

瀬戸内海の水質環境に及ぼす黒潮流路と 外海の海況変動の影響

中村充博*・小林弘二朗**・村上和男***

海面水位, 海水温, および塩分濃度の上昇等, 瀬戸内海の水質環境が変化しているとの報告がある. 本研究では, これらの水質変化の原因を外海域の海況の変化に求めた. その結果, 黒潮の離岸により, 瀬戸内海及び外海域の海面水位と海水温の変動が密接に関係し, 黒潮が接岸した場合には, 水位と水温が上昇する結果が得られた. また, 瀬戸内海の水質環境の上昇には, 外海水の侵入が大きく寄与していると考えられた.

1. はじめに

近年, 瀬戸内海等の内湾域において, 気象庁等の機関を通じ, 海面水位, 海水温(特に冬季の海水温), および塩分濃度が上昇しているという報告がある(高橋, 2004). 特に, 海面水位の上昇, 海水温の上昇, 塩分濃度の上昇, 及びこれらの変化に伴う生息魚種の変化等が報じられており, また, 秋季に毎年のように起こっている宮島の厳島神社の回廊の冠水, 昨年の台風による高潮被害等, 平均海面の上昇によるいくつかの被害も危惧されている.

具体的にデータとして, 広島湾の最近20年間の平均海面水位の推移を図-1 に, 平均海水温の推移を図-2 に示す. 使用データは, 気象庁および瀬戸内海広域総合水質調査の現地観測データである. 結果より, 両図とも顕著な上昇傾向であることが分かる.

そこで本研究では, これらの水質変化の原因を外海域の海況の変化に求め, 黒潮の流路の変動及び外海域の水位・水温変動と瀬戸内海の水質環境の変動との関連を調べ, そのメカニズムの把握及び内湾域の水質環境保全や創造のための基礎資料とする.

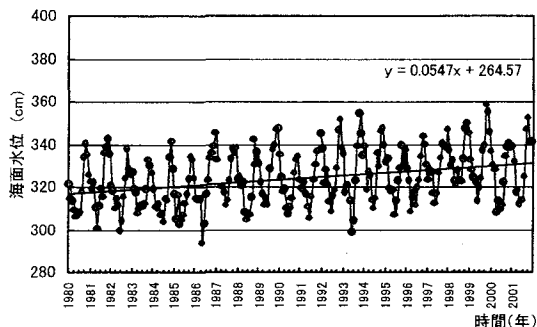


図-1 広島における最近20年間の平均海面水位の推移

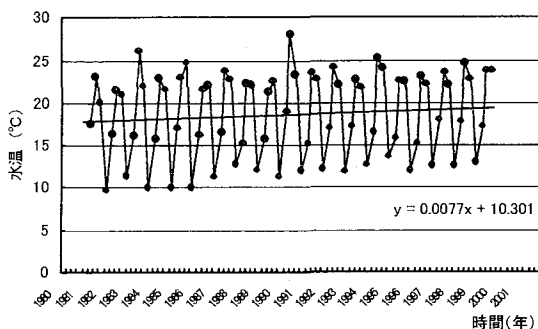


図-2 広島における最近20年間の平均海水温の推移

2. 黒潮の離岸距離に伴う瀬戸内海の水質変動

(1) 最近20年間の黒潮の離岸距離の傾向

黒潮の流路の離岸距離の定義は, 各岬から黒潮流軸(黒潮北縁から約24 km の所) までの距離とする.

図-3 にその例として, 潮岬から真南の方向に位置する黒潮流軸までの離岸距離の関係図を示す. 離岸距離は, 潮岬と黒潮流軸の緯度と経度の差を求め距離に変換し算出した. 黒潮流軸のデータは, 日本水協海洋情報研究センターの MIRC 黒潮流軸データセットを用いた.

次に, 黒潮が日本列島を接近して流れた接岸と, 離れて流れた離岸の定義を示す. 潮岬の場合, 岬から真南の方向にある黒潮流軸との離岸距離が, 約50 km 以内にある場合を「接岸」, 約50 km から100 km までを「やや離岸」, 約100 km から160 km までを「離岸」, 約160 km 以上を「著しく離岸」としている(川合, 1972).

図-4 に潮岬から黒潮流軸までの月平均の離岸距離の経時変化の結果を示す. 図-4 より黒潮は年単位での長期的な変動ではなく, 月・季節単位での短期間で変動している傾向があることが分かる. また, 図-4 上に黒潮の接岸と離岸を区分する境界線を挿入した結果, 1980年代は黒潮が離岸することが多く90年代は黒潮が接岸することが多いことが分かる.

* 工修 植村技研工業(株)
(元 武蔵工業大学大学院工学研究科
都市基盤工学専攻)

** 前田建設工業(株)
(元 武蔵工業大学工学部土木学科)

*** 正会員 工博 武蔵工業大学大学教授工学部都市基盤工学科

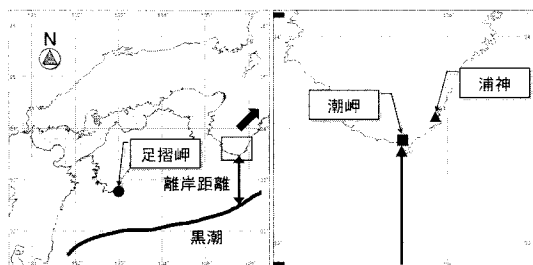


図-3 黒潮の離岸距離の定義

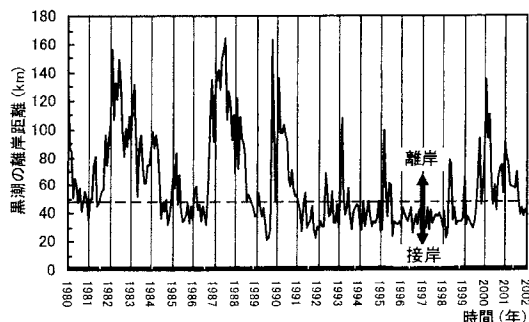


図-4 黒潮の離岸距離の変動

(2) 瀬戸内海の家況変動特性

図-5 に潮岬と浦神の月平均海面水位の差と黒潮の離岸距離との関係を示す。解析に用いた海面水位は、すべて気圧補正した水位である。気圧補正は、潮汐観測地点周辺の海面気圧から大気圧を減じて算出した値を、実測の海面水位に加えを行った。

また、海面水位の結果に浦神(図-3 参照)との水位差を用いているのは、潮岬と浦神の水位差は、黒潮接岸時に相対的に大きく、離岸時に小さいことが報告されており、黒潮の離岸の指標として潮岬と浦神の水位差が利用されているためである(Sekine・Fujita, 1999)。

図-6 に潮岬での月平均水温偏差(1980年～1994年の各年の月平均値－各月の15年間平均値)と黒潮の離岸距離との関係を示す。

両図より、潮岬では黒潮の接岸(離岸)に伴い海面水位と水温が上昇(低下)する傾向があり、黒潮流路と潮岬での海面水位・海水温の対応が良いことが分かる。離岸距離と海況値の相関係数は海面水位で0.72、水温で0.56であった。結果を詳しく考察すると、まず海面水位は黒潮の流軸が約80 km 以上離れると、潮岬と浦神との月平均水位の差がほぼ無くなり、それよりも黒潮が接岸すると潮岬の海面水位が高くなる傾向がある。平均で15 cm の上昇が見られた。

竹内(2003)の研究結果でも、潮岬から黒潮の北縁までの距離が25マイル(約50 km)付近を境に、沿岸で観測される水位差の変動がまったく異なる事が報告されて

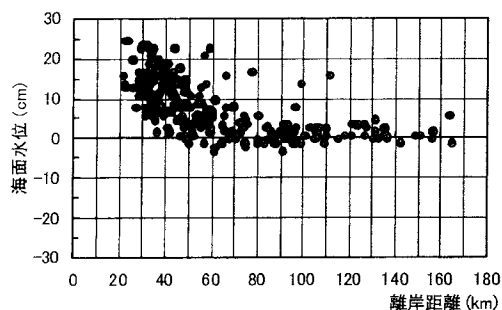


図-5 潮岬と浦神の月平均海面水位の差と黒潮の離岸距離との関係

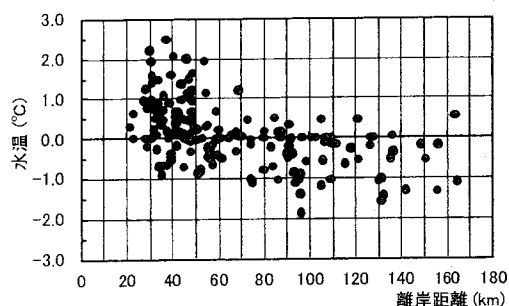


図-6 潮岬の月平均水温偏差と黒潮の離岸距離との関係

おり、本研究でも同様の結果を解析することができた。

水温に関しても海面水位と同様に、黒潮が接岸すると高くなる傾向があることが分かった。平均で2.0℃の上昇が見られた。

さらに、同様の結果が豊後水道側の足摺岬(図-1 参照)でも得られている(中村, 2004)。

次に、外海域の結果を基に、黒潮の離岸距離の変動に伴う瀬戸内海内湾域の海況変動を解析した。

瀬戸内海の各験潮場における冬季の月平均海面水位と浦神の月平均海面水位の差と黒潮の離岸距離との関係を図-7 に示す。

結果には、各験潮場の中より宇和島、呉、宇野、洲本、および和歌山を用い、また外海域との比較として潮岬を図中に載せた。冬季の期間は1月～3月とした。

結果より、内湾域の海面水位の変動は、湾中央部の呉、宇野辺りで少しバラツキがあるが、外海域の潮岬と同様の変動をしており、外海域での変動が内湾域に伝播していることが分かった。

次に、瀬戸内海の各湾、灘における2月の月平均水温偏差(1980年～2000年の各年の2月平均値－2月の15年間平均値)と黒潮の離岸距離との関係を図-8 に示す。

結果より、黒潮が接岸(離岸)すると水温が上昇(低下)しており、海面水位と同様の結果となった。

また、接岸時に0～2℃の間で変動しており、の外海

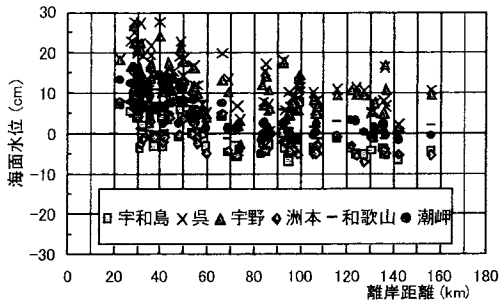


図-7 各験潮場における月平均海面水位と浦神の月平均海面水位の差と黒潮の離岸距離との関係

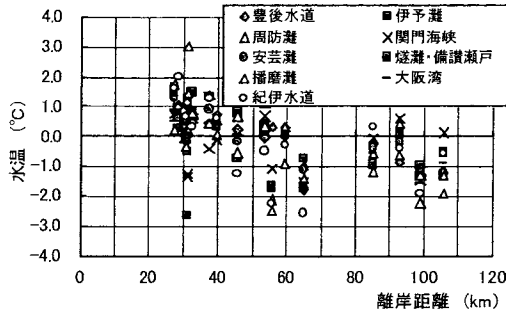


図-8 瀬戸内海の湾、灘における2月の月平均水温偏差と黒潮の離岸距離との関係

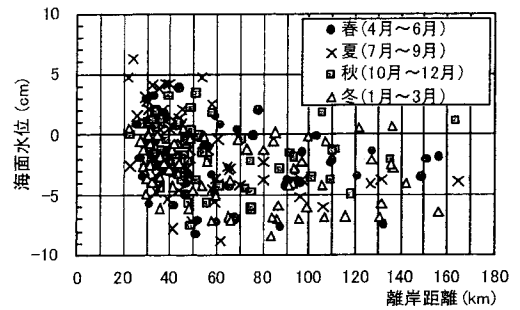


図-9 潮岬と足摺岬の季節毎の月平均海面水位の差と黒潮の離岸距離との関係

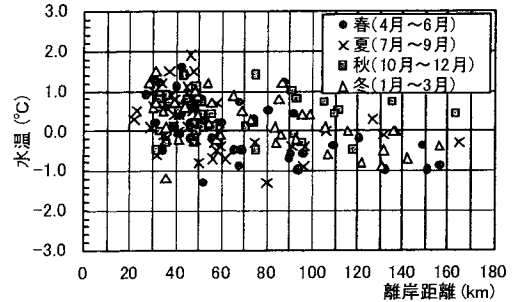


図-10 潮岬と足摺岬の季節毎の月平均水温の差と黒潮の離岸距離との関係

域の結果とはほぼ同様の変動傾向であることが分かった。

以上の結果より、黒潮の離接岸により外海域の水況が変動し、その影響が直接瀬戸内海の水況を変動させていることが分かり、黒潮の離接岸の影響は湾内まで伝播していることが考えられた。

次に、図-9に潮岬と足摺岬との季節毎の月平均海面水位差(+の場合には潮岬の海面水位が高い)と黒潮の離岸距離との関係の結果を示す。さらに、図-10に潮岬と足摺岬との季節毎の月平均水温差(+の場合には潮岬の水温が高い)と黒潮の離岸距離との関係の結果を示す。

図-10より、水温は接岸時に潮岬の方が足摺岬に比べ季節問わず高くなる傾向が多いことが分かった。

潮汐周期による海面変動の平均水位は、豊後水道と紀伊水道の海面水位を比較した際、豊後水道の方が高い傾向にある。そのため、図-9の結果より離岸時では、足摺岬の海面水位の方が高い傾向にあることが分かる。

しかし、接岸時では潮岬の方が高くなる時期もある。×印で示された夏季にその傾向が多い。このような水位差や温度差は、瀬戸内海の流動場、および海水交換のメカニズムに影響を及ぼしている可能性があると考えられる。

3. 瀬戸内海における水位変動の要因

黒潮の接岸による瀬戸内海の水況は、平均で15

cm程上昇しており、また海水温も2.0℃程度上昇する結果を得ており、その変動値は、ほぼ外海の変動値と同様であることが確認できた。

そこで、この黒潮の離接岸が瀬戸内海の水質環境の変動に及ぼす影響を考察する。

図-7、図-8、図-9、および図-10より、黒潮の接岸により海面水位が上昇し、海水温も上昇する結果を得た。この要因は、海水温が上昇することによる海水の膨張であるとする、その水位上昇量 ΔH は次式によって説明することができる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_A H &= \rho_B (H + \Delta H) \\ \Delta H &= \frac{(\rho_A - \rho_B) H}{\rho_B} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ΔH : 上昇水位 (m)、 H : 水温が上昇した層厚または水深 (m)、 ρ_A : 上昇前の密度 (g/cm^3)、 ρ_B : 上昇後の密度 (g/cm^3) である。

実際に、黒潮が接岸した年の1997年の7月(離岸距離: 33 km)と、離岸した1987年の7月(離岸距離: 165 km)の瀬戸内海各地における海面水位と海水温を代入し、仮に各地の水位上昇が、すべて水温上昇による海水の膨張により生じたと仮定したとき、その時に必要な水深(層厚) H (m)を算出した。

計算結果を表-1に示す。また、表中には、各験潮場付近の実際的水深を載せてある。実水深は、海図、およ

び瀬戸内海広域総合水質調査データより算出した。

結果より、足摺岬、および潮岬の外海域の水位上昇は、実水深と計算値がほぼ一致しているので、黒潮の接岸による水温上昇による海水の膨張によるものと考えられる。

しかし、瀬戸内海では実水深と計算値が大きく異なっており、水温上昇のみで水位が上昇したとは説明し難い。つまり、瀬戸内海の水位上昇は、水温上昇による海面膨張と、外海域の水位上昇により黒潮系水塊が瀬戸内海に流入したことが複合して生じたと考えられる。

以上のことから、黒潮の接岸による瀬戸内海の水況変動は、次のように推測することができる。

まず、黒潮の接岸により外海域の水温が上昇する。その結果、海面膨張により外海域の水位が上昇し瀬戸内海と外海域とに水位勾配ができる。その勾配により外海域から高水温・高塩分の黒潮系水塊が流入し瀬戸内海の水況が上昇する。1997年の場合の水位上昇は、海水の膨張によるものが約15%、外海水の浸入によるものが約85%と推定される。

表-1 計算結果

観測場	計算値(m)	実水深(m)
足摺岬	253	250以上
宇和島	328	56
大 分	351	55
門 司	139	10
徳 山	142	35
広 島	236	20
呉	366	20
宇 野	231	25
大 阪	608	13
淡 輪	188	20
洲 本	399	56
小松島	240	30
和歌山	135	30
潮 岬	301	250以上

4. 数値計算

現地観測の結果より、黒潮接岸時に離岸時に比べ平均で約15 cm 水位が上昇すること、および紀伊水道側の海面水位が豊後水道側より5 cm 程度高くなることが確認できた。この時における瀬戸内海の水況への影響を把握するため、数値計算を用い検討した。

(1) 数値モデル

数値モデルには、2次元多層モデルを用いた。層の分割方法はレベルモデルである。

基礎方程式は、静水圧近似を仮定した運動方程式と連続式と物質輸送方程式である。離散化方法には差分法のADI法(Alternating Direction Implicit Method: 交互方向陰解法)を、3次元計算にはMode Splitting法を使用した。

本モデルでは、水平渦動粘性係数と水平渦拡散係数は

一定値を与え、鉛直渦動粘性係数と鉛直渦拡散係数は、中立安定状態を基準にした勾配リチャードソン数の成層化関数を適用した。

計算における計算条件を表-2に示す。計算時間は、黒潮は月・季節単位での短期間で変動している傾向があるため2000年9月15日から3ヶ月間とした。

表-2 計算条件

項目	設定値	
格子間隔	水平方向: 1152 m × 924 m	
	鉛直方向: 5 層	
	1・2層(5 m), 3・4層(10 m), 5層(以深)	
タイムステップ	15 s	
水平渦動粘性係数	10 m ² /s	
水平渦拡散係数	50 m ² /s	
鉛直渦動粘性係数	0.005 m ² /s	
鉛直渦拡散係数		
初期条件	塩分	32 psu
	水温	20℃
境界条件	強制水位	関門海峡; 八幡の調和定数
		豊後水道; 長島と土佐清水の調和定数
	塩分	紀伊水道; 室戸岬と串本の調和定数
		34 psu
	水温	20℃
計算方法	ADI法およびMode Splitting法	
計算期間	2000/9/15~12/15	

計算は、表-3に示すように4ケース行った。Case-1は離岸時を想定し、強制水位は潮汐のみした。Case-2は接岸時を想定し、平均水位を両水道とも15 cm 上げた。15 cm 水位を上げたのは、図-5および図-7より、黒潮の接岸時に水位が平均10~15 cm 程度上昇していたためである。Case-3, 4は接岸時でも両水道での水況変動が違う場合と想定し、両水道の平均水位に5 cm の水位差をもうけた。境界での塩分濃度は、離岸時、および接岸時において殆んど差が無いと仮定し、34.0 psu と一定とした。結果は、紙面の都合上、Case-1およびCase-3の結果のみ示す。

表-3 計算条件

境界条件	境界	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
強制水位(cm)	紀伊水道	①	③	③	②
	豊後水道	①	③	②	③
塩分(psu)	紀伊水道	34.0	34.0	34.0	34.0
	豊後水道	34.0	34.0	34.0	34.0

①; 潮汐のみ

②; 潮汐 + 平均水位10 cm

③; 潮汐 + 平均水位15 cm

図-11に、Case-1およびCase-3における2184時間後(3ヶ月)の層平均した瀬戸内海の塩分の分布図を示す。

結果より、両ケースに差異が生じた。まず、Case-1ではPt.bの大阪湾辺りにおいて、淀川からの淡水が瀬戸内海中央部、および紀伊水道の方向に淡水が流出している傾向がある。しかし、Case-3においては、紀伊水

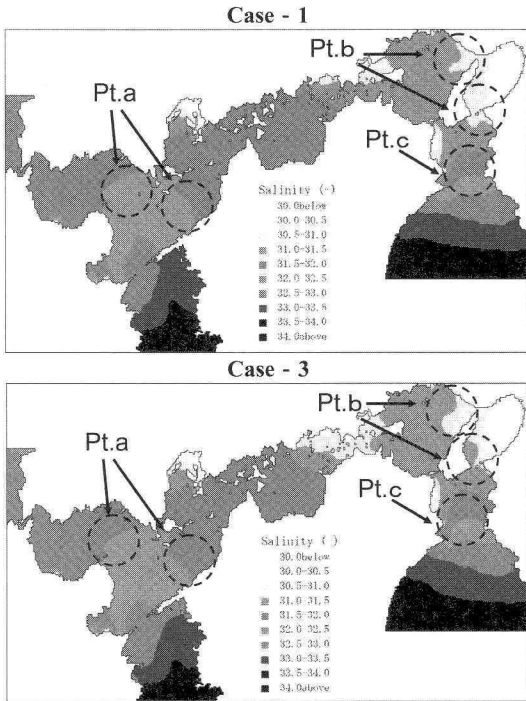


図-11 Case-1 およびCase-3における層平均した瀬戸内海の花分分布図(2184時間後)

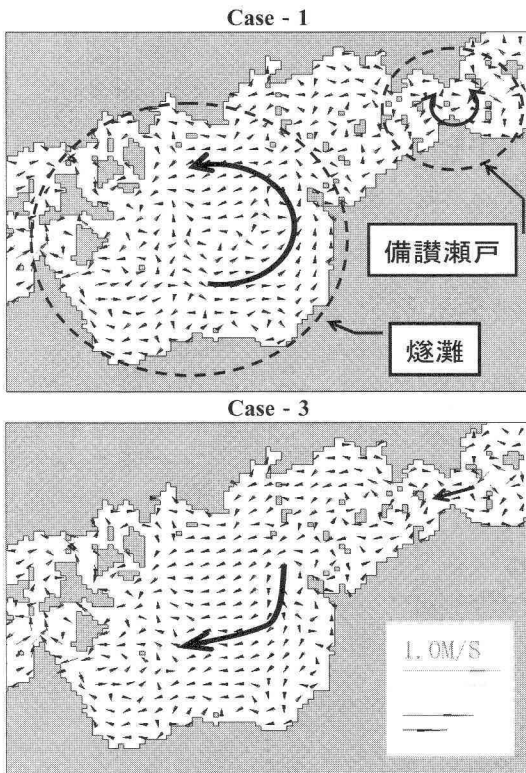


図-12 Case-1 およびCase-3における燧灘から備讃瀬戸にかけての潮汐残差流

道から大阪湾内へ高塩分水塊が流入し、その影響により瀬戸内海中央部の方向に Case-1以上に淡水が流出していることが分かる。

この理由として、流動場の違いが考えられる。その確認として、図-12に Case-1および Case-3における瀬戸内海中央の燧灘・備讃瀬戸における潮汐残差流の結果を示す。

結果より、Case-1においては、燧灘では反時計回りの環流が存在している。しかし、Case-3においては、平均的に東部から西部に向かう流れが卓越していることが分かる。つまり、水位差の違いにより流動場に変化が生じ、その結果、外海水の挙動に差異が生じたのだと考えられる。

この結果、紀伊水道からの高塩分の外海水の流入、大阪湾に流入した淡水の挙動等、近年の塩分の観測結果の変動傾向も説明することができ、黒潮の離接岸による外海域の花況変動は、内湾域の花況を変動させるのみでなく、瀬戸内海の流動場にも変化を与え、その流動が更に内湾域の花況変動を複雑化させていると考えられた。

5. 結 論

本研究の結果、以下の結論が得られた。

- 1) 黒潮の離接岸により、瀬戸内海及び外海域の海面水位と海水温の変動が密接に関係し、黒潮が接岸した場合には、水位と水温が上昇する結果が得られた。
- 2) 黒潮の接岸による海水温の上昇、すなわち海水の膨張により外海域の海面水位は上昇したと考えられる。しかし瀬戸内海においては、海水の膨張のみでなく外海水の侵入によって外海域と同程度の平均水位と平均水温が上昇する。
- 3) 黒潮の接岸時に紀伊水道側の平均水位が豊後水道側より 5 cm 高いという数値計算結果から、最近の瀬戸内海の花分変動傾向が説明できた。

参 考 文 献

- 高橋暁(2004):瀬戸内海の花期水温変化について(Ⅲ),日本海洋学会大会講演要集, Vol.2004, pp. 132.
- 川合英夫(1972);海洋物理学Ⅱ,東海大学出版会, 1972.
- Sekine, Y., K. Fujita(1999); Why does the Sea Level Difference Between Kushimoto and Uragami Show Periods of Large Meander and Non-Large Meander Paths of the Kuroshio South of Japan?, Journal of Oceanography, Vol.55, pp. 43-51.
- 竹内淳一(2003):水温画像からみた黒潮の北縁位置について,和歌山県水産試験場水試だより3月号に掲載.
- 中村充博(2004):瀬戸内海の水質環境に及ぼす海流の影響について,武蔵工業大学修士論文.