

黒潮流路変動に伴う沿岸域への栄養塩流入現象

八木 宏*・足立久美子**・二平 章***・高橋正和****

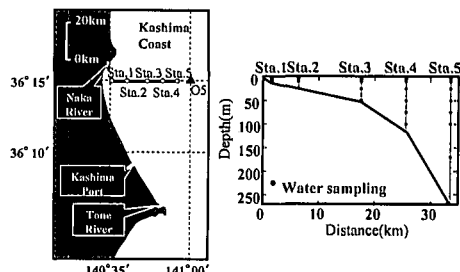
開放性沿岸域の栄養塩動態に与える外洋影響の実態を明らかにするために、鹿島灘海域を対象とした栄養塩計測を2001年2月～11月に実施した。観測結果に基づいて、鹿島灘沿岸域における基本的な栄養塩分布とその季節変化の特徴を把握した上で、季節変化では説明出来ない急激な栄養塩変動現象があることを示した。さらに広域観測データなどから、これが黒潮流路の接岸によって沖合下層の高栄養塩水塊が沿岸域に流入したのが原因であること、さらに過去の黒潮流路接近時との流況比較から、鹿島灘沿岸域には黒潮の接近によって南下流が励起され親潮系水が流入する場合と北上流が発達し沿岸湧昇が発生する場合があることを示した。

1. はじめに

最近の足立ら(1994)、奥西ら(2000)の研究によって、これまで内湾域や藻場・干潟と比べ貧栄養で生産力が低いと考えられてきた開放性砂浜海岸域が、比較的高い基礎生産力を有しており、開放的な環境下であっても再生産過程が重要な役割を果たす海岸域物質循環系の存在が指摘されている。したがって、今後は沿岸域全体の物質循環の全体像を明らかにする中で開放系の浅海域物質循環機構を解明していくことが不可欠ある。著者らは、既に開放性沿岸域として鹿島灘を対象とした栄養塩の動態観測を開始しているが(大森ら, 2001)、今回の研究では浅海域から外海域までを含むより広域の栄養塩・クロロフィルa量の周年観測を実施し、その基本的な季節変動特性を把握した上で、季節変化以外の栄養塩変動を引き起こす要因として外洋影響に着目し、黒潮流路変動と栄養塩供給過程の実態把握を試みた。

2. 現地観測の概要

本研究では開放性沿岸域として鹿島灘海域を対象として、2001年2～11月の期間に茨城県水産試験場調査船「ときわ」によって栄養塩計測を中心とした調査を原則として月1回行った(但し7, 9月は欠測)。調査は図-1に示すように、茨城県大洗沖の東西ライン上に5カ所の観測点(Sta.1～5)を設け、①採水による溶存態窒素(NO_2 , NO_3 , NH_4), 溶存態リン(PO_4), 溶存態珪素(SiO_2), 表層クロロフィルa量の計測, ②蛍光光度計付STDによる水温, 塩分, クロロフィルa濃度(蛍光光度値から換算)の鉛直分布計測を行った。このうち、採水によるクロロフィルa量の分析については、試水200ないし300mlをWhatman GF/Fフィルターでろ過し、DMFによる色素抽出ののち、蛍光法によりクロロフィルa量を測定した。また栄養塩については試水をメンブ



(a) 対象海域と観測ライン (b) 観測ライン上の海底地形

図-1 観測対象海域と観測位置

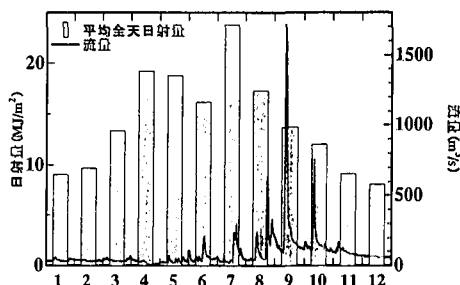


図-2 2001年の全天日射量(銚子)と那珂川(野口)の流量

レンフィルター(孔径 $0.45\mu\text{m}$)でろ過し、プラン・ルーベ社製 TRAACS800により、ろ水中の濃度を測定した。図-2は、栄養塩変動に影響を与えられると考えられる月平均全天日射量(銚子地方気象台)と鹿島灘海域に流出する那珂川の流量の時系列を示したものである。日射量は、3月から上昇し、7月に最大を示した後減少している。流量は、1～5月の期間は小さく、8月下旬と9月中旬に比較的大きな出水が発生した。

3. 観測結果と考察

3.1 栄養塩及びクロロフィルa量の空間構造とその季節変化特性

図-3に、各季節の代表として、2, 5, 8, 10月のクロロフィルa量と溶存態窒素(DIN)の東西断面分布を

* 正会員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科
** 正会員 水 修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
*** 水 博 茨城県水産試験場沿岸資源部長
**** 茨城県水産試験場沿岸資源部

示す。クロロフィル a 量は、2 月に沿岸域から増加が始まり、5 月に海域全体で濃度レベルが高くなっている。8 月には、陸岸近くを除きクロロフィル a 濃度は大きく減少し、沖合の水面下 50 m 程度を中心として弱い極大層が現れており、10 月には陸岸に近い海域の表層で高い値を示す。一方、DIN は、2 月には陸岸に近い領域を除き海域全体で全水深的に濃度レベルが高いものの、5 月には表層から濃度が低下しており、8 月以降は水面下 100 m 程度までの濃度が非常に低くなっている（陸岸近くを除く）。以上の事実から鹿児島沿岸域の栄養塩・クロロフィル a 量の空間構造とその季節変化は、①冬季は海域全体に栄養塩が豊富に存在し、2 月には浅海域からクロロフィル a 量の増加が始まる、②春季は植物プランクトンの季節的なブルームによってクロロフィル a 量が表層を中心として高くなり、一方栄養塩は表層から消費され減少していく、③夏季には水面下 100 m 程度まで栄養塩濃度が大きく低下し沖合水面下 50 m 程度に弱いクロロフィル a 極大層が存在する状態になる、④秋季には河川水の流入に対応して陸岸近傍で表層クロロフィル a 量が増加する、とその基本的な特徴をまとめることができる。

次に、栄養塩比に基づき浅海域から外海域までの栄養塩成分の特徴を検討した。図-4 は、浅海域、陸棚海域、外海域の代表として、Sta. 1, Sta. 3, Sta. 5 の 2~11 月のすべての栄養塩データの NP 比 (DIN/PO_4) と SN 比 (DIN/SiO_2) の関係を示したものであり、図中には Redfield 比 (NP 比: 16, SN 比: 0.94) を点線で表示している。これを見ると、外海域の特徴は 2~6 月の期間は Redfield 比よりも多少小さい比較的稳定した値を示すのに対して、8~11 月には NP 比が小さく SN 比が大きくなる形に傾向が大きく変化することである。これは、基本的に外海水は窒素に比べ相対的にリン、珪素が多い傾向がある上に、夏季~秋季にかけて表層を中心に栄養塩が消費されると（図-3 参照）、リン、珪素に比べ窒素が大きく減少するためと考えられる。一方、浅海域は外海域に比べ NP 比が大きい領域に値が分布する傾向があり、これは陸岸に近い浅海域において窒素過剰の陸水影響がより強く反映されていることを示している。以上ことから Redfield 比を基準に考えれば、外海域で窒素制限の傾向、浅海域ではリン制限の傾向があり、陸棚海域はその中間的に性質を示す。一方、珪素については、春季ブルーム期の沖合表層で一部珪素不足の傾向が見られるが全体的には制限因子になることは少ない。

次に、栄養塩の岸沖方向変化の特徴を把握するために Sta. 2（水深 20 m）及び Sta. 5（水深 170 m）における水面下 20~25 m の DIN の時系列を図-5(a) に示す。これを見ると、5 月を除けば、2~4 月にかけて外海側 (Sta.

5) で DIN 濃度が相対的に大きく、6 月以降はこれが逆転し、浅海域で濃度が相対的に高くなっている。このような岸沖方向の濃度勾配とその季節変化は、冬季から春季にかけては外海から沿岸域への栄養塩輸送が主体的であるのに対し、初夏から秋季にかけては逆に沿岸から外海側に向けて栄養塩輸送が行われている可能性を示している。

3.2 短期的な栄養塩変動現象

図-5(a) に示したように、5 月には季節変化では説明することができない急激な栄養塩濃度の上昇が発生した。ここでは、この短期的な栄養塩変動に着目して、その原因と性質について検討を加えた。図-5(a) に DIN 濃度を示した Sta. 2 は、比較的陸岸に近い点であることから、栄養塩変動の原因としてはまず河川水を中心とした

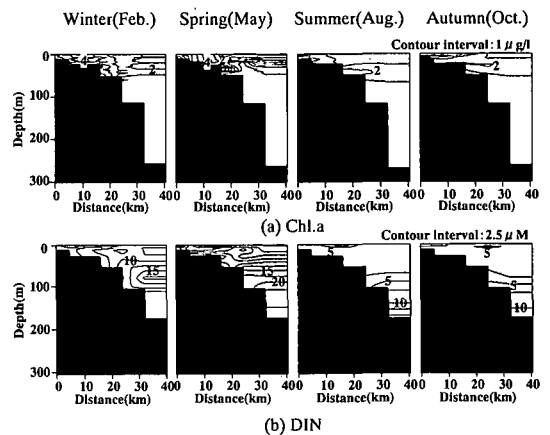


図-3 季節別のクロロフィル a 量と DIN の東西断面分布

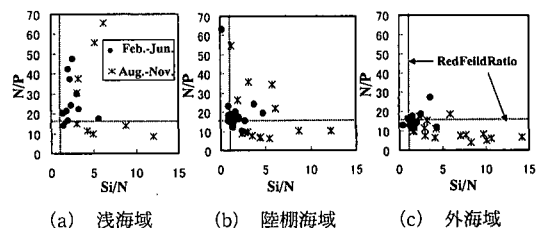


図-4 NP 比-NS 比関係の浅海域、陸棚海域、外海域の比較

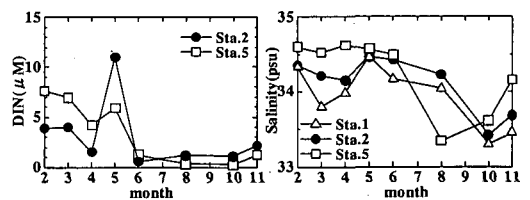
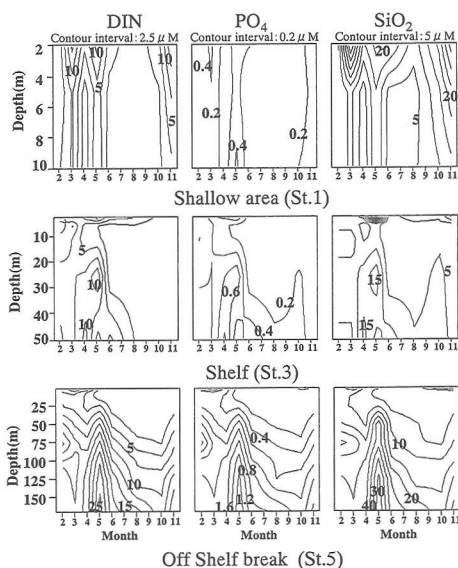


図-5 DIN と塩分の経時変化 (Sta. 2, Sta. 5)

図-6 DIN, PO₄, SiO₂の時空間コンター

陸水影響が考えられる。そこで、この時の塩分を調べると(図-5(b)) 栄養塩濃度が急激に上昇した5月には低塩分化ではなく高塩分化しており、このことは急激な栄養塩変動が陸水影響ではなく何らかの外海からの影響であることを示唆している。図-6は、栄養塩の時空間的な変動を示すために、浅海域(Sta.1)、陸棚海域(Sta.3)、外海域(Sta.5)におけるDIN, PO₄, SiO₂濃度の時空間分布を示したものである。これを見ると、栄養塩の急激な上昇が発生した5月には、外海域において顕著に高栄養塩化しており、その影響が陸棚海域、浅海域にも波及している様子がわかる。

図-7は、栄養塩の急激な上昇が発生した5月とその前後の4, 6月について、(a)人工衛星 SeaWiFS による表層クロロフィルa量、本観測による(b)クロロフィルa量、(c) DIN, (d)水温の東西断面分布を示している。これを見ると、①4月から5月にかけて表層付近でクロロフィルa濃度が上昇すること、②5月に沖合中層以深を中心に栄養塩濃度が上昇すること、③栄養塩濃度の上昇に対応するように、沖合下層の低温水が陸棚斜面に沿って上昇し沿岸域に接近していることなどがわかる。そこで、4, 5, 6月について、最沖側観測点(Sta.5)の塩分水温データからTS図を作成し、水塊特性の変化を調べた(図-8)。その結果、4, 6月に比べて、5月には中層以深の水塊が高密度化していることがわかった。これらの事実、5月には沖合中層以深の水塊の沿岸域へ湧昇現象が発生し、それが急激な栄養塩濃度の上昇を引き起こしたことを示している。

この時の外洋の状態を気象庁海洋月報に基づき検討し

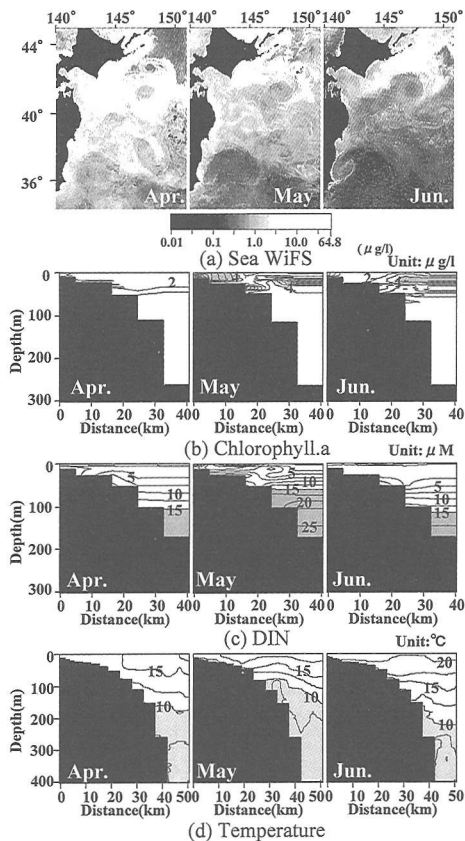


図-7 黒潮流路変動前後のクロロフィルa, 栄養塩, 水温の東西断面分布 (クロロフィルa量は4 μg/l, DINは15 μM, 水温は10°C以上にハッチ)

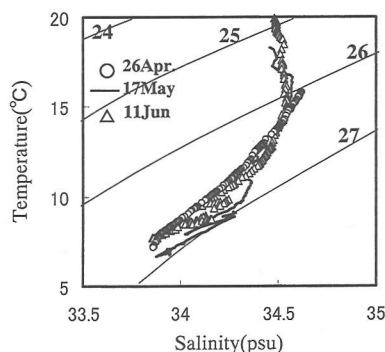


図-8 黒潮流路変動前後の Sta. 5 における TS 図

た結果、5月は黒潮流軸が急激に鹿島灘沿岸に接近した時期にあたる事が確認された(気象庁, 2001)。この傾向は、図-7(a)の SeaWiFS の画像データにも現れており、4月から5月にかけて、黒潮域と推定される低クロロフィルa領域が沿岸に接近している。一方、沿岸域のクロロフィルa濃度のレベルは SeaWiFS データ及び観

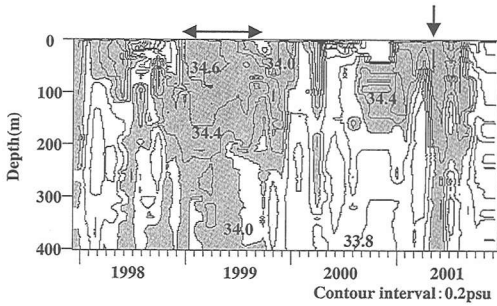


図-9 大洗沖観測定点（茨城水試）における1998～2001年までの塩分の時空間コンター（34以上をハッチ）

測によるクロロフィルaの断面分布からわかるように春季ブルーミングによって濃度レベルが高い状態を示しており、結果として沿岸域とその沖側海域の間でクロロフィルa濃度のコントラストが非常に明瞭になっている。

以上の検討から、観測期間中の5月に発生した栄養塩の短期的な変動現象は黒潮流路の鹿島灘沿岸域への接近に伴う湧昇現象によって、沖合下層から高栄養塩水塊が沿岸に波及したことが原因であると考えられる。楊ら(2001)によれば、1999年6月に黒潮流路が陸岸に接近することによって常磐海域相馬沖で湧昇現象が発生したことが報告されており、黒潮が離接岸を活発に繰り返す常磐～鹿島灘海域では、黒潮流路接近時に湧昇現象が発生することで高栄養塩水塊が沿岸域へ供給されることが今回の検討によって明らかとなった。

3.3 黒潮接近時における鹿島灘沿岸域の流れの応答

前節の検討によって、栄養塩の短期変動現象として黒潮流路接近時に生じる湧昇現象があることがわかった。黒潮接近時に栄養塩供給があるとすれば沿岸域の基礎生産力にとって重要な要素であることから、ここでは過去のデータも併せて、黒潮流路接近に対する沿岸域の応答特性について検討を加えた。

図-9は、鹿島灘海域の長期的な水塊変動特性を示すために、茨城県水産試験場が毎月実施している定期海洋観測の観測定点のうち、本研究の観測点Sta.5に最も近い観測点O5（図-1参照）における塩分鉛直分布を1998年から2001年までの4年間について時空間コンターとして示したものである。これを見ると、本観測期間中に栄養塩変動が発生した2001年5月に（縦矢印）急激な高塩分化が発生しており黒潮流路が接近したことを示しているが、これ以外の時期にも高塩分化は比較的頻繁に発生していることがわかる。特に、黒潮流路の北上傾向が強かった1999年には1年間を通して高塩分的な状態が継続している（図中横矢印）。このうち1999年8月については、著者らが行った現地調査によって、黒潮流路の急

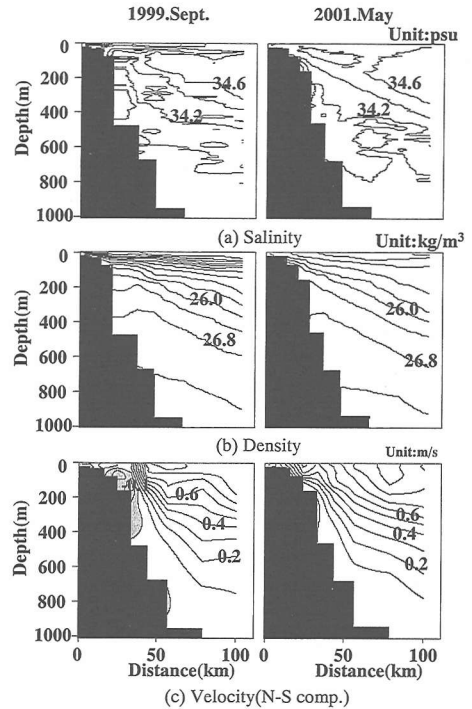


図-10 黒潮流路接近時の塩分・ σ_t ・力学計算より算出した南北流速成分の東西断面分布（流速は北向成分を正とし負の部分ハッチ）

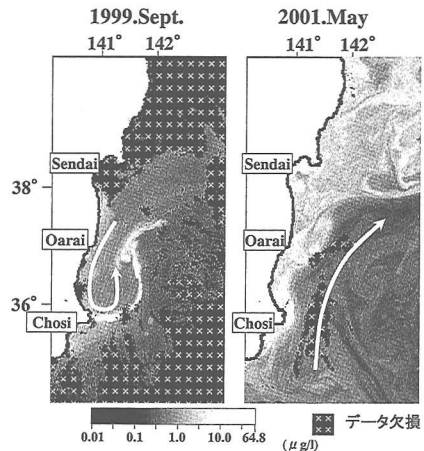


図-11 黒潮流路接近時(1999.8と2001.5)の人工衛星SeaWiFSによる表層クロロフィルa濃度の空間分布

激な接近に伴い沿岸域の水温塩分特性が急変する現象が捉えられている（八木ら，2000）。そこで1999年の黒潮流路接近時（接近後の1999年8～9月）と2002年5月を比較することで、黒潮流路接近に伴う鹿島灘沿岸域の流れの応答特性を調べた。

図-10中の(a)と(b)は、茨城県水産試験場によって計測された1999年9月と2001年5月の塩分、密度

(σ_t)の東西断面分布を比較したものである(東西断面の緯度は、本研究の観測線と一致)。これを比較すると、両者とも高塩分水が沿岸に接近する傾向があるものの、2001年5月は高塩分水がより沿岸に近い所まで波及していることがわかる。密度分布を見ると、1999年9月、2001年5月ともに沖合海域を中心として等密度線が右下がりの傾向を示しており、これは沖に向かって低密度となる黒潮流路部の密度構造に対応したのとなっているが、密度の岸沖変化を両者で比較すると、2002年5月の方がより沿岸に近い海域まで顕著な密度勾配を示していることがわかる。

次に、上記の黒潮接近時における流動特性を力学計算に基づく流速分布と人工衛星 SeaWiFS による流況パターンから検討を行った。図-10(c)は、水深1000mを無流面と仮定し、力学計算から求めた流速南北成分の東西断面内分布を示している。これを見ると、沖側(東側)の流速値、流速分布の傾向には両者に大きな違いは見られない。一方、沿岸域については2001年5月は沿岸のごく近傍まで北上流が波及しているのに対して、1999年9月は、沿岸域ではむしろ逆の南向きとなっていることがわかる。このような流れの特徴は SeaWiFS の表層クロロフィルa量の画像(図-11)にもその特徴が現れており、2001年5月には、北上する強い黒潮に対応する低クロロフィルa領域が陸岸近くまで接近しているのに対して、1999年は八木ら(2000)が指摘しているように、陸岸に近い海域には南下流、その沖合には北上する流れが発生し、結果として、沿岸水(高クロロフィルa領域)は反時計まわりの環流に取り込まれるように円形の軌跡を示している。

以上の事実は、黒潮の接近に伴う鹿島灘沿岸域の応答として、2つのパターンが発生することを示唆している。一つは、黒潮の沿岸域への接近度が相対的に小さい場合に黒潮流路の接近に伴って沿岸域に南下流が励起される1999年8~9月に対応したものであり、この時には、北側の海域から相対的に低温・低塩分の親潮系水が鹿島灘沿岸域に侵入する。もう一つが黒潮がより近い流路をとる2001年5月に対応した場合であり、この時は鹿島灘沿岸域には北上流が励起され、黒潮接近に伴う湧昇現象によって沖合中層以深の高栄養塩水が沿岸に波及する。

4. ま と め

開放性沿岸域における栄養塩変動の外洋影響を明らか

にするために、鹿島灘沿岸域を対象に現地調査を実施した。その結果以下のことが明らかとなった。

①鹿島灘海域の基本的な栄養塩の空間分布構造とその季節変化を示し、冬季から春季にかけては外海側から沿岸域に、初夏から秋季にかけては沿岸域から外海域に栄養塩が輸送される可能性を示した。

②短期的な栄養塩の変動現象として、黒潮流路接近時に沖合中層以深の高栄養塩水塊が沿岸域に湧昇する現象があることを示した。

③黒潮接近時の鹿島灘沿岸域の流れの応答は、黒潮流軸の沿岸域への接近度が小さい場合には沿岸域に南下流が励起され北側海域から親潮系水が沿岸域に侵入し、黒潮流軸の接近度が大きい場合は、沿岸域に北上流が励起され、湧昇によって沖合中層以深の高栄養塩水が沿岸に波及する。

謝辞：本研究の調査を行うにあたっては、茨城県水産試験場調査船「ときわ」の関係者の方々、また鹿島灘海域の海洋観測データ提供について、茨城県水産試験場海洋漁業部石川毅一郎長、須能紀之主任にご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。また、本研究の現地調査、試料分析に協力してくれた元東京工業大学大学院生の永澤洋君に謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究(c)『多重スケール沿岸海洋モデル構築に基づく外海栄養塩流入フラックス算定の試み』(代表者：八木 宏、課題番号：13650563)の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参 考 文 献

- 足立久美子・日向野純也・木元克則(1994): 鹿島灘砂浜海岸における一次生産(1992年), 水工研技報, 第16巻, pp. 13-24.
大森義暢・八木 宏・足立久美子・二平 章(2001): 鹿島灘沿岸域における栄養塩及びクロロフィルa量の時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1271-1275.
奥西 武・足立久美子・日向野純也・中村義治・中山哲蔵(2000): 鹿島灘沿岸における一次生産の基本構造, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1021-1025.
気象庁(2001): 気象庁海洋月報, No. 101, 34 p.
八木 宏・身崎成紀・灘岡和夫・中山哲蔵・二平 章・山下俊彦・福本 正(2000): 黒潮流路変動に対する大規模沿岸流れの応答と沿岸水の流出過程について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 391-395.
楊 燦守・田中 仁・沢本正樹・花輪公雄(2001): 1999年6月の相馬海域における異常漁獲現象に対する黒潮移流の影響, 水工学論文集第45巻, pp. 1057-1062.