

# 博多湾東部海域狭窄部における 密度成層破壊構造物の現場適応へ向けた検討

NUMERICAL SIMULATION FOR SITE APPLICATION OF DENSITY  
STRATIFICATION DESTRUCTION STRUCTURE IN EAST PART OF HAKATA  
BAY

濃野浄見<sup>1</sup>・山崎惟義<sup>2</sup>・渡辺亮一<sup>3</sup>・北野義則<sup>4</sup>・林義晃<sup>5</sup>

Kyoaki NOUNO, Koreyosi YAMASAKI, Ryouti WATANABE, Yosinori KITANO,  
Yoshiaki HAYASHI

<sup>1</sup>学生会員 学士 福岡大学大学院工学研究科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 福岡大学教授 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 福岡大学准教授 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 関東学院大学教授 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

<sup>5</sup>正会員 学士 福岡大学教育技術職員 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

Hypoxic water is generated in the every summer season in the east part sea area in the Hakata bay. Thus, the bottom environment around here is getting worse. We did the model experiment in 2005, whether the density stratification was able to be canceled by using the energy of the flow. As the results, it has been understood that the mixture of the density stratification is promoted by setting up the structure of the inclination board type. However, which extent it is effective when this structure is applied to the stricture sea area is not understood. Then, the site sea area was clarified and the level of the destruction of the density stratification with the stratification destruction structure was clarified by analyzing CFD in the present study. As a result, when the structure is set up while the density stratification is hardly destroyed when the structure is not set up, it has been understood that the density stratification is destroyed.

*Key Words* : hypoxic water, density stratification, numerical simulation, mixture

## 1. はじめに

博多湾東部海域(図-1 参照)では, 夏季に貧酸素水塊が発生し, 底生生物が死滅することなどが問題視されている<sup>1) 2) 3)</sup>. ここでの貧酸素水塊の発生原因は, 密度成層の形成であることが明らかとなっている<sup>4)</sup>. 梅雨時期の大雨と気温の上昇により狭窄部で密度成層が形成されると, 上層から下層への酸素供給が制限されるため, その後の数日間で底層の酸素が消費され, 低層に貧酸素水塊が形成される. 一旦, 貧酸素水塊が形成されると博多湾内の潮汐では破壊されず, 長期にわたって湾奥部に留まっている.

一方, 低層は貧酸素化しているのに対し, 表層では富栄養化にともなう植物プランクトンの光合成により, 酸素が豊富に存在している. そこで, 上層と下層の溶存酸素濃度の差が最も大きかった狭窄部(2005年6月)

における溶存酸素濃度鉛直分布を平均すると, 6.7mg/lであった<sup>7)</sup>. このことから, 海水の上下混合を行うことで貧酸素水塊を解消することが可能と考えられる.

混合を促進させ, 密度成層を解消する方法としては, 曝気による方法や上層水をポンプで下層に強制的に送り込む方法等が考案されているが<sup>4)</sup>, いずれの方法も持続的に運転するための維持管理費が膨大な額になるなどの欠点がある. そこで, 平成17年度, 狭窄海域で速くなっている流れを攪拌することにより, 密度成層が解消可能であるか, 模型を用いて実験した<sup>6) 7)</sup>. その結果より, 狭窄部に流れを攪拌する幾つかのタイプの構造物の中で傾斜板タイプの構造物を狭窄海域に設置することで, 最も上下混合が促進されることが明らかとなった.

構造物による密度成層の解消法は, 設置後に必要な維持管理費がほとんどなく, 非常に経済的な手法であ

ると考えられる。しかし、現場海域に密度成層破壊構造物を適用した場合にどの程度成層破壊されるか、模型実験の結果だけでは明らかにならない。それを解明する方法としては実際の博多湾に傾斜板を設置し検証することが最も信頼度の高い結果を得ることができる。しかし、実際の博多湾に傾斜板を設置し検証するためには、膨大な経費がかかり、成層破壊構造物の有効性が確認されるまでは、難しい現状がある。

そこで、本研究では、現場海域における成層破壊構造物による密度成層の破壊の程度を現場スケールで数値シミュレーションすることにより検討することを目的とした。



図-1 対象海域および構造物の想定設置位置 (○印)

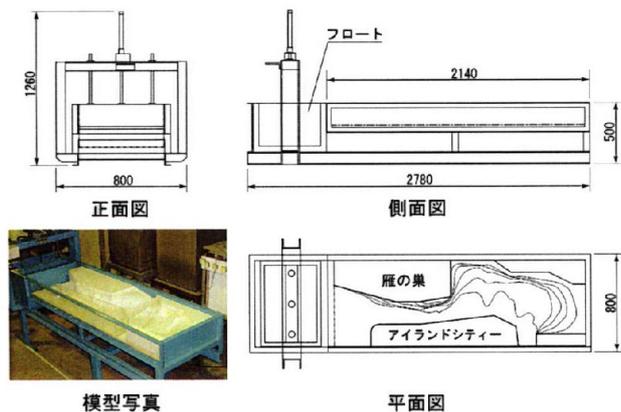


図-2 和自沖の再現模型

## 2. 解析方法

### (1) 実験方法

本研究は既往の模型実験と模型のシミュレーション結果を比較することにより、本計算手法が妥当であるか確認を行った。

図-2 は、模型実験で使用した狭窄海域の模型寸法お

よび模型写真を表している。

模型の縮尺は、水平方向が 1/2500、鉛直方向が 1/40 のひずみ模型である。

図-2 の平面図に示したアイランドシティ部および、それに面する側面部は密度成層の混合状況を観察できるように、透明アクリル板を用いた。

密度成層の混合状況を観察するためフルオレセインで塩水を着色した。混合する様子は紫外線を上部から照射しフルオレセインの蛍光を側面からカメラで撮影した。

まず、塩水を模型内に注入し、つぎに塩水を注意深く注入し密度成層を作成した。

潮汐流は、図-2 側面図に示したフロートを上下させることで再現できる構造となっている。

### (2) シミュレーションの方法

本研究では、密度流の CFD 解析などで幅広く用いられ有用性が高い CFD ソフトウェア FLUENT6.3.26 (アンシス・ジャパン) を用い模型実験および狭窄海域のシミュレーションを 2 次元領域で行った<sup>8)</sup>。

計算メッシュの生成には FLUENT が推奨する GAMBIT2.3.16 (アンシス・ジャパン) を用いて行った。

模型実験のシミュレーションの格子の寸法は、0.1 × 0.1 (cm)、格子点数は 10 万点、現場海域のシミュレーションの格子の寸法は、0.2 × 0.2 (m)、格子点数は 1 万点とした。

基礎方程式は、下記のとおりである。

運動量保存法則 (ナビエ-ストークスの式)

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \rho u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u}{\partial x} + v \frac{\partial \rho u}{\partial y} \right) &= \rho x \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \left( \frac{\partial \rho v}{\partial t} + u \frac{\partial \rho v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right) &= \rho y \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

質量保存則 (連続の式)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  を密度、 $u$ 、 $v$  を  $x$ 、 $y$  の各方向流速、 $p$  を圧力とする。

実海域においては、乱流モデルとして  $k-\varepsilon$  モデルを採用した。初期条件は各セルに計算開始時の流速を流れ方向に与えた。

境界条件は、模型実験および実海域のどちらのシミュレーションにおいても、入口の境界条件を velocity-inlet、出口の境界条件を pressure-outlet、海底の

境界条件を wall、自由表面の境界条件を摩擦の無い wall と設定した。図-3 は境界条件を示している。また、本研究においては、水位変化が発生しないと仮定し計算を行った。

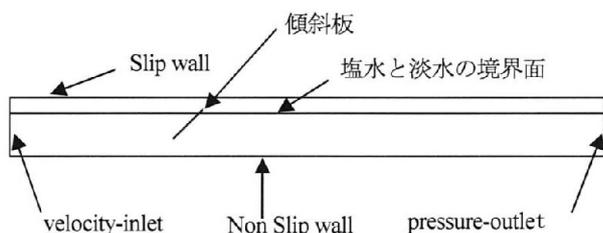


図-3 境界条件

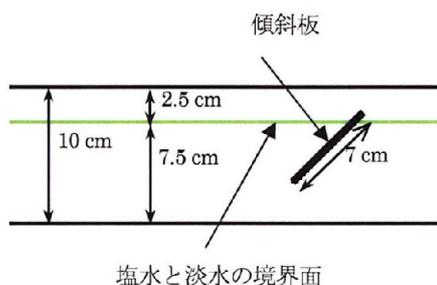


図-4 模型実験の傾斜板を有す場合の場の形状

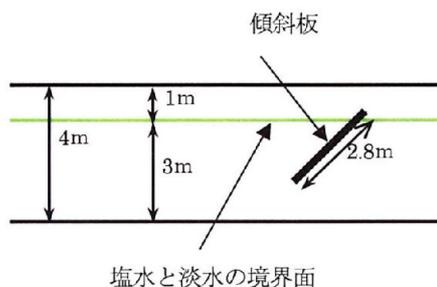


図-5 実海域の傾斜板を有す場合の場の形状

水深の設定は模型実験、実海域のどちらも平均海面時の水深としている。

傾斜板の形状は、模型実験の場合では、高さ 7 cm、実海域の場合では、高さ 2.8m の板を 45° 傾けた構造となっている。図-1 は、対象海域および構造物の設置位置を示している。図-4 は模型実験の構造物を有す場合の場の形状。図-5 は実海域の構造物を有す場合の場の形状。

流速は、模型実験のシミュレーションの場合、流速の早い部分だけを模型実験時の流速変化 (1.88 ~ 2.77 (cm/s)) に合わせて計算した。また、実海域の流速については、Teledyne RD Instruments 社製ワークホース ADCP を用い大潮時における狭窄海域の断面流速

を一日観測により測定した時の最大流速 (23.7 (cm/s)) および平均流速 (15.1 (cm/s)) について定常状態になるまで計算した。計算結果は 15 分でほぼ定常状態になっている。また、計算流速は、調査結果が上層、下層どちらにおいてもほぼ同程度の流速であったため、場所によらず一定の流速を左から右に与えた。

密度は、模型実験のシミュレーションの場合、実験値に合わせ、(上層密度: 0.999 (g/cm<sup>3</sup>), 下層密度: 1.004 (g/cm<sup>3</sup>)) 実海域のシミュレーションにおいては HYDROLAB 社製水質チェッカー DS5 によって測定した狭窄海域の塩分濃度を UNESCO (1981) の海水の状態方程式に代入することにより密度を算出した (上層密度: 1.011 (g/cm<sup>3</sup>), 下層密度: 1.019 (g/cm<sup>3</sup>))。

また、上層水と下層水の拡散係数は  $5 \times 10^{-9}$  (m<sup>2</sup>/s) とした<sup>9)</sup>。

次に、実海域における傾斜板の攪拌効果の度合いを密度変化から推定するために、玉井にならい、次のように単位面積あたりの輸送量を求めた<sup>10)</sup>。まず、計算結果より傾斜板下流 80 (m) に、海面から鉛直方向に 0.2 (m) ごとの平均密度 (定常状態になってから 5 分間後の 10 秒の平均) を求め、初期状態および計算後の密度分布を描いた。次に初期淡塩境界面上部の上記の密度差の積分値を求めた。ここで面積  $S$  (kg/cm<sup>2</sup>) が単位面積あたりの輸送量となる。

### 3. 数値計算の結果と考察

本計算手法が妥当であるか確認するため、既往の模型実験と模型のシミュレーション結果を比較した。

図-6 は、模型実験における模型側面部から傾斜付近を撮影した写真及び計算結果 (密度のコンター図) を示している。傾斜板なしの場合 (図-6 a, b 参照)、実験計算共に成層境界面はほぼ同じ形状で波打つのみで上下層はほとんど混ざらないことが分かる。これより、この条件では、密度成層がほとんど破壊されないことが分かる。

また、傾斜板有り場合 (図-6c, d 参照)、実験も計算傾斜板共に前方では成層境界面がほぼ同じ形状で窪み、後方ではほぼ同じ形状で渦を巻いており、上下層が激しく混合していることがわかる。これよりこの条件では、成層混合が行われ密度成層は破壊されることが分かる。このことより、傾斜板の有無に関わらず混合状況は実験時の写真と計算結果の密度のコンター図はほぼ一致しており、定性的に計算結果が実験結果を表している。

そこで、この計算方法を用い、現場海域における傾斜板による密度成層の破壊の程度を知るため同様の方法でシミュレーションを行った。

(フルオレセインを含む塩水の蛍光が白く光って見える)

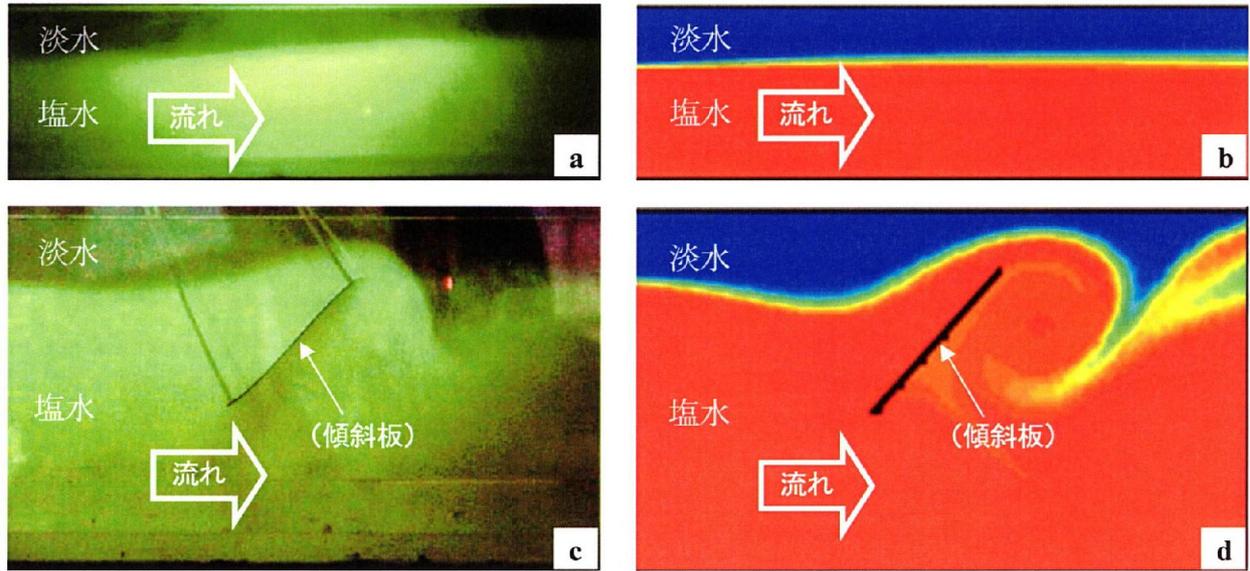


図-6 模型実験における実験結果と計算結果の比較，実験の写真（左）計算密度のコンター図（右）

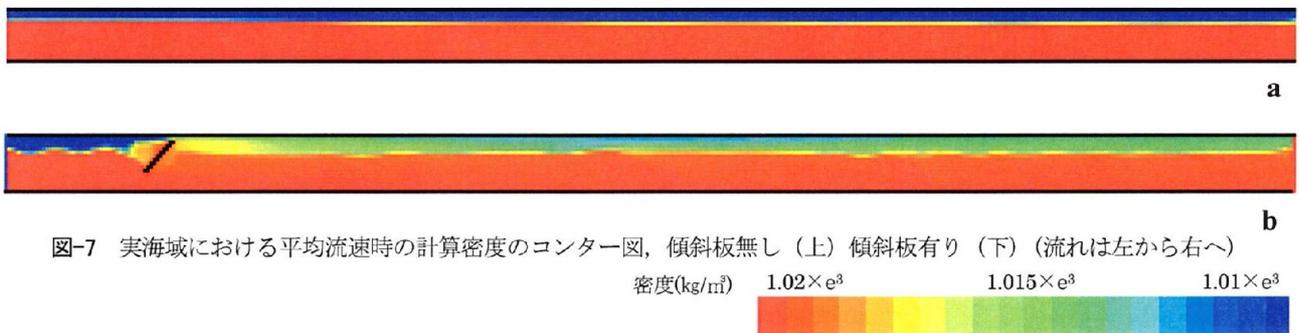


図-7 実海域における平均流速時の計算密度のコンター図，傾斜板無し（上）傾斜板有り（下）（流れは左から右へ）

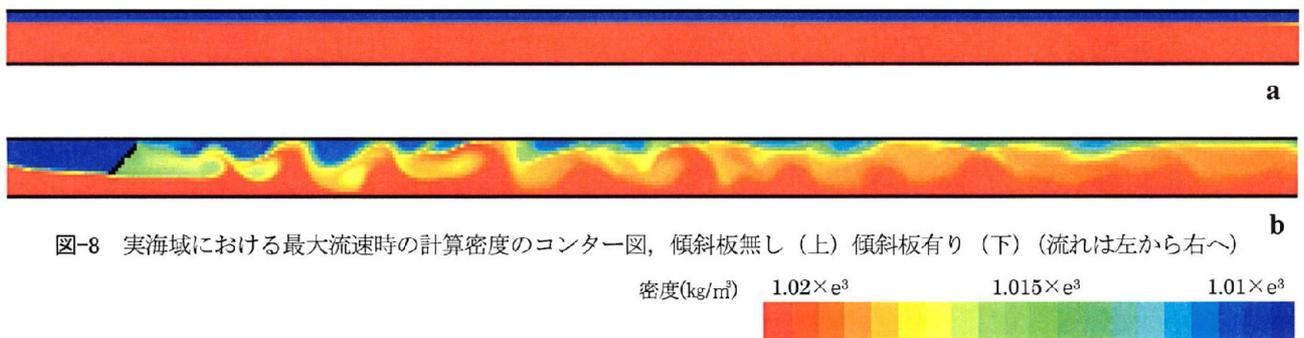


図-8 実海域における最大流速時の計算密度のコンター図，傾斜板無し（上）傾斜板有り（下）（流れは左から右へ）



図-9 平均流速時における流速のベクトル図

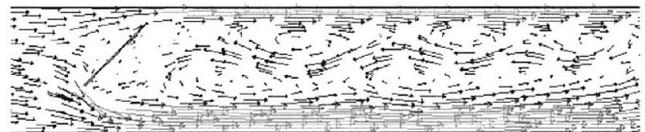


図-10 最大流速時における流速のベクトル図

図-7は、平均流速時の実海域における計算結果（密度のコンター図）を示している。同図より、この場合傾斜板なしでは、密度成層はほとんど破壊されていないのに対し傾斜板有りでは密度成層が混合されることが分かる。

図-8は、最大流速時の実海域における計算結果（密度のコンター図）を示している。同図より、この場合傾斜板なしでは、密度成層はほとんど破壊されないのに対し、傾斜板ありでは密度成層が大きく混合されていることが分かる。さらに図-7b、図-8bの比較から平均流速時に比べ最大流速時ではより激しく混合されていることが分かる。

次に、傾斜板による密度成層の混合メカニズムを知るために傾斜板を設置した場合の計算結果（流速ベクトル図）を確認した。

図-9及び図-10はそれぞれ、傾斜板ありの場合の平均流速時、最大流速時の流速の計算結果をベクトル図である。

図-9より平均流速時に傾斜板により後方で大きく渦をまくことがわかる。

また図-10より最大流速時では平均流速時よりさらに大きく渦を傾斜板の後方でまくことが分かる。

これらのことにより傾斜板を設置した場合には、密度成層が傾斜板に伴う渦により混合され流速が増すにつれてその度合いが大きくなることが分かる。

次に、実海域における傾斜板の攪拌効果の度合いを物質輸送から推定するために、単位面積あたりの輸送量を求めた。

図-11に、実海域における傾斜板なしの場合密度分布を示した。この図より、単位面積あたりの質量輸送量を求めると、平均流速時では  $0.5 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ 、最大流速時では、 $1.7 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  となった。

また、図-12に、実海域における傾斜板をありの場

合の密度分布を示している。この図より、単位面積当たりの物質輸送量は、平均流速時で、 $4.6 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ 、最大流速時で、 $5.6 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  となった。このことより、傾斜板を設置しない場合には、ほとんど密度成層が破壊されないのに対し構造物を設置した場合には密度成層が破壊されることが密度変化と物質輸送の面からも示された。

#### 4. 結論

本研究では、博多湾東部海域狭窄部に成層破壊構造物として傾斜板の設置を想定したシミュレーションを行ったその結果以下のことが分かった。

- ・傾斜板を設置しない場合では平均流速から最大流速時にかけて密度成層はほとんど破壊されない。
- ・傾斜板を設置すると密度成層の破壊促進効果が期待できる。

今後の課題として、精度の高い計算をするために潮汐による水位と流速変動をシミュレーションすることのできる計算モデルに変え、3次元解析する必要がある。

謝辞：本研究を進めるに当って、一部を、科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号 18360254，研究代表者：渡辺亮一，および基盤研究C：課題番号 19560554，研究代表者：山崎惟義）の助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

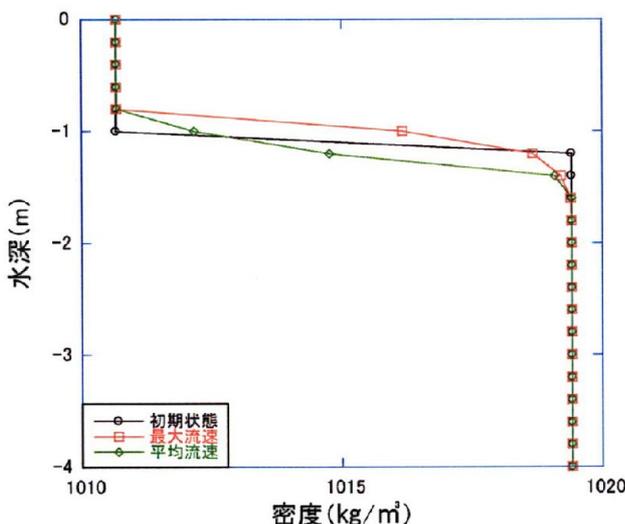


図-11 傾斜板を有さない場合の密度分布

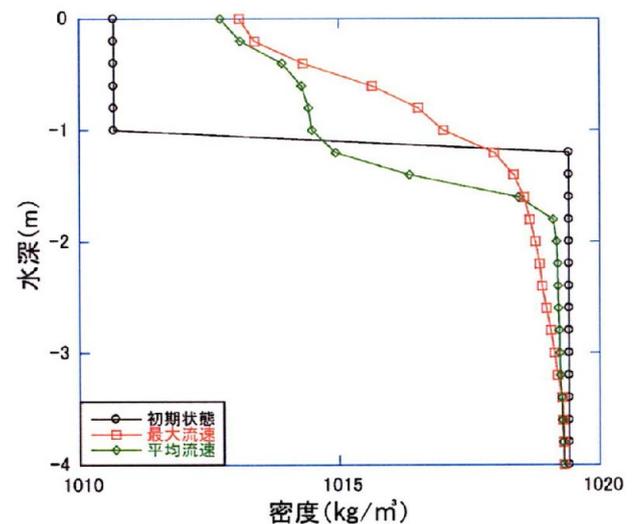


図-12 傾斜板を有す場合の密度分布

## 参考文献

- 1) 児玉真史, 松永信博, 水田健太郎, 徳永貴久: 和白干潟における水質の動態に関する現地観測, 土木学会論文集, No. 720, Page53-61 (2002)
- 2) 児玉真史, 徳永貴久, 松永信博: 干潟における水質の季節変化とその変動要因に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 49, No. 2, Page1116-1120 (2002)
- 3) 熊谷博史, すし本健治, 楠田哲也: 長期連続観測と数値解析による貧酸素水塊の生成消滅機構の解明, 環境工学研究フォーラム講演集, Vol. 38th, Page97-99 (2001)
- 4) 中瀬浩太: 閉鎖水域の密度成層および底層貧酸素の解消への流動促進装置の適用, 海洋工学シンポジウム Vol. 20th Page. ROMBUNNO. OES-55 (2008)
- 5) 熊谷博史: 博多湾湾奥部における貧酸素水塊の発生子測, 環境工学研究論文集, 第 42 巻, pp277-285, 2005.
- 6) 迫田祥哉: 博多湾における密度成層解消のための模型実験福岡大学工学部土木工学科卒業論文, 2005.
- 7) 田中克朋: 和白沖における密度成層解消のための模型実験, 福岡大学工学部土木工学科卒業論文, 2006.
- 8) DONNELLY B 他: 成層流の計算流体力学的 (CFD) 検討, Environ Hydraul, pp455-460, 1999.
- 9) 化学工学会編, 化学工学便覧, 丸善株式会社, 1999.
- 10) 玉井信行: 連行概念の統一化と連行係数の評価法, 土木学会論文集, 第 381 号, pp1-10, 1987.