

衛星画像及び公共用水域水質測定結果から得られた鹿児島湾に流入する外洋水の特徴

Characteristics of the oceanic water intrusions into Kagoshima bay derived from satellite images and public water monitoring data

細谷和範¹・西 隆一郎²
Kazunori HOSOTANI and Ryuichiro NISHI

¹正会員 博(学) 津山工業高専講師 電子制御工学科(〒708-8509 岡山県津山市沼624-1)

²正会員 博(工) 鹿児島大学教授 水産学部水産学科(〒890-0056 鹿児島市下荒田4-50-20)

In this study, effect of the oceanic water intrusions into Kagoshima Bay on the water quality was investigated by the satellite images of the thermal infrared sensor or the ocean color sensor and water quality data collected every two months by the local government. The water quality data do not specifically address oceanic water intrusion, but provided useful information. As the satellite SST (sea surface temperature) and chl-a (chlorophyll-a) images taken by the MODIS on Aqua and Terra satellite were employed. And the satellite data showing oceanic water intrusion were compared with the water quality data. In this paper, qualitative research was performed because there were not many samples. As the result of analysis for four years (April, 2004 - Mar., 2008), the satellite images and water quality data on January, 2008 show the same tendencies at each intruding term. Although only one sample couldn't reveal enough an influence due to the oceanic water intrusion, water quality data agree to show the decent difference.

Key Words : Kagoshima bay, Oceanic water intrusion, Satellite image, MODIS, Public water

1. はじめに

南九州に位置する鹿児島湾は、南北約70km、東西約20kmで南端に開口部を持ち、最深部は200mを越える閉鎖的湾である(図-1)。湾内の水質について、たとえば有機物による汚濁の指標となる化学的酸素要求量(COD)は1998年以降悪化傾向を示し、A類型の環境基準を満たさない地点数が増加していることが自治体によって報告されている¹⁾。また湾内の流れや水質は季節によって異なり²⁾、冬季の混合期の水温分布は上層から下層にかけておよそ16℃～17℃で一定となり、上下層の水の循環が促進される。一方、夏季の成層期は表層付近の5m～10mが成層化し、上下層の循環が弱くなる。これにより冬季以外の季節において、底層の溶存酸素量(DO)が環境基準を大きく下回ることもある。

鹿児島湾のすぐ南では黒潮が流れており、黒潮本流から断続的に分離した暖水塊がフィラメント状に九州沿岸を通過する(図-1右)。このとき鹿児島湾の湾口から湾内に向かって高温かつ高塩分の外洋水が貫入する急潮現象が発生することが知られている。この間欠的な外洋水の流入は潮汐残差流や季節的な密度流に並び海水交換に大きく寄与していると見られ、湾内の水質環境や水産業などの経済活動に大きく影響を与えていると考えられる。湾内に流入する外洋水に関しては、これまでに多くの研究がな

され、東シナ海陸棚端付近で発生した黒潮フロント攪乱が周期20日～30日で断続的に北上し、鹿児島湾口に接触して侵入するという報告がある³⁾。山城ら⁴⁾は大隈分枝流の周期8日以下の流速変動が湾内への間欠的な流入に寄与していることを示した。また湾内に流入した水塊の挙動について、定期フェリーによる湾口付近の水温及び流速分布の測定⁵⁾や定点ブイによる水温観測結果⁶⁾から、冬季における外洋水の流入は上層から流入し下層から流出する流れ場を有し、およそ1～3℃の温度差でおよそ10cm/s～20cm/sの速度で流入しているようである。また衛星

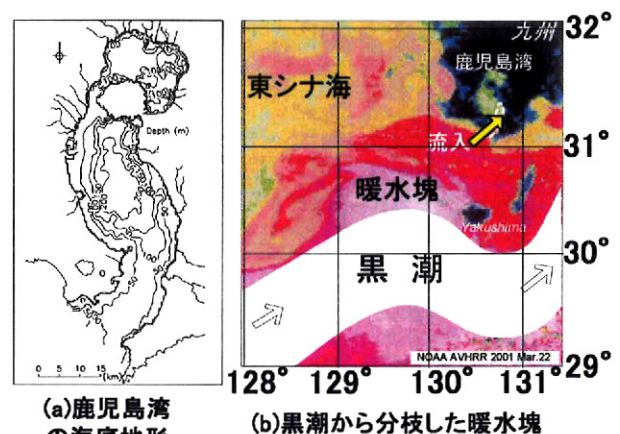


図-1 鹿児島湾と黒潮から分枝する暖水塊の動き

リモートセンシングを用いた海面温度 (SST: Sea Surface Temperature) の画像解析⁷⁾より、外洋水は主に湾の東側沿岸に沿って北上し、1週間程度で桜島南岸にまで達することが示されている。Kohnoら⁸⁾は有限差分モデルを用いて流入のメカニズムを調べ、湾口に接触した暖水境界条件が生む密度流がコリオリ力の影響を受けて反時計回りの流れとなり、東岸沿岸に干渉を受けて湾内部に侵入する半地衡性の沿岸密度流の特徴⁹⁾を有することを示した。この外洋水の流入現象は一度のイベントで大量の外洋水を湾内にもたらすものと推測されるため、流入現象が湾内の水質環境に与える影響を把握することは湾内における水質の保全を講じる上で非常に重要である。

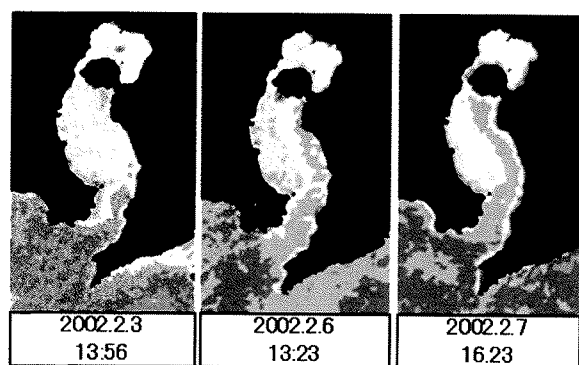


図-2 NOAA衛星で見た外洋水の流入⁷⁾
(白色が低温、濃い灰色が高温を示す)

しかしながら、この流入現象の発生は間欠的であり、また一週間程度で流入が完了してしまうために湾内に流入する水塊の挙動や水質の変化を実測で捉えることは非常に難しい。近年、高性能のADCPを搭載した観測船による流況調査¹⁰⁾が頻繁に行われているものの、間欠的な外洋水の流入現象の全体像は現在のところ十分に把握されていない。加えて流入時における水質の変化についても現在のところ流入時に特化した調査は行われていない。このため、湾内の水質環境が外洋水の流入によりどの程度影響を受けているか議論するための資料が少ない状況にある。

そこで本研究では、過去に定期的に行われた公共用水域の水質測定日に撮影された衛星画像を調べ、水質測定日が偶然に外洋水の流入時と一致するサンプルを抽出し、流入に伴う水質環境への影響を調べた。ここで、本研究において使用する衛星画像は海面の温度分布が把握できるSST画像と植物プランクトンの賦存量に関係のあるクロロフィルa (Chl-a) 画像の二種類を選択した。本稿では、衛星画像によって外洋水の流入時と判断される日の公共用水域水質測定結果からいくつかの水質項目の水平分布を調べ、流入水塊が示す特徴 (たとえば、流入水は湾内水と容易に混合するのか、あるいは湾内の奥深くまでもたらされるのか等) を定性的に調べた結果について述べる。また、湾央の一地点では水質の鉛直測定が行われていることから、このデータを用いて流入水塊の厚さの推定について併せて述べる。

2. 使用データ

(1) 衛星画像

衛星画像を用いて間欠的かつ一週間程度の期間で発達する外洋水の流入パターンを捉えるには日単位の衛星画像が必要となる。海上の情報が得られる極軌道の地球観測衛星は16日程度の回帰日数を持つものが多いが、走査範囲が広い熱赤外バンドを有し、同仕様の衛星が複数周回しているNOAA衛星は同じ地点の画像を1日に最低でも2回観測でき、時系列画像による流入速度の推定や流入パターンの把握が可能である。本研究ではNOAA衛星のように、同じ仕様のMODISセンサを搭載したNASAのTerra衛星とAqua衛星によるSST画像とChl-a画像を用いた。これらの衛星の回帰日数は約16日であるが、走査範囲が2330kmと広く、実効的な回帰日数は2日とされる上、2機の衛星が運用されているため、同地点を1日に2回撮影することができる。ただし、Chl-a画像を取得する海色センサは太陽光の反射を利用する受動型センサであるため、昼間に撮影されたデータのみ利用が可能となる。本研究では大気補正と幾何補正処理が施され、約1kmの空間解像度を有するSST及びChl-aプロダクト (LEVEL2, JAXA/東海大提供) を用いた。またデータの可視化はNASAが公開しているSeaDASデータ処理ソフトウェアを用いた。

(2) 公共用水域水質調査データ

本研究では、鹿児島湾内の27地点で2ヶ月毎に実施されている公共用水域水質測定の検体値データ (国立環境研究所環境数値データベースより引用) を利用した。調査対象となる測定点は外洋水の流入経路をカバーする湾口から湾央の10地点 (図-3) を選定した。なお、湾内の水質の測定は複数の調査船により湾内をいくつ

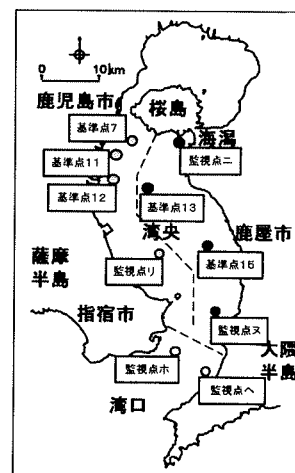


図-3 調査地点

かの領域で分担して実施され、転流時付近 (午前10時～正午) に採水がなされている。観測層は湾央のSt. 13を除き表層の値である。St. 13は鉛直4層 (表層, 20m, 100m及び200m) の値が得られている。

本研究で比較検討する水質項目は主に生活環境項目から選択し、流入する外洋水と湾内水とを区別しやすいものとして水温、塩化物イオン及び水素イオン濃度 (pH) を選択した。また水質環境への影響を把握するものとして栄養塩類の全りん (T-P)、汚濁の指標となる化学的酸素要求量 (COD) 及び溶存酸素量 (DO) を選択した。

3. 衛星画像を用いた通年の流入状況の把握

衛星画像を用い、公共用水域の水質調査日における外洋水の流入状況を把握する前提条件として、衛星画像が通年で流入する外洋水と湾内水とを識別できる必要がある。鹿児島湾への外洋水の流入が湾口に接する黒潮由来の高温水によって駆動される半地衡性の沿岸密度流であるとすれば、上層流入・下層流出で湾の東側沿岸に沿って流入するものと見られる。湾内水と流入水との水温差が顕著な冬季については熱赤外バンドを有する人工衛星のSST画像を用いることで流入する暖水塊の流入パターンを把握することができる。一方、表層付近が成層化する夏季にも流入現象が存在することが漁業関係者を中心に知られている。鹿児島湾において夏季に発達する温度成層は5m～10m程度であり、湾口に数十mの厚い暖水塊が接すれば冬季と同じように沿岸密度流が発達することが可能であると推測される。しかしながら、熱赤外バンドでは夏季の流入を把握することができない。Hosotaniら¹¹⁾は富栄養化傾向を示す鹿児島湾内ではChl-aの濃度が高く、流入する黒潮水塊と有意な差を持つことに注目し、海色センサによって取得されたChl-a画像を用いることで流入水塊を識別できることを示しており、本研究でもMODISのSST画像とChl-a画像の適用を試みた。

本節では、はじめに衛星によるSST画像とChl-a画像を用いて外洋水の流入状況の通年モニタリングについて述べ、続いて公共用水域水質調査日における流入状況を調べた。

(1) 各季節の流入状況の把握

図-4に2005年から2006年のMODIS画像を調べ、外洋水が流入していると見られるケースのSST及びChl-a画像例を示す。冬季や春季の例ではSST画像とChl-a画像との両方が流入パターンを捉えていることがわかる。一方、夏季ではChl-aでのみ識別可能であり、秋季はChl-a画像を用いることで定性的に把握できている。これらの特徴について、流入コース上におけるSSTとChl-a濃度の相関分布(図-5)をみると、SSTとChl-aの相関関係は冬季や春季の例では線形な比例関係を示す一方で、夏季や秋季の例では勾配がほぼ水平となっており、SSTは適用できないことがわかる。以上の結果から、SSTとChl-aの二種類の衛星画像を用いることで年間を通じた流入状況を調べることが可能であると考えられる。ただし、Chl-a画像を用いる場合、プランクトンの生産活動が場所や水質に大きく影響を受けるため、単に画像の輝度の濃淡等で外洋水を識別できないケースも多い他、流入後の経過日数によってChl-a濃度も変化するため、利便性はSSTより劣る。

(2) 公共用水域の水質測定日における流入状況

2004年4月～2008年3月の4年間に実施された公共用水域水質測定調査の実施日に取得されたMODISに

よるSST画像とChl-a画像を調べ、外洋水の流入の有無を定性的に判断した結果を表-1に示す。前節(1)では、雲量の少ない良好な画像を使用したが高、データの多くは雲の影響を受けている他、海上の状態によっては流入パターンの判読が難しくなるため、流入の有無の判断の目安として、①湾の東側沿岸に沿ったパターンを示し、②SST画像の場合は湾内水と流入水塊の温度差が1℃程度またはそれ以上を示すもの、あるいはChl-a画像において、流入水塊部が湾内水と0.5mg/l程度またはそれ以上の差が認められるものとした。また、水質調査日の衛星画像が雲の影響で取得できない場合は、水質測定日の前後の衛星画像を調べた。

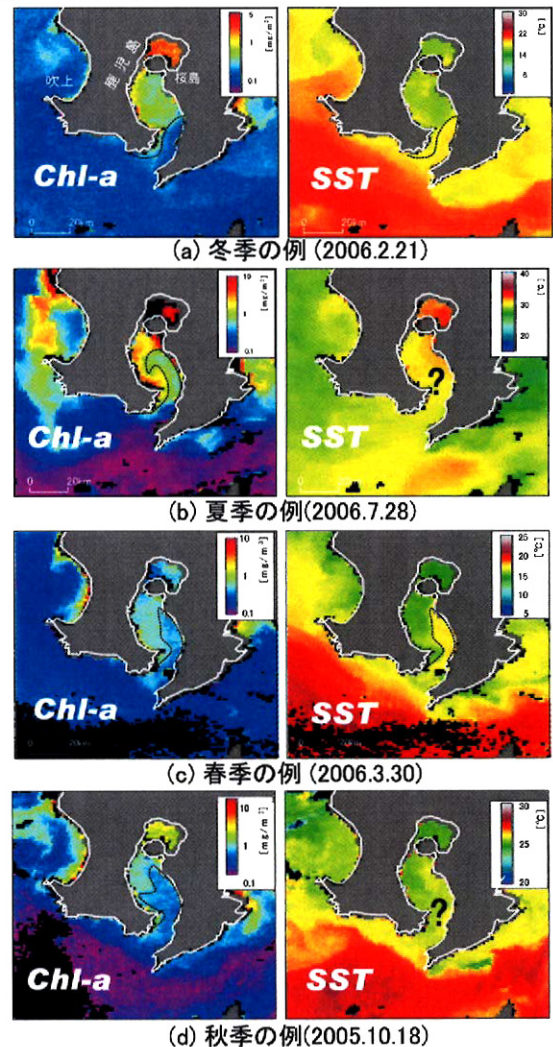


図-4 外洋水の流入とみられる各季節の衛星画像

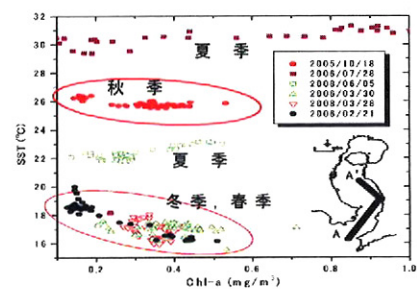
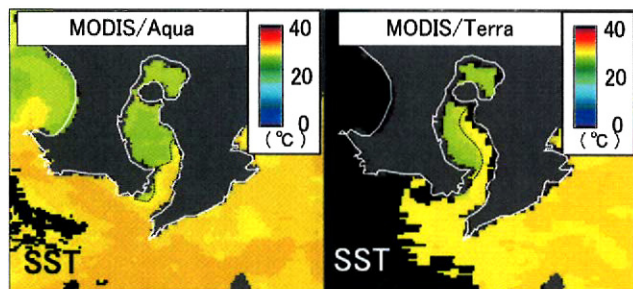


図-5 測線上のSSTとChl-aの相関

2004年から2008年の間に実施された計24回の調査のうち、外洋水が侵入中に実施されたケースは2008年1月8日（冬季、図-6）のみであった。なお、不明瞭ながら2006年7月12日（夏季）にも低濃度のChl-aが湾内に分布している様子が見られたが、当該日は夜半から早朝にかけて、100mmを越える降水があったため、サンプルとしては不適当であるため評価対象から除外した。

表-1 衛星画像を用いて調べた水質測定日の流入状況

年	採水日時	天候	画像から判断した流入の状況
2004	4月12日 10:59	晴	なし
	6月9日 11:12	晴	雲のため判読不可
	8月4日 10:58	晴	なし
	10月4日 10:58	曇	雲のため判読不可
	12月1日 10:35	晴	なし
2005	2月21日 10:50	曇	なし
	5月11日 11:00	曇	なし
	7月4日 11:00	曇	雲のため判読不可
	9月12日 10:55	晴	なし
	11月9日 11:00	曇	なし
2006	1月10日 10:40	晴	なし
	3月7日 10:40	晴	なし
	5月8日 10:45	曇	雲のため判読不可
	7月12日 10:45	晴	雲のため判読不可 調査日の早朝100mm/時を越す降雨あり
	9月4日 10:45	曇	なし
2007	11月6日 10:40	曇	なし
	1月9日 10:50	薄曇	なし
	3月12日 10:00	晴	なし
	5月7日 10:55	晴	なし
	7月2日 10:50	曇	雲のため判読不可
2008	9月3日 10:40	曇	なし
	11月7日 10:30	晴	なし
	1月8日 10:40	晴	流入あり
	3月10日 10:35	晴	なし

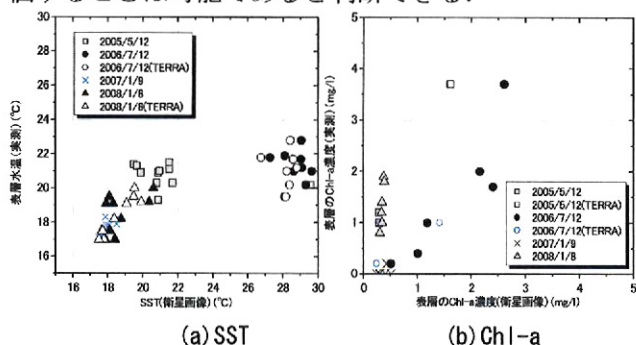


(a) 2008.1.6 13:36 (b) 2008.1.8 13:38
図-6 流入状況（2008年1月）
（水質調査は1月8日に実施されている）

ここで、衛星によるSSTとChl-aの値は沿岸から離れた洋上にあわせたバンド間演算が行われているために、狭い湾内の水質をどの程度の精度で捉えることができているか確認しておく必要がある。冬季の水質調査日（2007年1月、2008年1月）、春季（2005年5月）および2006年7月（若干不鮮明な画像であった）におけるAqua衛星とTerra衛星のSST及びChl-a値と実測値との相関関係を図-7に示す。ここで、Chl-aは全地点で測定されておらず、10地点中6地点で測定されたものである。

SSTの場合、画像が不鮮明であった2006年7月のケースを除き、おおそ線形な関係であることが見て取れる。また、Chl-aの場合は、2008年1月において衛星Chl-a値が実測よりも過小評価となっている。以上の結果から衛星によって取得された水温やChl-aの値を定量的に評価するにはかなり慎重な扱いが

必要であるが、外洋水の流入パターンを定性的に評価することは可能であると判断できる。



(a) SST (b) Chl-a
図-7 衛星によるSST及びChl-a値と実測値との相関関係
（衛星名が記載されていない凡例はAquaを示す）

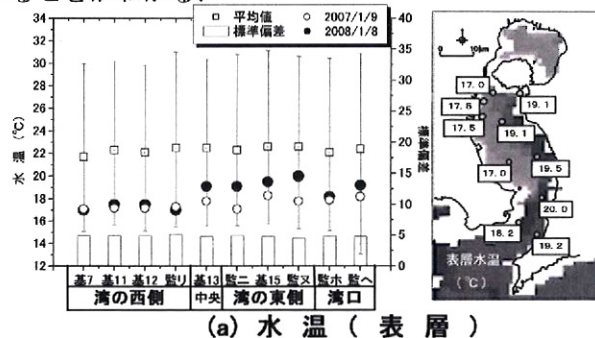
4. 公共用水域水質測定結果による外洋水流入時の水質

(1) 各水質の表層分布

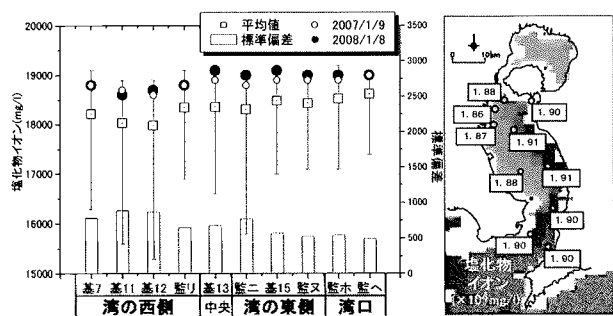
流入パターンが認められた2008年1月8日の各地点における表層の水質（水温、塩化物イオン濃度、全りん(T-P)及びCOD）の水平分布を図-8(1)及び図-8(2)に示す（各図の右側には図-6(b)の流入パターン上に2008年1月8日の測定値をプロットしたものを記した）。図中の“●”印は流入のケースを示し、また参照値として、流入の兆候が見られなかった前年の2007年1月9日のデータを“○”印でプロットした。また4年間の統計的なデータとして、各地点の平均値を“□”印、期間内の最大値と最小値をバーグラフで示した。なお、地点によっては陸域等の影響によりデータのばらつきが大きくなり、データの扱いに注意を要するため、標準偏差を付記した。

(a) 表層水温の水平分布

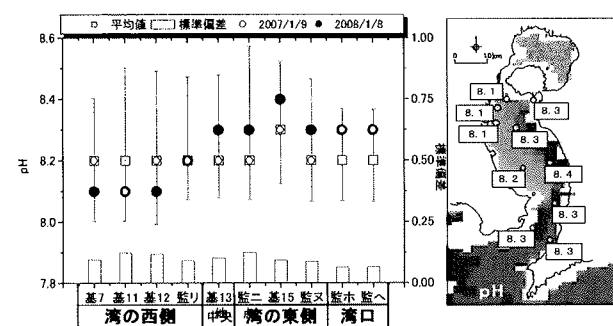
図-8(1)の水温の水平分布を見ると、湾内の平均水温はほぼ一定であり、データのばらつきを示す標準偏差はおおよそ5°Cである。これに対し、流入中の水温分布は衛星画像で得られたSSTパターンと同様に、流入水塊の範囲にあたる湾口から湾の東側に分布する測定点では、湾の西側の測定点よりもおよそ2°C高い値を示している。また、外洋水の流入の兆候が見られない2007年1月7日の水温分布と比較すると、流入パターン上の地点の水温が高くなっていることがわかる。



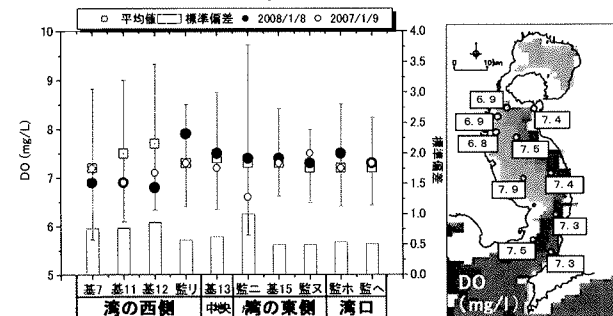
(a) 水温（表層）
図-8(1) 2008年1月8日の水質調査結果



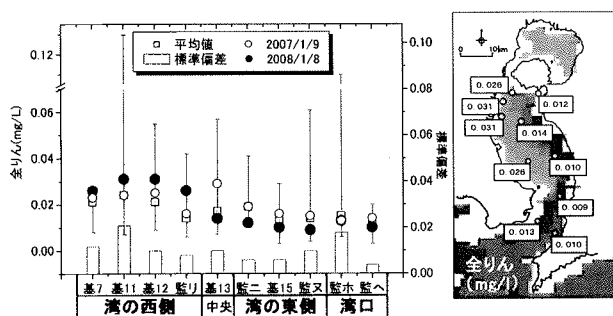
(b) 塩化物イオン (表層)



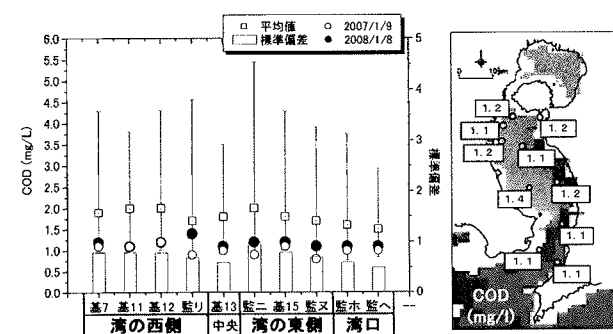
(c) pH (表層)



(d) DO (表層)



(e) 全りん (表層)



(f) COD (表層)

図-8(2) 2008年1月8日の水質調査結果

(b) 塩化物イオン

鹿児島湾内の塩化物イオン濃度は、河川からの淡水が多く供給される雨季に低く、降水量が少ない冬季では高くなる傾向を有する。図-8(2)(b)を見ると、塩化物イオンの平均値は河川や市街地のある湾の西側が低く、湾の東側から湾口にかけて高くなる傾向を有する。これに対し、流入時の濃度は冬季で河川流量が小さいため相対的に5000mg/lほど大きい値を示し、流入が見られない2007年の値と比べると、湾の東側の測点(基準点13, 15, 監視点二)でわずかに大きい値を示した。しかしながら、本結果からは外洋水の流入に伴う大きな違いは確認できない。

(c) 水素イオン濃度(pH)

図-8(2)(c)をみると、期間内の平均値はほぼ全ての測定点で8.2を示すが、外洋水の流入時は湾の東側でpHが高くなっている。流入がない2007年の結果と比べると湾口の監視点ホや監視点へは同じ値を示しているが、湾内の東側の地点では0.1の差を有している。この差は湾中央の基準点13まで続いており、外洋水がその水質を維持したまま湾の内部まで移流しているものと推測することができる。

(d) 溶存酸素(DO)

DOは水生生物の生息や海域の自浄作用に影響するため、閉鎖性海域の環境保全を講じる上で重要な項目である。図-8(2)(d)を見ると、冬季の流入時のケースでは、流入範囲である湾の東側の測点では平均値と同等で、流入が見られない2007年と大きな差は見られない。また、湾の西側では平均値よりも0.1mg/l~0.2mg/lほど低い値を示しているが、これも2007年1月と2008年1月のケースとに大きな差は見られない。

(e) 全りん(T-P)

栄養塩類の一つであるT-Pの水平分布を図-8(2)(e)に示す。平均値を見ると、栄養塩類は湾西岸の市街地から供給されるためか、湾の西側で高く、湾口に向かって低濃度となっている。また、監視点ホに近い沿岸には水産加工施設が多いため、濃度がやや高くなっている。外洋水の流入時は、湾口から湾の東側で0.1mg/lを示しており、湾口付近の濃度を維持したまま湾中央の基準点13まで達していることがわかる。なお、本論文には掲載しなかったが全窒素(T-N)もT-Pと同様の特徴を示した。

(f) 化学的酸素要求量(COD)

有機物による汚濁の指標であるCODの水平分布を図-8(2)(f)に示す。CODは沿岸からもたらされる栄養塩類と低次生態系の活動に依存し、鹿児島湾では春季から秋季にかけて環境基準の2.0mg/lを越える日が多い。しかしながら、冬季は陸域からの窒素やりの供給があっても水温が低いために低次生態系の生産活動が活発でなく、CODは一様に低い値とな

る。2008年1月のケースでは、湾内全域でCODが1mg/l程度と低かったため、流入する外洋水による影響を伺うことができない。

(2) 湾中央の基準点13における水質の鉛直分布と流入水塊の厚さの推定

図-9にSt. 13における水質項目（水温、T-P及びCOD）について、2007年1月9日及び2008年1月8日の測定結果による鉛直プロファイルを示す。また、前項と同様に4年間の統計的なデータとして、平均値及び最大値と最小値をプロットした。なお、St. 13は流入水塊の外縁付近に位置し、流入コースの中心から数km離れているため、必ずしも流入水塊の構造を代表するものではないことに注意する必要がある。

冬季の通常時における水温分布は2007年1月のように、表層から底層水温はおおよそ一定の値で分布するが、2008年1月のケースでは、表層において、流入する暖かい外洋水の影響と見られる約19℃の水温が示されている。一方、20m層では約17℃を示すことから、流入水塊の厚さは20mよりも薄いものと推測される。湾内の数地点にブイロボットを設置した観測結果⁶⁾によると、冬季の流入水塊と湾内水はおおよそ2℃～5℃の水温差を有しており、表層と10m層に設置された水温計がほぼ同様の変化を示していることから、流入水塊の厚さは少なくとも水深10m以上あると述べられている。このことと本結果とをあわせると流入水塊の厚さは10m～20mと推測することができる（ただし、基準点13は流入水の中心部から離れた外縁に位置しているため、この推測は過少評価である可能性もある）。

次に栄養塩類のT-Pの鉛直分布を見ると、水温の場合と同じように表層付近の分布に特徴的な違いがみられる。流入時と見られる2008年1月のケースでは表層のT-Pが0.01mg/lの低い濃度を示し、低栄養塩の外洋水の影響と解釈することができる。

CODについては、冬季は低次生態系の生産活動が活発に行われないうえに、水温と同様に上層から下層までおおよそ一定の分布形状を示すが、流入時とみられる2008年1月のケースでは、表層でCOD濃度が20m層より0.5mg/lほど低い値を示しており、これも外洋水が流入による影響を受けていると解釈することができる。

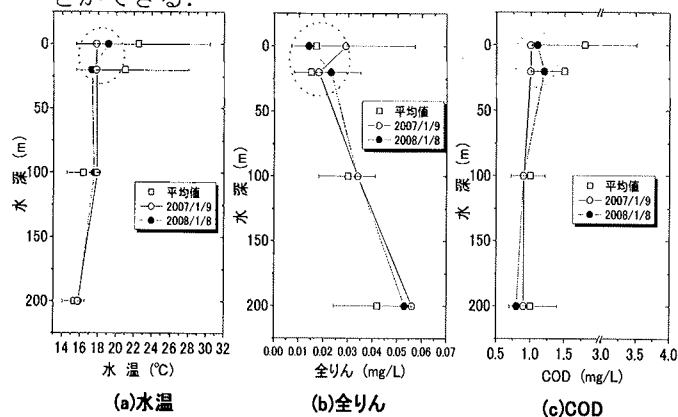


図-9 湾中央（基準点13）の水質測定値の鉛直分布

10. おわりに

鹿児島湾内に間欠的に流入する外洋水が湾内の水質環境に及ぼす影響を把握することは、湾の水質環境の保全のために非常に重要である。

本稿では観測が難しく、これまで明らかとなっていなかった外洋水流入時の水質について、過去に実施された公共用水域水質測定結果の中から抽出し、定性的な水質の特徴を調べた。衛星画像を用いて流入時と思われる水質測定日を調べたところ、2008年1月8日の1ケースが該当した。各水質項目の表層水平分布より、湾内に流入する外洋水は、湾口での水質を維持したまま市街地が集中する鹿児島市近くまでもたらされていると考えられる。また、湾中央部の基準点13における鉛直分布より、流入水塊の厚さは10m～20mであることを示唆する結果が得られた。

今回の調査では1ケースしかサンプルを評価していないが、外洋水の流入が湾の水質環境に寄与していることが示された。今後さらに多くのサンプルの抽出を試みる予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、独立行政法人国立環境研究所による環境数値データベースに掲載された公共用水域水質測定結果（検体値）データを利用させて頂きました。また、衛星画像は宇宙航空研究開発機構（JAXA／東海大学（TSIC/TRIC）提供）のバイナリデータを利用させて頂きました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鹿児島県編：第4期鹿児島湾水質環境管理計画（第4期鹿児島湾ブルー計画）報告書、2005。
- 2) Takahashi, T.: Seasonal Differences of the Circulation Processes in a Coastal Basin Nearly Closed by Land, Ocean Management, 6, pp.189-200, 1981.
- 3) 秋山秀樹：九州南・東岸海域に出現する黒潮暖水舌の動態, 月刊海洋, 26(11), pp.689-697, 1994.
- 4) 山城徹, 繁原俊弘, 浅野敏之：鹿児島湾への外洋水の流入に及ぼす大隅分枝流の影響について, 海洋開発論文集, 24, pp.921-926, 2008.
- 5) 櫻井仁人, 前田明夫, 杉森康宏, 久保田雅久：鹿児島湾の湾口断面を通しての海水流入・流出過程, 海の研究, 9(1), pp.1-12, 2000.
- 6) 大谷賢樹, 菊川浩行, 折田和三, 幸野淳一, 木下紀正：鹿児島湾への外洋水の流入, 海の研究, 7(4), pp.245-251, 1998.
- 7) 菊川浩行, 小野祐作, 細谷和範, 石黒悦爾：NOAA/AVHRR イメージの内挿法と鹿児島湾への暖水流入, 鹿児島大学水産学部紀要, 53, pp.22-36, 2004.
- 8) Kohno, J., Hosotani, K., Ono, H. and Kikukawa, H.: Warm Ocean Water Intrusion into Kagoshima Bay, Journal of Visualization, 7/4, pp.331-340, 2004.
- 9) 久保川厚：湾内への暖水塊侵入の力学, 海洋研究ノート, 30(1), pp.68-78, 1992.
- 10) 第十管区海上保安本部：H19年度鹿児島湾流況観測報告, 2007.
- 11) Hosotani, K. and Winarso, G.: Oceanic Water Intrusion into Kagoshima Bay Resulting in Thermal Stratification, Journal of Visualization, 10/3, pp.325-334, 2007.