

# 内湾奥部河口域に位置する泊地内の流動に及ぼす気象要因の定量評価

環境水域工学分野 風嵐 陽太

## Abstract

内湾奥部河口域の流れは潮流と河川流，吹送流を主要因とした複雑な流況を呈しており，加えて，河川水流入に伴う密度成層の形成が流れをより複雑化していることがわかっている．しかし，それぞれがどの程度流動場に影響を及ぼしているのかについては明らかにされていない．また，港湾海域が抱える環境問題の対応策として，様々な修復技術が考案されているが，それぞれが実海域の流動場に及ぼす影響についてまで言及されていない．本研究では，環境悪化が問題となっている大阪湾奥部に位置する堺泉北港湾海域堺 2 区の北泊地を対象に現地観測，数値計算を行い，北泊地の流況特性を把握するとともに，北泊地の流れに及ぼす風の影響を海水交換と流速出現頻度を指標に定量評価した．その結果，西風条件で海水交換量が增加することが推測された．また，北泊地に環境改善技術である浅水化を適用した場合，海水交換効率が現状より向上することを明らかにした．

## 1 研究背景と目的

内湾奥部に位置する河口域では，富栄養化や貧酸素水塊の発生などの水質悪化，また，漂流，漂着ゴミによる港湾施設の機能低下や景観悪化が問題視されている．これらの環境問題に取り組むうえで，海水交換過程や漂流ゴミの流入過程を把握すること極めて有用であるといえる．このような背景の下，これまで閉鎖性の高い海域や河口域の流動場の把握を目的とした数多くの研究がなされてきた．

既往の研究によって，内湾奥部河口域の流動場は潮流と河川流，吹送流を主要因とした複雑な流況を呈しており，加えて，河川水流入に伴う密度成層の形成が流れをより複雑化していることが明らかにされている．しかし，それぞれが流動場に及ぼす影響度については言及されていない．また，河口域が抱えている環境問題である富栄養化や貧酸素水塊の発生などの対応策として，様々な環境修復技術が考案されているが，それぞれを施工した際，実海域の流動場にどのような影響を与えるのかについてまで言及されている研究は少ない．

そこで本研究では，実際に環境悪化が問題となっている大阪湾の堺泉北港湾海域堺 2 区の北泊地(以後，北泊地と略称する)を対象に現地観測と数値計算を行い，北泊地の流れに及ぼす気象要因を定量評価するとともに，その知見を用いて環境改善技術の施工が流動構造に与える影響について評価することを目的とする．

## 2 研究対象海域の概要

本研究対象海域として選定した北泊地は，現在では港湾施設として利用されていないが，かつては利用されていたため静水性の高い海域となっている．また，大和川河口に位置しており(図-1)，大和川から流入する栄養塩を含んだ淡水と海水が混ざり合う汽水域であるため，栄養塩の負荷が大きく，慢性的に塩分躍層が存在する海域である．遠藤ら [1] の測定結果から，北泊地は慢性的に密度成層が見られ 10 月上旬まで底層の DO 濃度が 1mg/l 以下と貧酸素状態になっていることが明らかになっている．

また，出水時に浮遊ゴミが大和川から北泊地へ流入しているという知見があり，実際に北泊地奥部に漂着ゴミが集積している様子も観察されている(図-1)．しかし，その流入メカニズムは明らかになっていない．



図-1 平成 22 年 12 月 13 日における北泊地奥部の様子



図-2 定点カメラの設置場所と撮影画像

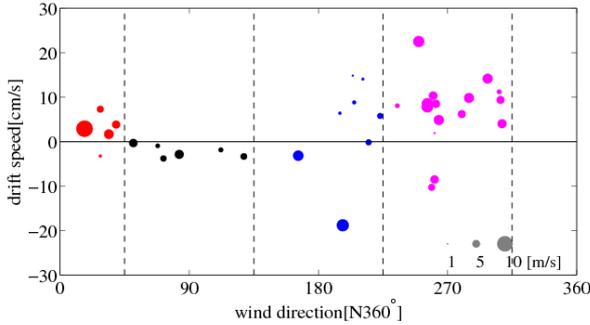


図-3 漂流物移動速度と風との関係

### 3 漂流物の観測による泊地開口部の流況特性把握

#### 3.1 北泊地開口部における観測概要

北泊地へ流入する表層流の流況特性把握と本モデルの再現性評価を目的として、北泊地開口部を流れる漂流物を観測した。北泊地の開口部に位置する通信塔の屋上（平均水面より約9.15m）にビデオカメラ（C-IR100）、通信塔内にレコーダー（DMR-500D）を設置し、平成22年9月23日から10月8日の日中、1秒間に3画像撮影した（図-2）。

#### 3.2 観測結果と考察

漂流物の連続撮影画像から漂流物の流向（北泊地へ流入or流出）と移動速度を算出した。ただし、出水時には大量の漂流物が確認され、それらすべての移動速度を算出することは難しいことから、1時間毎に1つの漂流物のみ抽出し、それを代表漂流物移動速度とした。

算出した漂流物移動速度と風向との関係性を図-3に示す。ここで、縦軸は撮影画像から算出した漂流物移動速度、横軸は大阪港波浪観測所の風向観測データである。プロットの大きさは風速を表す。この図より、風速によらず東風が吹いているときには流出、西風が吹いているときは流入方向に移動している傾向が見取れる。このことより、漂流物の移動方向が風向と一致しており、漂流物の移動に対して風応力による影響は大きいと言える。

次に、出水との関係について考察する。大和川河口から3km上流に位置する遠里小野橋における水位観測

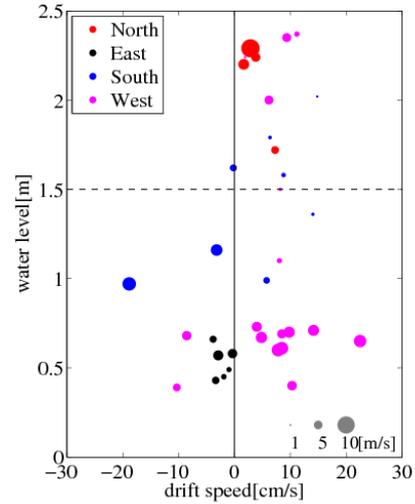


図-4 漂流物移動速度と遠里小野橋における水位との関係

データを縦軸に、漂流物移動速度を横軸にとったものを図-4に示す。ただし、プロットの色、大きさは図-3の場合分けをそのまま適用した。この図より、遠里小野橋において観測される水位が1.5m以上であるとき、漂流物は北泊地に流入する傾向にあるといえる。ここで海上の漂流物の移動は、一般的に表層流ベクトルと風圧流ベクトルを合成することによって表せることから、漂流物移動速度  $U$  は次式で表せる [2]。

$$U = U_w + 0.035 \sqrt{\frac{C_{da}}{C_{dw}}} \sqrt{\frac{A}{B}} W \quad (1)$$

ここに、 $U_w$  は表層の流速、 $C_{da}$  は漂流物の空中抵抗係数、 $C_{dw}$  は漂流物の水中抵抗係数、 $A$  は風圧のかかる断面積、 $B$  は水圧のかかる断面積、 $W$  は風速である。撮影画像より、確認された漂流物はほぼ水中に存在したことから、式(1)の右辺の2項目が無視でき、算出した漂流物移動速度は表層流速とほぼ同値であるといえる。よって、上述した漂流物の移動に対する考察は表層流れについても同様のことがいえる。

### 4 港湾海域における流動場の予測手法

本研究では流動予測モデルとして、CENSIS (Coastal ENvironment SIMulation System) を使用する。CENSISは、静水圧近似を適用した粘性非圧縮性流体の質量保存式、運動方程式・輸送方程式を支配方程式とした、沿岸水域・湖の流れ場計算に適した準3次元流動モデルである。

### 5 実海域の再現によるモデルの精度検証と流況特性の把握

本モデルの精度検証と北泊地の流況特性の把握を目的として行った実海域の再現シミュレーション結果について示す。

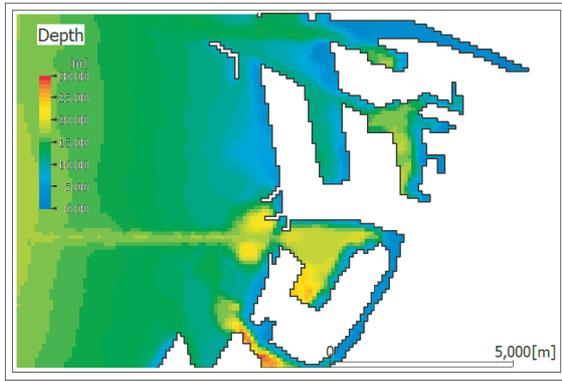


図-5 計算対象領域

## 5.1 計算条件

### 5.1.1 計算対象領域

本再現計算においては、大和川河口を含む経度方向に10km、緯度方向に15kmを計算対象領域として設定した。水平方向の計算格子数は経度方向に100、緯度方向に150とし、水平解像度100m×100mで離散化を行った。鉛直方向は計算格子数を20とし、第1層の層厚は1.5m、第2～8層は0.5m、第9～12層は1.0m、第13～16層は2.0m、第17～20層は3.0mと設定した。海底地形は、堺の海図（海図No.JP1146、平成19年5月補刷）を元に作成した。計算対象領域と与えた水深データについて図-5に示す。

### 5.1.2 計算期間

内湾奥部河口域の再現を行うに当たり、密度成層が形成されていない時と形成されている時で、流動が大きく変わることが予想されるため、今回2ケースの計算を行った。Case.1として北泊地開口部において漂流物の観測を行った平成22年9月23日から10月8日、Case.2として密度の成層化が予想される平成22年8月4日から8月19日までのそれぞれ16日間を計算期間とした。

### 5.1.3 河川流入条件

大和川からの河川水流入の影響を考慮するために計算対象領域の上流端で流量、塩分(=0psu)、水温の条件を与えた。流量は、大和川河川事務所が行った平成22年の遠里小野橋における水位データと流量データより式(2)に表される近似式を導出して与えた。

$$Q = 58.584H^2 + 29.592H + 6.2848 \quad (2)$$

ここで、 $Q$ は流量[m<sup>3</sup>/s]、 $H$ は水位[m]を表す。

### 5.1.4 開境界条件

潮汐の影響を考慮するために、計算対象領域の北側、西側、南側の計算領域端において開境界を設定し、潮位変動量、塩分、水温についてそれぞれの境界に同様の値を与えた。潮位変動については海上保安庁から提供されている大阪港における潮汐推算のデータを用いた。塩分、水温に関しては、大阪湾水質定点自動観

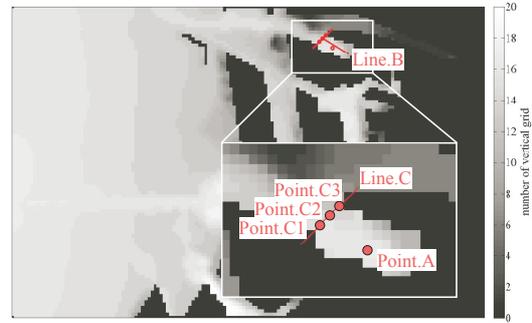


図-6 計算結果のoutput位置

測データ配信システムにおける大阪港波浪観測塔の観測データをスプライン補間し、設定した。

### 5.1.5 気象条件

本流動予測モデルでは、海面における風応力や熱フラックスなどを考慮するために、風速、風向、降水量、気温、相対湿度、雲量、直達日射量の7つの諸量を与える。風情報は大阪港波浪観測塔、降水量、気温については堺地域気象観測所、相対湿度、雲量、直達日射量は大阪管区気象台での観測データを使用した。直達日射量に関しては観測されていないため、全日射量の観測データを使用した。

## 5.2 観測データとの比較によるモデルの精度検証

### 5.2.1 計算出力地点

本計算における出力地点を図-6に示す。

### 5.2.2 比較検証結果

塩分について観測データと比較した結果について示す。比較対象として、大阪湾水質定点自動観測データ配信システムによる北泊地での観測データを選定した。

Point.Aにおける各ケースの塩分の鉛直データの時系列分布と、観測データを図-7に示す(観測値の空白はデータの欠損である)。この図より淡水層が出現する際、観測データに比べ計算結果の方が淡水層の層厚が厚くなっていることがわかるが、淡水層の層厚のなまりを除けば、計算結果と観測データは定性、定量的に良好に一致している。塩分の再現性は密度成層形成を含めて良いと判断した。同様に、水温についても比較したところ海表面の水温に差が見られたが定性的には一致しており、再現性は確保されたといえる。

次に、流動の再現性について検証を行うため、北泊地開口部の表層流れの計算結果と、撮影画像より求めた漂流物移動速度の比較を行う。北泊地開口部の中央(Point.C2)におけるCase.1の第1層流速計算結果と、漂流物移動速度について図-8に示す。ここで横軸は漂流物移動速度、縦軸はその時刻における計算結果を表し、計算結果についてはLine.Cを基準に正の値が北泊地に流入する流向、負の値が流出する流向を示す。こ

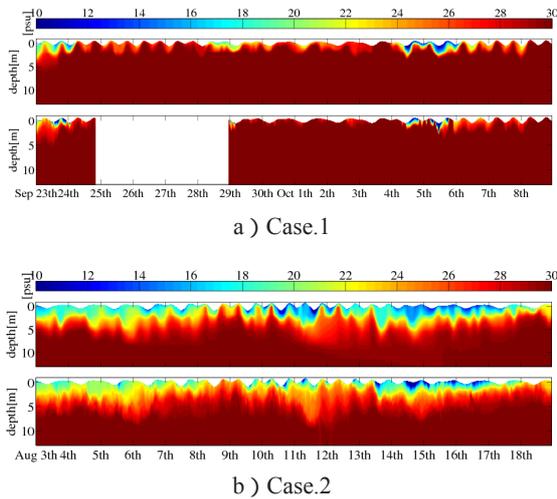


図-7 塩分の鉛直データの経時変化（上：計算結果，下：観測データ）

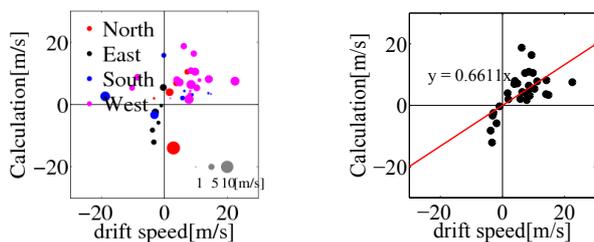


図-8 計算結果と漂流物移動速度 図-9 計算結果と漂流物移動速度の定量的比較

の時、流向については80.56%の割合で一致している。また、流向が一致した結果のみについて表示し、近似直線を求めた(図-9)。このときの近似式は $y = 0.6611x$ であり、平均的には漂流物移動速度のほうが大きい値をとっているといえる。これは、風圧流の影響を計算結果に加味しなかったことが要因であると考えられる。

以上より、流向、流速ともに計算結果と現地観測結果は良好に一致しており、本モデルにおける流動の再現性についても確保されたといえる。

### 5.3 計算結果から見る北泊地の流動

Case.1, Case.2の計算結果について考察する。北泊地開口部における流動について漂流物移動速度と同様に、風応力と河川流、潮汐流との関係性について考察した。その結果、Case.1の結果については表層流れに風と河川流量との相関が見られ、中層流れと潮汐変動量との相関が見られた。Case.2においては、表層流れと河川流量との相関は見られたが、どの層においても風と潮汐変動量との相関は見られなかった。

次に、各ケースの計算期間中のPoint.C2における流入出速度の出現頻度と風向度数分布について図-10に示す。ここで、縦軸は水深、横軸は出現頻度で正の値が流入、負の値が流出方向の流れを表す。この図より、Case.1では上層で流出傾向、下層で流入傾向の2

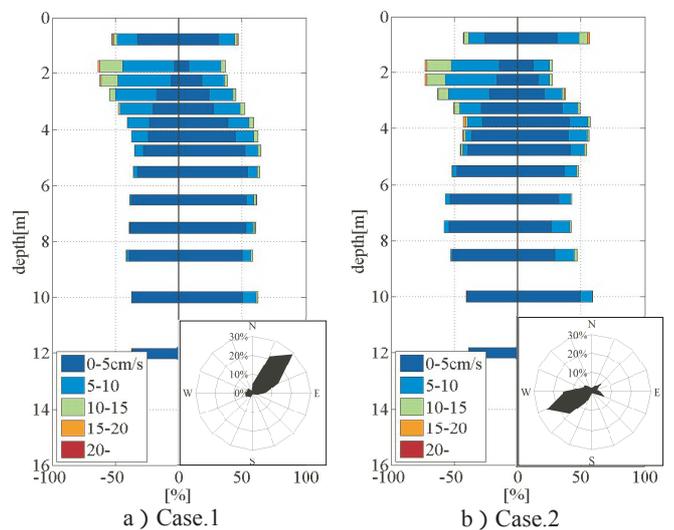


図-10 Point.C2での流入出速度の出現頻度

層構造であり、Case.2ではより複雑な層構造であることがわかる。また、風向傾向と第1層目の流向傾向は両ケースとも一致しており、長期的にはCase.2においても風の影響があると推測できる。

## 6 泊地の流動に及ぼす気象要因の定量評価

泊地内流動に対する気象要因の定量評価を行うため、気象要因のみ変更した計算を行い、それぞれの計算結果を比較、考察した結果について示す。

### 6.1 計算条件

本計算における各計算条件について、再現計算の際に用いた計算条件との変更点について述べる。まず、鉛直方向の第1層目の層厚を1.0mとした。開境界条件における潮位 $\zeta_0$ は、潮位差 $H(=1.2\text{m})$ 、周期 $T(=12\text{hr})$ の潮汐を次式のように正弦関数で与えた。

$$\zeta_0 = \frac{H}{2} \sin \omega \quad (3)$$

開境界における塩分、水温は、平成22年8月3日12:00の値を与え続けた。河川流入条件として、流量は平水時の評価を行うため、一定値( $Q=22.0\text{m}^3/\text{s}$ )を与えた、水温は開境界で与えた表層水温と同値を与えた。

また、各計算の条件差を失くすことを目的に水面における熱フラックスと蒸発を考慮しないこととした。よって、この計算において、風による影響は風応力の影響のみ評価することとする。

### 6.2 泊地の流動に及ぼす風の影響評価

風による北泊地の流動変化を明らかにするため、無風状態における計算結果と東風、西風を吹かせた計算結果とを比較した。ただし、風速はそれぞれ計算対象海域における平均的な風条件として5m/sを与え、計算領域で一様とした。本計算結果については、北泊地開口部の潮汐毎の流速を比較し、ほぼ同値となったところから考察の対象とした。

北泊地開口部における流動について考察する。4潮

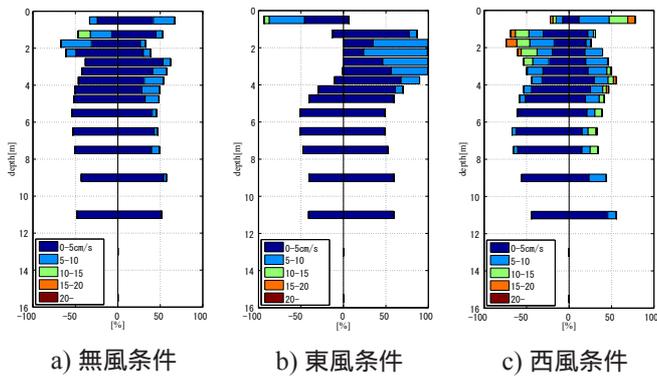


図-11 Point.C2 での流入出速度の出現頻度

夕間の Point.C2 における各層の流速出現頻度について図-11 に示す。この図より、東風条件では無風条件と比べると明らかに流動構造が変化しており、風による影響の強さが伺える。ただし、5m 以深ではそれほど変化はなく、東風条件においても底層は静穏な流動環境であることが推察される。西風条件では東風条件のような大きな違いは見られないが、流速は全体的に大きくなっている。入江ら [3] は、エスチュアリー循環による表層流れの方向と逆方向の風が吹くとき、風によりエスチュアリー循環は弱められ、上層だけでなく下層における流速も小さくなると述べている。本計算においても東風条件のとき、第3、4層においてエスチュアリー循環による流出方向の流れを吹送流の補償流が上回った結果、図-11 のような流動構造となったと考えられる。また、西風条件においてはその逆の事象、つまり、西風が表層流れを助長しエスチュアリー循環を活性化させた結果、流速が全体的に大きくなったと考えられる。

北泊地開口部 (Line.C) からの 1 潮汐間の海水交換量はそれぞれ、無風条件で  $5.5520 \times 10^6 t$ 、東風条件で  $5.2956 \times 10^6 t$ 、西風条件で  $8.5512 \times 10^6 t$  であった。ここで、海水交換量は各ケースの密度場の違いを考慮して、流量に密度を乗じた質量を用いて評価した。この結果より、西風条件のときに海水交換量が多いことがわかる。このことから西風がエスチュアリー循環を活性化させたと推察できる。

各風条件を与えた際の下げ潮最強時と上げ潮最強時の Line.B における水平流速と密度の分布について、図-12 に示す。どちらの時刻においても東風条件では、淡水層が確認できない。これは風応力により北泊地への河川水流入が阻害されているためと推測できる。

下げ潮時、西風条件では無風条件と比較し、流向の傾向は中層の流速が大きくなっている。これは前述したように、西風がエスチュアリー循環を活性化させたためであると推察される。一方上げ潮最強時を見ると、無風条件では表層で流出方向、中底層で流入方向を示している。東風条件では流出方向に風が吹いているので、表層の流れを助長し流速が全体的に大きくなると予想されるが、表層を除き大きくない。このことより、西風が表層の流れを助長することにより、全体的に流れが大きくなったと推察してきたが、風応力による物理的影響によるものだけではないといえる。つまり、西風条件時に流速、海水交換量が増加したのは、西風によって河川水の流入量が増加し、密度の低い水が入ってきたことにより、鉛直方向の密度差が大きくなった。そのため海水間の摩擦によるエネルギー損失が少なくなり、その分流速が大きくなり、交換量も増加したということである。

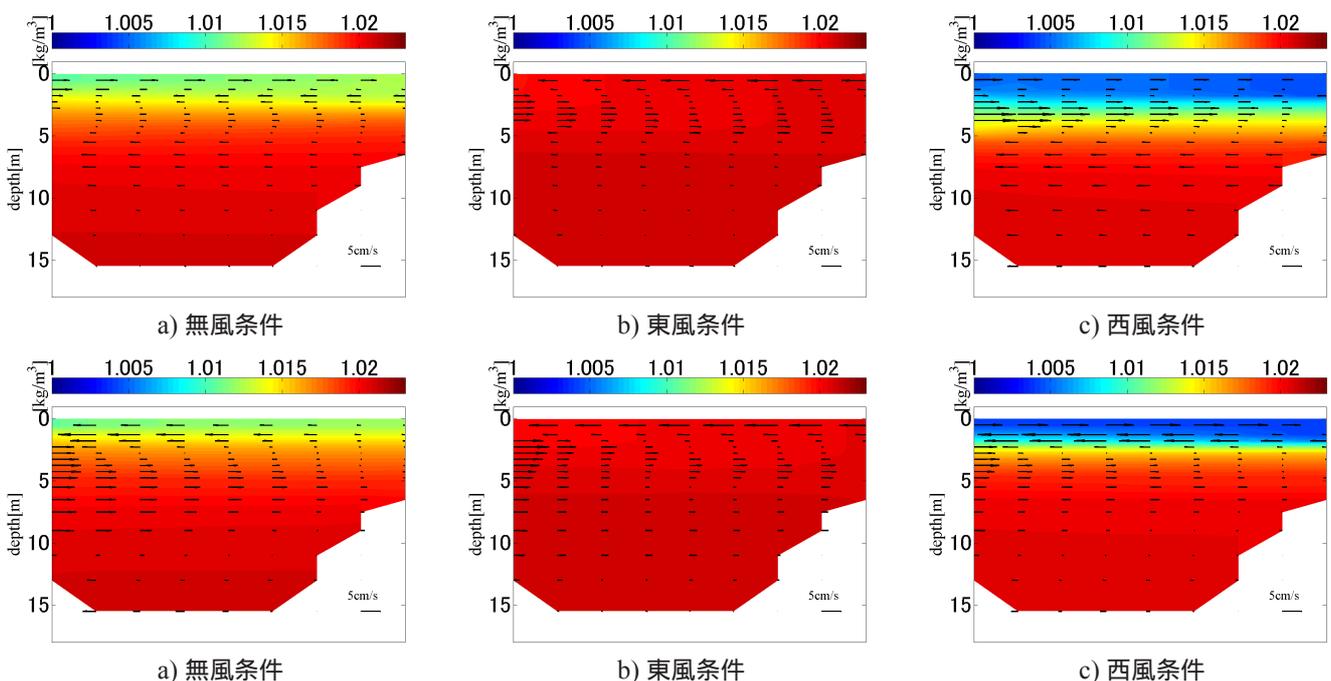


図-12 北泊地内の水平流速と密度の最強時の空間分布 (上: 下げ潮最強時, 下: 上げ潮最強時)

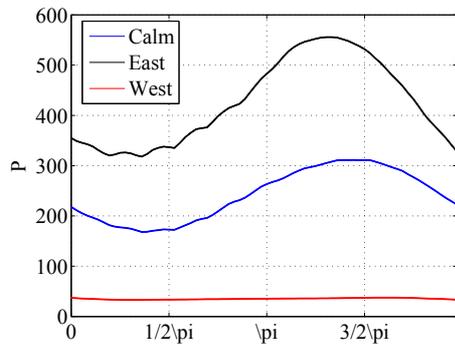


図-13 Point.Aにおける水柱の密度成層強度

ここで、各条件ごとの北泊地内の密度成層強度についてみておく。図-13に各ケースにおけるPoint.Aにおける水柱の密度成層強度について示す。ここで密度成層強度の指標としては、多田ら[4]が諫早湾における密度成層強度の把握に使用したポテンシャルエネルギー( $P$ , 式(4))を用いた。

$$P = \frac{1}{H} \int (\rho - \rho_m)gz \cdot dz \quad (4)$$

ここで、 $H$ は水深、 $\rho$ は密度、 $\rho_m$ は密度の鉛直平均値、 $z$ は水表面からの距離である。一般的に、 $P$ の値が大きいかほど成層が発達しているといえる。この図より、上げ潮時に密度成層強度が低くなり、下げ潮時に高くなるような潮位変動に伴う密度成層強度変化が確認できる。また、それぞれを比較すると、密度成層強度は東風条件時に低くなり西風条件時に高くなっていることがわかる。

## 7 浅水化が泊地の流動に与える影響評価

北泊地のような海域の環境修復手法として、大阪湾の浅場が少ない特性を考慮して、浅水化によって環境構造を改善することが効果的であると考えられる。そこで、浅水化した際の北泊地の流動とこれまでに行った計算結果とを比較し、流動環境が地形変化によりどのように変化するのか考察する。

### 7.1 計算条件

堺泉北港湾海域の北泊地の傾斜を外海方向に1/200と設定し、浅水化した場合の計算を行う。水深以外の計算条件としては、6.1に準ずる。また、浅水化を適用した場合の風の影響についても考察を行うために、それぞれの風条件についても計算を行った。

### 7.2 計算結果

計算結果より、北泊地開口部の第1層目の流入方向の出現頻度には大きな差は見られなかった。よって、浅水化後も漂流物が北泊地に流入する頻度は変わらないと推測できる。

次に海水交換について評価する。海水交換量は浅水化した場合、してない場合に比べ総じて減少した。ただし、海図より求めた北泊地の容積は約6,990,000m<sup>3</sup>で

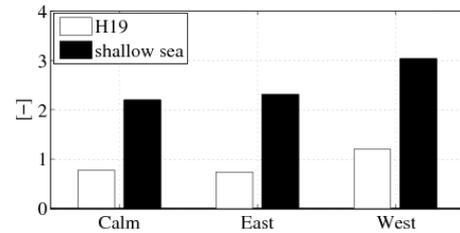


図-14 海水交換量と北泊地内の海水量との比

あり、浅水化後は約1,865,000m<sup>3</sup>である。よって、容積に大きな差があるため、浅水化による海水交換量の変化を単純に絶対量で評価するのは好ましくない。そこで、どれだけの海水が入れ替わっているか考察するため、北泊地における海水の密度がすべて1.023t/m<sup>3</sup>として北泊地内の海水の質量を算出し、1潮汐間の海水交換量とそれとの比を求めた。その結果について図-14に示す。この図より、海水交換量と北泊地内の海水量との比によって評価すると、浅水化した場合総じて大きい値を取ることがわかる。よって、海水交換効率は浅水化した場合大きくなるといえ、流動の観点からも浅水化は有用であるといえる。

## 8 まとめ

- ・河口域に位置する泊地の流動に及ぼす気象要因について、海水交換と流速出現頻度の視点から定量的に評価した。
- ・浅水化を適用にすることにより泊地開口部及び泊地内の流動は大きくは変わらないが、適用することにより、海水交換効率は向上することを明らかにした。

## 参考文献

- [1] 遠藤徹・水田圭亮・重松孝昌(2008): 貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp1151-1155.
- [2] 松崎義孝・藤田勇・竹崎健二(2010): 重油・漂流物を用いた室内実験による漂流特性の研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp939-944.
- [3] 入江政安・中辻啓二・西田修三(2004): 大阪湾における貧酸素水塊の挙動に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.926-930.
- [4] 多田彰秀・中村康裕・阿部和也・田井明・鈴木誠二・中村武弘(2010): 淡水流入が諫早湾の水質動態に及ぼす影響について, 土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp.366-370.

## 討議等

討議[嘉名光市 准教授]

北泊地を浅水化した場合、大和川より北泊地に流入する陸域起源漂流ゴミの量は減少するのか。

回答：本計算結果より、北泊地開口部の表層フラックスに大きな差が示されなかったため、北泊地へのゴミの供給量の浅水化に伴う増減は、微小であると推測される。

北泊地の浅水化はどのような基準で設定したのか。

回答：既往の現地調査と本数値計算結果より、北泊地は夏季に3m付近で成層が形成されており、本計算において淡水層のみ存在する領域と密度成層が存在する領域の流動の比較考察を行うため、北泊地開口部における水深が5mとなるように傾斜を1/200と設定した。これは一般的な自然干潟と同程度の傾斜である。

討議[矢持進 教授]

出水時にごみが沖合いに流れずに流入するのはなぜか。

回答：出水時に大和川から供給されるゴミの量が増加することが一つの理由として挙げられる。また、計算結果では平水時においても大和川の流速が大きいとき、大和川から北泊地に回りこむ流れが示されている。出水時には河川流速が増加することから、回り込む流れが発生し、その流れに乗ってゴミが流入すると考えられる。

計算対象領域の北側と南側の水質では現地調査では異なる値が測定されているが、計算では一様と設置している。その妥当性は？

回答：本計算では、北泊地の流動を主眼に考察しており、北泊地内の水質の再現性が確保されていることから、一様条件で妥当であると考えられる。

計算結果において、北泊地開口部における交換流量の1潮汐間のマスバランスは取れていたか。

回答：西風条件ではほぼバランスは取れているが、無風、東風の両条件では流入量のほうが大きい値を取っている。

討議[嘉名光市 准教授]

私見で北泊地の環境改善方法を提案せよ。

回答：環境改善技術としては、北泊地における生物活性や鉛直循環が微小であることを考慮して、それぞれを高める効果が期待される浅水化が適当であると考えられる。また、浅水化するために必要な土砂については、大和川で定期的に行われている浚渫土砂を利用することが望ましいと考える。