

資料

鹿児島湾における水質挙動及び水塊の移動に関する調査研究

Research about Behavior of Water Quality and Movement of a Water Mass in the Kagoshima Bay

榎 憲 弘 山 田 正 人¹ 右 田 裕 二
 宮 元 誠 牛 垣 里 奈 大 庭 大 輔

1 はじめに

鹿児島湾は南北約80km、東西約20kmの細長く入り組んだ内湾である。桜島と鹿児島市街地を結ぶ水深約40m、幅約1.9kmの西桜島水道を隔てて、北方の湾奥部と南方の湾中部・湾口部に大別される(図1)。湾奥部と湾中部はすり鉢を2つ繋げたような形状のため湾内水と外海水との交換が悪く、特に湾奥部は海水の交換が少ない閉鎖性の高い海域となっている¹⁾。このため、赤潮の発生や、海水中の溶存酸素(以下「DO」という。)が極めて不足している水塊(以下「貧酸素水塊」という。)の比較的浅い層での発生が報告されている²⁾。

鹿児島湾における貧酸素水塊の発生・消失や、栄養塩類の溶出・沈降・移動等の挙動は複雑で、鉛直循環や外海水との交換の程度等によって大きく異なることから、鉛直循環や外部海水との交換、栄養塩類等の移動状況を調査し、挙動を把握することで、今後の環境保全対策の推進に資する「鹿児島湾における水質挙動及び水塊の移動に関する調査研究」を2015年度から実施している。

今回、1994年4月から2016年3月までの22年間の鉛直方向の水温測定結果並びに、2015年7月から2016年5月までの多項目水質計及び採水試料の調査結果の解析から、夏期の成層形成状況や秋期から冬期の鉛直循環の発生状況、水塊の移動状況、DOの鉛直分布の季節変動、栄養塩類等の鉛直方向の挙動について若干の知見を得たので報告する。

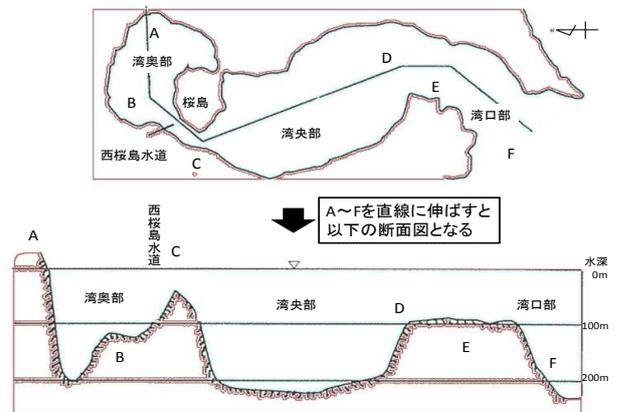


図1 鹿児島湾地形図

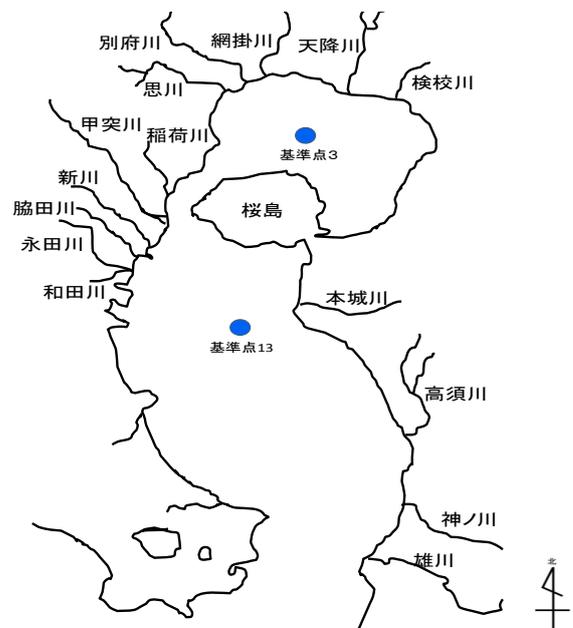


図2 基準点3及び基準点13位置図

1 熊本支庁保健福祉環境部

2 調査方法

2. 1 1994年4月から2016年3月の水温状況

鹿児島湾の常時監視時の調査地点である基準点3及び基準点13(図2)の1994年4月から2016年3月の鉛直方向の水温測定結果を各月毎、各水深毎に平均化し解析した。調査時期は1994年度から2004年度は原則として偶数月に調査を実施し、2005年度から2015年度は原則として奇数月に調査を実施した。調査水深は表層から50mまでは1m毎、50mから100mまでは5m毎、100m以深は10m毎に調査を実施した。

2. 2 多項目水質計及び採水試料による調査

2. 2. 1 調査地点

常時監視時の調査地点であり、湾奥部の中央付近に位置する基準点3、及び湾奥部の最深部付近に位置する監視点トに加え、海流による影響を調査するために西桜島水道北付近(以下「西桜島水道北」という。)に調査地点を設定し、計3地点で調査を実施した(図3)。



図3 鹿児島湾奥部調査地点

2. 2. 2 多項目水質計による測定

2015年7月から2016年5月の間に計7回の調査を実施した。調査方法は多項目水質計(Hach Hydrolab製 DS5)を船上から概ね5秒に1mずつ底層まで垂下し、水深、水温、塩分、pH、DOを連続測定した。また、測定した水温(T)及び塩分(S)の結果から海水の密度(σ_t)を下記の式により算出した。

$$\sigma_t = \rho(S, t, 0) - 1000 \quad (\rho = \text{密度}, t = T \times 1.00024)$$

2. 2. 3 採水試料の採水水深、及び採水方法

表1に各地点の採水水深を示す。表層(0.5m)はバケツで直接採水し、その他の水深はバンドーン採水器により採水を行った。

表1 各地点の採水水深

採水地点	水深 (m)							
	0.5	5	10	20	45	65	100	130
基準点3	0.5	5	10	20	45	65	100	130
監視点ト	0.5	75	150	200				
西桜島水道北	0.5	20	50	100				

2. 2. 4 採水試料の測定項目、及び測定方法

測定項目: DO, 全窒素(T-N), 溶存態全窒素(DT-N), 全りん(T-P), 溶存態全りん(DT-P), 硝酸態窒素(NO₃-N), 亜硝酸態窒素(NO₂-N), アンモニア態窒素(NH₄-N), りん酸態りん(PO₄-P)

測定方法: JIS K 0102に基づき測定を行った。DT-N, DT-P, 栄養塩類(NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P)は、採水試料をガラス繊維フィルターGC-50(47mm)(ADVANTEC製)でろ過を行い、懸濁態物質を除いたものを測定試料とした。

3 結果

3. 1 1994年4月から2016年3月の水温解析結果

3. 1. 1 水温の経月変化

1994年4月から2016年3月の水温を月毎に平均化したものを図4(基準点3)及び図5(基準点13)に示す。水温が一番低いのは3月であり、表層から底層まで概ね一様となっていた。

4月から9月にかけて水温は表層から上昇し、月ごとに深い層で水温が上昇していた。10月以降は、水温の変化が低下へと転じた。水温の低下は上昇時と同じく表層からであるが、直下の層と水温が一様となり、その様な水温の層が徐々に厚くなるような変化が起こっていた。1月には表層から底層まで水温が概ね一様となっていた。その後、2月、3月と表層から底層まで概ね一様の状態でさらに水温が低下していた。

各水深の水温変化の挙動は上昇時と低下時で異なっていた。水温上昇時は鉛直方向の混合が起こりにくいため、下の層の水温上昇は熱拡散によるものと考えられた。水温低下時は水温低下による密度上昇で生じる鉛直方向の混合と熱拡散による影響と考えられた。なお、経月変化は両地点とも概ね同様の挙動を示した。

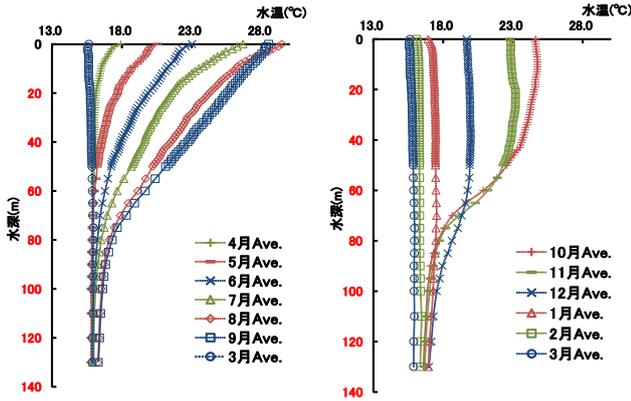


図4 基準点3の水溫経月変化

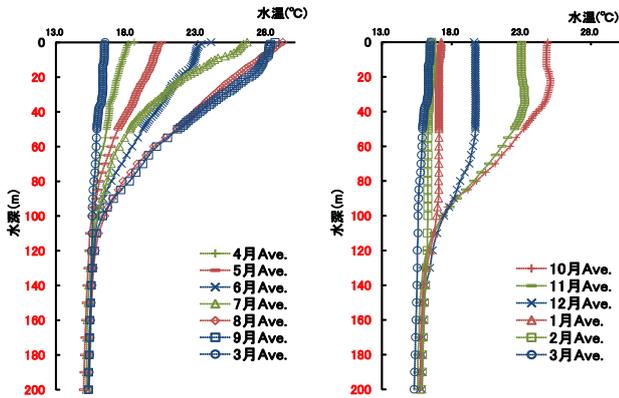


図5 基準点13の水溫経月変化

3. 1. 2 基準点3と基準点13の水溫差

基準点3と基準点13の各月の水溫差を图6, 10月と11月の水溫の鉛直狀況を图7に示す。5月から11月の表層から100m付近までは、基準点13の水溫が高い傾向を示していた。特に、10月と11月には表層から60m付近の水溫差は1℃未満であったが、60m付近から80m付近で2℃程度と水溫差が大きくなっていた。これはこの時期に生じる鉛直循環等による水溫が低下する深さの違いにより差が大きくなっていると考えられるが、水溫が低下する深さに違いが生じる要因についてはさらに解析が必要である。

なお、水溫の低下する深さが底層まで到達する冬季は、基準点3及び基準点13の水溫が概ね一致した。

3. 2 多項目水質計及び採水試料の調査結果

3. 2. 1 多項目水質計測定結果 (水溫)

多項目水質計による水溫の測定結果を图8及び图9に示す。なお、監視点トの150m以深部分は各月とも150m付近と同程度の数値であったことから省略した。

基準点3, 監視点トは3月から9月にかけて水溫は表層から上昇し, 月ごとにより深い層で水溫が上昇していた。

11月以降は、水溫が低下しており、水溫の低下は上昇時と同じく表層から起こるが、直下の層と水溫が一樣となり、その一樣な水溫の層が徐々に厚くなっていくような変化が起きていた。1月には表層から底層まで水溫が概ね一樣となっていた。

この結果は3. 1. 1の結果と一致していた。なお、基準点3の10mから50m付近及び監視点トの20mから50m付近で、上層より水溫が高くなっている状態が確認された(图10)。

西桜島水道北の3月から9月の測定結果では、他の2地点より表層の水溫上昇は小さい傾向であったが、7月の60m付近の水溫が他の2地点は18℃程度であるのに対し、西桜島水道北では19℃近くあるなど、他の2地点に比べ、中層部(40mから100m)で水溫が高い傾向を示し、同様の状態は9月にも確認された(图11)。また、11月の80m付近にはっきりとした水溫躍層が確認されるなど、他の2地点と異なる傾向を示した。なお、11月には西桜島水道北の20mから80m付近で上層より水溫が高くなっている状態が確認された(图10)。

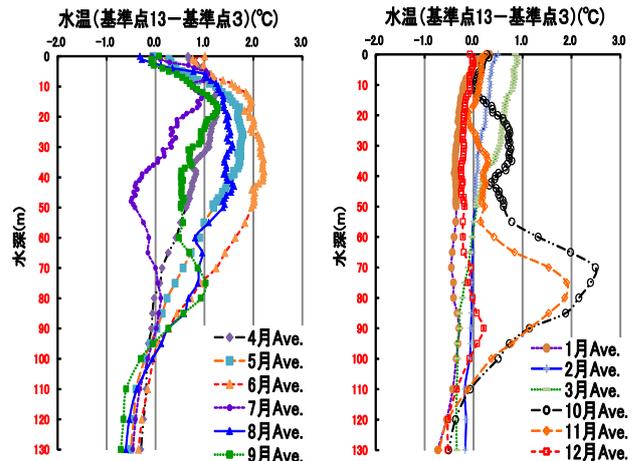


图6 基準点3, 及び基準点13の水溫差

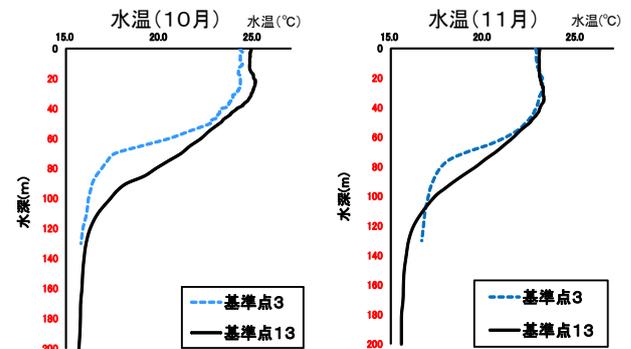


图7 10月, 及び11月の水溫鉛直狀況

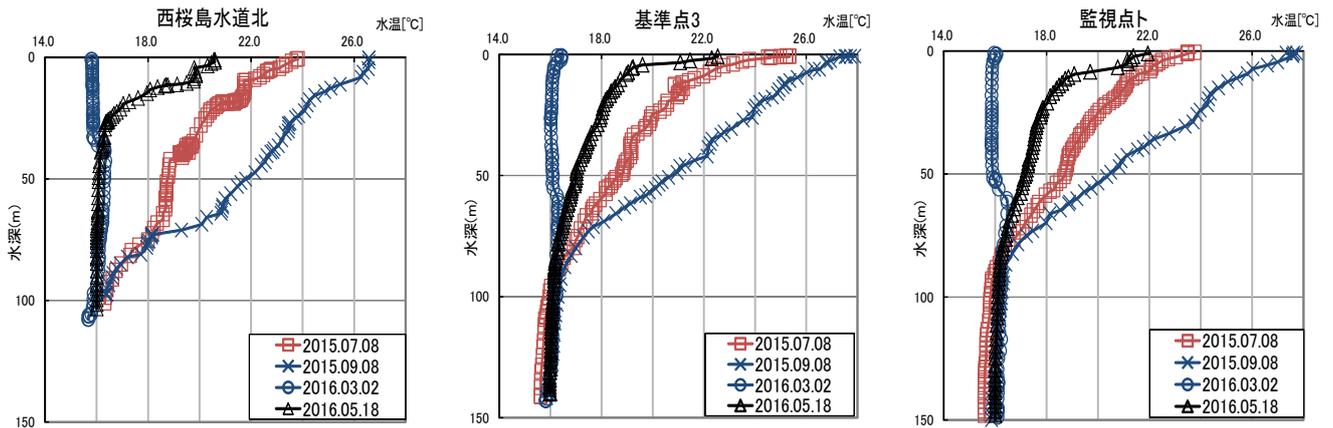


図8 多項目水質計による水温の測定結果（3月から9月）

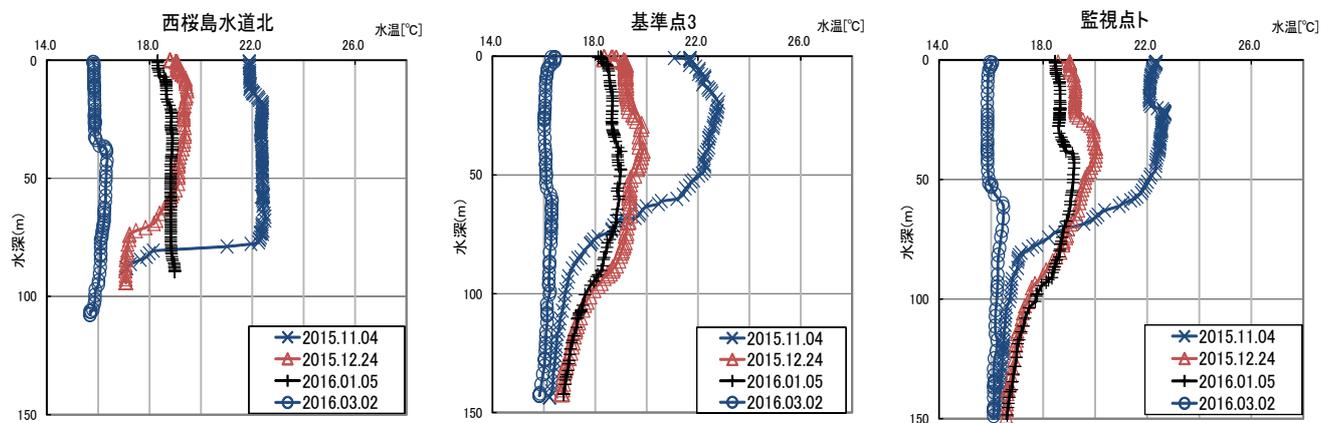


図9 多項目水質計による水温の測定結果（11月から3月）

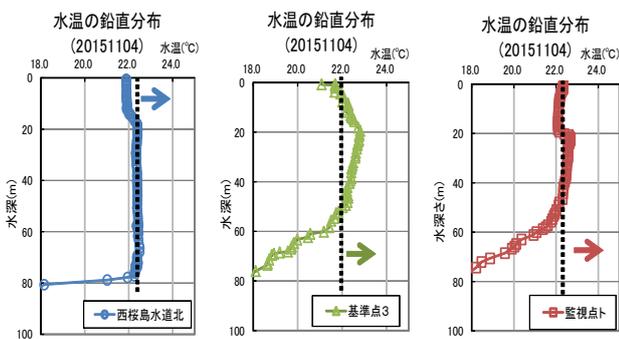


図10 水温の鉛直分布（11月）

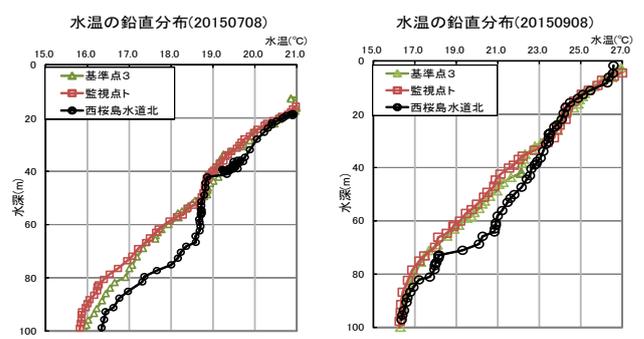


図11 水温の鉛直分布（7月，9月）

3. 2. 2 多項目水質計測定結果（塩分）

塩分の測定結果を図12及び図13に示す。なお、各地点、各月ともに、100m以深部分は100m付近と同様の数値であったことから省略した。

概ね3月から9月にかけて表層部分の塩分低下が起きており、月ごとにより深い層でも塩分低下がみられるようになっていた。

11月には西桜島水道北の60mから80m付近、基準点3の40mから60m付近、監視点トの20mから60m付近で下層より塩分が高い状態が確認された。

12月には、塩分が概ね等しい層が複数みられるようになり、3月には表層から底層まで塩分が概ね一樣となり、鉛直循環が底層まで到達していたと考えられる。

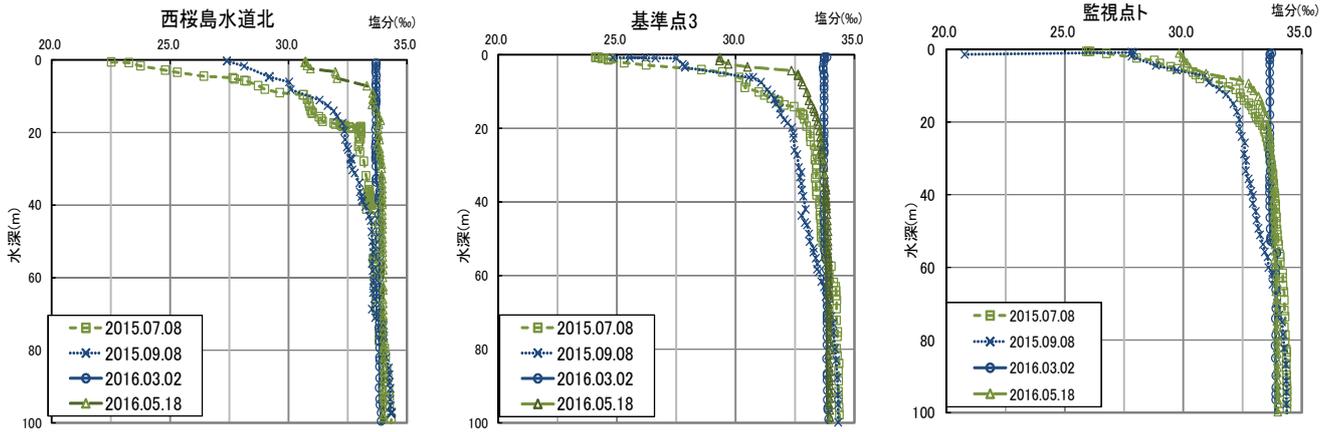


図12 多項目水質計による塩分の測定結果（3月から9月）

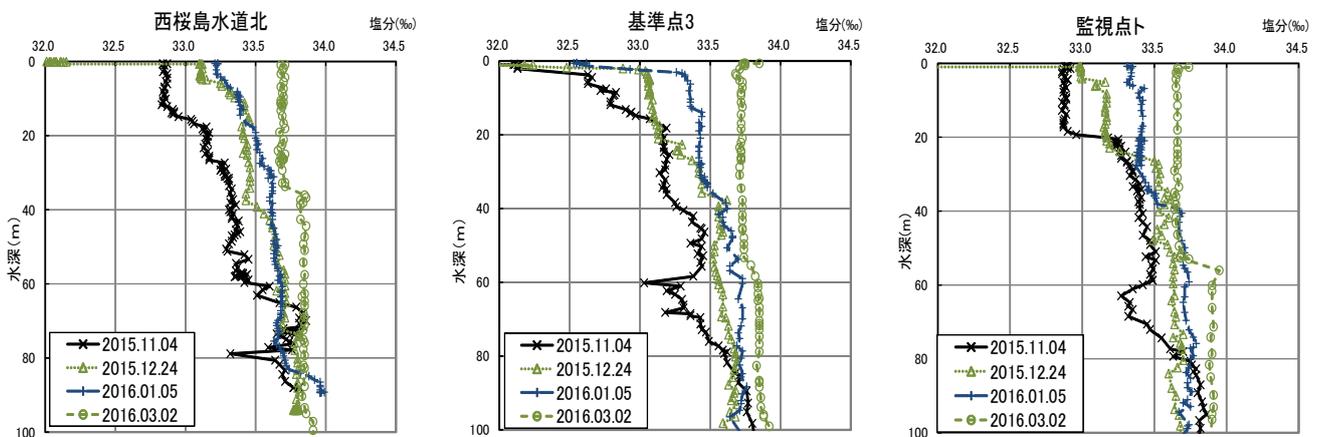


図13 多項目水質計による塩分の測定結果（11月から3月）

3. 2. 3 多項目水質計測定結果（密度）

水温と塩分の測定結果から算出した密度を図14及び図15に示す。なお、各地点、各月ともに、100m以深部分は100m付近と同様の数値であったことから省略した。

3月から9月にかけて、表層の密度が低下しており、月ごとに、より下の層でも密度が低下していた。11月以降は、低下していた部分の密度上昇が起こり、3月には表層から底層まで密度が概ね一様となっており、鉛直循環が底層まで達していたと考えられる。

各地点、各月ともに、表層から深くなるにつれ密度が上昇していく傾向が見られたが、11月に西桜島水道北の70mから80m付近、基準点3の50mから60m付近及び70m付近で下層より密度が高くなっている部分が見られた。また、11月に西桜島水道北の80m付近で明確な密度躍層がみられた。

3. 2. 4 11月における水温、塩分及び密度の結果

気温が低下すると表層の水温が低下することにより密

度が上昇し、その結果として鉛直循環が生じる。11月は鉛直循環の到達する深さが徐々に深くなる時期であると考えられるが、湾奥部の表層の塩分は下層より低いので、単純に鉛直循環のみが起きていれば、鉛直循環の到達した層はその下層より塩分が低い状態であると考えられる。しかし、各地点で下層より塩分の高い部分を確認されており、この現象は鉛直循環だけでは説明がつかないことから、鉛直循環以外の要因が鉛直方向の挙動に影響を及ぼしていると考えられた。

湾中央部の水温が湾奥部より高い傾向を示していること、西桜島水道北の80m付近に水温躍層及び密度躍層が生じていること、基準点3の40mから60m付近に下層より塩分の高い層があること、西桜島水道北の70mから80m付近、基準点3の50mから60m付近及び70m付近で下層より密度が高い部分があることなどを勘案すると、湾中央部の水塊が湾奥部に流入している可能性が示唆されるが、さらなるデータの蓄積及び解析が必要である。

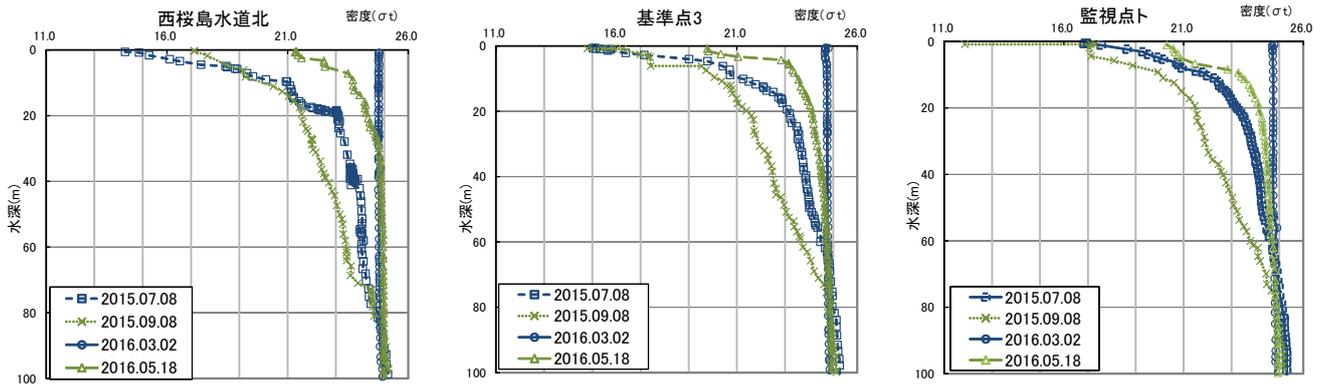


図14 水温と塩分から算出した密度（3月から9月）

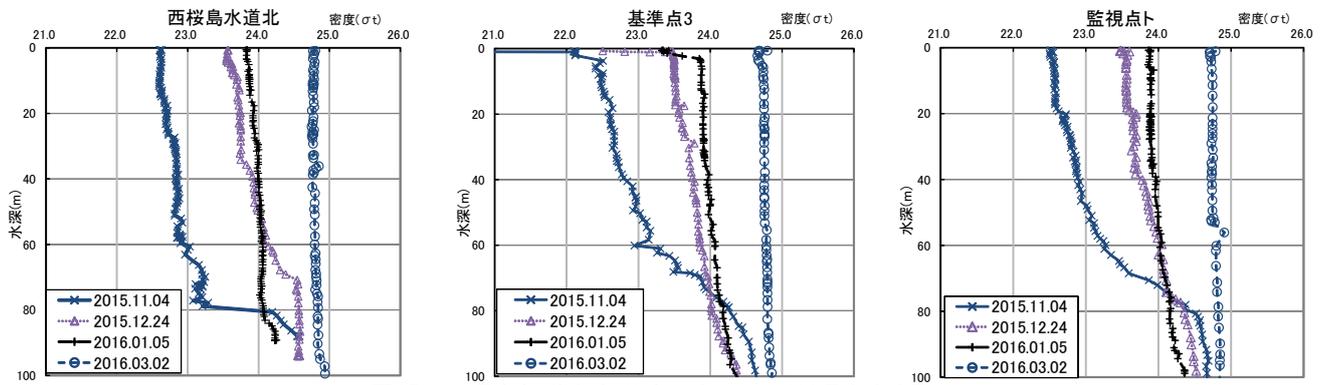


図15 水温と塩分から算出した密度（11月から3月）

3. 2. 5 多項目水質計測定結果 (DO)

多項目水質計によるDOの測定結果を図16に示す。5月から11月は、表層のすぐ下でDOが増加しその後、50m付近まで減少するが、50m付近から100m付近では蛇行するような不連続的变化が確認された。表層に近い部分のDOの増減は、植物プランクトンの光合成や呼吸による影響と考えられるが、50m付近から100m付近で確認される不連続的变化については、植物プランクトンの光合成や呼吸では説明がつかず、今後、海流等の関連項目を含めて解析する必要がある。

100m以深部分については、5月から1月にかけて、減少し続けていくが、3月には増加し、表層から底層まで概ね一様となる季節変動があった。3月にDOが増加するのは、冬季に鉛直循環が下層にまで及ぶことで表層付近の高DO水が循環しているためと考えられる。

3. 2. 6 採水試料の測定結果

各地点の各層で採水した試料のDO, T-N, DT-N, T-P, DT-P, 栄養塩類の9月の測定結果を図17に、3月の測定結果を図18に示す。なお、栄養塩類のうち、NO₂-Nはほ

んど検出されず、また、NH₄-Nは9月の監視点トの150m及び200m以外ではほとんど検出されなかった。

9月において、DOは表層付近では8mg/L前後で、10mから100mでは5mg/L前後となり、100m以深では深さに伴い減少していく傾向が確認された。これは、9月の多項目水質計のDO結果と概ね同様の傾向を示した。

窒素とりんは概ね同じような挙動であり、9月の栄養塩類は深さに伴うDOの減少とは反対に増加している傾向が確認された。光の少ない下層では、有機物の分解が進み、DOが消費されると考えられるが、夏季は成層が強固に発達しており、鉛直循環が起こりにくいため、溶存態有機物は沈降しないと考えられる。よって、プランクトンの死骸などの懸濁態有機物が沈降し、呼吸や分解によりDOが消費され、分解に伴い下層の栄養塩類の濃度が増加したものと考えられる。

3月には、表層から底層までDO, T-N, DT-N, T-P, DT-P, 栄養塩類が概ね一様となっていた。この現象は冬季に起きる全層にわたる鉛直循環により、表層から底層まで均質になっているためと考えられる。

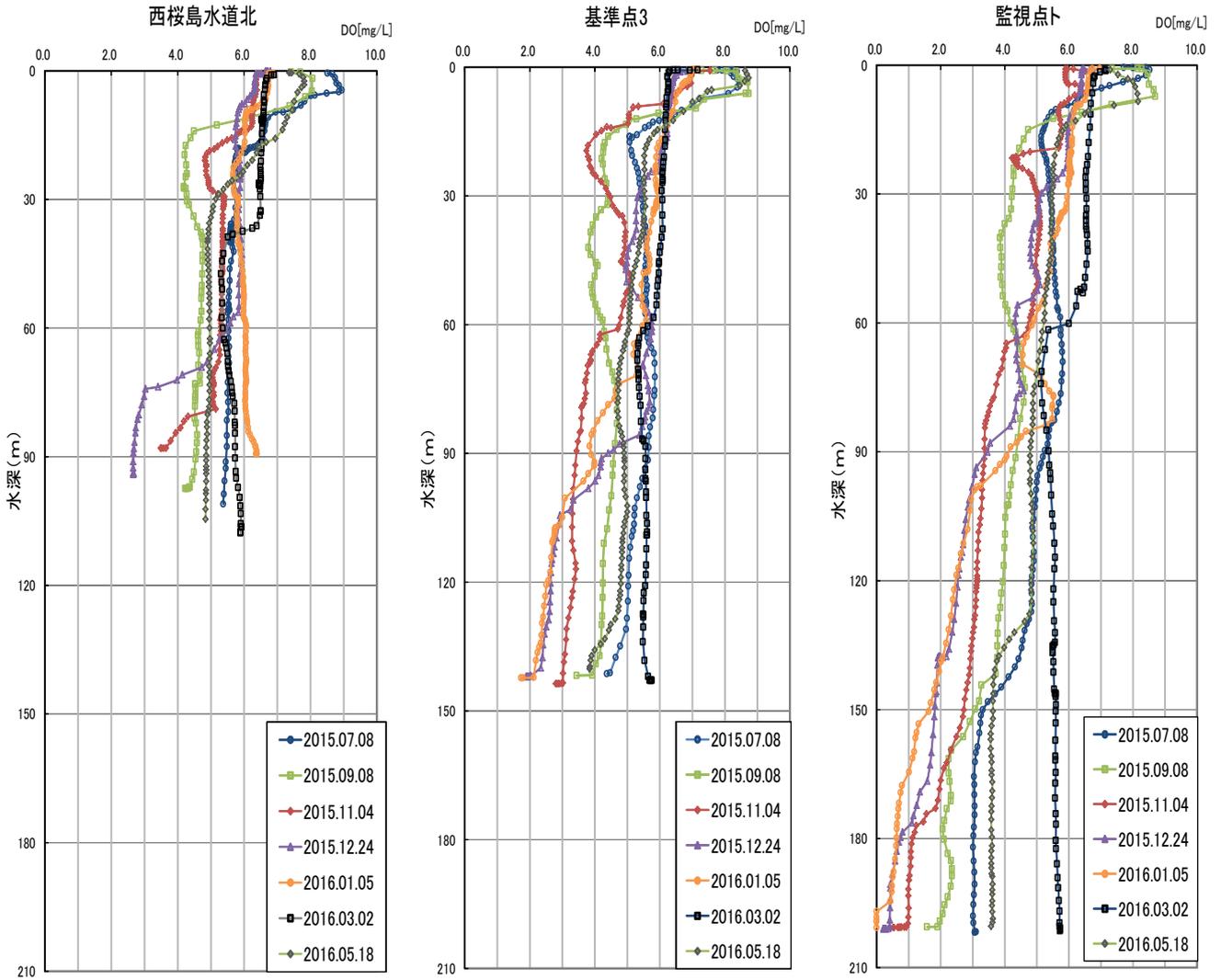


図16 DO測定結果

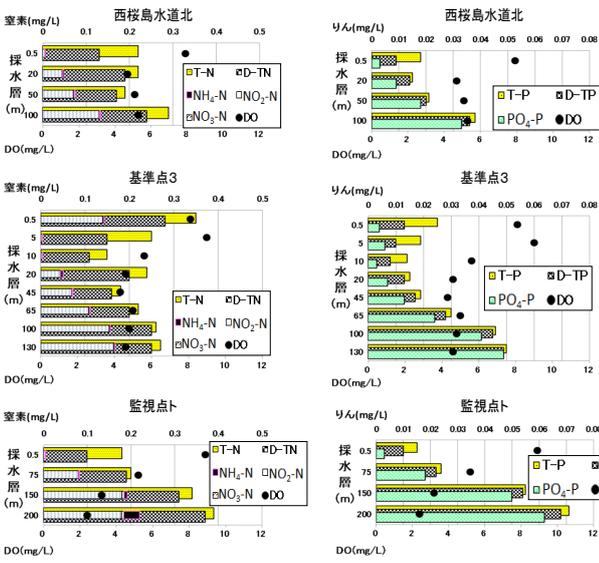


図17 DO, T-N, DT-N, T-P, DT-P, 栄養塩類の測定結果 (2015年9月)

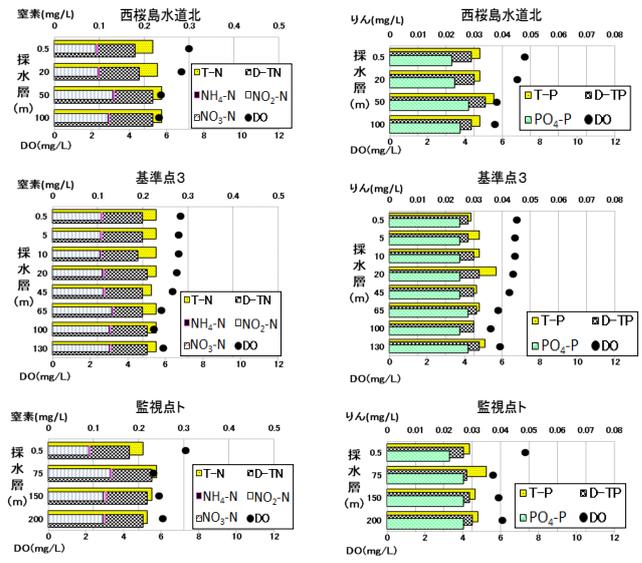


図18 DO, T-N, DT-N, T-P, DT-P, 栄養塩類の測定結果 (2016年3月)

4 まとめ

1994年4月から2016年3月までの22年間の鉛直方向の水温測定結果並びに、2015年7月から2016年5月までの多項目水質計及び採水試料の調査結果から、以下のことが明らかになった。

- 1) 22年間の鉛直方向の水温測定結果から、4月から9月にかけて表層の水温が上昇し、10月から3月にかけて表層の水温が低下する傾向にあった。また、水温が低下する深さは10月以降に徐々に深くなり、1月に表層から底層まで水温が概ね一様となった。
- 2) 10月及び11月の60mから80m付近では、基準点13が基準点3より2℃程度水温が高い傾向を示した。
- 3) 多項目水質計による調査結果では、西桜島水道北は、7月の中層部(40mから80m)で基準点3及び監視点トに比べ水温が高いことや、11月に明確な水温躍層が確認されるなど、基準点3及び監視点トと異なる挙動を示した。
- 4) 多項目水質計による水温、塩分及び密度の調査結果から、下層より上層の塩分や密度が高い地点が確認されるなど、鉛直循環だけでは説明がつかない現象が確認され、鉛直循環以外の要因が鉛直方向の挙動に影響を及ぼしていると考えられた。
- 5) DOは、表層のすぐ下で増加し、50m付近まで減少していくが、50m付近から100m付近では蛇行するような不連続的変化が確認された。
- 6) 採水試料の結果から、9月の栄養塩類濃度はDOの減少に伴い増加する傾向が確認された。また、3月は全層にわたる鉛直循環の影響により、表層から底層までDO、T-N、DT-N、T-P、DT-P、栄養塩類の濃度が概ね一様となった。

5 おわりに

鹿児島湾の鉛直方向のデータを解析したところ、基準点13が基準点3より中層部の水温が高い傾向にあること、西桜島水道北が基準点3及び監視点トと異なる挙動を示していること、塩分や密度の逆転層が確認されたこと、DOの不連続的変化が確認されたことなどが判明した。このことは、鉛直循環だけでは説明がつかないことから、今後、DOの消費と貧酸素水塊やプランクトンとの関連性、海流の影響の有無等についても明らかにし、鹿児島湾の水質悪化の要因についてさらなる解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 鹿児島県；鹿児島湾水質環境管理計画（平成27年3月）
- 2) 鹿児島県水産技術開発センター；赤潮情報
<http://kagoshima.suigi.jp/akashio/newHP/info.html>
※上記アドレスについては、原稿作成時のものであり、現在は変更されている場合があります。