動が反転する。しかし, 接岸時には水深方向にほぼ一様な流動構造を有しており, 黒潮離岸によって流動構造が大きく異なるという結果を得ている(中辻ら, 2002; 金ら, 2003)。この特徴を確認するために, 夏季の小潮時に観測した残差流と一潮汐積分した密度分布を示すとともに, 観測した潮汐時に対応する残差流ならびに密度の断面内分布の比較を行った。図-3(a)は観測結果, (b)は計算結果である。残差流のベクトル表示は, 上下方向は北流・南流を, 左右方向は西流・

東流を示している。

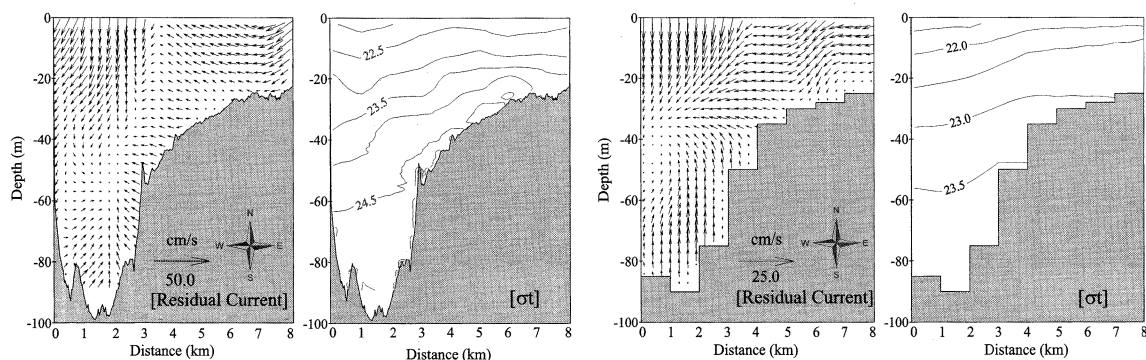
和歌山側の水深の浅い海域では, 西向きの流れを呈し, 表層での流速は速いが, 水深とともに減少する傾向が見られる。水深が大きくなり, 流速の速い徳島側では上層で南向き, 下層で北向きの流れを呈している。流れの向きが逆転するのは水面下約40mである。

一方, 密度の断面分布は観測・数値実験ともに成層状態にあり,  $\sigma_t$ の値は海表面・海底差で2.5となっている。両者に絶対値で約1.0程度の違いはあるが, 力学的には鉛直方向勾配が直接的に関与することから, 今回の数値計算は紀淡海峡で得られた観測結果を良好に再現していると判断できる。

つぎに, 紀伊水道から大阪湾湾奥に縦走する断面(図-2(c)に直線で示す)における塩分と密度( $\sigma_t$ )分布を示す。図-4(a)と(b)は, それぞれ黒潮の接岸期・離岸期の計算結果である。両分布の空間変化は沖合境界条件に依存する。両者を比較すると黒潮離岸期では強い成層状態にあり, 湧昇した深層水は紀伊水道, 紀淡海峡へと海底面に沿って運ばれると想像できる。紀伊水道の海水は紀淡海峡の底層部から大阪湾へ流入することがわかる。

#### (3) 粒子追跡による外海起源水塊の輸送過程

外海起源の水塊が太平洋から紀伊水道・紀淡海峡を経由して大阪湾に流入してくるのか, その可能性を探るために粒子追跡による数値実験を行なった。実験内容は紀伊水道沖合境界 I において横断方向に2km間隔, 鉛直方向に2m間隔(但し, 水深80m~90mの間)から, 粒子群を流速に比例させて5分毎に放流し, その軌跡を追いかける方法である。したがって, 粒子群は3次元で時間変動するが, 表現は非常に難しいので, 図-5に示すように粒子群の位置を海表面と大阪湾・紀伊水道の縦断面に直交投影することにより表現することとした。黒潮離岸期と接岸期の流動場と拡散場の計算は予め実行しておき, それぞれの粒子位置を割り出すことにより線形補完で流速



(a) 観測結果 (2005年8月10日)

(b) 数値実験結果

図-3 紀淡海峡横断面における残差流と一潮汐間積分した平均密度分布(黒潮離岸期)

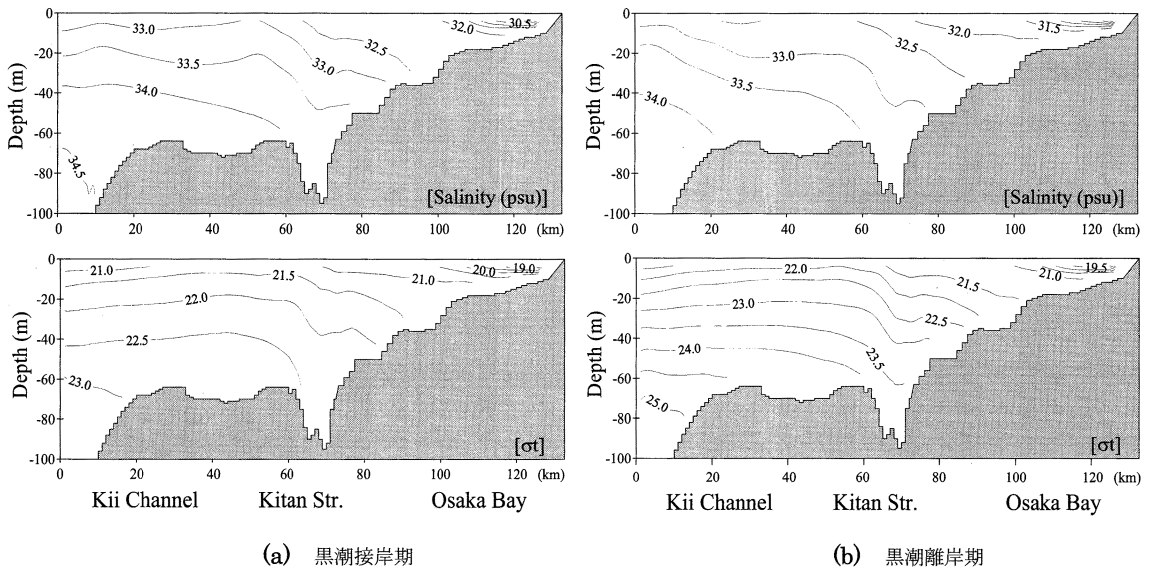


図-4 紀伊水道縦断面における1潮汐積分塩分と密度差分布

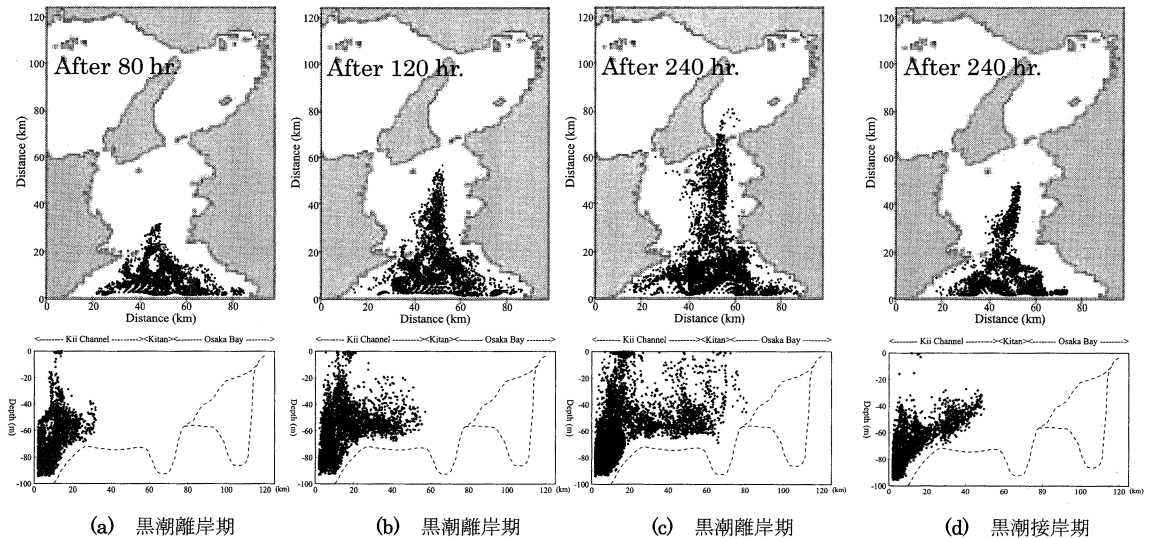


図-5 黒潮離岸・接岸期における外海起源の水塊の輸送分布特性

と拡散係数を与えて、つぎの時間ステップの粒子位置を決定する。

黒潮離岸時における底層水塊の挙動は、計算の開始後80時間で浦生田岬と日ノ御埼を東西につなぐ紀伊水道入り口に至っている。160時間後には海南まで北上し、約200時間後に紀淡海峡まで至る。240時間後の分布を見ると、外洋から紀伊水道の底層へ進入した外洋起源(低温・高塩)の水塊が紀淡海峡を通じて大阪湾南海部海域へ流入することが見てとれる。紀伊水道を輸送される粒子群の形状はまさに密度流(density current)の様相を呈して

おり、粒子群の散らばり程度から、水深10mの低温・高塩分の垂表層水塊が紀伊水道に進入しているものと考えられる。両図ともに水塊の先端はdensity headを形成している。図中の破線は紀伊水道ならびに大阪湾西部・東部海域の水深の概観を与えているものであり、目安程度に海底面を示している。

図-5(d)は黒潮接岸期の計算結果である。実験開始後240時間後の粒子群の分布を示しているが、黒潮離岸期に比して進入速度は小さい。

#### 4. 結果とその考察

瀬戸内海の各灘や各湾のリンや窒素等の起源を調べるとその多くが外洋起源であり、陸域からの栄養塩の汚濁負荷を大きく上廻ることを示唆する研究報告が多くなってきた。この指摘は、現在施行されている総量規制の理念を根本的に否定するものであり、瀬戸内海研究において早急に検討し、結論が求められる課題である。一方、著者らは1999年以来現地観測を含む研究を実施し、紀淡海峡を通じた栄養塩フラックスには黒潮蛇行が影響していることが判明したが、力学的に考察された研究はない。

本研究では、3次元流動・粒子追跡モデルを用いて、密度流的アプローチから現象の解明を図った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 紀伊水道の潮汐残差流はバロクリニック流れであり、水深40m以深では紀淡海峡を通して大阪湾へ流入する流れがある。その流れは黒潮経路に依存して決まる。
- 2) 紀淡海峡で観測された成層化ならびに底層の北向き流れは、瀬戸内海への栄養塩輸送を担うものである。外海起源の低温・高塩分の水塊の大阪湾への移流をもたらす力学機構である。
- 3) 粒子追跡によって可視化された現象は上述の諸過程を明確に説明した。また、紀伊水道で見られたのは密度の高い水塊が海底面に沿って流動する密度流である。中辻・藤原(1995)は大阪湾や東京湾、伊勢湾等、閉鎖性の強い成層内湾において、地衡流バランスによって生じる河川ブルームの偏向現象と、エスチュアリー循環による時計回りの水平循環流が観られることを観測と数値実験によって確認した。それは重力効果によって表層水塊がどのように拡がるかであった。本論文で扱ったのは、太平洋に起源をもつ高塩分・低水温の水塊が陸棚海底に沿って紀伊水道および大阪湾海底に運ばれる重力密度流である。太平洋から約65km隔てた紀淡海峡での成層構造や物質フラックスに黒潮の経路の影響が現れる可能性

を指摘することができた。それは3次元数値実験の結果を粒子追跡という視覚に訴えて初めて確信できた事実である。

沖合境界において黒潮の動態を適正に表現しえてない弱点も承知しているが、大阪湾の物質輸送や水質構造を議論する上で、紀淡海峡での海水交換の可能性は大いにある。表題にもう一つの密度流という言葉を用いたのはそのような意味を持たせたいからである。

**謝辞：**本研究はわかやま海域環境研究機構の研究活動で実施した現地観測に鼓舞され、継続している研究成果の一部である。記して関係者に謝意を表する。

#### 参考文献

- 金 漢九・西田修三・中辻啓二(2003)：紀淡海峡における流動構造と物質輸送に及ぼす黒潮蛇行の影響，第50回海岸工学論文集，pp.926-930。
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一(2002)：海洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送，第49回海岸工学論文集，pp.1076-1080。
- 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，第73巻海と空，pp.81-92。
- 武岡秀隆(2006)：沿岸域における外洋起源栄養物質質量の見積もり法とその問題点，沿岸海洋研究，第3巻，第2号，pp.105-111。
- 中辻啓二(1994)：大阪湾における残差流系と物質輸送，水工学に関する夏期研修会，94-A-9，pp.1-28。
- 中辻啓二・藤原建紀(1995)：大阪湾におけるエスチュアリー循環機構，第42回海岸工学論文集，pp.396-400。
- 中辻啓二・西田修三・金 漢九・山中亮一(2002)：紀淡海峡における残差流と物質輸送の現地観測，第49回海岸工学論文集，pp.1071-1075。
- 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)：海洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量，第44回海岸工学論文集，pp.1061-1065。
- 藤原建紀・小林志保・高志利宣(2003)：瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測，第50回海岸工学論文集，pp.951-955。
- 藤原正幸・大橋行三・藤原建紀(1997)：診断モデルによる8月の紀伊水道における残差流シミュレーション，第44回海岸工学論文集，pp.411-415。