

# 現地観測および流動水質モデルを用いた伊万里湾における 流動・水質特性の把握

## Study of the Characteristics of Flow Structure and Water Quality in IMARI Bay by means of Field Observation and Numerical Model

鈴木誠二<sup>1</sup>・多田彰秀<sup>2</sup>・平 智樹<sup>3</sup>・坂口誠人<sup>4</sup>・松本健太郎<sup>5</sup>・西田 渉<sup>6</sup>

Seiji SUZUKI, Akihide TADA, Tomoki TAIRA, Masato SAKAGUCHI  
Kentarō MATSUMOTO and Wataru NISHIDA

Recently, an increase in the load from the land and a food scatter of aquaculture causes eutrophication in IMARI Bay. Therefore, red tides have been generated. It is necessary to decrease the red tide. So, as a basic research, we clarify the characteristics of flow structure and water quality by means of field observations and a numerical model. As a consequence, it is clear that flow structure around bay mouth is very complex. Bay water flows out in the upper layer during ebb tide, and outer sea water flows into the lower layer during flood tide. It is realized that the tidal exchange is strong comparatively in the western part of the bay, while it is weak in the central and south-eastern part.

### 1. 研究の背景と目的

近年、多くの閉鎖性水域において水質悪化が進行し、生態系に甚大な影響を与えている(鈴木ら(2005))。長崎県と佐賀県の県境に位置する伊万里湾は、湾口部が3箇所だけの閉鎖性の強い湾であり、外海との海水交換が悪い。それに加え、陸域からの汚濁負荷量の増加や養殖による餌散布等により湾内の富栄養化が進行しており、湾沿岸部を中心に大小様々な赤潮の発生が問題となっている((株)水理計画(1997))。また、それに伴う漁獲量の減少も深刻な問題となっている。とくに、1999年8月に発生した大規模な赤潮(長崎新聞(1999))により、約7億6000万円にも及ぶ甚大な漁業被害を受けた。漁獲量の回復ばかりでなく、伊万里湾に生息する天然記念物であるカブトガニの保護・保全の観点からも、富栄養化防止策が早急に必要である。

以上のような背景を踏まえて、本研究では、伊万里湾における物質循環を把握するために、湾内の流動特性および水質動態を明らかにする。すなわち、伊万里湾の流動構造および水質動態に関する現地観測を行うとともに、3次元流動水質予測モデルを用いて、湾内全域の流動特性および水質動態を検討する。とくに、1999年の大規模赤潮発生後の再現計算を行うことにより、赤潮発生後の湾内の水質動態について考察を行う。

湾水表面積120km<sup>2</sup>を有する伊万里湾の概略図(北西部)と観測地点を図-1に示す。湾内には、福島をはじめ大小多数の島が存在し、非常に複雑な地形を形成するとともに、三箇所の湾口部(津崎鼻-青島、青島-鷹島、鷹島-星賀)で外海に接続し海水交換が行われている。また、平均水深は約23mと浅いが、津崎鼻と青島とを結ぶ湾口部では、急激に水深が深くなり、水深50mを越える部分もある。

### 2. 伊万里湾での現地観測

#### (1) 現地観測の概要

2008年8月28日から30日にかけて、ADCPによる曳航観測およびSTDを用いた水質観測を行った。さらに、2009年8月6日にはADCPによる湾口部の流動観測を、2009年8月12日(小潮期)に湾内の水質観測と採水調査を行った。なお、流動観測日は大潮期に対応している。

#### a) 2008年度の現地観測

2008年の現地観測では、ADCPを用いて曳航観測を行

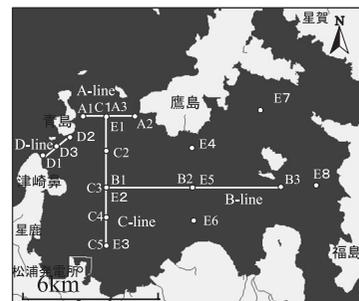


図-1 伊万里湾の概略図(北西部)と観測地点

1 正会員 博士(工) 長崎大学助教 工学部社会開発工学科  
2 正会員 博士(工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科  
3 修士(工) 関門港湾建設(株)  
4 学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科  
5 学生会員 九州大学大学院総合理工学部  
6 正会員 博士(工) 長崎大学准教授 工学部社会開発工学科

うとともに、多項目水質計を用いて定点観測を実施した。曳航観測は、8月28日と30日にA-lineにおいて計3回、8月29日にB-lineにおいて計4回（満潮時、下げ潮最強時、干潮時および上げ潮最強時）実施した。また、水質については、8月29日にB-line上の3点において計4回、曳航観測と並行して計測した。8月30日には、C-line上の6点で計2回（満潮時、下げ潮最強時）の水質観測を行った。なお、水質観測項目は、水温、塩分、クロロフィルa（以後、Chl-aと略記する）、DO、pHおよび濁度である。

#### b) 2009年度の現地観測

2009年8月6日に実施した現地観測では、湾口部の海水交換を把握するために、A-lineおよびD-lineにおいて曳航観測を計6回実施した。一方、8月12日の水質観測では、E1～E8の計9点でSTDによる水質観測のほか、E2、E5、E8の3点の表層、中層、下層において採水調査を実施した。なお、採水試料の分析項目は、全窒素、アンモニウム態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、全リン、リン酸態リン、Chl-aである。

#### (2) 現地観測の結果と考察

図-2は、2008年8月29日のB-line上における流速ベクトル（水平方向成分）の鉛直分布を示す。上げ潮最強時および下げ潮最強時ともに、水深7mと12mとの間を境に表層と中・底層との間で流況が大きく異なっていることが分かる。下げ潮最強時には、表層において青島と鷹

島とを結ぶ湾口部へ向かう速い流れ（北西方向）が発生している。一方、上げ潮最強時には、B1-B2区間の中・底層で南東方向に向かう強い流れが現れている。すなわち、湾口に近い湾西部水域で発生する流れは、表層と中・底層で流向が異なり、表層から流出し、中・底層から流入する特性があると判断される。また、上げ潮最強時には、B2-B3区間の水深7m付近で流向が異なる流れの存在が確認される。これは、鷹島南部海域において、大規模な渦が発生することで外海との海水交換が弱まる可能性があるという報告（鈴木ら（2008））と一致している。

2009年にD-lineで計測された下げ潮最強時および上げ潮最強時の断面流量分布を図-3に示す。湾内から湾外への流出流量を正、湾外から湾内への流入流量を負の値としている。下げ潮最強時には、D3点付近の中央部の全層から強い流出が見られる。一方、上げ潮最強時には、D1からD3区間の水深10mから45mの間層において非常に強い流入が確認できる。これは、2008年の現地観測の際にB-lineの西側で計測された中・底層からの南東方向へ向かう強い流れの原因と考えられる。表-1に観測時の断面流量を示す。常にD-line上の断面流量がA-lineに比べ大きい。すなわち、伊万里湾の海水交換は、津崎鼻と青島とを結ぶ湾口部において卓越しているものと判断される。さらに、断面積はD-line上の方が小さいために、流速が速く、その影響が湾中央部まで及ぶと考えられる。

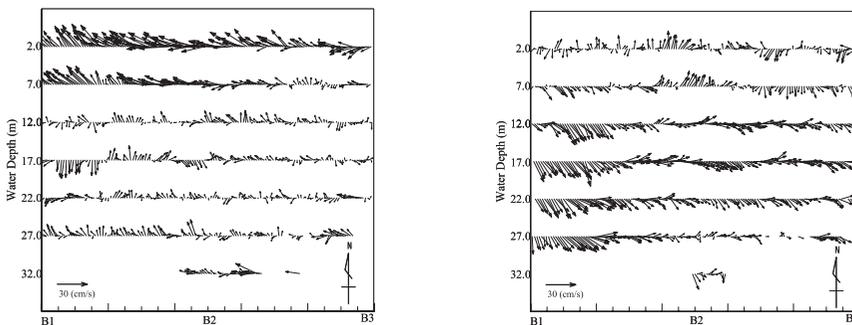


図-2 B-lineにおける流速ベクトル（水平方向成分）の鉛直分布（左図：下げ潮最強時、右図：上げ潮最強時）

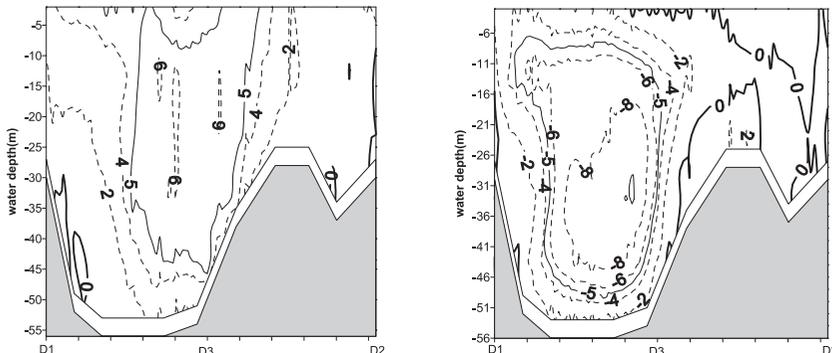


図-3 D-lineにおける断面流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 分布（左図：下げ潮最強時、右図：上げ潮最強時）

表-1 A-lineおよびB-lineにおける断面流量

	A-line (m³/s)	D-line (m³/s)
満潮時	-635.4	-2602.0
下げ潮最強時	5352.2	8304.8
干潮時	1133.6	4634.8
上げ潮最強時	欠測	-8468.1

図-4は、2008年8月29日のB2点で計測されたChl-aの鉛直分布を示す。流況と同様に、水深7mから10mの間を境に濃度が大きく異なり、表層では2~4μg/lの値を示し、中・底層では1μg/l以下となっている。また、中・底層では潮汐の条件による濃度変化は認められないものの、表層では、干潮時および上げ潮最強時に高く、満潮時および下げ潮最強時に低い値となっている。

図-5は、2008年8月30日のC-line上で下げ潮時に計測された水温の鉛直分布を示す。鉛直分布は、C0点からC5点までの6地点の観測値を用いて空間補間を行って作成したものである。水深約10m以浅の表層では、南北方向に温度勾配が卓越し、中・底層では鉛直方向に温度勾配が認められる。とくに、C5点では北部の水温よりも3℃以上も高く、30℃を超えている。C5点に近い松浦発電所では、日中に約100万t/dayの冷却水を排水しているため、伊万里湾西部水域の水温構造に多大の影響を及ぼしているものと考えられる。

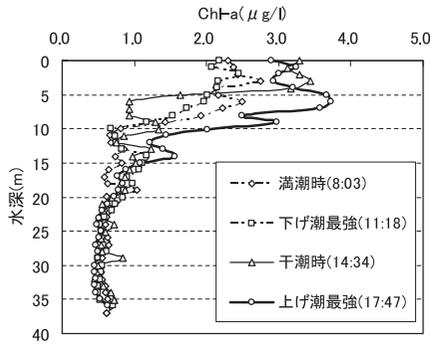


図-4 Chl-aの鉛直分布 (B2点)

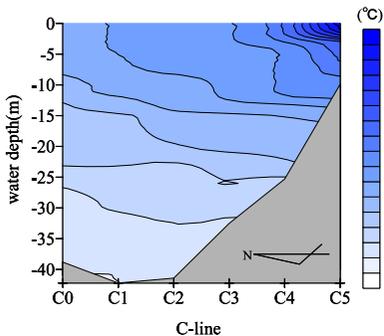


図-5 C-lineにおける観測水温の鉛直分布 (下げ潮時)

図-6は、2008年8月30日の下げ潮時のC-line上で観測されたChl-aの鉛直分布を示す。水温の鉛直分布と同様に水深10m以浅で高い値を示している。とくに、C-line中央部のC2, C3点の水深約5mで高い値を示すことがわかる。

図-7は、2009年8月12日に実施したE2, E3およびE8点における、全窒素と全リンの採水分析結果を示す。図より、全窒素、全リンともに低い値を示していることが分かる。これは、観測日以前の数日間に大きな降雨がなく、河川からの流入負荷が少なかったためと考えられる。なお、全窒素、全リンともに湾西部水域のE2点以外の底層では高い値を示している。上述したように、湾西部水域は湾口部の影響を受け流速が速く、有機態窒素やリンなどの堆積量が少ないものと推測される。そのため、湾中央部や湾東部に比べて栄養塩の溶出量が少ないものと考えられる。また、湾東部のE8点において全層で濃度が高い傾向がみられる。

図-8は、2009年8月12日のE2, E5およびE8において

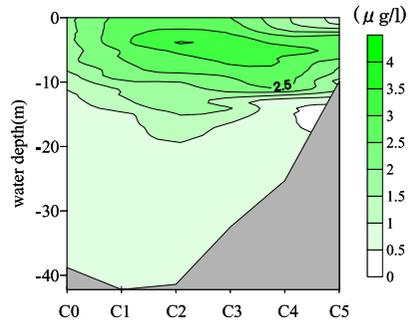


図-6 C-lineにおけるChl-aの鉛直分布 (下げ潮時)

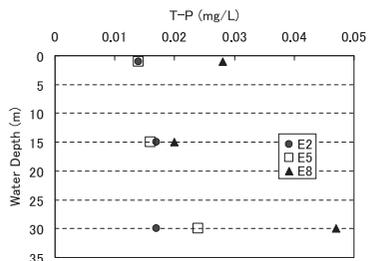
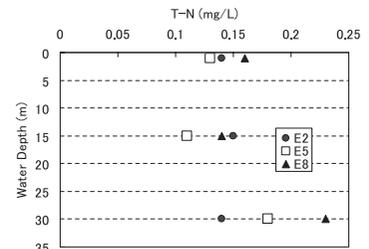


図-7 採水分析結果 (上図:全窒素, 下図:全リン)

計測されたChl-aの鉛直分布を示す。早朝に観測を行ったため、表層のChl-a濃度は比較的低い値であるが、E8では、E2と比べほぼ全層において高い値を示している。

このように、栄養塩の濃度が高い湾東部において、湾西部に比べ植物プランクトンが増殖しやすい環境にあるものと考えられる。さらに、湾中央部では、下げ潮時に西向きの流れが卓越しているため、植物プランクトンが湾東部において増殖し、潮流によって湾西部に輸送されている可能性が示唆される。ただし、実際にそのような現象が生じているかを確認するためには、今後複数地点において、流動および水質の定点連続観測を実施する必要がある。

### 3.3 次元流動水質予測モデルを用いた数値シミュレーション

#### (1) 流動・水質に関する数値シミュレーションの概要

現地観測では、伊万里湾全域を同時に計測とすることは難しい。そこで、本節からは中辻(1994)によって構築された3次元流動水質予測モデルを用いて伊万里湾全域の流動特性および水質動態に関する数値シミュレーションを行った。基礎式は、質量、運動量、水温・塩分偏差の各保存則、密度の状態方程式で構成されている。定式化に際しては、水の非圧縮性、静水圧近似およびBoussinesq近似を導入している。密度の状態方程式については、Miller and Poisson (1981)の提案式を用いる。水質モデルについては、植物プランクトン、無機態リン、有機態リン、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、有機態窒素、CODおよび溶存酸素を採用した。詳細は、鈴木ら(2005)を参照されたい。

伊万里湾全域を東西方向に96分割、南北方向に97分割し、水平方向の格子間隔は200mとした。また、鉛直方向の格子間隔 $\Delta z$ については、表層から $\Delta z = 2.0\text{m}$ を1層とし、それ以下を $\Delta z = 0.5\text{m}$ で2層、 $\Delta z = 1.0\text{m}$ で1層、

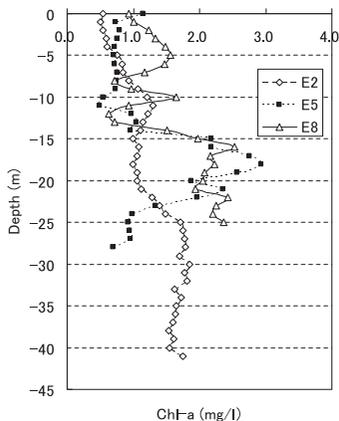


図-8 Chl-aの鉛直分布 (E2, E5, E8)

$\Delta z = 2.0\text{m}$ で9層、 $\Delta z = 5.0\text{m}$ で7層とり、計20層とした。計算期間は15日間とし、差分時間は3.0秒とした。水温と塩分の初期条件は、観測値に基づき空間補間して与えた。気象条件は、気象庁松浦観測所および福岡観測所で観測された気温・日射量・風向風速・雲量を与えた。また、開境界条件として、三箇所の湾口部に $M_2$ 分潮の潮位変化を与えている。河川流入としては、志佐川(約15万 $\text{m}^3/\text{day}$ )、有田川(約25万 $\text{m}^3/\text{day}$ )および伊万里川(約9万 $\text{m}^3/\text{day}$ )を考慮するとともに、発電所からの排水(約100万 $\text{m}^3/\text{day}$ )についても境界条件として与えた。なお、モデルの精度については鈴木ら(2008)によって既に検証されており、支障はない。さらに、赤潮発生後の湾内の水質動態を捉えるために、1999年の赤潮が大量発生した後の再現計算を行った。

#### (2) 計算結果と考察

図-9は、下げ潮最強時における表層の流動の計算結果を示す。湾北西部では、北向きおよび西向きの流れが卓越し、湾中央部では西向きの流れが顕著であることがわかる。また、松浦発電所および志佐川からの流入水は一度湾中央部に向かい、湾東部からの流れと合流して湾口部に流れている。さらに、福島南部の浅水域の水塊は、主に福島南西部を通って流出することも確認できる。図-10に表層の残差流の結果を示す。湾西部水域では反時計回りの循環流が形成されている。一方、湾東部では福島西部沿岸を北上する流れが卓越するとともに、福島東部の流れが弱く滞留していることがわかる。福島西部(E8)の栄養塩濃度が湾西部(E2)に比べ高くなっている観測結果は、福島西部に沿って北上する残差流によって福島南部海域の高い栄養塩((株)水理計画(1997))が輸送されたものと考えられる。

1999年の大規模な赤潮発生後の水質変化を明らかにするためにに行った再現計算のChl-aに関する初期分布を図-11に示す。当日の水質に関する観測データが少ないために、窒素、リン、Chl-aおよびDOは2009年の観測値を初期条件として与えた。さらに、鷹島南部水域(図-11中

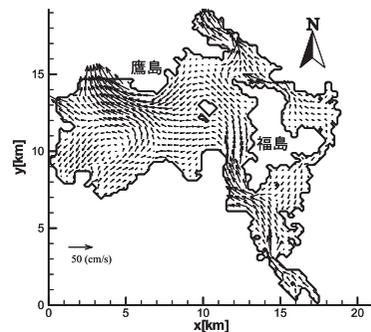


図-9 下げ潮最強時の流速ベクトル

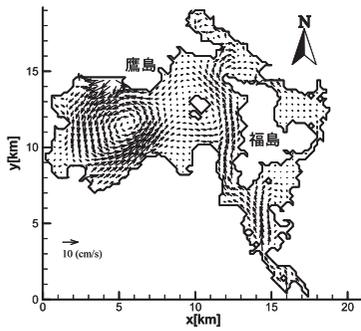


図-10 残差流（表層）

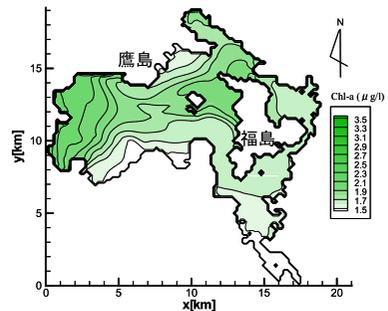


図-12 赤潮発生5日後のChl-a分布

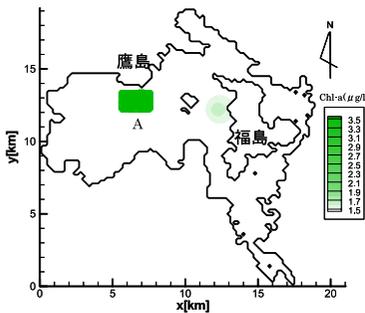


図-11 Chl-aの初期分布

のA領域)に赤潮として高濃度のChl-a (50 $\mu$ g/l)を設定した。赤潮の発生水域およびその濃度については、赤潮発生時の詳細な観測データがないために、長崎新聞(1999)および地元漁業者の証言をもとに、仮想的に設定した。図-12は、5日後のChl-aの濃度分布を示す。植物プランクトンは湾口部からの流出と枯死により減少するものの、反時計回りの循環流(図-10参照)によって、養殖場が過密に分布する湾西部沿岸域を南下し、星鹿港から松浦発電所西側にかけて長期間滞留する結果となった。また、湾中央部において活発な植物プランクトンの増殖が行われ、福島北部の沿岸域に広がる結果となった。

以上のようなことから、3次元流動水質予測数値モデルを用いて伊万里湾内の流動特性および水質動態を把握することができた。今後、湾口部の流動・水質を詳細に再現するためには、境界をさらに沖側へ広げる必要がある。

#### 4. 結論

現地観測を行うとともに、3次元流動水質予測モデルを用いて、湾内の流動特性および水質動態の解明を試みた。

現地観測の結果から、湾口部付近の流況は複雑であり、海水は表層から流出し、中・底層から流入する特性を有することが分かった。湾奥部で発生した植物プランクトンが下げ潮によって湾西部へ輸送され、上げ潮時には再び湾東部へ運ばれることも明らかとなった。また、湾南西部では、水温の水平分布が顕著であり、周辺海域の流動構造および水質動態に少なからず影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、流動・水質シミュレーションを実施することによって、湾西部水域では反時計回りの循環流が形成されるとともに、湾東部の福島西部水域は北向きの流れが卓越することも分かった。1999年のように湾中央部で赤潮が発生した場合、植物プランクトンが湾西部沿岸水域に長期間滞留することが再現計算により明らかになった。

**謝辞**：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A「沿岸海域環境再生に関する総合的研究」(研究代表者:小松利光, 課題番号20246083)の援助を受けた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表する。

#### 参考文献

鈴木誠二, 西田修三, 金城周平, 小野雅史, 中辻啓二 (2005): 小川原湖におけるヤマトシジミの資源量変動と物質循環, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1041-1045.  
 鈴木誠二, 西田 渉, 平 智樹, 野口正人 (2008): 伊万里湾の流動構造に及ぼす風の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 396-400.  
 長崎新聞 (1999): 8月11日, 朝刊, 23面.  
 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A9. 1-28.  
 (株)水理計画 (1997): 伊万里湾における全窒素・全磷の類型指定, 調査報告書, 第2章, pp. 10-22.  
 Millero, F. J. and Pisson, A(1981): International One-Atmosphere Equation of State of Seawater, Deep Sea Research, Part A, Vol.28, No. 6, pp. 625-629.