

冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境

阿保勝之¹・杜多 哲²・藤原建紀³

冬季の東部瀬戸内海における無機態窒素濃度に及ぼす残差流の影響を明らかにした。診断モデルを用いて、密度場及び流速場から東部瀬戸内海の残差流を計算した。残差流は風の影響を強く受け、季節風の強い 1 月から 2 月には東向きの通過流が発生し、播磨灘北部では強い東向きの残差流が発生した。この残差流に伴い栄養塩濃度の低い水塊が燧灘から東進し備讃瀬戸および播磨灘の栄養塩濃度が低下した。播磨灘北部の栄養塩濃度は、夏季に低く秋に上昇して 12 月頃に最大となり、冬季になると低下した。この冬季の濃度低下は東向きの残差流の発生した後に起こり、西よりの季節風が早期から強い年には栄養塩濃度の低下が早くノリ養殖不作の原因になる。

1. はじめに

近年、東部瀬戸内海においては栄養塩不足が原因でノリの色落ちが頻繁に発生してノリ養殖に打撃を与えている。栄養塩不足の要因については、大型珪藻による消費、外洋からの栄養塩供給量の低下、陸域負荷の減少など多くの要因が重なっていると考えられる(瀬戸内水研, 2005)。物理的要因としては海域の流動が重要であり、特に残差流は移流効果が高く、ノリ漁場への貧栄養水塊の流入に関係するなど栄養塩環境に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、ノリ養殖が行われる冬季の残差流を診断モデルにより計算するとともに、海域の栄養塩環境に及ぼす残差流の影響を検討し、ノリ不作(栄養塩不足)の原因となる物理的環境を明らかにした。

2. 資料と方法

(1) 調査資料

2004 年度から農林水産省農林水産技術会議「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業」により関係各県と共同研究を行い、東部瀬戸内海(備讃瀬戸～播磨灘)のモニタリング調査、貧栄養化の原因究明および栄養塩濃度予測に取り組んでいる。本研究では、2004 年 11 月～翌年 3 月まで兵庫、岡山、香川、広島 の 4 県が実施したモニタリング調査のうち、毎月上旬の水温・塩分および栄養塩データを解析に用いた(図-1)。さらに、4 県が実施した浅海定線調査の水温・塩分データ(2001 年～)も利用した。また、海上風の推定には AMeDAS 毎時風向・風速データを用いた。

(2) 診断モデル

残差流の計算には診断モデル(藤原ら, 1997; 柳ら, 1998; 寛ら, 2002)を用いた。診断モデルは与えられた

密度場に対応する流動場を計算するモデルである。計算領域は燧灘から紀伊水道とし、計算格子は $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 、鉛直方向には播磨灘の最大水深 40 m までは 5 m 間隔、それ以深は 10 m 間隔とした。まず潮流計算を行った後、渦動粘性係数($\nu_h = 0.016 \times T_p \times U^2 (\text{m}^2/\text{s})$; T_p は潮汐周期, U は潮流振幅, $\nu_v = \nu_h \times 10^{-5}$) および潮汐応力を計算した(図-2)。さらに、東部瀬戸内海における密度場と流速場から流動場(残差流)を推定した。密度場はモニタリング調査データ(水温、塩分)から求め、流速場は海域周辺の AMeDAS 毎時風向・風速データ(各月上旬の平均値)を空間補完して求めた。ただし、一般に AMeDAS 風速データは海上風を過小評価するため、藤原(1997)に従い観測値を 2 倍して風速場を求めた。

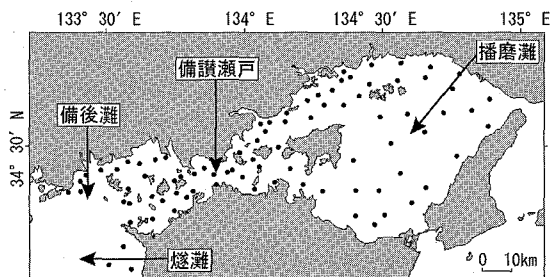


図-1 東部瀬戸内海における調査定点

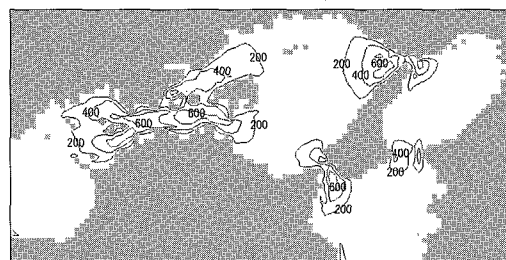


図-2 計算領域と水平渦動粘性係数 (m^2/s)

1 正会員 農博 (独法)水産総合研究センター 養殖研究所
2 農博 (独法)水産総合研究センター 養殖研究所
3 正会員 農博 京都大学教授 大学院農学研究科

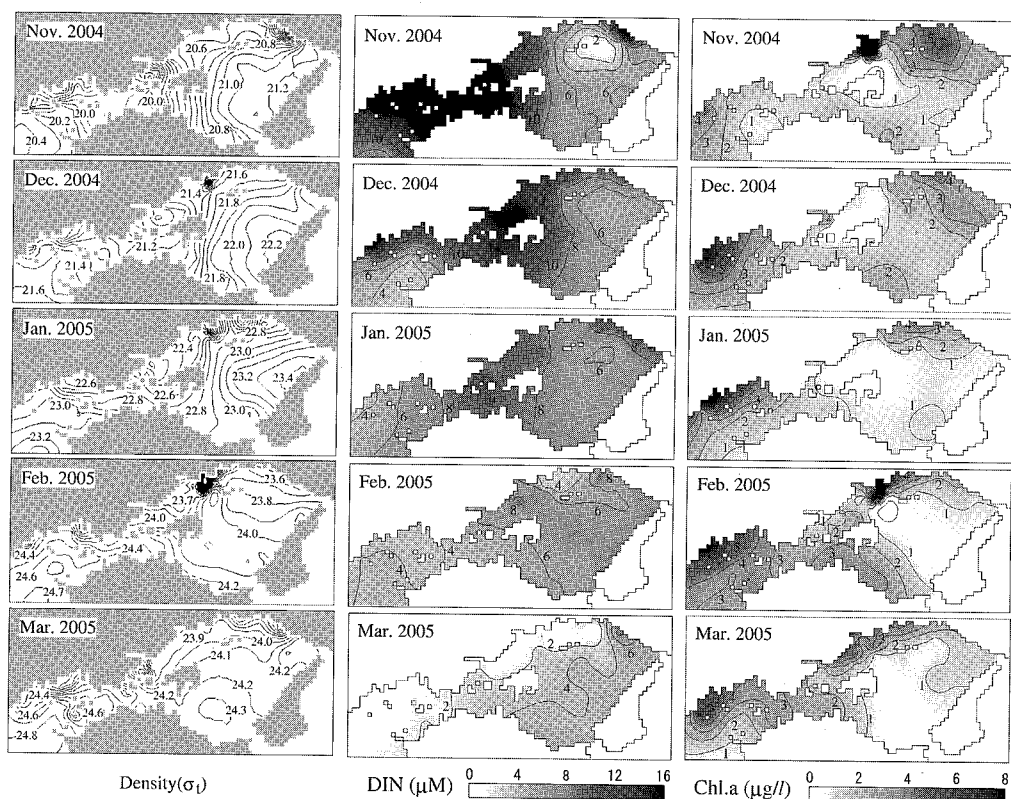


図-3 密度、無機態窒素 (DIN)、Chl.a 濃度の水平分布 (表層)

3. 結 果

(1) 密度 場

2004 年度冬季の東部瀬戸内海 (備讃瀬戸～播磨灘) における表層の密度分布 (観測値) を図-3 (左図) に示した。11 月から翌年 1 月までは備讃瀬戸で低密度となっていたが、2 月以降は播磨灘北部で低密度となっていた。なお、密度分布は塩分分布とはほぼ一致していた。

(2) 風 速 場

冬季の東部瀬戸内海地域の風速場を図-4 に示した。11 月～12 月には風は比較的弱かったが、1 月になると季節風が強くなり、備讃瀬戸から播磨灘では強い西風 (東向きの風) となった。3 月になると風向は西より (東向き) であったが風速は弱くなった。

(3) 残 差 流

残差流の計算結果を図-5 に示した。表層の残差流を見ると、11 月～12 月には、播磨灘北東部から小豆島に向かって南西方向に流れ、さらに四国北東部沿岸を東へ流れていた。また、備讃瀬戸では燧灘へ向かって西進していた。北西～西よりの季節風が強くなった 1 月以降は、播磨灘北部沿岸で強い東向きの流れが見られ、播磨灘中央部では南西向きの流れとなっていた。備讃瀬戸では東向きの残差流となり、備讃瀬戸から播磨灘へ向かう流れ

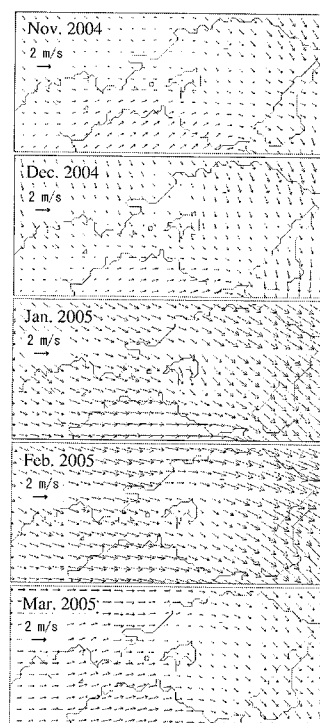


図-4 風速場

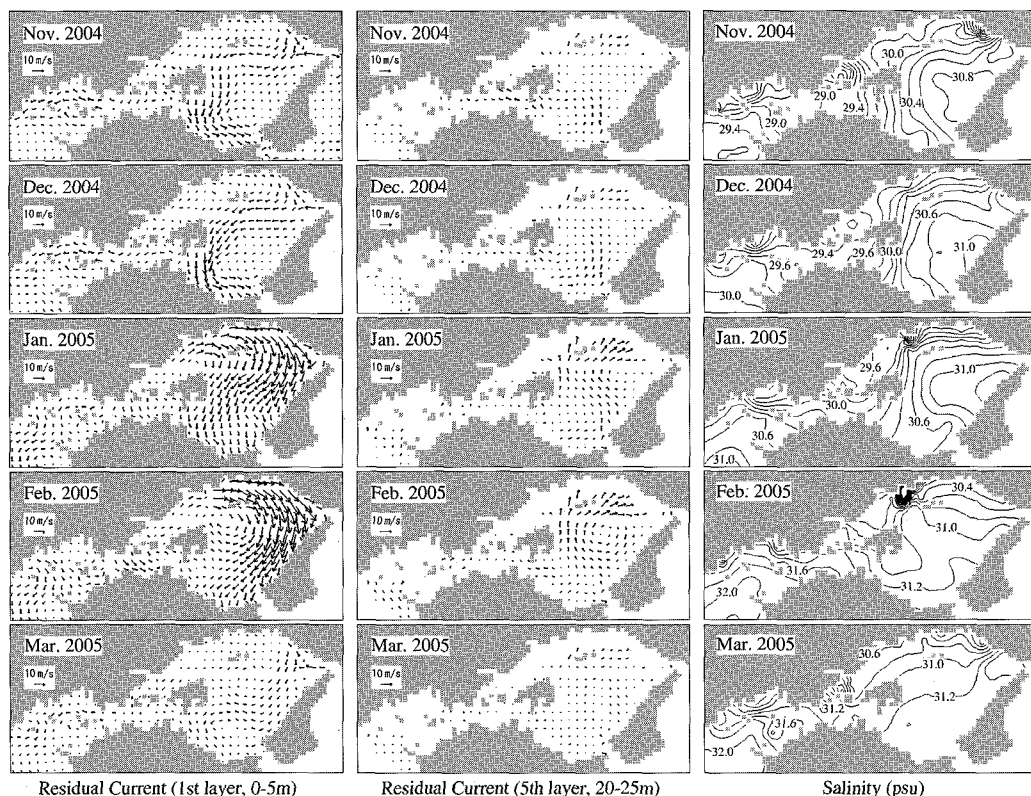


図-5 残差流計算結果(左:第1層,中央:第5層)と表層塩分観測値(右)

が発生していた。一方、下層の残差流は、播磨灘北部で北東方向へ流れていた。

(4) 栄養塩濃度

表層の無機態窒素(DIN)濃度およびクロロフィル a 濃度の分布(観測値)を図-3に示した。無機態窒素濃度は11月~12月には備讃瀬戸で高かったが、1月以降は濃度が低下し、低濃度域が燧灘・備後灘から備讃瀬戸・播磨灘北部へ拡大した。クロロフィル a 濃度は、播磨灘北部沿岸および備後灘で高濃度であった。11月~12月には小豆島周辺にクロロフィル a の低濃度域が見られ、1月以降は低濃度域が拡大し、2月には播磨灘中央部、3月には播磨灘中部~南部で低濃度域が見られた。

4. 考 察

(1) 残差流と風の関係

東部瀬戸内海の残差流は風の影響を強く受けていた。風が弱かった11月~12月と季節風の強かった1月~2月の残差流のパターンは大きく異なっていた。播磨灘北部においては、11月~12月には残差流が小さかったが、季節風の強い1月~2月には強い東向きの残差流が上層で見られた。また、備讃瀬戸においては、11月~12月には西向きの残差流であったが、季節風の強い1月~2

月には東向きの残差流となり燧灘から播磨灘に向かって流れていた。瀬戸内海では風および東西の水位差によって通過流が生じる(藤原・肥後, 1986; 藤原ら, 2006; 國井・藤原, 2006)。今回の備讃瀬戸における残差流の計算結果は、冬季の西よりの季節風によって東向きの通過流が発生したことを示している。一方、11月~12月に備讃瀬戸で見られた西向きの残差流は、水位差など風以外の要因によって発生したと考えられる。

(2) 残差流と水塊の移動

塩分分布(図-5, 右図)を見ると、11月~12月には備讃瀬戸で低塩分となっていた。備讃瀬戸は河川からの流入量が多い(山本ら, 1996)、10月~12月の降雨の影響により備讃瀬戸の塩分が低かったと考えられる。一方、1月以降は播磨灘北部で低塩分となり、2月~3月には燧灘から備讃瀬戸にかけて高塩分となった。季節風の強まった1月以降は、備讃瀬戸から播磨灘北部にかけて強い東向きの残差流が見られたことから、燧灘に存在した高塩分の水塊が備讃瀬戸へ東進し、備讃瀬戸にあった低塩分水が播磨灘北部へ移動したと考えられる。

(3) 残差流が栄養塩環境に及ぼす影響

残差流に伴う水塊移動は、東部瀬戸内海の栄養塩動態に大きな影響を与えている。11月~12月には備讃瀬戸

で無機態窒素濃度が高かったが、1月以降は高塩分化とともに濃度が低下し、3月には燧灘から播磨灘北部にかけて非常に低濃度となった。燧灘・備後灘においてプランクトンにより栄養塩が消費されて貧栄養水塊が形成され、これが東向きの残差流によって備讃瀬戸から播磨灘へ拡大したと考えられる。また、1月～2月には播磨灘北部沿岸で東向きの強い残差流が生じたため、大阪湾から播磨灘への栄養塩供給が少なかったと考えられる。

(4) 残差流と冬季の栄養塩濃度低下

季節風が吹く冬季(1月～2月)には残差流のパターンが大きく変化して東向きの通過流が発生し、備讃瀬戸及び播磨灘北部の無機態窒素濃度が低下した。これらの海域の栄養塩環境は、東向きの残差流が発生する時期及びその大きさに影響されると考えられる。播磨灘における無機態窒素データ(兵庫県, 1999～2005)及び本研究の調査データを用いて、2001年度～2005年度の播磨灘北部の平均濃度と平年値を求めた(図-6)。播磨灘北部の無機態窒素濃度は平均的には夏季に低く、秋から上昇して12月に最大となり、その後は低下していた。この無機態窒素の濃度低下が始まる時期は年によって異なっており、2001, 2002, 2003, 2004, 2005年度には、それぞれ12月, 11月, 1月, 3月, 12月に濃度低下が始

まった。特に、2004年度は2月まで高い状態が続いたのに対し、2002年度と2005年度は早期に濃度低下が始まり冬季の濃度が非常に低かったのが特徴である。

この冬季の窒素濃度低下には、冬季に見られる東向きの残差流が大きく関係していた。図-7には、2001年度から2005年度までの11月・12月の残差流を示した。

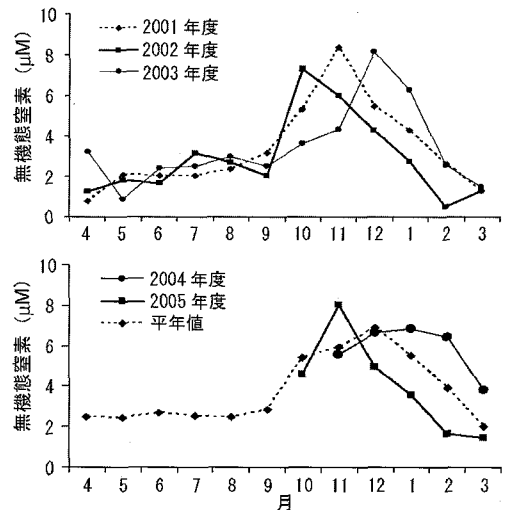


図-6 播磨灘北部の無機態窒素 (DIN) 濃度

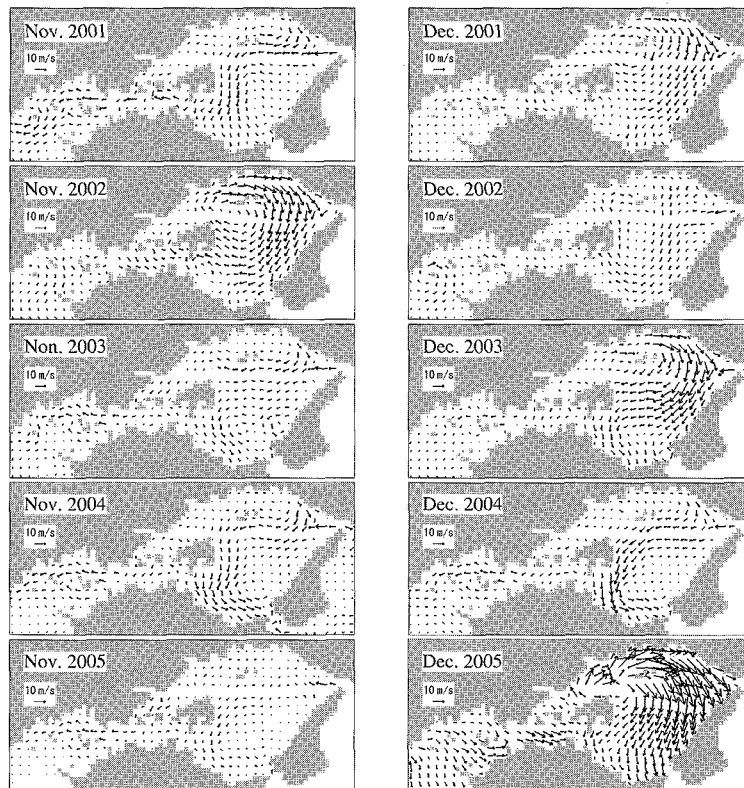


図-7 11月, 12月の残差流計算結果 (2001～2005年)

濃度低下が早期に起きた2002年度には11月から東向きの残差流が見られ、12月に濃度が大きく低下した2005年度には12月に非常に強い東向きの残差流が発生していた。12月と1月にそれぞれ濃度低下が始まった2001年度および2003年度には、12月に東向きの残差流が発生していた。また、2月まで高濃度が続いた2004年度には、12月まで西向きの残差流が続いていた。このように、東向きの残差流の発生時期は窒素濃度の低下時期とよく対応していることから、東向きの残差流を駆動する季節風の発生時期と強さから東部瀬戸内海の窒素濃度変化をある程度予測できると考えられる。

(5) 栄養塩環境とノリ養殖

冬の窒素濃度の低下がいつ始まるかはノリの養殖生産に大きく影響する。2002年度には残差流が早くから真冬の特徴(強い東向きの流れ)を示し、窒素濃度の低下が早期に始まったため、東部瀬戸内海のノリ養殖は不作となった。2005年度は、早くから冬型の気象となったため、窒素濃度の低下が早く低濃度で推移しノリ養殖にとっては厳しい栄養塩環境が続いた。井上ら(2004)は2002年秋季には例年より早く季節風(西風)が吹いたため、西から貧栄養水が流入して東部瀬戸内海の栄養塩濃度が早い時期から下がったとしている。今回の残差流の計算結果は、2002年度秋季には早くから東向きの通過流が発生したことを示しており、季節風に伴う西からの貧栄養水の移動がノリ色落ちの要因であることを示唆している。

一方、松岡ら(2005)は、香川県におけるノリ生産量と漁期中の積算降水量に相関関係があることを示し、秋季の降水量が少なかったことが備讃瀬戸東部(香川県沿岸)における2002年度のノリ色落ちの主原因であるとした。東部瀬戸内海の中でも、地域によって冬季の栄養塩環境(栄養塩不足の原因)が異なると考えられる。播磨灘北部では、秋季には残差流は小さいが、冬季には強い東向きの残差流が発生する。一方、播磨灘南部では残差流は南西向きに流れたのち香四国北東部沿岸を東へ流れており、香川県沿岸の残差流は秋季と冬季であまり変化がない。したがって、播磨灘北部における栄養塩環境は冬季の残差流の影響を強く受けるが、香川県沿岸の栄養塩環境は冬季の残差流や季節風の影響が小さく、陸水流入など他の影響が大きく現れると考えられる。

5. おわりに

今回の研究では、冬季の東部瀬戸内海の栄養塩環境が残差流の影響を強く受けることを示した。しかし、瀬戸内海の栄養塩環境は、気象条件による短期変動だけではなく、外洋からの流入負荷の影響を受けて長期変動している(藤原ら, 2003; 小林ら, 2004)。また、ユーカン

ピア(*Eucampia zodiacus*)やコスキノディスクス(*Coscinodiscus wailesii*)など大型珪藻の大発生による栄養塩の消費も栄養塩不足の大きな要因となっており(西川・堀, 2004a, 2004b)、栄養塩不足及びノリ不作の原因を特定することは容易ではない。今後、これらの多くの要因を総合的に解析することにより、栄養塩濃度の変動機構を解明する必要がある。

謝辞: 本研究は農林水産技術会議の先端技術高度化事業「瀬戸内海における養殖ノリ不作の原因究明と被害防止技術の開発」により行われた。本事業の中でモニタリング調査を実施された兵庫県、岡山県、香川県、広島県の担当者各位に敬意を表します。

参考文献

- 井上由紀子・藤原建紀・堀 豊・原島 省(2004): 東部瀬戸内海における冬季の栄養塩分布と季節風 - 2002年度のノリの色落ちに関して -, 海洋学会春季大会講演要旨, p. 213.
- 寛 茂穂・藤原建紀・山田浩且(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, 49巻, pp. 386-390.
- 國井麻紀・藤原建紀(2006): 瀬戸内海の東西の水位差によって起きる通過流, 海洋気象学会誌・海と空, 81巻, pp. 31-22.
- 小林志保・高志利宣・藤原建紀(2004): 瀬戸内海における栄養塩輸送の長期変動とその低次生態系への影響, 海洋気象学会誌・海と空, 80巻, pp. 61-68.
- 瀬戸内海区水産研究所(2005): 瀬戸内海における養殖ノリ不作の原因究明と被害防止技術の開発, 養殖, 526号, pp. 96-99.
- 西川 哲也・堀 豊(2004a): ノリ色落ちの原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響, 日本水産学会誌, 70巻, pp. 31-38.
- 西川 哲也・堀 豊(2004b): ノリ色落ちの原因藻 *Coscinodiscus wailesii* の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響, 日本水産学会誌, 70巻, pp. 872-878.
- 兵庫県(1999): 平9年度兵庫水試事業報告, pp. 138-149.
- 兵庫県(2000a): 平10年度兵庫水試事業報告, pp. 130-141.
- 兵庫県(2000b): 平11年度兵庫水試事業報告, pp. 136-147.
- 兵庫県(2001): 平12年度兵庫水試事業報告, pp. 125-130.
- 兵庫県(2003): 平13年度兵庫水試事業報告, pp. 139-144.
- 兵庫県(2004): 平14年度兵庫水技七年報, pp. 85-90.
- 兵庫県(2005): 平15年度兵庫水技七年報, pp. 115-120.
- 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, 海岸工学論文集, 44巻, pp. 411-415.
- 藤原建紀・肥後竹彦(1986): 瀬戸内海の通過流量と物質輸送に対する風の効果, 沿岸海洋研究ノート, 23巻, pp. 109-119.
- 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, 海岸工学論文集, 50巻, pp. 951-955.
- 藤原建紀・小林志保・國井麻紀・宇野奈津子(2006): 瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動, 沿岸海洋研究, 43巻, pp. 129-136.
- 松岡 聡・吉松定昭・小野 哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚(2005): 備讃瀬戸東部(香川県沿岸)におけるノリ色落ちと水質環境, 沿岸海洋研究, 43巻, pp. 77-84.
- 柳 哲雄・黒田 誠・石丸 隆・才野敏郎(1998): 伊勢湾の夏季の残差流, 沿岸海洋研究, 35巻, pp. 185-189.
- 山本民次・北村智顕・松田 治(1996): 瀬戸内海に対する河川流入による淡水, 全窒素及び全リンの負荷, 広島大学生物生産学部紀要, 35巻, pp. 81-104.