

# 黒潮流路変動と前線渦が鹿島灘の広域沿岸水挙動に与える影響について

八木 宏<sup>1</sup>・身崎成紀<sup>2</sup>・灘岡和夫<sup>3</sup>・中山哲徹<sup>4</sup>・足立久美子<sup>5</sup>・二平 章<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科土木工学専攻  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>東京海上リスクコンサルティング㈱

<sup>3</sup>フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究科情報環境学専攻

<sup>4</sup>工修 (独)水産研究センター水産工学研究所水産土木工学部水理研究室長

<sup>5</sup>水修 (独)水産研究センター水産工学研究所水産土木工学部主任研究官

<sup>6</sup>水博 茨城県水産試験場沿岸資源部長

典型的な開放性沿岸域である鹿島灘を対象として、外洋変動がどのような形で広域沿岸水挙動に影響を与えているかを解明すべく、著者らが行った広域現地観測結果を中心に検討を行った。その結果、鹿島灘沿岸域への非定常性の強い外洋影響の具体的な形態として、①沖合を流れる黒潮が北向きに大きくその流路を変化させた場合、沿岸域全体に強い南下流が励起され、北側の常磐海域から低温・低塩分の親潮系水がそのフロント部分を先鋭化させながら沿岸海域に侵入し水塊特性が急変すること、②黒潮前線に発生した中規模渦(前線渦)が沿岸域まで波及し、沿岸水と外洋水の交換を促進することなどが明らかとなった。

*Key Words : open coast, Kuroshio fluctuation, coastal current, intrusion, frontal eddies*

## 1. はじめに

最近の足立ら<sup>1)</sup>の研究によれば、これまで内湾域や干潟・藻場と比べ貧栄養と考えられてきた開放性砂浜域が、比較的高い基礎生産力を有しており、それが海岸生態系を支える上で重要な役割を果たしていることが明らかにされつつある。したがって、今後、このような開放性砂浜域の機能を守り、海岸環境保全を行って行くためには、高い生産力を維持する自然海浜海域のメカニズムの実態解明が求められている。

このうち海岸域の生態環境を支える物質輸送・物質収支については、河川や地下水の評価と同時に、沿岸水の外洋流出過程や外洋底層からの栄養塩供給など外海からの影響を正確に把握しておくことが重要である。しかしながら、黒潮流路変動などを含む外海影響については、現象の間欠性が強く、また、時間スケール、空間スケールともに大きいため、一般に調査・観測が困難であり詳細な検討例は数少ない。

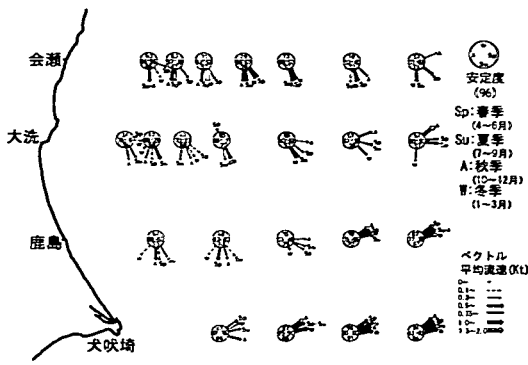
著者らは、このような点をふまえて、海岸域と外洋域とを結ぶ重要な海域でありながら、その実態把握が進

んでいない中間領域を“Coastal Buffer Zone”と位置付け、近年現地観測を主体とした研究を進めている(例えば、八木ら<sup>2), 3), 4), 5)</sup>、灘岡ら<sup>6)</sup>)。今回の研究では、外洋変動が沿岸域に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、黒潮流路変動や前線渦に対する大規模沿岸流の応答と、それに伴う水温・塩分を中心とした水環境特性の変化、そして沿岸水の外海域への流出過程を現地観測結果に基づいて明らかにすることを試みた。

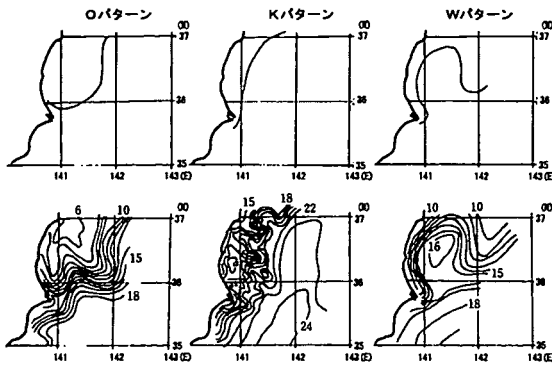
## 2. 鹿島灘の流況特性に関する既往の研究

ここでは本研究で対象とした鹿島灘海域の流況特性について、既往の研究によって明らかにされている事実を整理しておく。

まず本海域の平均的な流況については、久保<sup>7)</sup>による1971年から1978年までの8年間にわたるGEK測流結果から、季節別の平均流向及び流速レベルの特徴がまとめられている(図-1(a))。これによると、鹿島灘海域では大吠埼沖合を東～北東方向へ流去する黒潮の影響を強く受け、沖側海域では1年間を通じ



(a) 鹿島灘海域の平均的な流動構造



(b) 鹿島灘沖の代表的な海洋構造パターン(上段)とその実例(下段:水温分布)

図-1 鹿島灘沖の流況特性(久保<sup>7)</sup>)

て北東～東方向の流れを示し、また沿岸域では南向き流れ(以後、南下流と呼ぶ)が卓越する。この沿岸域に発達する南下流については水温・塩分の空間分布との対応関係から地衡流では説明できないものであることが示されており、黒潮への連行現象等によって励起された非地衡流的な流れの可能性が指摘されている(久保<sup>7)</sup>)。

以上が鹿島灘の平均的な流れの構造の特徴であるが、実際の流況は黒潮流路変動などの影響を受けて時間的にも空間的にも大きく変動している。例えば、図-1(b)は茨城県水産試験場によって示された鹿島灘の代表的な海洋構造パターンである。図の上段が黒潮系暖水域と親潮系冷水域の相対的な位置関係に基づく海洋構造パターンの模式図(境界線より北側が親潮系水、南側が黒潮系水)、下段がそれに対応する海洋構造の実例(水温分布)を示しており、鹿島灘海域は大きく分けると3種類の海洋構造に分類されることがわかる。このうちOパターンは低水温が鹿島灘海域の沿岸を覆う冷水舌型、Kパ

ターンはフロントが南北に形成される黒潮分派型、Wパターンは低水温の沿岸域と沖合域の間に暖水が張り出す暖水舌型であり、これらは黒潮流路や海洋構造の季節変化などの影響を受けてそのパターンを変化させている。さらに、鹿島灘沖の黒潮前線域周辺に発生する前線渦も、周辺海域におけるサンマ、イワシ、マサバなどの浮遊幼生移動などに重要な影響を与えることも指摘されている(平井<sup>8)</sup>、河合<sup>9)</sup>、Kawai & Saitoh<sup>10)</sup>)。

以上のように、鹿島灘海域の特徴は、①黒潮の影響を強く受けた平均的な流れの構造、②非定常性の強い海洋変動(黒潮分派流、冷・暖水舌、前線渦など)の存在であるといえるが、そのいずれについてもメカニズムに踏み込んだ検討は不十分であり、またこのような外洋変動が沿岸域へ与える影響についてはほとんど検討されていない。そこで本研究では、黒潮流路変動や前線渦など非定常性が強い外洋影響が沿岸域に与える影響に着目し、広域現地観測に基づく検討を試みた。

### 3. 現地観測概要・気象条件及び観測期間中の水環境変動の基本的な特徴

#### (1) 観測概要

観測対象海域は、広く外洋に面し開放性の高い鹿島灘沿岸域である。今回の観測では、時空間スケールの大きい外洋変動の沿岸域への影響を把握することを目的として、沿岸方向(ほぼ南北方向)に約100km、岸沖方向(ほぼ東西方向)には、浅海域(水深約10m)から大陸棚縁辺域(水深約110m)まで約20kmの広域観測領域を設定し、その中の3つの観測線(川尻沖観測線:K-line、大洗観測線:O-line、須田浜沖観測線:S-line)上に合計11ヶ所の係留観測ブイを設置し(図-2参照)、1999年7月24日から8月28日の約35日間にわたって、水温・塩分・流速・波高・濁度・クロロフィルaの連続計測を行った。使用した計測機器の概要を表-1に、また観測線S-Line上の各計測機器の設置状況の詳細を図-3に示す。

#### (2) 気象条件

今回の観測期間中の気象条件として、銚子地方気象台の日射量、風速、風向、那珂川と利根川の流量の時系列を図-4に示す。本観測期間は、梅雨明け後の気象状態が比較的安定した時期にあたり、日射は規則的な日周変動を示している。さらに、風系場については、夏季に勢力が強くなる太平洋高

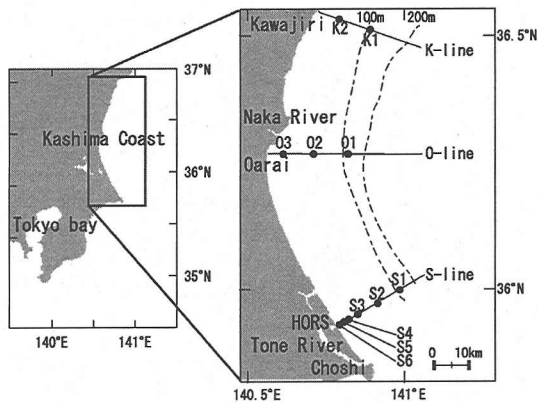


図-2 観測海域と観測ライン及び観測点位置

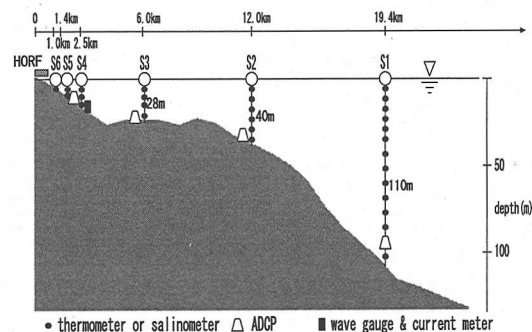


図-3 観測線S-line上の観測点と観測機器の設置状況

気圧の影響を受けて基本的には南風が卓越しており、特に梅雨明け直後の7/24～8/2の期間（期間Ⅰ）では最大10m/sを越える強い南風が、また8/18～23の期間（期間Ⅱ）でも5m/sを超える南風が連吹していた。河川流量については、8/12に関東域を通過した温帯低気圧の影響により、利根川で最大流量4000m<sup>3</sup>/s、那珂川で最大流量1000m<sup>3</sup>/sの出水が発生した。観測期間中には、これ以外に顕著な河川出水はなかったが、観測期間前の7/15には利根川で最大流量3000m<sup>3</sup>/s、那珂川で最大流量3300m<sup>3</sup>/sの出水が発生しており、観測期間初期にはこの出水の影響が残っていたことが考えられる。

### (3) 水温データに基づく水環境変動の基本的特徴の抽出

はじめに、観測期間中の基本的な水環境変動の特徴を水温データに基づいて抽出することを試みた。図-5は、南北方向に位置が異なる3つの観測

表-1 観測機器一覧

観測点	水深(m)	水温(m)		保存器		海底位置	
		水層(m)	水層(m)	水深(m)	水深(m)	水深(m)	水深(m)
K1	158	110	1,36.9,12.15,20.25,30.35,40.45,50.55,60.65,70.80,80.90	30	20,100		
K2	5	40	1,36.9,12.15,19.24,30.35,39.44	1.6			
O1	212	110	1,36.9,12.15,20.25,30.35,40.44	6	20,100		
O2	122	40	1,36.9,12.15,19.24,30.35,39.44	1.6			1
O3	34	20	1,38.9,12.15,19.24,30.35,39.44	1		1	
M1	16	40	1,36.9,12.15,19.24,30.35,39.44	1.6			
S1	194	110	1,36.9,12.15,20.25,30.35,40.45,50.55,60.65,70.80,80.90,100	1,630			1
S2	12	40	1,36.9,12.15,19.24,30.35,40.44	1.6			1
S3	6	28	1,36.9,12.15,17.19,21.5,24.27	1.6		1	1
S4	25	20	1,36.9,12.15,19.24,30.35,39.44	1.6		1	1
S5	14	10	1,39	1		1	2
S6	1	7	1,36	1			1

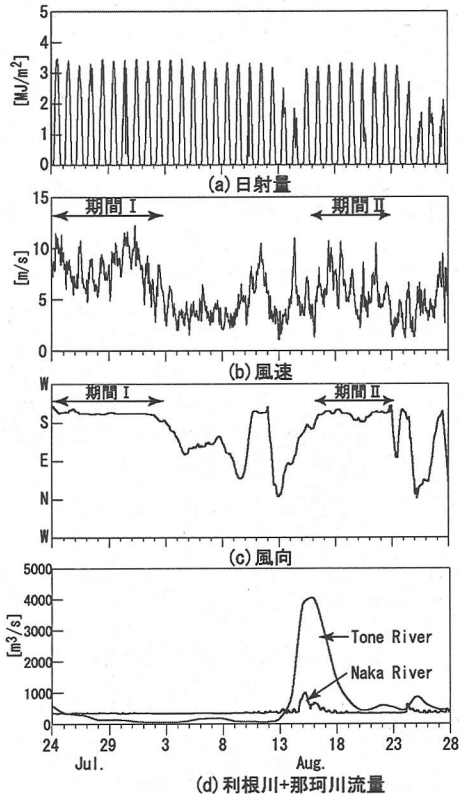
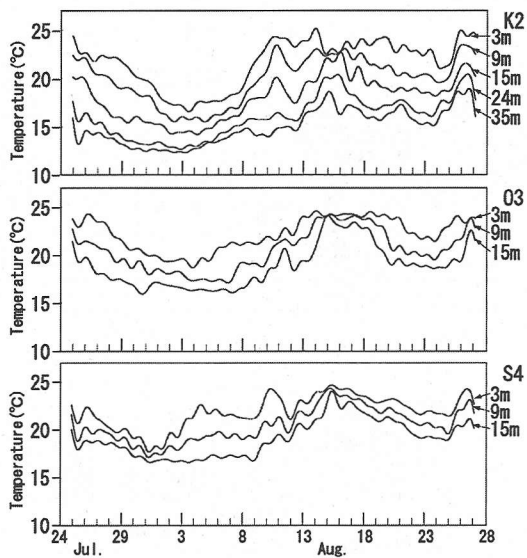
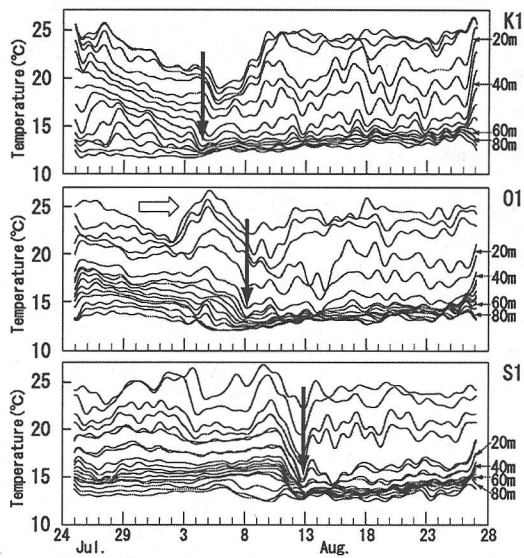


図-4 観測期間中の気象条件と河川流量

線（K-line, O-line, S-line）それぞれについて、(a) 岸に近い観測点 K2, O3, S4（水深40m以浅）、(b) 大陸棚縁域の観測点 K1, O1, S1（水深110m程度）の水温変動長周期成分（25時間以上の成分をローパスフィルターによって抽出したもの）の時系列を示したものである。まず浅海域の水温変動を見ると、いずれの観測点においても観測期間前半の7/24～8/1にかけて全水深的に大きく水温が低下し、水温レベルが一度回復した後、8/18ごろから再び水温低下している。この水温低下が発生する期間は、前述の南風が連吹する期間Ⅰ、Ⅱにそれぞれ対応していることから、海上風が水温変動に与える影響が示唆される。図-6左図は、表層水温と沿岸方向



(a) 浅海域 (K2, O3, S4)



(b) 大陸棚縁領域 (K1, O1, S1)

図-5 水温長周期成分 (25時間以上) の時系列

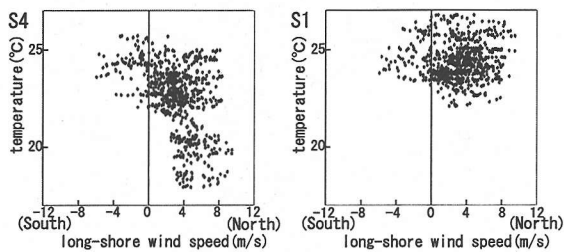


図-6 沿岸風速と表層水温の相関図

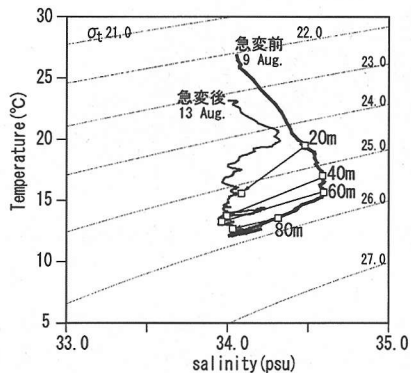


図-8 水温急変前後の水塊特性の変化(観測点S1)

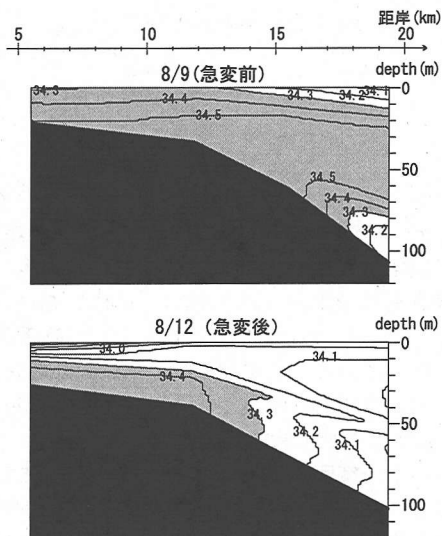


図-7 水温急変現象前後の観測線S-Lineに沿った塩分の岸沖断面分布 (塩分34.3以上をハッチ)

風速 (岸に沿う方向の風速) との関係を観測点 S4 について調べたものである。両者の関係には多少ばらつきがあるものの、大局的には正の沿岸方向風速 (南風, 北向き) によって水温低下が生じている。本海域においては、夏季の南風時に沿岸湧昇によって沿岸水温が低下することはこれまでも報告されており (八木ら<sup>2),4)</sup>, 灘岡ら<sup>6)</sup>), 浅海域の水温変動が海上風による沿岸湧昇・沈降によって強く影響を受けることがわかる。

一方、観測海域沖側端の大陸棚縁領域 (観測点 S1) の水温と海上風との関係についても調べたが両者の間には浅海域のような明確な相関は見られない (図-6 右図)。むしろ S1 で特徴的なのは、図-5 (b) 中に矢印で示したように、観測期間中盤にお

いて中層以下の水温が急激に低下することであり、この水温低下現象の発生はK1(8/4)→O1(8/8)→S1(8/12)と北から南へと0.1m/s程度の速度で伝播している。さらに、別の特徴としては、観測点O1の表層において、8/3～8/8の期間に表層水温が急激な上昇・下降を示してことが挙げられる(図中白抜き横矢印)。この両者については、気象条件との明確な相関が見られないことから、何らかの外洋影響によるものである可能性が高い。そこで、本研究では、①観測期間中盤に大陸棚縁中層以深を中心に発生した急激な水温低下現象、②大陸棚縁表層(観測点O1)において発生した水温変動現象に絞ってそれぞれの性質と外洋変動との関係を詳しく検討した。

#### 4. 黒潮流路変動に伴う鹿島灘沿岸域の流動・水温・塩分構造の変化

##### (1) 急激な水温低下現象発生前後の塩分及び流速変動の特徴

前節で指摘した急激な水温低下現象(前節の①)の性質を把握するために塩分及び流速の変化について検討を行った。図-7は、観測点S1において水温低下現象が発生する直前の8/9及び発生直後の8/12における観測線S-Lineに沿った塩分の岸沖断面分布である。これを見ると、水温低下現象発生後は沖合海域を中心として低塩分化が進んでおり、水温低下と併せて塩分も低下したことがわかる。図-8は、急変現象前後の水塊特性の変化を示すために、観測点S1における塩分水温特性をT-S図として示したものである。これを見ると水面下40m以深の水温と塩分は急変現象前後で等密度線にほぼ沿った形で低温・低塩化していることがわかる。このことは、水温の急変現象は、比較的密度に近い低温で低塩分の水塊が鹿島灘沿岸域に進入したために発生したことを示している。

次に、水温急変現象と流況との関係について検討した。図-9は、ADCPによる流速測定を行った観測線S-Line上の観測点S1, S2, S3について、沿岸方向流速の長周期成分の鉛直分布を示したものである(流速値はローパスフィルターによって25時間以上の成分を抽出したもので南向き流れが正)。図中には、観測点S1において水温急変現象が発生する時期を縦矢印で、南風が吹連する期間I, IIを横矢印でそれぞれ示している。これを見ると水温急変現象発生前の観測期間前半では、観測点S1で上層、その他の観測点では全層で北向き流れが発生

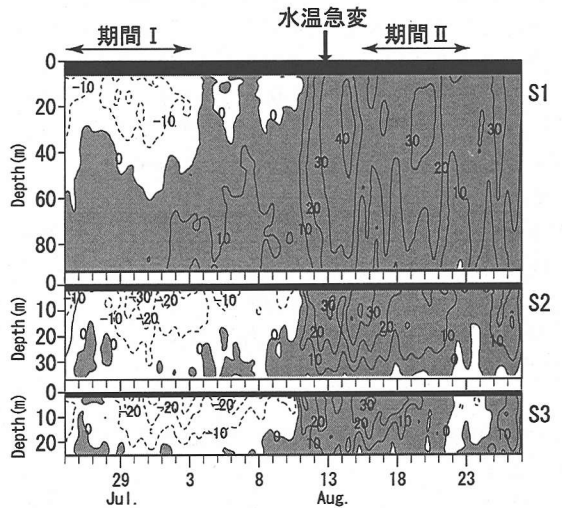


図-9 観測点S1, S2, S3における沿岸方向流速長周期成分の時空間分布(正流速[南向き]にハッチ)

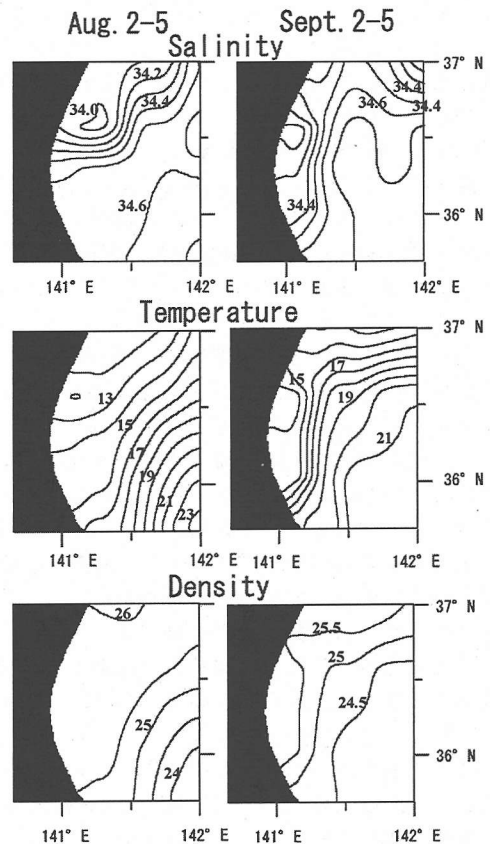


図-10 塩分・水温・密度の広域平面分布(水深100m)

している。これは、この期間が比較的強い南風が連吹した期間 I にほぼ対応していること、北向き流れが沖合上層と浅海域で発生していることなどから海上風に駆動された流れであると考えられる。一方、観測期間後半は、水温急変現象発生時からすべての観測点で急速に南向き流れが発達しており、水深 110m の観測点 S1 においてもほぼ全層で南向き流れとなっている。この南向き流れは、沖合の観測点ほど強く継続時間も長いことから、何らかの外洋影響によって駆動された大陸棚外の流れが浅海域まで含め陸棚海域全体に波及し、陸棚全体に南下流が発達したものと考えられる。

## (2) 鹿島灘を中心とした広域海洋構造とその変化の特徴

前節の検討結果から、本研究で着目している水温の急変現象及びそれに連動した南下流の急激な発達、何らかの外洋影響によって発生したものと考えられるが、沿岸域への外洋影響の実態を明らかにするためには、沿岸域を含んだより広域の海洋構造とその変動の性質を把握する必要がある。ここでは、広域の水温・塩分構造、黒潮流路の挙動、沿岸水位変動などから観測期間中の広域海洋変動の特徴を検討した。

### a) 水温・塩分の広域平面構造

図-10 は、茨城県水産試験場によって毎月行われている海洋観測の結果から、本観測領域も含むより広域の塩分・水温・密度( $\sigma$ )の平面分布(水面下 100m)を、8月(観測日 8/2~5, 急変現象前)と9月(観測日 9/2~5, 急変現象後)について示したものである。これを見ると、鹿島灘海域では8月から9月にかけて、黒潮流系と思われる高温高塩分水が外海側から陸岸側に向け接近している。一方、陸岸に近い大陸棚海域では、8月に北側に位置していた低温低塩分水が、その先端部分で塩分のシャープなフロントを形成しながら、9月には比較的狭い幅で沿岸域に進入し、観測対象海域の南側まで南下していることがわかる。この北からの進入水の水塊特性を T-S 図に基づいて調べたところ、低温で低塩分傾向が強い親潮系の水塊特性を持っていることが確認され、さらにこれを図-8 に示した水温急変現象直後の沿岸域の水温塩分特性と比較すると両者はほぼ対応していることがわかった。以上の事実は、本観測期間中に、北側の常磐海域から鹿島灘沿岸域へ親潮系水の流入現象が発生したことを示しており、ここで着目している沿岸域の水温急変現象はこの親潮系水の沿岸域への進入に伴って発生したものと考えられる。

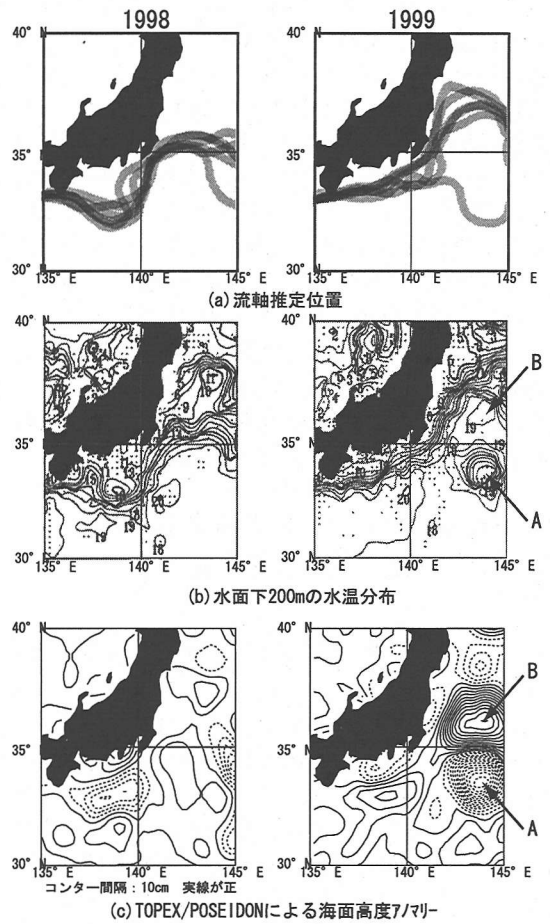


図-11 1998, 1999年の広域海況の比較

### b) 黒潮流路変動の特徴

次に、鹿島灘海域に強く影響を与えている黒潮流路変動の観測期間中の特徴について検討を加えた。図-11 は、観測を実施した 1999 年及び比較のためにその前年の 1998 年について、(a) 気象庁発表の黒潮流軸推定位置 (7, 8 月中の全推定位置を重ねて表示)、(b) 気象庁海洋月報による海面下 200m の水温平面分布 (8 月)、(c) 海面高度計 TOPEX/POSEIDON による海面高度アノマリーの空間分布 (8 月) を示したものである。1999 年の 200m 深水温分布を見ると、房総沖に大規模な冷水塊が存在しており(図中 A)、これに押し上げられるように黒潮流路に相当する高水温帯が常磐沖にまで北上している。この傾向は海面高度アノマリーにもその特徴がよく現れており、常磐沖に高水位領域が形成され(図中矢印 B)、冷水塊部分は水位が低くなっている(図中矢印 A)。海上保安庁水路部の報告によれば、1999 年は 1 年間を通して黒潮流路の北上

傾向が強かつ不安で、流軸が北に大きく蛇行した後それが暖水塊として切離される現象が3回(3, 5, 10月)発生している。本観測期間は5月と10月に発生した暖水塊切離の中間の時期であり、図-11(a)の黒潮流軸推定図からもわかるように黒潮流路が北上傾向を強めた時期にあたる。

c) 沿岸水位変動

次に、沿岸域の水位変動から観測期間中の外洋変動特性を検討した。図-12は、観測期間中の鮎川、小名浜、銚子、布良、南伊豆、御前崎の沿岸水位長周期変動成分(ローパスフィルターで25時間以上の変動成分を抽出)の時系列を示したものである。これを見ると、北側の東北~鹿島灘海域(鮎川、小名浜、銚子)と南側の房総~東海海域(布良、南伊

豆、御前崎)の間に水位変化の傾向に大きな違いが見られる。東北~鹿島灘海域では、観測期間前半に低水位状態であり、観測点S1で水温急変現象が発生した8/10~12ごろに沿岸水位が急激に上昇し、後半は相対的に高水位状態を維持している。これに対して房総~東海海域では、観測期間前半に水位が高く後半で水位が低くなる傾向を示している。房総~東海海域では、8/6付近に水位が非常に高くなっているが、このとき相模湾周辺海域において急潮が発生したことが海上保安庁水路部によって報告されており、このことから観測期間前半では黒潮流路が相模湾・伊豆海域において陸岸に接近傾向であったことが推測される。一方、図-13は人工衛星 TOPEX/POSEIDON による海面高度アノマ

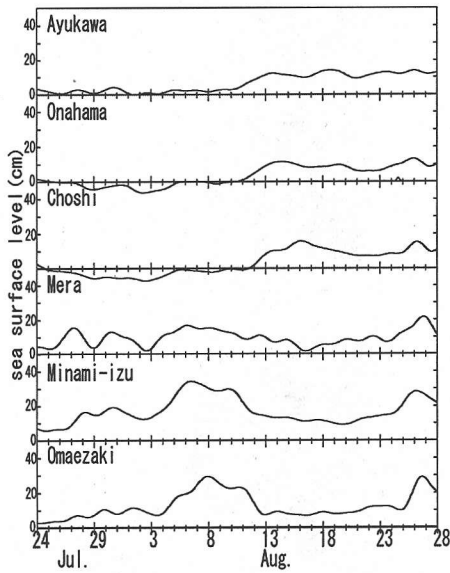


図-12 沿岸水位の長周期変動成分の時系列

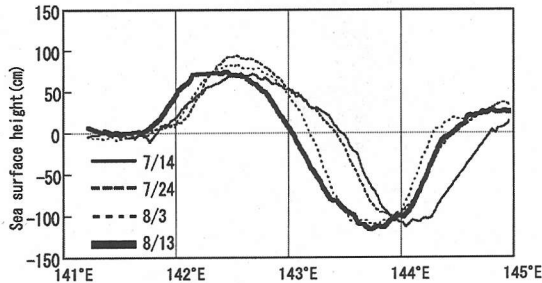


図-13 TOPEX/POSEIDONによる海面高度アノマリーの軌道上分布

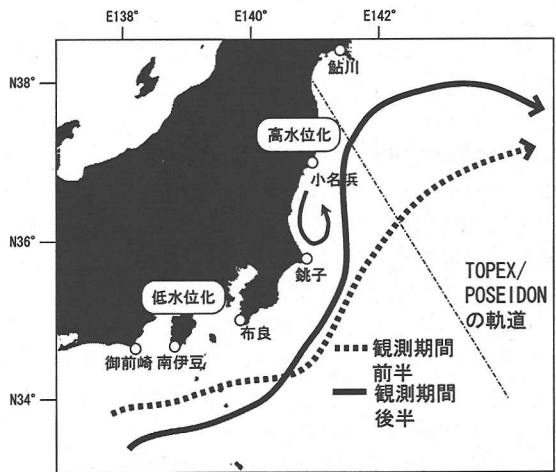


図-14 観測期間中の黒潮流路と沿岸水位変動の模式図

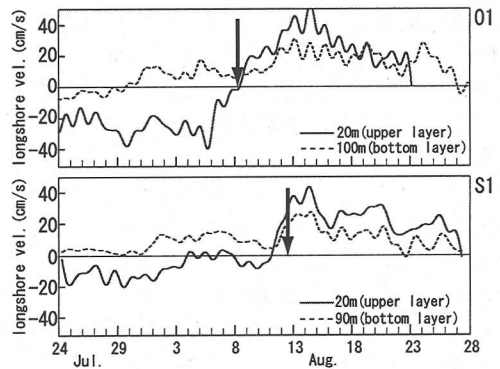


図-15 観測点O1, S1にける上層及び底層流速の時系列

リーの軌道上分布を示したものである（衛星軌道は図-14を参照）。ここで海面高度アノマリーのピークは図-11(c)の高水位域（矢印B）に対応しており、黒潮はこの西側の水位勾配が大きい部分を流れていると考えられる。これを見ると、鮎川から銚子で沿岸水位が上昇する8/13に高水位部分が北上かつ沿岸に接近しており、このことはこの時期に黒潮流路が陸岸に近づいたことを示している。

以上の検討結果及び気象庁の黒潮流軸推定位置（図-11(a)）に基づいて観測期間中の黒潮流路と沿岸水位の関係を模式的に示したのが図-14である。すなわち観測期間初期には黒潮は相模湾、伊豆近海で陸岸に近い流路をとり房総沖で北東方向に流去していたため伊豆近海で高水位状態、銚子以北で低水位状態を示すが、その後、常磐・鹿島灘海域において黒潮流路が北向きに転じ陸岸に接近することで、銚子以北の水位が上昇し、一方伊豆近海では流路が沖にシフトすることで低水位化したものと考えられる。

### (3) 黒潮流路変動時の鹿島灘海域の流動特性

これまでの検討結果を踏まえ、外洋変動と沿岸域の流況との関係について考察する。図-15は、大陸棚縁辺の観測点01, S1における上層（水面下20m）・下層（S1:水面下90m, O1:水面下100m）の沿岸方向流速長周期成分の時系列を示したものである（南向き流れが正）。図中には、各観測点において急激な水温低下が発生した時期を矢印で示している。これを見ると、水温急変現象に対応するように各観測点では沿岸流速が全層的に南向きに転じており、また南下流の発生時期については北側の観測点01が先行している。一方、南下流が最大流速を示す時期については、観測点01, S1ともに8/13～14ごろであり、これは図-12に示した鮎川、小名浜、銚子で沿岸水位上昇が発生した時期にほぼ対応している。このことは、北上傾向を示す黒潮の影響によって、親潮系水が北側から鹿島灘沿岸域へ進入し、さらに黒潮流路が陸岸へ接近（8/13前後）することによって沿岸域全体に強い南下流が励起され、それが親潮系水の鹿島灘沿岸域への進入現象を強化している可能性を示している。

さらに水温急変現象直後の鹿島灘海域の広域流況を把握するために衛星リモートセンシングデータを用いた検討を行った。図-16は、8/17～19の人工衛星SeaWiFSによる表層クロロフィルa量の空間分布を示したものである。図-4(d)で示したように、本観測期間中の8/14～15には大規模な河川出水が発生したため、SeaWiFSの画像には利根川か

らの河川水を中心とした沿岸水が高クロロフィルa部分として示されており、広域流況を示す良いトレーサーとなっている。これを見ると、8/17に銚子沖を東に向かう高クロロフィルaの領域は、その後、流向を大きく変え北上している。NOAA/AVHRRの表層水温と比較すると、高クロロフィルaの領域は、高水温の黒潮外縁部に連行・移流されている様子が確認されている。図-9, 15に示した流速記録から、この時期沿岸域には浅海域から陸棚縁海域まで強い南下流が発生していることがわかっており、このことから、黒潮流路の陸岸への接近に伴って、鹿島灘海域では沿岸域は南下流、沖合海域は北上流となり、結果として反時計回りの環流が形成され（図-14参照）、沿岸水はこれに沿って沿岸域から外洋域へ流出していたと考えられる。

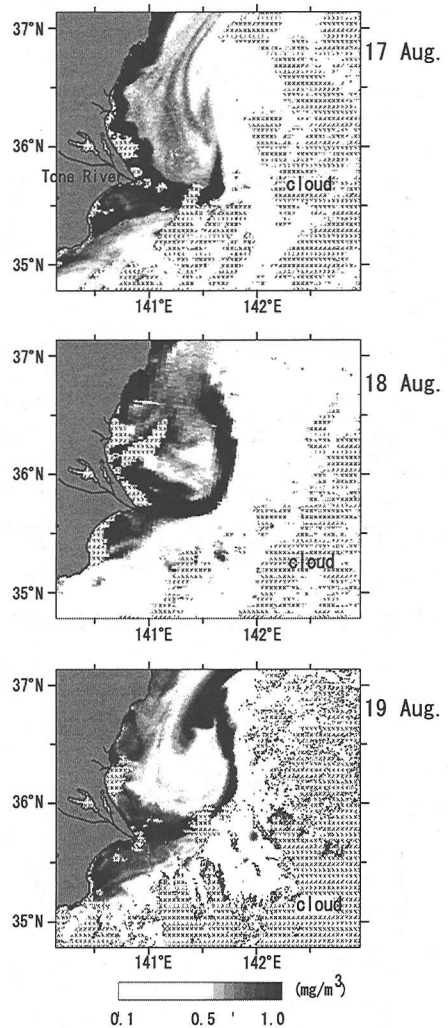


図-16 水温急変現象直後のSeaWiFSによるクロロフィルa量の空間分布



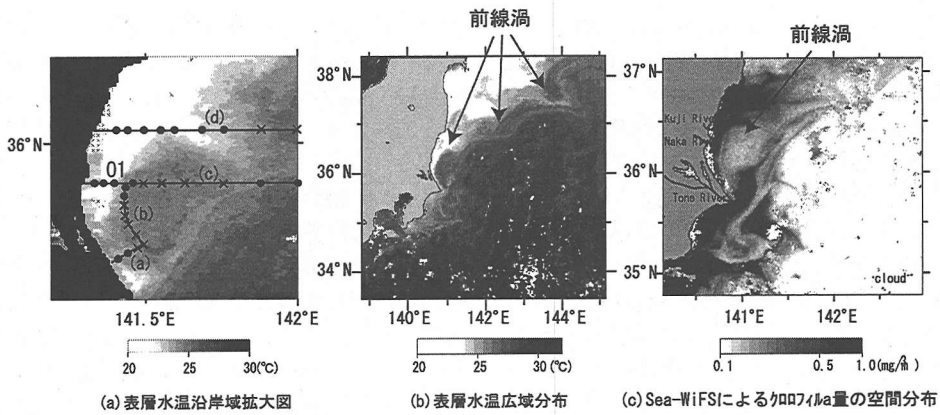
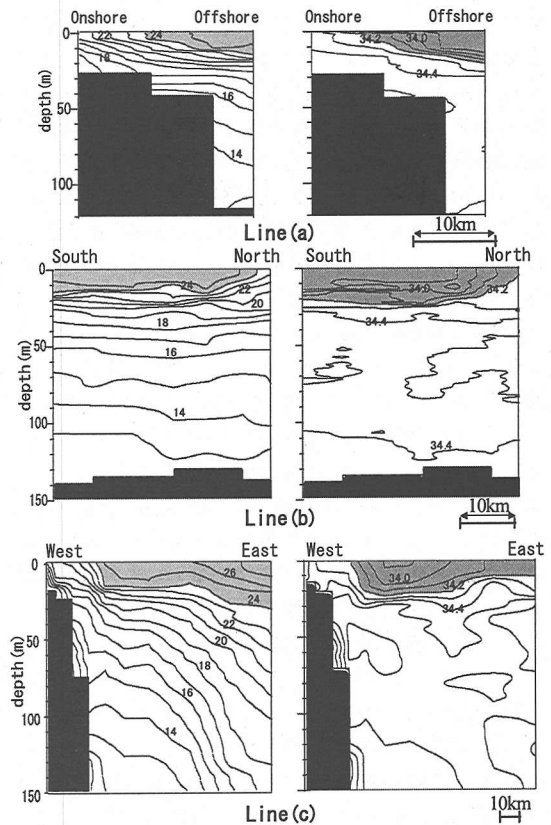


図-17 前線渦発生時のNOAA/AVHRR表層水温及びSeaWiFSによるクロロフィルa量の空間分布

以上をまとめると、1999年には、房総沖の黒潮流域に冷水塊が形成されており、黒潮流路は北上傾向で暖水渦の切離を繰り返す不安定な状況にあった。8月初旬～中旬にかけて黒潮流路が北上傾向を強めることで、常磐海域に位置していた親潮系水がフロント状となって鹿島灘沿岸域に進入し、さらに黒潮の陸岸への接近によって沿岸域全体に強い南下流が励起され、親潮系水はそのフロント部分を先鋭化させながら南下し、結果として観測海域南端の観測点S1において急激な水温低下現象が発生したと考えられる。

### 5. 黒潮前線渦の沿岸域への影響

ここでは、本研究のもう一つの着目点である、大陸棚縁の観測点01表層に現れた急激な水温変動現象について検討する。図-17(a)は、観測点01の表層水温が急激に上昇した8/4のNOAA/AVHRRによる表層水温分布に、01の測点位置及び8/2に茨城県水産試験場と水産工学研究所によって行われた海洋観測の観測位置を重ねて表示したものである。これを見ると、高温の黒潮域から派生した水塊が大陸棚海域に波及し観測点01にまで到達している様子が現れており、01における急激な水温変動の原因はこの黒潮域から派生した高温水であることがわかる。図-17(b)は、同じ8/4の表層水温についてより広域の分布を示したものである。これを見ると高温域と低温域の間に140～150kmの間隔で渦状の構造が3箇所発生している。これは、その発生位置や空間スケールから黒潮前線部分に発生する前線渦と考えられ、観測点01に波及したのはその中で最も岸側に位置していたものであることがわかる。



沿った岸沖方向の観測線, Line (b): 観測線 S-line と 0-line を結ぶ水深 100 ~ 200m 帯の沿岸方向の観測線, Line (c): 観測線 0-line に沿って沖合まで延長した東西方向の観測線, に対して鉛直断面内の水温分布と塩分分布を示したものである (それぞれの位置は図-17 (a) 参照, 図中で水温は 24℃ 以上, 塩分は 34.2 以下をハッチして表示). まず Line (c) を見ると, 沖合海域から沿岸域に向かって厚さ 20 ~ 30m 程度の比較的薄い高温水が, 表層部に進入している様子がわかる. さらに, Line (a) (b) を見ると, この薄い表層暖水は 8/2 には観測点 01 のごく近傍まで到達し, その南の海域において沿岸域に広く広がっている様子がわかり, このような表層暖水の拡がり方は, 図-5 (b) の表層水温変動パターンや NOAA/AVHARR の表層水温の分布形と一致するものとなっている. 図-17 (a) には, 表層の水温と塩分の関係を示すために, 図-18 の観測結果に基づき, 表層塩分が相対的に低い値を示す観測点を×印で表示している. これを見ると, 前線渦の高温領域は表層塩分が低い部分に良く対応しており, 黒潮から派生した前線渦が比較的低温低塩分であることを示している. さらにほぼ同時期の SeaWiFS によるクロロフィル *a* の空間分布を調べると (図-17 (c)), (a) の NOAA/AVHARR の表層水温でとらえたのとほぼ同形の前線渦が低クロロフィル *a* 領域として明確に現れている. 以上の事実は, ①黒潮前線渦は表層 20 ~ 30m の比較的薄い構造を持って沿岸域に波及する, ②前線渦には沿岸から供給されたと考えられる低塩分水がトラップされている, ただし, クロロフィル *a* 量のレベルは低く, 栄養塩は枯渇している可能性が大きいことを示している. このように前線渦中の水塊が, 低塩分・低クロロフィル *a* 濃度であることから, 前線渦中にトラップされた沿岸水は, 鹿島灘海域よりも黒潮上流域において黒潮前線にトラップされた沿岸水 (低塩分) が栄養塩を消費した後に, 前線渦として黒潮前線域から鹿島灘沿岸域に波及したものと考えられる. 低塩分の沿岸水が黒潮前線周辺に分布する傾向があることは, Imazato and Qiu<sup>11)</sup>によっても報告されている.

以上のように, 黒潮前線渦は沿岸域に波及することで直接的に外洋水と沿岸水の交換に影響を与えており, 前線渦のような非定常性の強いメソスケールの海洋変動も沿岸水の流出過程に重要な役割を果たしていることをこの結果は示している.

## 6. 結 論

本研究では, 黒潮流路変動に伴う鹿島灘沿岸域

の流れの応答や, 黒潮前線渦の波及効果などに着目し, 沿岸域と外洋域との相互過程 (沿岸域への外洋影響や沿岸水の外洋への流出メカニズム) の実態を把握することを試みた. 結論は以下のとおりである.

(1) 黒潮流路変動に対する鹿島灘海域の応答として, 黒潮流路が北上傾向を強めると, 鹿島灘沿岸域には親潮系水の進入現象が発生する. 黒潮流路が急激に陸岸に近づくと, 海岸域を含めた陸棚海域全体に強い南下流が励起され, 常磐海域から進入した親潮系水はそのフロント部を先鋭化させながら南下し, 沿岸域の水温塩分構造を急変させる. 鹿島灘の沿岸水は, 沿岸域の南下流, 沖合海域の北上流が形成する反時計回りの環流に沿った形で外洋に流出する.

(2) 黒潮前線に発生する前線渦が陸岸に近い領域に接近した場合, 20 ~ 30m 程度の厚さで沿岸表層に進入する. この前線渦は, 相対的に低塩分で低クロロフィル *a* の性質を有し, 外海水と沿岸水の交換に大きな役割を果たしている.

今後の課題としては, 本研究で示した黒潮流路変動に伴って鹿島灘沿岸域に発生する南下流, 親潮系水のフロント状進入, 沿岸域に波及する前線渦の力学機構を示すとともに, これらが栄養塩輸送などを通して海域の基礎生産力にどのような影響を与えているかを明らかにすることが必要と考えられる.

謝辞: 本研究の現地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, 水産工学研究所調査船たか丸の方々に協力して頂きました. また, 茨城県, 福島県両水産試験場からは貴重な定期広域観測データを提供して頂き, ここに関係各位の協力に対して謝意を表します. また, 本観測を行うにあたって流速計 (ADCP) を快くお貸し頂いた長崎大学工学部野口正人教授, 中村武弘教授, 多田彰秀助教授, 北海道大学工学部山下俊彦助教授, 西松建設技術研究所福本正氏に謝意を表します. 本研究は, 平成 10・11 年度文部省科学研究費基盤研究 (B) 『栄養塩動態からみた海-陸接合領域における生態環境システムの総合的解析』 (研究代表者: 灘岡和夫, 課題番号 10450181), および平成 11・12 年度文部省科学研究費基盤研究 (c) 『開放性海岸に発達する広域沿岸境界層の空間構造計測現地実験と広域漂砂モデルの構築』 (研究代表者: 八木 宏, 課題番号 11650552) 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

- 1) 足立久美子, 日向野純也, 木本克則: 鹿島灘砂浜海岸における一次生産 I. 植物プランクトン量の変動, 水産工学研究所技報(水産土木), pp. 13-24, 1992.
- 2) 八木 宏, 坂本太郎, 灘岡和夫: 開放性沿岸域における夏季の水温変動特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 416-420, 1997.
- 3) 八木 宏, 日向博文, 緒方健太郎, 灘岡和夫: 長期観測データに基づく鹿島灘沿岸域の大規模流動解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 421-425, 1998.
- 4) 八木 宏, 日向博文, 内山雄介, 灘岡和夫: 熱変動特性から見た夏季鹿島灘沿岸域における海水流動特性の解明, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 396-400, 1999.
- 5) 八木 宏, 日向博文, 足立久美子, 日向野純也, 灘岡和夫: 鹿島灘海岸域における日スケールの水温変動と物質輸送特性, 土木工学論文集, No. 642/ II -50, pp. 87-98, 2000.
- 6) 灘岡和夫, 二瓶泰雄, 小西伸英, 中山哲蔵, 足立久美子, 藤井智史, 佐藤健治, 山下俊彦: 鹿島灘における広域海水流動と河川水挙動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 486-490, 1999.
- 7) 久保治良: 鹿島灘 II 物理, 日本全国沿岸海洋誌(日本海洋学会沿岸海洋研究部会編), 第8章, 東海大学出版会, pp. 293-304, 1985.
- 8) 平井光行: 衛星画像による黒潮前線付近の frontal eddy の特徴について, 東北水産研究所研報, Vol. 47, pp. 69-78, 1985.
- 9) 川合英夫編: 流れと生物と, 京都大学学術出版会, pp. 22-23, 1991.
- 10) Kawai, H. and Saitoh, S.: Secondary fronts, warm tongues and warm streamers of the Kuroshio Extension system, *Deep-Sea Res.*, Vol.33, pp.1487-1507, 1986.
- 11) Imazato, N. and Qiu, B.: An Event in Water Exchange between Continental Shelf and the Kuroshio off Southern Japan: Lagrangian Tracking of a Low-Salinity Water Mass on the Kuroshio, *J. Physial Oceanography*, Vol.17, pp.953-968, 1987.

(2002. 3. 26 受付)

## EFFECTS OF KUROSHIO PASS DEFLECTION AND FRONTAL EDDIES ON MESO-SCALE CURRENT DYNAMICS AT KASHIMA COAST

Hiroshi YAGI, Shigeki MISAKI, Kazuo NADAOKA, Akiyoshi NAKAYAMA,  
Kumiko ADACHI and Akira NIHIRA

To clarify the effects of Kuroshio-related offshore ocean current fluctuations on the coastal current system, we performed field measurements of the velocity and water qualities in the Kashima coastal region extending to the shelf edge. The results show that the deflection of Kuroshio current towards the Kashima coast induces a strong southward current in the wide extent of the coastal region and thereby the Oyashio influenced water intrudes with a sharp temperature and salinity front to the coastal area from the northern offshore area. The frontal eddies of Kuroshio current may have another appreciable influence to the coastal current field, i.e., the warm water from a frontal eddy intrudes to the surface layer of the shelf sea with about 20m thickness.