

伊万里湾における流動特性および水質動態に関する研究

鈴木誠二*・多田彰秀*・西田渉**

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF FLOW STRUCTURE AND WATER QUALITY IN IMARI BAY

by

Seiji SUZUKI*, Akihide TADA* and Wataru NISHIDA**

Recently, red tides have been generated in Imari Bay. Especially, a large-scale red tide damages the aquaculture and the ecology extensively. So, as a basic research, we clarify the characteristics of flow structure and water quality by means of an observation and numerical model in Imari Bay. As a consequence, it is clear that flow structure around bay mouth is very complex. Bay water flows out in the upper layer at the ebb tide, and outer sea water flows in in the lower layer at the flood tide.

Key words : enclosed bay, eutrophication, water quality, numerical model, residual flow

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¹⁾。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、大小様々な赤潮の発生が問題となっている。また、それに起因した漁獲量の減少も深刻な問題となっている。漁獲量の回復や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。そのためには、まず基礎的研究として、湾内における物質循環を把握することが重要となる。

そこで本研究では、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ことを目的とする。具体的には、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明らかにする。

図-1に伊万里湾の概略図(北西部)を示す。湾の水面積は120km²であるのに対し、三箇所の湾口部(それぞれの開口幅約1km, 1.5km, 4km)で外海に接続して

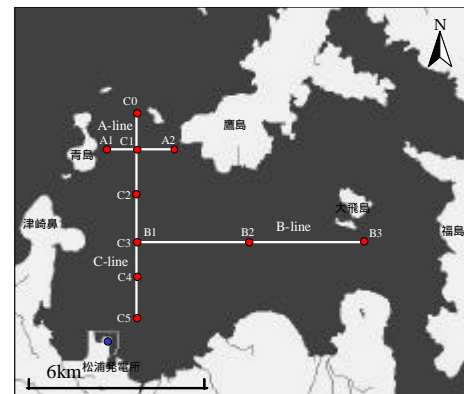


図-1 伊万里湾の概略図(北西部)と観測地点

いる。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している。平均水深は約23mと浅いが、津崎鼻と青島間の湾口部では、急激に水深が深くなり、水深50mを越える。

伊万里湾では、ブリ、鯛、クルマエビといった海面養殖が盛んに行われており、地域を支える産業の一つである。しかし、1999年8月に発生した大規模な赤潮²⁾により、約7億6000万円にも及ぶ甚大な漁業被害を受けた。また、先述のように、伊万里川河口域の干潟にはカブトガニをはじめとした多種多様な生物が生息している。

平成21年12月18日受理

* 社会開発工学科(Department of Civil Engineering)

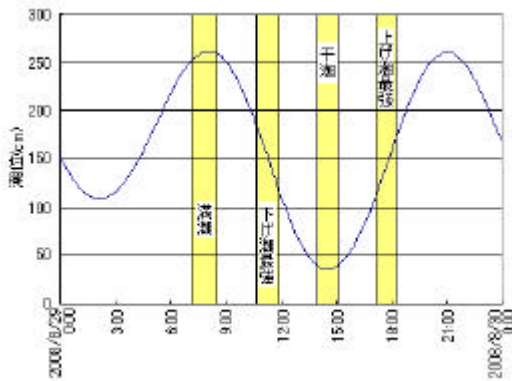


図-2 8月29日の潮位および観測時間

2. 伊万里湾の流況・水質観測

2.1 現地観測の概要

流動および水質観測は2008(平成20年)年8月28日から30日までの3日間に実施した。なお、この期間の潮汐は大潮期に相当する。流動観測については ADCP を用いて曳航観測を行うとともに、多項目水質計を用いて定点観測を実施した。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。曳航観測は、28日と30日に A-line において計3回、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、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。30日には、C-line 上の6点で計2回(満潮時、下げ潮最強時)の観測を行った。曳航観測を行った8月29日の潮汐および観測時間を図-2に示す。観測期間中の風向・風速(気象庁松浦観測所)を図-3に示す。観測期間中は北北東または北東からの風が常時吹いており、30日には風速5m/sを超える強風が連吹した。

2.2 現地観測の結果と考察

図-4に29日の B-line 上における水平方向の流速ベクトルの鉛直分布を示す。下げ潮最強時および上げ潮最強時ともに、水深7mと12mの間を境に表層と中・底層とで流況が大きく異なっていることがわかる。下げ潮最強時には、表層部において青島と鷹島間の湾口部へ向かう速い流れが発生している。一方、上げ潮最強時には、B1B2区間の中・底層部で南東方向に向かう強い流れが現れている。つまり、湾口部付近の湾内部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考えられる。また、全層で下げ潮最強時に西向き、上げ潮最強時には東向きの流れの傾向が認められる。

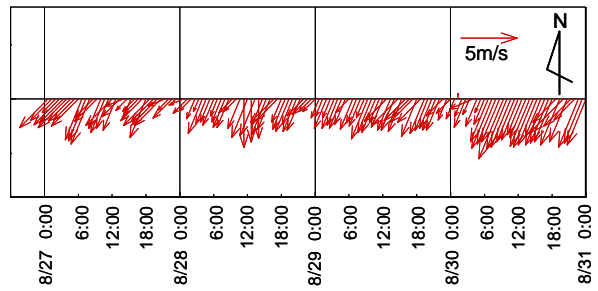


図-3 観測期間における風向・風速

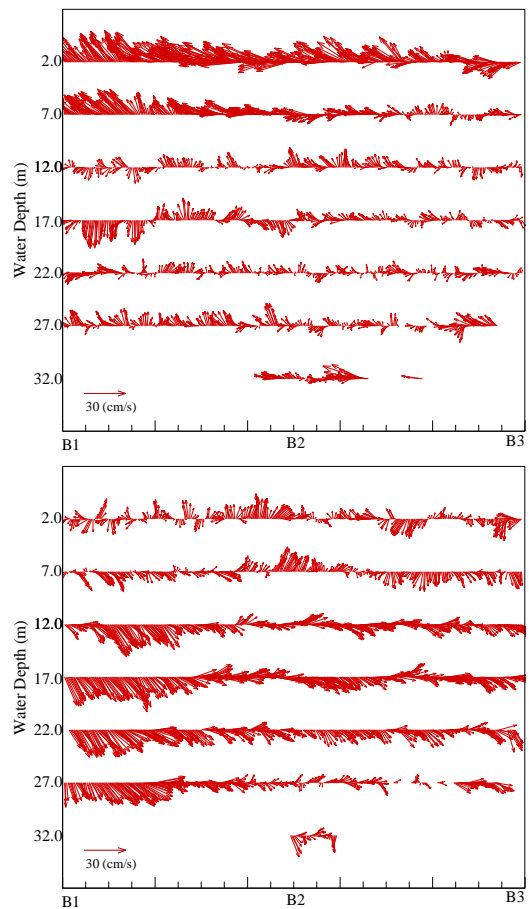


図-4 B-line における流速ベクトル(水平方向成分)の鉛直分布

(上図：下げ潮最強時，下図：上げ潮最強時)

これは、青島と津崎鼻間の湾口部からの流入の影響を強く受けるためであると推察される。また、上げ潮最強時には、B2B3区間の水深7m付近において流向が異なる流れの存在が確認された。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³⁾という報告と一致している。

図-5に29日のB2におけるChl-aの鉛直分布を示す。

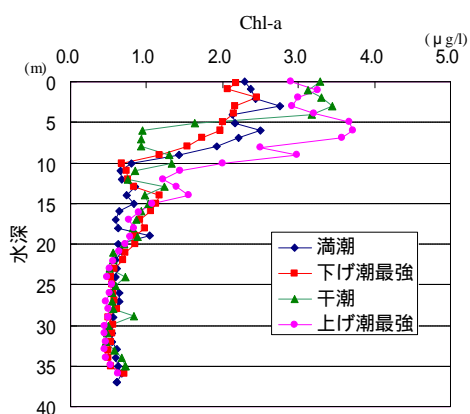


図-5 Chl-a の鉛直分布 (B2 地点)

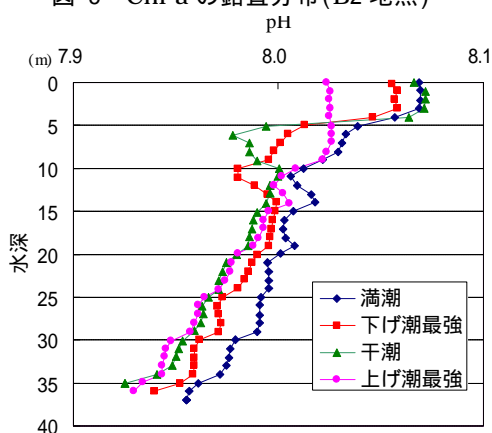


図-6 pH の鉛直分布 (B2 地点)

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っており、表層部では 2~4 μ g/l の値を示し、中・底層部では 1 μ g/l 以下となる。また、中・底層部では潮汐の状態による濃度変化はあまり現れないが、表層部では、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る。図-6 に 29 日の B2 における pH の鉛直分布を示す。この分布に関しては、表層部で潮汐の状態による値の変化が現れるものの、鉛直分布の傾向は Chl-a のそれと類似しており、表層で高く、中・底層で低い。東部の湾奥部で光合成により発生した植物プランクトンが、潮流(図-4 参照)によって下げ潮時に湾口部へ輸送され、上げ潮時には再び湾奥部へ運ばれていると考えられる。なお、満潮時には Chl-a の値が低いものの、pH の値が高い。これは、B1 および翌日に水質観測を行った C3 の結果にも同様の傾向が現れており、湾西部の水塊の流入・混合が複雑に影響したものと推察される。

湾口付近における植物プランクトンの輸送の詳細および、Chl-a と pH が逆の変化を示す原因を明らかにするために 2009 年夏期に再度観測を行った結果、同様の

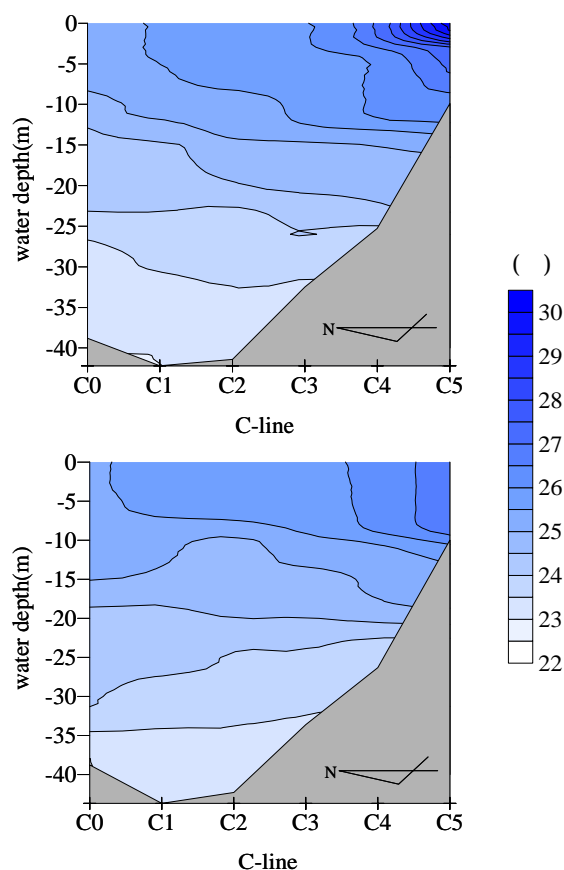
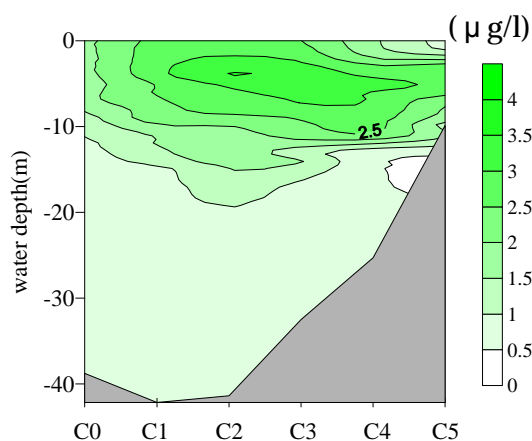
図-7 C-line における観測水温の鉛直分布
(上図：下げ潮最強時，下図：満潮時)

図-8 C-line における Chl-a の鉛直分布

分布は示さなかった。湾西部沿岸域では、ブリ・ハマチ等の養殖場が多数点在しており、観測時に一時的に大量の餌散布等の影響を受け pH が低下した可能性が高い。

図-7 に 30 日の C-line における水温の鉛直分布を示す。なお、同図は C0 から C5 までの 6 地点の観測値を用いて空間補完を行ったものである。いずれの結果にも水温の鉛直分布がみられるが、水深 10m 以浅の表層

部においては南北方向に顕著な温度変化が存在している．C4 と C5 の表層水温は満潮時よりも下げ潮最強時の方が高い．とくに，C5 では北部の水温よりも3 以上も高く，30 を超えている．こうした水平分布は，周辺部に市街地や発電 所等が存在することから，流域の産業活動に影響を受けた流出水が志佐川等から流入したこと，また，沿岸の浅水域に停滞した水塊が日射により温められ，それが潮汐によって湾中央方向に鉛直混合・拡散しながら流送されてきたことが原因と推察される．図-8 に下げ潮最強時の C-line における Chl-a の鉛直分布を示す．鉛直方向には水温分布と同様に水深 10m 以浅では高い傾向を示す．一方，水平方向では水温分布と異なり C-line 中央部の C2，C3 地点の水深約 5m で高い値を示すことがわかる．

3. 流動・水質シミュレーション

3.1 流動・水質シミュレーションの概要

現地観測で，伊万里湾全域を同時に対象とすることは難しい．そこで本節からは 3 次元流動水質予測モデル (ODEM)⁴⁾ を用いて伊万里湾全域の流動特性および水質動態を明らかにすることを目的とする．なお基礎式は，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．定式化にあたって水の非圧縮性，静水圧近似および Boussinesq 近似を仮定している．基礎式を以下に示す．密度の状態方程式については，Miller and Poisson⁵⁾の提案式を用いる．

図-9 に計算対象領域を示す．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 250m とした．また，鉛直方向の分割間隔については，表層から 2.0m を 1 層とし，それ以下を 0.5m を 2 層，1.0m を 1 層，2.0m を 9 層，5.0 m を 7 層とり，計 20 層とした．計算期間は 2008 年 8 月 20 日から 30 日までの 11 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，観測値をもとに空間補完して算出したものを与えた．

気象条件としては，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 M2 分潮の潮位変化を与えた．河川流入として志佐川(約 15 万 m³/day)，有田川(約 25 万 m³/day)および伊万里川(約 9 万 m³/day)を考慮し，発電所からの排水(約 100 万 m³/day)についても境界条件として考慮した．

3.2 計算結果と考察

図-10 に，B1 地点の水深 9m，17mにおける流向・流速の観測値と計算結果を示す．水深 9m においては，

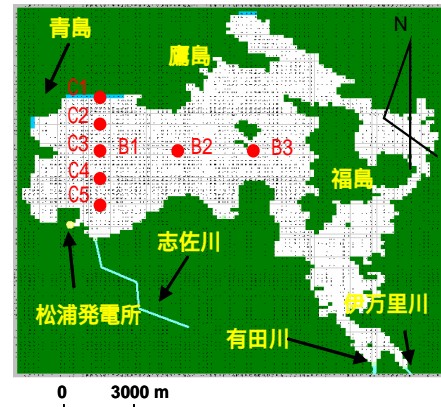


図-9 計算対象領域

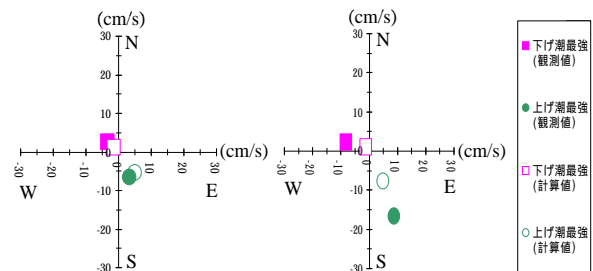


図-10 B1 における流向・流速の観測値と計算値の比較 (左図：水深 9m，右図：水深 17m)

上げ潮最強時と下げ潮最強時ともほぼ観測値と計算値は一致している．一方，水深 17m においては，下げ潮最強時に流速に若干の違いがあるものの，流向は一致していることが確認できる．上げ潮最強時には，流速に違いがあるものの，流向が一致しており，定性的には観測時の流況を再現できていると判断できる．なおモデルの精度については鈴木ら(2008)³⁾によって検証されている．

図-11 に下げ潮最強時における表層の流動および水温分布の計算結果を示す．下げ潮最強時には湾西部で北向きの流れが卓越し，湾中部では西向き流れが卓越していることがわかる．言い換えれば，鷹島と青島間の湾口部から湾外へ流出する傾向にある．その要因として，湾南西部からの北向きの流れと湾中央部の西向き流れが合流することによるものと考えられる．また，福島南部の浅水域の水塊は，主に福島南西部を通じて流出することがわかる．湾西部では，河川流入量が最も大きい志佐川と排水の影響を受け，水温が高い値を示している．なお，流入水については排出温の最高値を設定しているために，過大に評価されており，観測値よりも高い値となっている．図-12 に 29 日の表層残差流の結果を示す．鷹島南部から福島西部にかけ

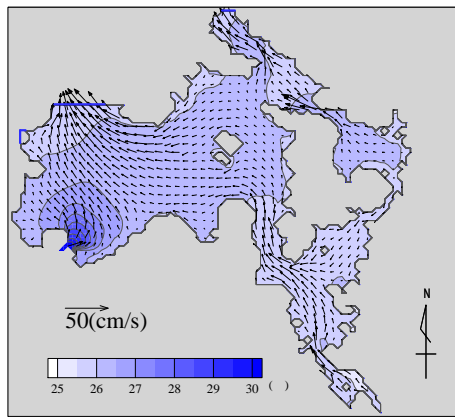


図-11 下げ潮最強時の流速ベクトルと水温分布(表層)

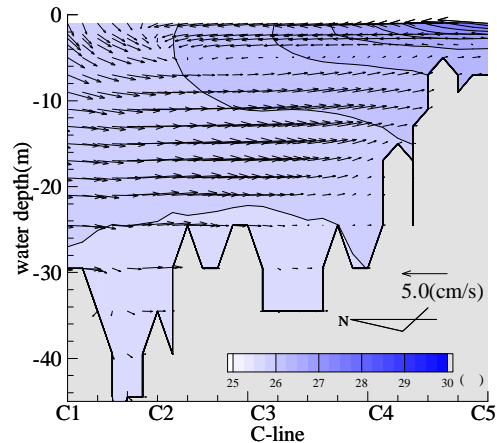


図-13 水温の24時間平均および残差流の鉛直分布(C-line)

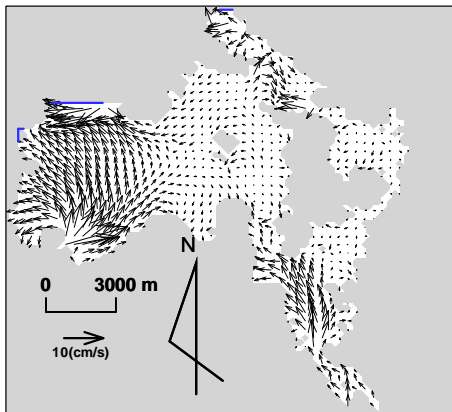


図-12 残差流(表層)

た湾中央部では残差流が弱く停滞していることがわかる。一方、湾西部では北向きの流れが卓越している。また、湾南東部では、伊万里川および有田川からの河川流入により北向きの残差流が卓越しているものの、福島南部では残差流が弱く停滞性が強いことがわかる。図-13にC-lineにおける水温の24時間平均および残差流の鉛直分布を示す。表層ではC3からC5まで北向きの湾外方向の残差流が卓越し、湾南西部の高水温の影響が広範囲に及んでいることがわかる。また、中・底層では南向きの湾奥部方向の流れが卓越し、水深約7mを境に流向が反転してエスチュアリー循環が確認できる。

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、湾内全域の流動特性および水質動態を明らかにすることを試みた。

現地観測の結果から、湾口部付近の流況は表層から流出し、中・底層から流入する特性を有することがわかった。湾奥部の表層で発生した植物プランクトンが潮流により、下げ潮時に湾口部へ運ばれ、上げ潮時には再び湾奥部へ運ばれることがわかった。また、沿岸部では、水温の水平分布が顕著であり、そのことが周辺の水塊の流動および水質の動態に少なからず影響を与えていることが示唆された。

流動・水質シミュレーションを実施することにより、伊万里湾全域の流動特性および水質動態を明らかにすることができた。とくに、湾西部では比較的流程が強い一方、湾中央部および湾南東部では、停滞性が強いことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 鈴木誠二, 西田修三, 金城周平, 小野雅史, 中辻啓二: 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, 2005.
- 2) 長崎新聞: 8月11日, 朝刊, 23面, 1999.
- 3) 鈴木誠二, 西田渉, 平智樹, 野口正人: 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, 2008.
- 4) 中辻啓二: 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, 1994.
- 5) Millero, F. J. and Pisson, A.: International One-Atmosphere Equation of State of Seawater, Deep Sea Research, Part A, Vol.28, No. 6, pp. 625-629, 1981.