

大阪湾阪南港の浚渫窪地周辺における流動および水質の現地観測

Field Surveys of Currents and Water Quality around Dredged Hollow Places in Port of Han-nan, Osaka Bay

中辻啓二¹・入江政安²・柴田剛志³

Keiji NAKATSUJI, Masayasu IRIE and Takeshi SHIBATA

There are lots of dredged hollow places in Osaka Bay, which had been dredged for reclamation at industrial areas in 1960's and 1970's. The dredged hollows make water movement stagnant and water quality worth. Dissolved oxygen is deficient near the bottom. In recent years, several times of "blue tide" which are the oxidation of hydrogen sulphide following the upwelling of anoxic water have been observed. It is not clear how much contribution such hollow places makes to declining water quality in the head of the bay. Field surveys of currents and water quality are carried out. An average current velocity is 4 cm/s in the hollows as same as that of the enclosed port area. There is not a clear difference between the water quality in the hollow places and that around the places.

1. はじめに

高度経済成長期には、産業の発展に伴う土地需要に対応するため、大規模な埋立地の造成が行われた。大阪湾においても例外ではなく、神戸港から阪南港にかけて多くの埋立地造成が行われた。その埋立地の造成材料として、造成予定地のごく近傍の海底から土砂が採取された。大阪湾にある浚渫窪地の多くはこの埋め立てのための土砂採取によるものである。近年では、大阪湾においても貧酸素水塊の湧昇に伴う青潮が度々観測されて(中辻ら, 2003)、浚渫窪地と青潮の関連性を指摘する声大きい。東京湾においても、浚渫窪地内部において青潮の源である硫化物を含む水塊が恒常的にかつ高濃度で存在する(佐々木ら, 1996)とされ、また、一部の青潮の発生に浚渫窪地を起源とする貧酸素水塊の湧昇が寄与した報告されている(五明ら, 1998)。最近、大阪湾における青潮が一般的に知られるようになって、青潮の原因が浚渫窪地であるかのような報道もされている。しかし、実際には、大阪湾における青潮の発生位置と浚渫窪地の分布は異なることが多い。浚渫窪地における水質悪化が青潮の直接の要因であるとは一概に言えない。大阪湾の浚渫窪地が湾奥部の貧酸素化や青潮の発生に及ぼす影響についてほとんど解明されていないことから、本研究では、阪南港北部に存在する浚渫窪地を対象として、流動および水質の現地観測を実施し、浚渫窪地周辺の流動構造と窪地内外の水質特性を明らかにすることを目的とする。

2. 現地観測の概要

(1) 浚渫窪地の概況

大阪湾における浚渫窪地は神戸港から大阪港、堺泉北港、阪南港と広範囲におよぶ。なかでも、大阪湾東岸沿いに多く存在する。この理由のひとつには、兵庫県側においては、背後の山地を削って宅地造成をするとともに、土砂を海上に輸送し、埋立地を造成する「神戸方式」が採られたことにより、海底浚渫を免れたことが挙げられるであろう。本研究では、大阪湾東岸沿いの中でも、港内に大小いくつかの浚渫窪地が点在する阪南港1区において観測を実施した。対象としたのは図-1に示す阪南2区埋立地北および大津川河口部にある2つの浚渫窪地とその周辺である。阪南2区埋立地北にある浚渫窪地は最大水深は約17.5m、規模は南北約1000m、東西約800mであり、周辺海域との水深差は6~8mである。大津川河口部にある浚渫窪地は最大水深が約17m、四方約200mの小規模なものである。周辺海域との水深差は5~6mである。

(2) 流動調査の概要

浚渫窪地内部およびその周辺の流動構造を明らかにするために、対象浚渫窪地を中心として直交するように2測線を設定した。東西方向に沖へと伸びるLine 1とそれに直交し、大津川河口部の浚渫窪地を通るLine 2の2測線である。調査日は2006年9月23日および10月21日の2日間で、ともに日潮不等の小さい大潮である。計測はRD Instruments社製ADCP(1200kHz)を用いて行い、1潮汐周期を考慮し、12.5時間の計測を実施した。12.5時間中にLine 1およびLine 2を1週回につき1.5時間かけて、全8周回計測した。9月23日の満潮は7時3分、干潮は13時18分で最大潮位差(淡輪)は105cmであった。午前中は風速3m/s前後の弱い北風であったが、15時頃より観測終了まで7m/s以上の北風が吹き続けていた。

1 フェロー 工博 大阪大学教授大学院工学研究科地球総合工学専攻
2 正 会 員 博(工) 大阪大学助教大学院工学研究科地球総合工学専攻
3 学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

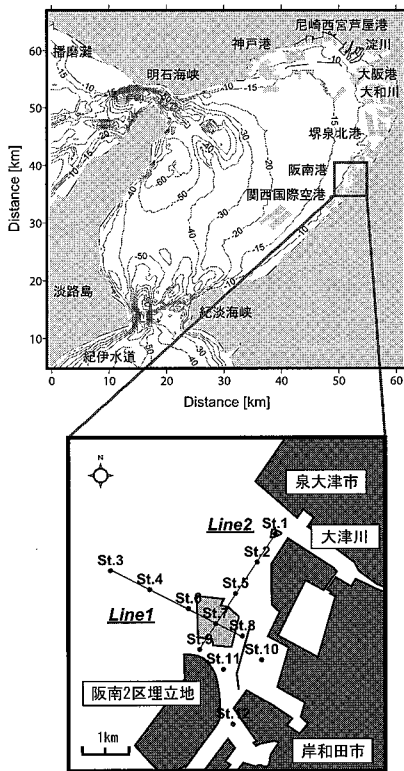


図-1 観測地点（下図中央薄灰色部が浚渫窪地）

また10月21日の満潮は6時19分、干潮は12時14分で最大潮位差（淡輪）は81 cmであった。この日も午前中の風は弱かったものの、15時頃より風速7 m/s以上の北風が観測された。得られたデータは空間方向には距離補間、時間方向にスプライン補間を施した。また、一潮汐間の平均流を算出した。

(3) 水質調査の概要

水質調査の観測点は流動調査の2測線上とその周辺の12地点とした。St.1, St.7, St.11, St.12が浚渫窪地内に該当する。観測日は2006年8月31日、9月9日、9月23日、10月8日、10月21日、11月4日の計6回である。流動観測と同時に実施した9月23日、10月21日の2日間はSt.1, St.3, St.5, St.6, St.7の5地点のみの測定である。計測は各地点で船を係留し、多項目水質計（アレック電子社製 ACL220-PDK）およびDO計（Hydrolab社製 QuantaG）を垂下し、塩分（psu）・水温（℃）・溶存酸素濃度（mg/l）の鉛直分布を計測した。さらに各地点において水表面から1 mおよび海底面から1 mの2水深において採水を行った。この採水による分析項目はT-N・NO₃-N・NO₂-N・NH₄-N・T-P・PO₄-Pである。なお、本論文では、溶存酸素濃度が3 mg/l以下となる状態を貧酸素状態、溶存酸素濃度が1 mg/l以下となる状態を無酸素状態と呼ぶことにする。

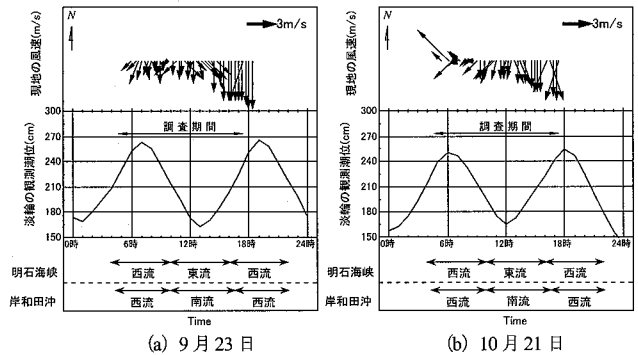


図-2 観測日の風向・風速と潮位

3. 阪南港浚渫窪地周辺の流動構造

阪南港1区の付近の流れは明石海峡の潮流の変動に合わせて変化する。明石海峡と阪南港1区での流れの変化の概要を図-2に示す。潮流図（海上保安庁、2005）によると明石海峡で東向き流れになるときは、流入した水が湾奥部沿岸に沿って流れ、紀淡海峡方面に流れていく。阪南港1区付近は南西向きの流れとなる。明石海峡で西向き流れになるときは、阪南港1区より南側では北向き流れ、阪南港1区以北では直接明石海峡に向かう西向き流れとなっている。これら湾内の流れの影響を受け、阪南1区で最も流れが強いのは干潮時と満潮時の1時間後となる。また、以上のような潮流の非対称性から、今回対象とした海域を含む大阪湾東岸沿いには「東岸恒流帯」と呼ばれる残差流が現れ、その流向は南西となる。

(1) 干潮時の流動構造

図-3は9月23日での干潮時（明石海峡東流最強1時間前）の水深1 mおよび10 mの水平分布、Line 1での鉛直分布を示す。この観測日には密度成層は消滅していた。干潮時から上げ潮時において、大阪湾東岸では海岸線に沿って南向きの流れとなることが知られているが、観測結果も窪地より沖側では全層で南西に向かって一様な流れとなっている。観測範囲の一番沖側の観測では流速は20 cm/s以上の流速が出ており、港内に近づくにつれて弱まり、10 cm/s前後の流速となっている。窪地の上部については、窪地西側よりはかなり弱まっているものの、概ね南南西への流れが見られ、窪地凹部内でもこの向きの流れは変わらず、5 cm/sの流速となっている。

沿岸方向のLine 2では、全体的に流れが弱くなり、上層では卓越した流向は認められない。水深2～3 m付近では弱いながらも南南西への流れへと変化している。2区埋立地沖の窪地、航路、大津川河口域の窪地を含めて水深8 m以深の流れは、南西で流速5 cm/sではほぼ一様となっている。

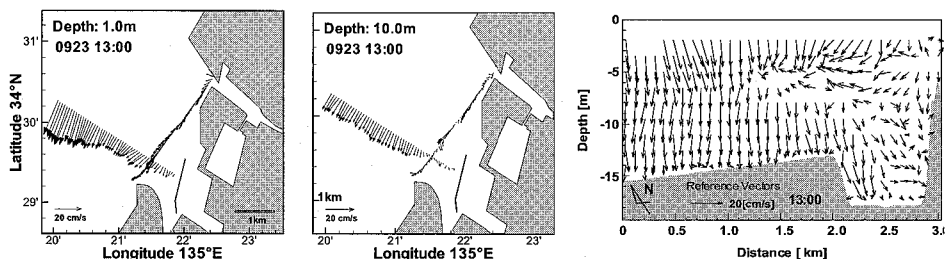


図-3 干潮時の流動の水平分布 (左; 水深 1m, 中; 水深 10m) および Line 1 における縦断分布 (右)

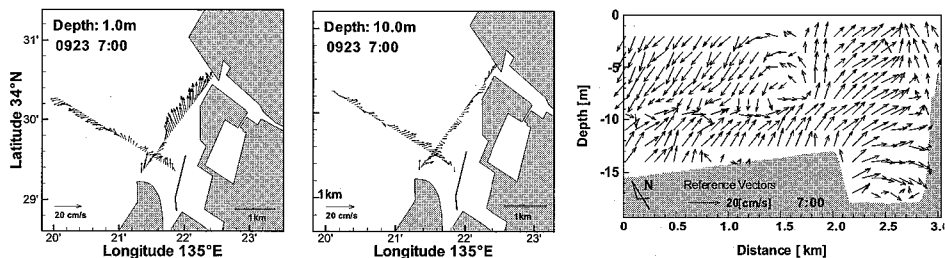


図-4 満潮時の流動の水平分布 (左; 水深 1m, 中; 水深 10m) および Line 1 における縦断分布 (右)

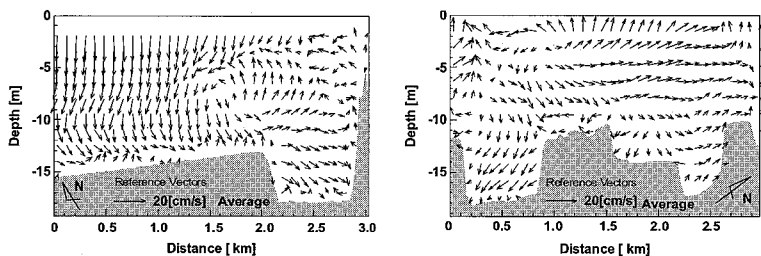


図-5 平均流の縦断分布 (左; Line 1, 右; Line 2)

(2) 満潮時の流動構造

図-4 は 9 月 23 日の満潮時 (明石海峡西流最強 1 時間前) の水深 1m および 10m の水平分布, Line 1 における鉛直分布を示す。港奥の表層から中層では海岸線に沿って北向きの流れであり, 沖に出ると西への流れる傾向となっている。水深 10m では流れは弱いものの全体的に東向きの流れで, 港内へと流れ込む向きとなる。窪地内では南東への流れである。

鉛直分布を見ると, 窪地から西方 500m より沖側では水深 8~9m 前後を境に 2 層構造となっており, 上層は南西への流れで流速 7~8cm/s 前後, 下層は北東流で流速 7~8cm/s 前後と逆転している。窪地上では, 窪地外下層と同じ水深においては沖側と同様に, 北東から東方向に流れ, 上層においても北東への流れとなっているが, 窪地凹部内については南東の流れとなっており, 流速は 10cm/s 弱である。

(3) 平均流の流動特性

図-5 に Line 1 および Line 2 における平均流の鉛直分布を示す。ここで, 平均流とは得られたデータを時間方向

にスプライン補間した後, 12.5 時間平均したものを指す。阪南 2 区の浚渫窪地以西では全層で南西へと流れ, 東岸恒流帯と一致する。表層では 20cm/s 程度の流速がある。干潮時には全層で南西方向, 満潮時には 2 層構造となっていたところからも分かるように, 流れの非対称性により, 水深が深くなるにつれて平均流速は小さくなっている。一方, 北側の埋立地により流れを妨げられている岸近くの海域では平均流速が 5cm/s 程度となり小さくなっている。表層では南へと流れるが, 水深 5m 付近において大津川河口部の浚渫窪地の付近では北へと向かう流れが見られる。この水深では阪南 2 区北の浚渫窪地上の流れは非常に弱くなっている。浚渫窪地内部においては, 流れが完全に停滞しているわけではなく, 平均流速 4cm/s 程度で南東向きの港内へと流れ込む流れが見られる。

(4) 窪地凹部の流れ

対象とした浚渫窪地は周辺の人工島や防波堤により流れの制限を受ける海域にあったが, 浚渫窪地内部の流速は最大 8cm/s, 平均 4cm/s 程度であった。これには鉛直方向の密度差がほとんど無かったことも影響している

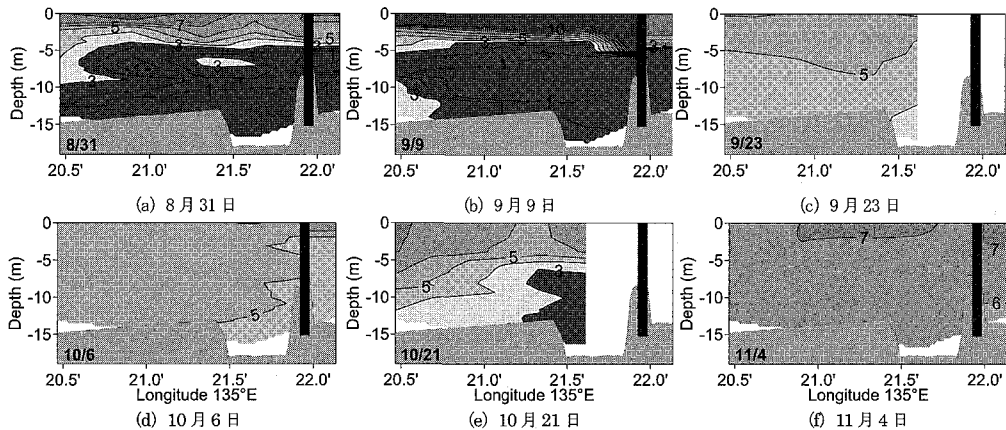


図-6 Line 1 における溶存酸素濃度 (mg/l) の鉛直分布 (底面付近の空白部は海図上の水深と観測時の水深の差によるものである)

と考えられる。これらの流速の値は、大阪湾奥部に位置する港内の底層付近の流速と比べても、極端に小さいわけではない。したがって、窪地凹部であるからといって、湾奥に散在する閉鎖性水域と比べて海水交換がなされず、滞留しやすい環境にあるとは考えにくい。浚渫窪地内部の水質および底質が周辺海域の水質へ及ぼす影響は無視できないと考えられる。

4. 阪南港浚渫窪地周辺の水質構造

(1) 溶存酸素濃度の分布特性

図-6 に Line 1 における DO 濃度の鉛直分布を示す。図中灰色部は DO 3 mg/l 以下の貧酸素状態を示している。夏季の 8 月 31 日では、海水は沖合いから堤防まで水深 5 m 以深において貧酸素化しており、水深 10 m 以深において無酸素化している。しかし、埋立地による流れの妨げを受けない沖合いでは、水深 10 m 以深のみ貧酸素化している。9 月 9 日には、さらに貧酸素化し、浚渫窪地に関わらず一様に、水深 4 m 以深で貧酸素化し、溶存酸素濃度が 1 mg/l のラインは水深 6～7 m にまで上昇し、それ以下の水深で無酸素状態となっている。両日とも、水深 4～5 m に水温の成層強度の強い層があり、貧酸素水塊はその水深まで到達している。

9 月 23 日には、窪地内部も含めて全層で貧酸素化が解消されている。観測日の 1 週間前に大阪湾奥部沿岸において、青潮が観測されており、つまり貧酸素水塊が湧昇していた。阪南港より奥部に位置する尼崎西宮芦屋港では秋季におけるの貧酸素水塊の湧昇が起きるような気象擾乱は、密度の成層構造を弱め、貧酸素状態を緩和させる (入江ら, 2005) とされ、阪南港においても、同様に作用し、貧酸素化が生じにくい環境になったものと考えられる。10 月 6 日についても同様に貧酸素化しておらず、海底まで溶存酸素濃度が 5 mg/l に回復している。

10 月 21 日は再び貧酸素化している。図-6(e) においては窪地内部だけが特徴的に貧酸素化しているように見えるが、岸に平行な測線 Line 2 の鉛直分布では浚渫窪地の存在の有無に関わらず、港奥部において水深 7～8 m において一様に貧酸素化していた。これは 2006 年 10 月の気候が、平年に比べ気温が高く、さらに降雨が極端に少なかったためである。11 月 4 日には貧酸素水塊は完全に解消され溶存酸素濃度も海底まで 7 mg/l に回復していた。貧酸素水塊減退期において、浚渫窪地内部のみが貧酸素水塊解消が遅れるといった現象は確認できなかった。

(2) 栄養塩濃度の時空間変動

表-1 は浚渫窪地内の St.1、St.7 と浚渫窪地周辺の St.4、St.5、St.6、沖合いにある St.3 における底層の T-N・NO₃-N・NH₄-N・T-P・PO₄-P・DO の観測結果を示したものである。

底層付近が無酸素状態であった 8 月 31 日と 9 月 9 日における顕著な特性は底層の NH₄-N・PO₄-P の濃度が高くなっていることである。唯一沖合いの St.3 では低い濃度であったが、浚渫窪地内部とその周辺では大きな違いは認められなかった。これは無酸素状態により、硝化反応が起こらず、NH₄-N が残存しやすかったため、また、嫌気状態と高水温により、PO₄-P の底泥からの溶出が促進されたためと考えられる。

貧酸素状態を脱した 9 月 23 日および 10 月 6 日では、好気状態に移行したことにより、底層での NH₄-N の濃度が大幅に減少し、NO₃-N・NO₂-N が増加している。PO₄-P についても減少している。T-N・T-P は、St.1 を除き、前回 2 回の観測に比べて大きく減少し、浚渫窪地内外で差は認められず、沖合いの St.3 と同程度の濃度にまで回復している。

再び港奥部で貧酸素化した 10 月 21 日では、底層において NH₄-N の濃度が若干増え、NO₃-N の濃度が減少

表-1 各地点における底層の栄養塩濃度(mg/l)および溶存酸素濃度(mg/l)

項目	日付	窪地内		窪地外			
		St.1	St.7	St.3	St.4	St.5	St.6
TN	8/31	0.49	0.46	0.47	0.45	0.47	0.55
	9/9	0.35	0.32	0.23	0.31	0.32	0.49
	9/23	0.24	0.22	0.19		0.21	0.19
	10/6	0.24	0.27	0.22	0.23	0.25	0.23
	10/21	0.37	0.31	0.26		0.36	0.35
	11/4	0.31	0.28	0.21	0.20	0.23	0.20
NO ₃	8/31	<0.005	<0.005	0.028	<0.005	0.021	<0.005
	9/9	<0.005	0.034	0.042	0.029	0.004	<0.005
	9/23	0.072	0.067	0.060		0.065	0.059
	10/6	0.056	0.053	0.050	0.053	0.057	0.056
	10/21	0.019	0.018	0.018		0.019	0.017
	11/4	0.006	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
NH ₄	8/31	0.24	0.22	0.09	0.26	0.26	0.21
	9/9	0.21	0.09	0.02	0.09	0.14	0.18
	9/23	0.02	0.02	0.01		0.02	0.01
	10/6	0.04	0.06	0.02	0.03	0.03	0.02
	10/21	0.10	0.06	0.03		0.08	0.06
	11/4	0.02	0.01	0.02	0.01	<0.01	0.01

項目	日付	窪地内		窪地外			
		St.1	St.7	St.3	St.4	St.5	St.6
TP	8/31	0.080	0.088	0.043	0.076	0.054	0.088
	9/9	0.088	0.060	0.031	0.057	0.074	0.095
	9/23	0.034	0.032	0.029		0.031	0.029
	10/6	0.030	0.031	0.029	0.029	0.029	0.027
	10/21	0.053	0.043	0.032		0.048	0.040
	11/4	0.023	0.019	0.026	0.022	0.021	0.019
PO ₄	8/31	0.062	0.067	0.036	0.059	0.040	0.063
	9/9	0.051	0.030	0.017	0.031	0.037	0.047
	9/23	0.029	0.027	0.024		0.026	0.024
	10/6	0.027	0.030	0.023	0.025	0.026	0.024
	10/21	0.043	0.035	0.026		0.038	0.032
	11/4	0.016	0.013	0.016	0.013	0.010	0.015
DO	8/31	0.05	0.05	0.14	0.10	0.09	0.15
	9/9	0.03	1.32	3.49	0.12	0.03	0.14
	9/23	3.47	3.88	4.14		3.71	4.47
	10/6	3.54	5.04	5.38	5.11	5.22	5.23
	10/21	1.99	2.73	3.15		1.75	3.97
	11/4	6.18	6.84	6.40	6.24	6.90	6.06

していた。嫌気条件下に戻っているが、PO₄-Pについては底層において夏季ほど上昇していない。これは水温が低下し、溶出が夏季ほど促進されなかったためと推察される。

11月4日の観測では完全に貧酸素水塊は消滅しており、海域による濃度の違いも見られなくなっている。また、NO₃-N・NO₂-NおよびNH₄-Nの双方共にほとんど確認されず、PO₄-Pについても低い値をとり、良好な環境に回復していることが確認できた。

以上のように、少ない観測回数であったが、窪地内の方が窪地外より水質は悪いものの、大きな差は認められるような結果は得られなかった。窪地凹部においてもある程度の流速があることから、窪地内外の底層の水質は相互に影響を及ぼしている可能性が高い。

5. ま と め

本研究では、大阪湾阪南港内浚渫窪地周辺において流動および水質の現地観測を実施し、近傍に埋立地や堤防が存在する港内の浚渫窪地周辺の流動特性を明らかにし、浚渫窪地およびその周辺の水質構造を把握した。主要な結論を以下に示す。

- ①岸沖方向の測線では1潮汐間の平均流は南西へと流れ、大阪湾東岸の恒流帯に関する既往の知見と一致する。窪地凹部では、一潮汐平均でも流速4 cm/s 強の南向きの流れが確認され、窪地上層と連動した流動構造を示した。強い停滞性が認められなかった理由として、窪地凹部の密度が上層の密度とほぼ同じであることが一因として挙げられる。
- ②溶存酸素濃度の鉛直分布から、調査海域において夏季の最盛期において、窪地の地形に関係なく、水深4 m

以深まで一様に貧酸素化していることが分かった。また、減退期においては、窪地凹部だけ貧酸素化解消が遅れるなどといった現象は認められなかったものの、浚渫窪地を含む港奥のみ貧酸素状態であった観測日もあった。底層における無機態栄養塩濃度の分析結果から、窪地内の方が窪地外より水質は悪いが、大きな差は認められなかった。

- ③本観測結果において、窪地凹部の水質および貧酸素状態に窪地外の底層と大きな違いが認められなかった理由は、窪地凹部内もその上部と同じ流動構造で、ある程度の流速をもって流れているからであると推測される。予想に比して活発な水交換により、窪地内の水質は窪地外の水質に影響を及ぼしている可能性が高い。

謝辞：本研究の調査は鉄鋼スラグ協会西日本支部近畿地区部会からの依頼により財団法人災害科学研究所にて実施したものである。関係者に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 入江政安・西村和幸・佐々木昇平・西田修三・中辻啓二(2005)：湾奥部閉鎖性水域における貧酸素水塊の消長への影響因子，水工学論文集，第49巻，pp. 1303-1308。
- 海上保安庁(2005)：大阪湾及播磨灘潮流図，海上保安庁第6231号，16p。
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男(1996)：東京湾における青潮の発生規模に関する考察・海岸工学論文集，第43巻，pp. 1111-1115。
- 五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦(1998)：東京湾湾奥の浚渫窪地における湧昇現象の現地観測・海岸工学論文集，第45巻，pp. 981-985。
- 八木 宏・内山雄介・鯉渕幸生・日向博文・宮崎早苗・灘岡和夫(1997)：東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1076-1080。