

番匠川河口域における流動構造と 水質変化の関係

RELATIONS BETWEEN FLOW PATTERNS AND WATER QUALITY IN THE BANJO ESTUARY

平島英恵¹・矢野真一郎²・中茂義晶³・井上徹教⁴・小松利光⁵・井芹 寧⁶・
東野 誠⁷・高見 徹⁷・西川勝義⁸・荒巻重則⁸

Hanae HIRASHIMA, Shinichiro YANO, Yoshiaki NAKASHIGE, Tetsunori INOUE,
Toshimitsu KOMATSU, Yasushi ISERI, Makoto HIGASHINO, Tohru TAKAMI,
Katsuyoshi NISHIKAWA and Shigenori ARAMAKI

¹学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

³工修 国土環境株式会社 名古屋支店 (〒455-0032 愛知県名古屋市港区入船1-7-15)

⁴正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶正会員 農修 西日本技術開発株式会社 環境部 (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁷正会員 工博 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒870-0152 大分市大字牧1666)

⁸国土交通省九州地方整備局佐伯河川国道事務所 (〒876-0813 大分県佐伯市長島町4-14-14)

In the Banjo River (Saiki, Oita), the population of clam drastically decreased after 1994 and has not been recovered yet. In order to make the reason clear some field surveys on water quality (:DO, salinity, water temperature, etc.), sediment quality and flow patterns were carried out from 2003 to 2004 in the Banjo estuary and Saiki Bay. Measurement results by ADCP showed the dominant flood current through the shorter navigation channel and the dominant ebb current through the longer one. In addition, water body tended to be stagnant in a neap tide and oxygen deficiency was measured in the longer channel. It was confirmed that temporal variation of DO concentration in the Banjo estuary depended on both flow patterns of tidal current and a redox conditions in the sediment.

Key Words: flow pattern, dissolved oxygen, sediment, field survey, Banjo River

1. はじめに

近年, 有明海など日本各地のアサリ産地で漁獲量の減少が続いている. その原因としてさまざまな要因が指摘されている¹⁾が, 水域をとりまく環境条件がそれぞれ異なるため, その解明には多くの事例的研究が必要とされている. 本研究で対象とする大分県佐伯市の番匠川河口域もかつてはアサリやクルマエビの良好な漁場であった. しかし1994年ごろからアサリの漁獲量が激

減し, 現在もほとんど回復していない²⁾. これまでの研究により, アサリ資源量の低下は冬季の減耗と稚貝の新規加入直後の死亡によるものが主な原因と考えられている³⁾. また, 河口干潟には場所によって高濃度の有機物を含む底泥が堆積しており, 水理条件によっては水・底泥境界面でのDO濃度は水中の50%以下となり, 底泥内部は嫌気状態となるため, アサリの生息に適さない環境にある⁴⁾. 番匠川河口域の水質はBODが 1.3mg/L 以下と比較的良好な状態を保っている⁵⁾が, 2002年夏

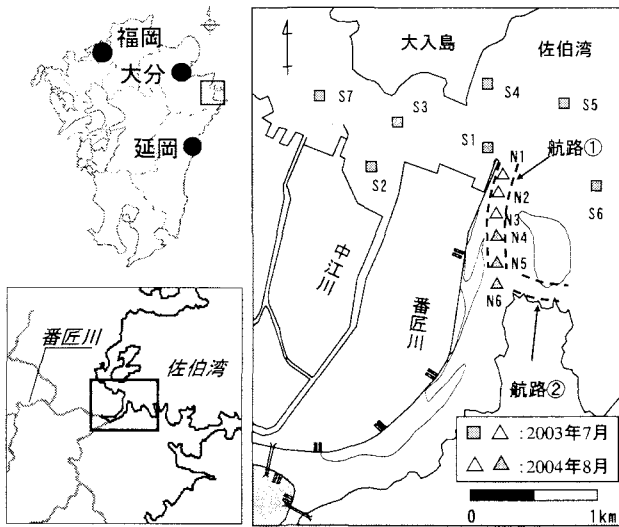


図-1 番匠川河口域の概略図

季に行った現地調査では、D0の低い水塊の発生が確認された。この低酸素の水塊はアサリの個体数密度が最も多い地点付近で確認されており、その挙動次第では重大な生息阻害要因となり得る。そこで本研究では、現地観測により番匠川河口域の流動特性を明らかにし、それが低酸素の水塊の挙動に与える影響について考察を行った。

2. 調査対象水域について

番匠川は大分県南海部郡本匠村三国峠を水源とし、久留須川、井崎川、堅田川などの支川を合わせ佐伯湾に注ぐ幹川流路延長38km、流域面積464km²の比較的小規模な一級河川である。平水流量は1.74m³/s程度と少なく、河口域は弱混合型の混合形態を持ち、感潮域は河口から上流約6.8kmの潮止堰までである。

河口の左岸側は佐伯市街として発展し、沖合へと埋め立てが進んでいるが、河口から上流約2.5kmまでの範囲には河口干潟も残されている。一方、右岸側はリアス式であり開発が進んでおらず、河道の水深は最大8m程度と深くなっている。また、河口には砂州が形成されており、過去のアサリの漁獲は主にこの砂州周辺から水揚げされていたものである。砂州の沖側は佐伯湾に向けて水深20m程度になるまで急に深くなっている。昭和62年(1987)には左岸側に導流堤が建設され、番匠川河口の左右岸の非対称性がさらに強められた²⁾。

加えて、漁船など小型船舶の航路確保のため、砂州周辺に2本の航路がL字型に浚渫されている(図-1)。航路①は砂州西側の水深1~2mの部分に約1.5m程度掘り下げており、比較的浅い。幅は50~100mであるが、佐伯湾へ出るまで1km近い長さがある。これに対し砂州南側の航路②は砂州と岬に挟まれており河岸の勾配も急で、水深は4~8m程度と深い。また、150~200mの幅がある一方、長さは400m程度と短い。

表-1 現地観測の実施状況(○：実施した項目、×：実施していない項目)

観測日	2003年		2004年
	7/24	9/24	8/24
潮汐条件	長潮	中潮	小潮
観測場所	佐伯湾・航路	河口	河口
ADCP曳航観測	×	○	○
水質観測	○	○	○
係留系設置	×	○	○
AVS	○	×	×

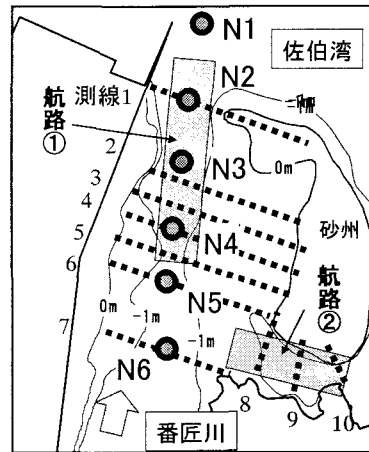


図-2 流況観測の測線

3. 現地観測の概要

一連の観測は2003年7月から2004年8月に渡って行われた。観測日と観測実施項目を表-1に示す。

(1) 2003年7月24日：河口と周辺海域(佐伯湾)の水質観測

本調査においては、潮汐による水質と水理条件の変化の影響を小さくするため、観測は潮汐の干満差が比較的小さい長潮の日を選んだ。調査対象地点は、図-1に示す佐伯湾内7点(S1~S7)と河口航路①内3点(N1~N3)の計10点である。これらの地点において、多項目水質計(YSI ナノテック社製、YSI6600)により水質観測(塩分、水温、D0)を行った。また、エクマン・バージ採泥器により採取した底質の表層を1cmの厚さで採取し、H₂S検知管(ガステック社製、201H)を使用してAVS分析を行った。地点N2で干潮直前の8:40に1回目の水質観測と採泥を行った後、佐伯湾内の水質観測と採泥を行った。その後、上げ潮時の13:36にN1、N2、N3で2回目の水質観測を行った。

(2) 2003年9月24日：河口域の水質・流況観測

満潮からの1潮汐間に計4回、小型漁船の側舷に取り付けた超音波ドップラー流速計(RD-Instruments社製、WorkhorseADCP1200kHz)とDGPSを用いた曳航観測により、河口域の断面流速分布を測定した。ADCPは層厚40cm、プランク5cmに設定した。測線は図-2に示した測線1、2、

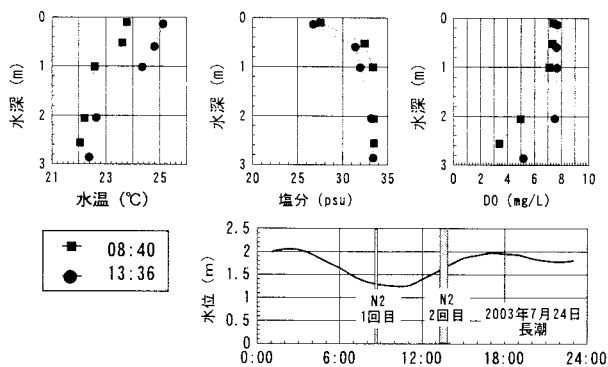


図-3 2003年7月の航路①内地点N2における水質の鉛直分布，ならびに潮位変化

5, 7, 8, 10の計6本である。また、前日の9月23日15時から24日15時までの24時間、N5, N6の2地点に小型メモリーDO計(アレック電子社製, COMPACT-DOW), 塩分水温計(同COMPACT-CT), ならびに電磁流速計(同COMPACT-EM)を水底から30cm上に係留した。地点N6には潮位測定用に水深計(同MDS-MkV/D)も設置した。DO計は10分ごとに1秒間隔で60回, 塩分水温計, ならびに水深計は毎分1回, 電磁流速計は毎秒1回計測を行うように設定した。

(3) 2004年8月24日：河口域の水質・流況観測

干潮からの1潮汐間に計6回, 2003年9月と同様の方法で河口域の流速分布を測定した。測線は河口近傍の測線2~10の計9本であり, 2003年の観測に較べ詳細な流速分布を得た。同時に図-2に示す計6地点において, 多項目水質計により水質観測を行った。さらに, 底質の表層を1cmの厚さで採取し, H₂S検知管によるAVS分析を行った。

また, 前日の8月23日14時から24日19時までの29時間, N2, N5, N6の3地点に, 塩分水温計, 電磁流速計を水底から30cm上に係留し, N2には水深計も併設した。

4. 調査結果と考察

(1) DO低下の原因について

別途2002年7月に地点N6より上流側で行われた河道内の水質調査時に, 地点N6の底層においてDOが2~3mg/L程度の貧酸素水塊を確認した。そこで, 2003年7月に佐伯湾と航路①で水質調査を行った。

佐伯湾の水面付近の水温は24℃程度, 全地点とも水深10m以深では約21.3℃と一定で低塩分層もなく, 強い成層は見られなかった。DOは最も深い地点でも6mg/L前後であり, 湾内には貧酸素水塊は認められなかった。

しかし, 河口航路①内の地点N2における1回目の観測(8:40実施)では底層でDOが大きく低下していた。図-3に地点N2の水質鉛直分布を示す。水面から1m下まではDOが7mg/L以上の飽和状態であったが, 水深1mから

底層にかけてDOが急激に低下し, 水深2m位置で4.97mg/L (69.3%), 底層(水深2.6m)では3.38mg/L (47.1%)となり低酸素の状態にあった。

一方, 上げ潮に転じた後の地点N2の観測(13:36)では, DOは底層でも5.2mg/L (72.8%)に回復していた。したがって, 上げ潮によってDOが豊富な海水が佐伯湾から航路内へ流入し, DOが上昇したものと考えられる。

このとき, 地点N1の底質は砂質であったが, その他の地点は泥質であった。底質の嫌気化の指標となるAVS濃度は, 佐伯湾の測点S1~S7においては全体的に低く, 最も高い地点でも0.25mg/gDWであった。しかし, 低酸素化が見られた航路①内の地点N2において, AVS濃度は1.84mg/gDWと非常に高い値であった。2mg/gDW以上のAVSはアサリの生態に影響を与えるとの報告があり¹⁾, この地点で発生する硫化物が, アサリの生息に悪影響を及ぼしている可能性がある。また, 別途室内実験により地点N2のSODを計測したところ, 2.44g/m²/dと高かった。以上のことから, 番匠川河口域で観察された低酸素の水塊は, 周辺海域から遡上したものではなく, 航路①内の底質が嫌気化し, 航路内においてDOが消費された結果生じたものと考えられる。

(2) 番匠川河口域の水質変動

a) 係留系による時系列データ

図-4に, 2003年9月23~24日(中潮)の地点N5, N6において係留系から得られた時系列データを示す。両地点の底層では, 潮位変動に応じて流向が変化していたことが見て取れる。また, 地点N5, N6ともに, 上げ潮時には南西方向の, 下げ潮時には北東方向の流向が卓越していた。これは地点N5, N6の近傍にある航路②から流入する流れが存在し, その影響を受けたためと考えられる。さらに, 日潮不等による潮差が小さい下げ潮時には流速は非常に小さく, N5で1cm/s程度, N6で3cm/s程度となっていた。上げ潮時も上げ幅が小さい時には流速は小さく, N5では上げ潮途中の2:00以降から流入が始まっていた。N6での流速も最大15cm/s程度に留まっていた。

塩分と流速の変化を比較すると, N5においては24日8:00までは流れが弱く塩分が一定であることから, 水塊が停滞していたことが伺える。一方, N6では23日23:00(干潮)以降24日7:00まで水路②を通じて流入した外海水により塩分が上昇していた。その後, 潮差の大きい下げ潮流によりN5, N6とも24日11:00まで塩分が下がるが, 上げ潮に転じるとN5では若干上昇した。なお, 上流のN6では下げ潮流が続いていることから, 甘い水が流下しN5の塩分を下げていると言える。N5とは1時間程度の位相差の遅れを持ってN6でも上げ潮に転じ, 水路②を通じて流入した外海水により塩分が上昇していた。24日11:00から13:00までのN5における塩分の

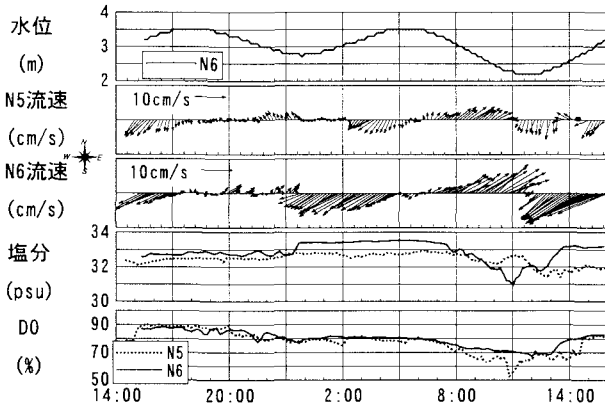


図-4 2003年9月23～24日(中潮)の時系列データ

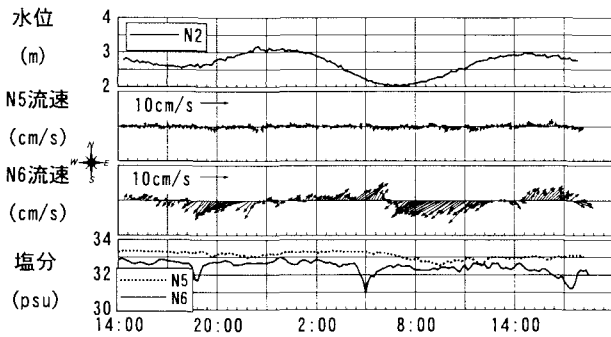
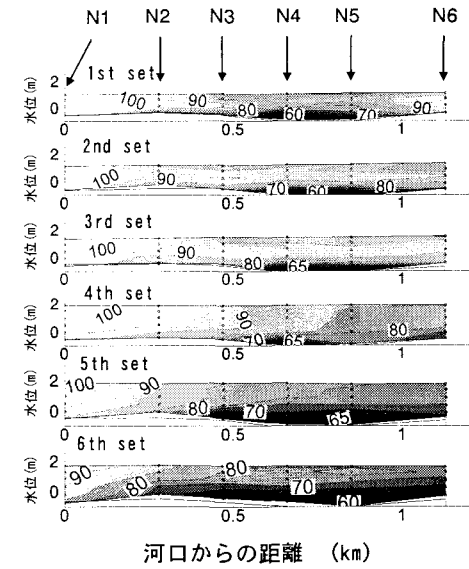
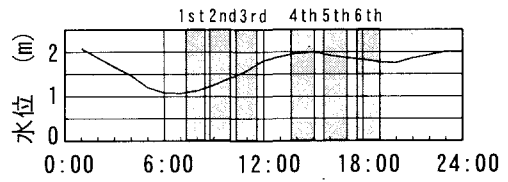


図-5 2004年8月23～24日(小潮)の時系列データ

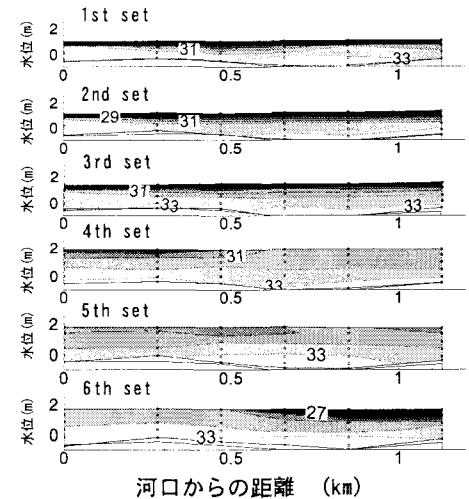
低下は、得られた流速データからのみでは現象を説明できないが、3次元的な複雑な流動構造が存在している可能性があり、今後詳細に調べる必要がある。

DOは地点N5、N6の両地点とも23日17時の潮差の大きい上げ潮後の満潮時で90%程度と最も高くなり、その後、下げ潮時に減少する傾向が見られた。特に、N5では24日の6:00から11:00の間にDOが大きく低下していた。これは、N6などの上流側からDOの低い水塊が流下してきたことと、N5ではN6に比べ流速が小さく滞留時間が長いため、底泥によって酸素が消費されたためと考えられる。また、N5で11:00頃にDOが急激に低下していたが、この時N5の流速は下げ潮から上げ潮へ転流する憩流時であった。その後の上げ潮により、DOが回復したことからも、DO濃度は移流によっても変動していると考えられる。同様に、N6でも上げ潮流によりDOが上昇していた。

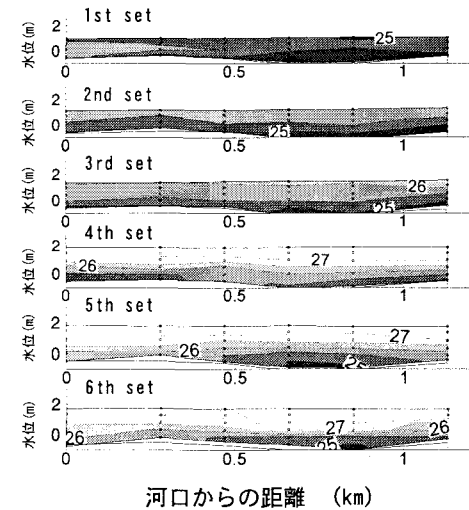
図-5に、2004年8月23～24日(小潮)の地点N5、N6において係留系から得られた時系列データを示す。N5の流速は2cm/s程度に留まり、潮流の変動は非常に小さかった。それでも上げ潮時には北東方向、下げ潮時には南西方向の流れとなっており、航路②を通過する流れの影響を受けていた。N6での底層流速も航路②の流れの影響を強く受けており、流速は最大で6.5cm/s程度であったが、2003年9月の中潮時と比較すると半分程度と



DO (%)



塩分 (psu)



水温 (°C)

図-6 2004年8月24日(小潮)の水質空間分布

なっていた。

また、N6における塩分濃度は干潮にあわせて大きく低下することが特徴である。これはN6が河道に近く、航路①の前面に位置しているため、河川水が流下する滞筋に当たり、河川水にさらされやすいためと考えられる。

b) 水質変動と潮汐の対応

図-6に、2004年8月24日(小潮)に実施した水質観測によるD₀、塩分、水温の縦断分布を示す。観測時間帯は、図-6に示す計6回である。

この日は、17~25psuの淡水層が表層に薄く広がっており、水深0.5m以深で32~34psu程度の海水層が見られた。また、この図より上げ潮によって佐伯湾からD₀が過飽和の海水が流入している様子がわかる。地点N4、N5の底層にあったD₀60%以下の低酸素の水塊は、水深がN4からN5にかけて深くなっていることもあり、上げ潮中でも底層に留まっていた。その後潮が引いていくにつれ、比較的D₀の低い水が、上流から河口へ流下していく様子が見てとれる。同時に、上げ潮時に縮小していた底層のD₀65%(4.5mg/L)以下の水塊は、下げ潮時にN3からN6にかけて拡大していた。観測されたD₀の最低値は3回目のN5の底層で、48.2%(3.3mg/L)であった。下げ潮時に河口域のD₀が全層で上流から低下していく同様の現象は、利根川河口域でも確認されている³⁾。

2004年の河口域の底質分布は、2003年に観測した分布とは異なっており、N3、N4、N5の3点のみが泥質であった。AVS値はN5で最も高く、1.7mg/gDWと嫌気的狀態であった。特に、底層でのD₀が低いN5では、観測船が打ったアンカーに海藻が大量に絡みつく様子が見られるなど流動の停滞が推測され、底質悪化や酸素消費に参与している可能性が考えられる。前述のとおり、2002年7月には貧酸素水塊が地点N6で見られている。また、同じ時に上流の河道部で底質が泥質であった地点も確認されている。したがって、河口域で見られる低酸素の水塊は、上流からの移流と河口域内での酸素消費との複合的な原因によるものと考えられる。

(3) 河口の流動特性

ADCPの測定限界のため、水面下約80cmまでと底面から上約20~70cmまでの流速は測定できない。観測当日の塩分分布は、ほぼすべての地点において水面下80cmより下層で30psuを超えていたため、ADCPによって観測された流速はほぼ海水の動きであると考えてよい。また、上流9kmで潮止堰上流に位置する番匠橋における河川流量は両観測日とも1~2m³/sと平水流量程度であり、淡水の流入は多くはなかった。

a) 2003年9月中潮期の流速分布

下げ潮時と上げ潮時の水深平均流速分布を図-7に示す。下げ潮時には測線7から沖へ扇状に一樣に広がるような流速分布が見られた。測線5でも30cm/s程度と比較的大きな流速があり、測線8とほぼ等しい値であっ

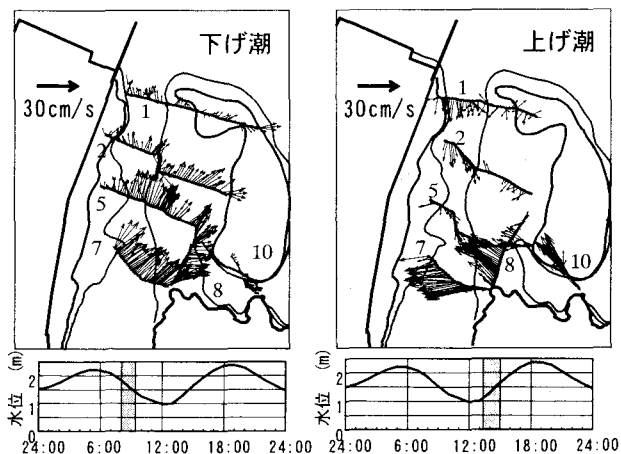


図-7 2003年9月(中潮)の水深平均流速分布

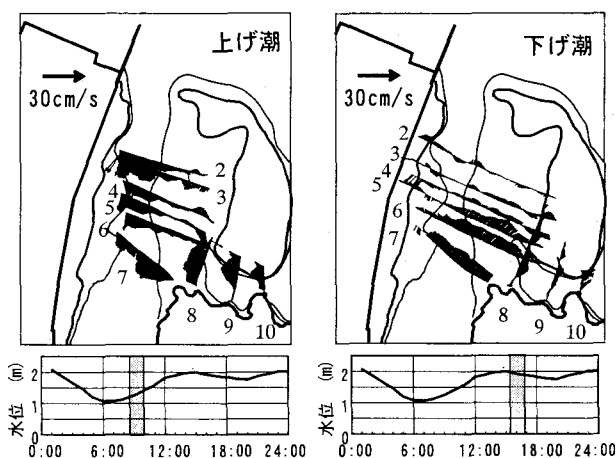


図-8 2004年8月(小潮)の水深平均流速分布

た。上げ潮時には測線8および10の流速が測線1~5に比べて大きいことが分かった。測線8では40cm/sを超える流速が見られたのに対し、測線5では10cm/s程度であった。

このときの流量(ADCPによって実際に観測された領域の流量)は下げ潮時に測線5で123m³/s、測線8で36m³/sで、流量比は3.4倍であったのに対し、上げ潮時には測線5で14m³/s、測線8で93m³/sで、流量比は0.2倍であった。したがって、上げ潮時に航路②を遡上した海水が下げ潮時に航路①を下っていく、流れの非対称構造が見られた。

b) 2004年8月小潮期の流速分布

上げ潮時と下げ潮時の水深平均流速分布を図-8に示す。上げ潮時には測線2~6は左岸側で最大17cm/sと比較的大きな流速となっており、左岸側から海水が遡上している様子が見て取れる。したがって、海水が航路①を通じて遡上してきていると推察される。測線2~6の右岸側は砂州のため水深が浅く、波が立っており、流れが不規則で流速も小さかった。測線8~10では流速は15cm/s程度であるが、水深が大きく流量が多いため、測線7の右岸側の流速が大きくなっていた。2003年9月の中潮

期における測線7の流れは、航路②から流入する南西の強い流れのみが観測されたが、小潮期では、航路①からの流れと航路②からの流れが合流している様子が見られる。

下げ潮時は、日潮不等により潮差が13cmと小さかった。そのため測線2～4の流速は非常に小さく、ほぼ停滞していた。しかし、測線5～10では右岸側を中心に10cm/s程度の流速でゆるやかに扇状に広がる流れとなっていた。

上げ潮時の流量は測線5では18 m³/sであったのに対し、測線8では55m³/sと流量比は約0.3倍であった。下げ潮時には測線5の流量は39 m³/s、測線8では22 m³/sと流量比は1.8倍であった。また、N5を通る測線6の水深平均流速は上げ潮時で15cm/s程度であったが、前述の係留系による結果から、底層の流速は終日ほぼ停滞していたことが確認された。上げ潮時のN5では表層から中層で海域から流入したため、D0が高い値を示したが、底層では流入がなかったため低酸素の状態が維持されたと考えられる(図-6)。

(4) 流況とD0変動の関連性についての考察

以上の結果を総合すると、番匠川河口域の特徴は次のようにまとめることができる。

河口域の流動構造については、基本的には上げ潮時に航路②より外海水が流入し、下げ潮時に主に航路①から流下する。しかし、小潮時のように航路②の潮流が弱まった時には相対的に航路①からの流入が増える場合もある。したがって、日潮不等がある場合などは潮差によって外海水と河口域の停滞水との交換特性が変わる。また、航路①は佐伯湾まで1km程度の延長を持つことから、半潮汐間(6時間)に航路内の停滞水が完全に入れ替わるには平均して5cm/s以上の流速が必要とされる。今回の観測では潮流が最も大きくなることが期待できる大潮期のデータがないため大潮期については議論できないが、小潮と中潮のように潮差が小さいときには航路①の底層ではこの条件は満足されておらず、底層水の停滞が考えられる。

次に、酸素消費が大きい水域として、底質が泥質でありAVS値が高い航路①内と考えられる。また、地点N6より上流においても、これまでの観測から底質が泥質の地点があるとわかっており、酸素の消費が大きい可能性が考えられる。したがって、上流域での酸素消費が大きく、潮差が小さい状態が続いた時には、航路①内へ低酸素の水塊が供給され、それが停滞することで貧酸素化が加速することが推測される。

また、流れが弱い場合には、アサリが利用すると考えられる水・底泥境界面でのD0濃度が水中の50%以下になる場合があることから⁴⁾、低酸素の水塊が停滞することがアサリに与える影響は、観測値から推定される以上に大きいと推察される。

5. まとめ

本研究では、番匠川河口域の流動と水質変動について、現地観測に基づいて以下のような知見が得られた。

- (1) 番匠川河口域で見られる低酸素化は、佐伯湾からの遡上によるものではなく、航路①内での底質による酸素消費と河川上流域からの移流との複合的な原因によるものである。
- (2) 航路①内では、上げ潮時に表層から中層でD0が上昇するが、底層では低酸素状態が維持される。下げ潮時には上流域よりD0の少ない水が流下してくる。
- (3) 中潮期、小潮期とも、上げ潮時に航路②を遡上した海水が下げ潮時に航路①を下っていく、流れの非対称構造が見られた。

今後は、河川部や干潟を含めた詳細な低酸素水塊の挙動や、それがアサリに及ぼす影響について、継続的な調査やシミュレーション等による検討が必要である。また、これまでの知見を総合して、アサリ資源量を回復するためのシナリオを作る必要がある。

謝辞:本研究の一部は、土木学会水工学委員会河川懇談会の共同研究「汽水域の環境特性に関する研究(番匠川)」の一環として行われたものである。佐伯河川国道事務所の小犬丸智明氏、時任勝宏氏、東京大学清野聡子助手には研究全般にわたってご協力頂いた。現地観測では九州大学大学院博士2年齋田倫範氏、同修士2年齋藤正徳氏を始めとする、同環境流体力学研究室の学生諸氏にご助力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 増殖場造成計画指針編集委員会編：増殖場造成計画指針－ヒラメ・アサリ編－平成8年度版、(社)全国沿岸漁業振興開発協会、pp.136-157、1997。
- 2) 清野聡子、小松利光、安達貴浩、井上徹教、高見徹、中茂義晶、別府五男、郡山貞次：水産生物資源の変動に関する複合的要因の解明過程における課題－大分県番匠川河口干潟のアサリを例として－、環境システム研究論文集、第30巻、2002。
- 3) 高見徹、東野誠、井上徹教、中茂義晶、安達貴浩、清野聡子、別府五男、郡山貞次、小松利光：河口干潟の環境と水産生物資源の変動に関する現地観測－大分県番匠川河口干潟のアサリを対象として－、水工学論文集、第47巻、pp.1081-1086、2003。
- 4) 東野誠、高見徹、中茂義晶、平島英恵、井上徹教、清野聡子、高木章次、荒巻重則、小松利光：底質環境が河口干潟の生態系に及ぼす影響－大分県番匠川河口干潟のアサリを対象として－、水工学論文集、第48巻、pp.1303-1308、2004。
- 5) 鈴木伴征、石川忠晴、銭新、工藤健太郎、大作和弘：利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動、水環境学会誌、第23巻第10号、pp.624-637、2000。

(2004.9.30 受付)