

大阪湾北部港湾域の流動特性と水質への影響

入江政安¹・佐々木昇平²・和田伸也³
中辻啓二⁴・西田 修三⁵

港内に大きな埋立地と複雑な水路をもつ大阪湾奥部北部港湾域において流動観測を実施した。港湾域の沖合の流動構造と同様に、港内では、上げ潮時には西から東へ、下げ潮時には東から西への流れが生じられる。南側開口部では、潮流の影響を受け、西から東へと時間的なずれを生じながら、全層で流出入することが明らかになった。また、並行して実施した3次元流動シミュレーションの結果、港内の流動は多層構造をもち、淡水流入とそれによる密度成層が港内の流動構造に大きな影響を与えていることがわかった。最後に、3次元流動水質モデルを用い、これら港内の流動がDOの収支にどのような影響を及ぼしているかについて評価した。

1. はじめに

1960年代に始まった大阪湾奥部の大規模な埋め立ては我が国の経済発展に大いに寄与した。とくに、山を削り、海を埋め立てる「神戸方式」は過密となった都市居住空間を山と海の両側に広げる効率的な都市開発方法であるとされた。一方で、神戸港周辺の水質汚濁は当時よりすでに始まっていた。CODの総量規制などの水質保全施策はやや遅れて1970年代に実施されたが、現在も水質は改善されたとは言い難い。このような湾奥部港湾域の、水質に着目した調査研究例(通産省中工研(2000)大阪市(2000)他)は多くはない。

本研究で対象としている大阪湾北部港湾域で、筆者らは貧酸素水塊調査を含む水質調査を数年にわたり実施し、春から初冬まで貧酸素水塊が存在していることや青潮の発生機構など多くの知見を得てきた(例えば、中辻ら, 2003; 入江ら, 2003a; 入江ら, 2005)。同様の港湾域での貧酸素化の例としては、横浜港で発生した青潮の報告がある(例えば、鯉淵・磯部, 2005)。大阪湾北部港湾域での貧酸素水塊の動態から推察すると、その原因は水深が大きい港湾内に蓄積される貧酸素水塊が風による流況の変化によって湧昇したことによると推察される。大都市近傍の港湾域の水質汚濁には港湾特有の流動構造が大きな影響を与えている。

港外との海水交換などのプロセスや機構が単純で少ないほど、港湾内の水質汚濁機構の解明は容易である。しかし、河川からの淡水流入や港外の潮流や残差流系の影響を無視できない港湾も多く、水質汚濁機構の解明はさほど容易ではない。本研究対象領域(図-1)においても、港湾域は3つの港域に分けられ、それぞれに開口部をも

ち、港域間は水路で接続している。港外の流況は上げ潮時には西から東へ、下げ潮時には東から西への流れとなる。淀川河川水の流入が流況へ及ぼす影響も無視できない。したがって、当海域の流動構造は複雑であると予想される。本研究では、都市域近傍の複雑な地形をもつ港湾を対象として流動構造を明らかにし、それらが水質汚濁に及ぼす影響について検討する。

2. 大阪湾北部港湾域の流動構造

(1) 概況および現地調査の概要

本研究で対象とした大阪湾北部港湾域とは神戸港および尼崎西宮芦屋港の港域である。大阪湾奥部では神戸市西部から関西空港に至る海岸線のほとんどで埋め立てが行われてきており、現在も造成中のものもある。埋立地は2種類に分けられる。一つは大阪府側、東岸の大阪港南港地区や堺泉北港に代表される陸続きに造成される埋立地である。他方は北部港湾域内のように、沖合に造成される埋立地である。北部港湾域では、ほぼ全ての埋立地が旧来の水際線を残したまま、沖合に造成されている。したがって、尼崎西宮芦屋港と神戸港は2つの水路と1つの細い水路で接続しているほか、港湾域内は水路が複雑に入り組んでいる。さらに、港内の静穏性を保つために多くの防波堤が建設されており、閉鎖性が強い。このような造成手法の結果、尼崎西宮芦屋港奥には大阪湾奥部では唯一の自然海浜「御前浜」が残される一方で、御前浜前面水域は汚濁し、極度に貧酸素化し、浜自体も貧困な生物相しかもち得ない。

本研究では神戸港と尼崎西宮芦屋港の開口部と接続部において、流動および水温・塩分の調査を実施した。調査日は2005年2月28日および3月27日の2日間で、ともに一潮汐周期(12.5時間)にわたり計測を実施した。2月28日には図-1に示すLine-1, 2, 4, 7, 8の観測線を2隻の船で、3月27日は図-1に示す7つの観測線を3隻の船で巡回し、RD Instruments社製ADCP(1,200kHz, 600kHz)を用いて流速の鉛直分布を計測し

1 正 会 員 博(工) 大阪大学助手大学院工学研究科地球総合工学専攻
2 正 会 員 修(工) 国土交通省九州地方整備局
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
4 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
5 正 会 員 工博 大阪大学助教授大学院工学研究科地球総合工学専攻

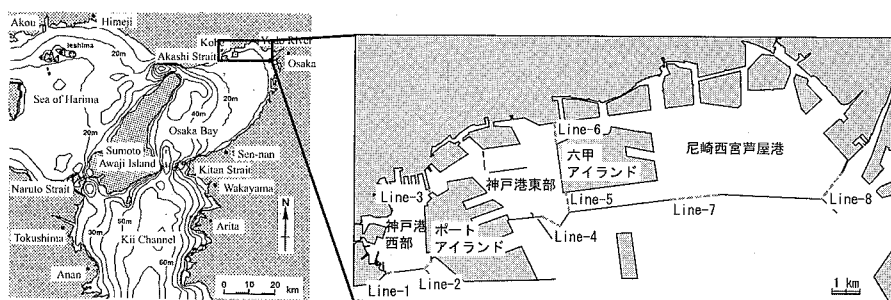


図-1 北部港湾域および観測線の位置

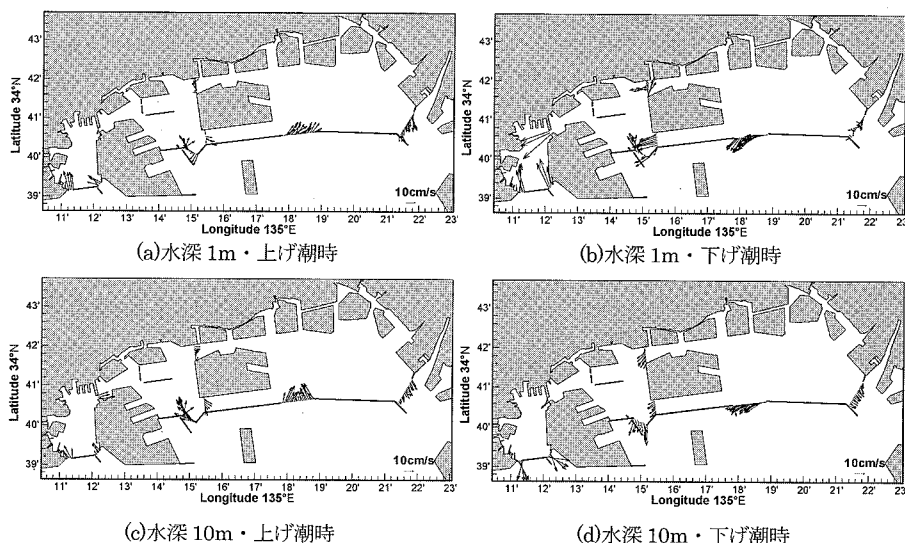


図-2 流速の水平分布特性 (3月27日の観測)

た。同時にCTD計を用い、水温・塩分を計測した。両日の潮汐は、ともに日潮不等の小さい中潮から大潮であった。2月28日の観測期間中の満潮は9時12分のT.P. + 51 cm, 干潮は15時28分のT.P. - 48 cmで、午前6時頃から西寄りの風が吹き始め、13時から風速5~6 m/sの西南西の風が17時過ぎまで吹き続けた。また、3月27日の満潮は7時43分のT.P. + 46 cm, 干潮は13時49分のT.P. - 64 cmで、10時頃までは風が無く、午前11時ごろから18時過ぎまで南寄りの風が風速3~5 m/sで吹いていた。

(2) 現地観測結果

図-2に3月27日の上げ潮時、下げ潮時の表層(水深1 m)と底層(水深10 m)の流速の水平分布を示す。上げ潮時は、神戸港の西側の開口部であるLine-1とLine-2で全層にわたって10~20 cm/sで流入する傾向が見られた。さらにLine-4, Line-7からも全層にわたってほぼ流入する傾向がみられた。この影響を受け、Line-3やごく表層を除くLine-8では各港域内を西から東へ通り抜ける流れを示している。下げ潮最盛時におい

ては、神戸港東部から尼崎西宮芦屋港のLine-4, Line-7では全層で流出しているのに対し、神戸港西部のLine-1, Line-2では上層流入・下層流出の2層構造となっている。流入している上層は水深2 mほどまでである。これは、その時間に南風4 m/sが吹いていたことも原因であると考えられる。

一方、Line-5とLine-6の流動は鉛直方向に2層に分かれている。図-3にLine-5における上げ潮時の流速の横断分布と測線中央で測定した水温・塩分・密度の鉛直分布を示す。横断分布図において、測線の北端を横軸の距離ゼロとしている。Line-5とLine-6における両測線ともに表層から2 mあたりまでは西向きの流れが見られるが、それより水深が深いところでは東向きの流れが見られた。この流向が変化する水深と、密度躍層の位置はちょうど一致する。下げ潮時には上層の厚さが増し、水深7 mで西流と東流が入れ替わる。西流する上層の流速と断面積が広がることで、東から西へという港全体の下げ潮時の流れと運動している。

著者らは2002年にも尼崎西宮芦屋港内で流況調査を

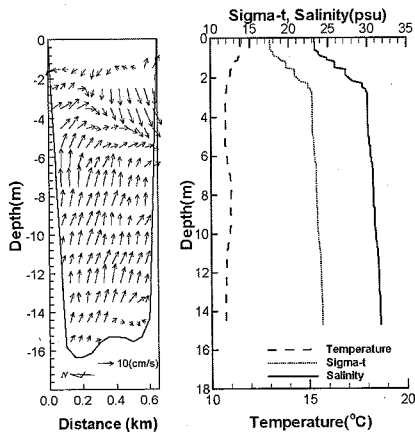


図-3 Line-5における流速の横断面分布と水温・塩分・密度の鉛直分布

実施しており、本調査とあわせて以下の知見を得た。Line-1, 2, 4, 7, つまり南側の開口部は基本的に全層流入・全層流出の構造をもち、風の影響により、2層構造となることもある。しかし、淀川河口に近いLine-8や東西方向の水路に位置するLine-5, 6では、密度躍層を境に上下層で流向の異なる2層構造となっている。

(3) 港内外の海水交換

港域への海水の流出入を明らかにするために、開口部での流量フラックスを算出した。算出方法は9回の横断観測結果を各地点各水深ごとに、時間方向にスプライン補間した上で、各横断面内のフラックスを合計して算出した。その結果と神戸港の潮位を図-4に示す。神戸港西部の2つの開口部は合算して示し、フラックスは港内に流入する場合を正、港外へ流出する場合を負として示している。満潮後1時間後にLine-1, 2で流出フラックスが最大となる。流出フラックスは、満潮後2~3時間後にLine-4, Line-7で最大に、ほぼ干潮時にLine-8で最大となる。このように、流出が最大となる時刻は西から東へずれていることがわかる。これは流入が最大となる時間を見ても同様である。各港域に設置した水位計から算出される各港域間の水位差を図-5に示す。水位は3点とも大気圧による補正を行ったうえで、一半日周期間の平均値を基準とし、水位差は基準面からの水位の差を取っている。神戸港西部より神戸港東部、神戸港東部より尼崎西宮芦屋港のほうが、満潮時に水位が高く、干潮時に水位が低くなっている。これは神戸港西部より神戸港東部、神戸港東部より尼崎西宮芦屋港の方が港外の潮汐に追従していることを示し、海水交換が良いことを示している。

全体の流量収支に最も寄与している開口部はLine-7である。流入フラックスの最大は $2.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、流出

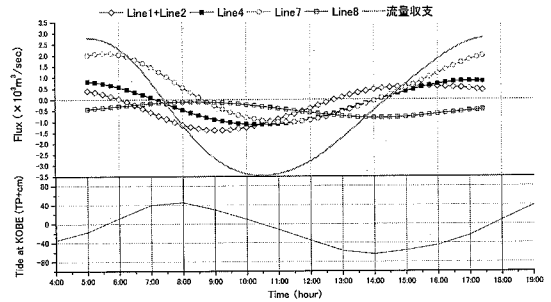


図-4 潮位および開口部の流量フラックスとその総計

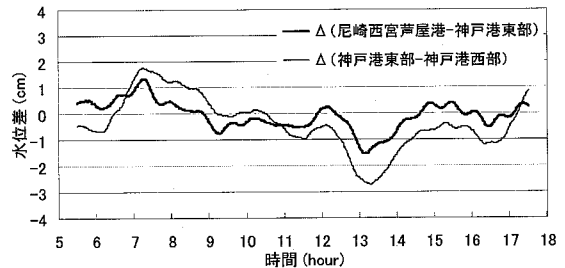


図-5 各港域の水位差

フラックスの最大は $1.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ で、流出フラックスより流入フラックスが大きい。一方で、Line-8では、常に流出となっている。ページの都合で図を省略するが、2月28日の観測においても、西から東へと流出入のピークとなる潮時が遅れている。大きな違いは、2月28日の流入フラックスの最大は約 $0.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ と約1/4となっていることである。3月27日は流入方向の流量フラックスが2月28日よりも大きくなっており、流出への転流時期が2月28日より遅れている。つまり、これら流出入の位相差はそれぞれの開口部からの流出入フラックスの大小の影響を受けていると言える。

3. 密度差が港湾域内の流動に及ぼす影響

(1) 計算条件

尼崎西宮芦屋港と神戸港を結ぶ水路や尼崎西宮芦屋港の東側開口部では密度躍層を境に上下層に分かれる流動特性をもつ。この原因を明確にするために、数値計算を実施した。数値計算は3次元流動モデルPOM (Princeton Ocean Model) に入江ら(2003b)で用いた水平圧力勾配を補正するスキームを加えたモデルにより行う。計算領域は、西側境界を播磨灘、南側境界を紀伊水道とする大阪湾全体であり、計算格子の大きさは沖合で1 km、港内で100~250 mと変化させた。鉛直方向には20層に分割した。境界の水位は主要6分潮で与えた。密度差による影響を評価するため、barotropic計算とbaroclinic計算の2つを行う。ただし、河川流量については同

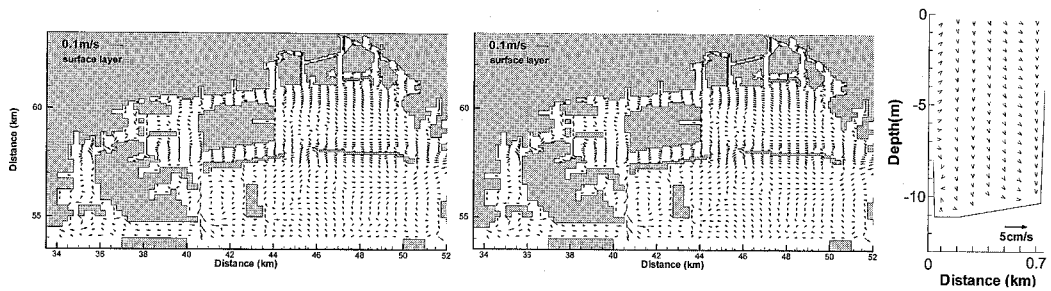


図-6 barotropic 計算における残差流の水平分布（左；表層，中；水深 5m）と接続部の鉛直分布（右）

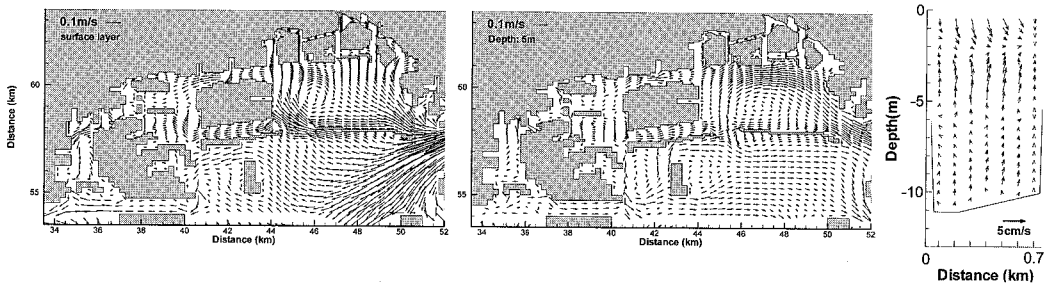


図-7 baroclinic 計算における残差流の水平分布（左；表層，中；水深 5m）と接続部の鉛直分布（右）

等に与えた。

(2) 数値計算結果

barotropic 計算，baroclinic 計算の結果をそれぞれ，図-6，7 に示す。barotropic の場合，尼崎西宮芦屋港東側より流入する傾向が認められるが，baroclinic 計算に比べ，弱くなっている。尼崎西宮芦屋港央で 2002 年の観測においても認められた時計回りの循環も baroclinic 計算の方が強くなっていることが分かる。図-6 右列に示したのは六甲アイランド北側水路における上げ潮時の流速の横断面分布である。barotropic 計算では全層で神戸港側へ流入する流れになっている。一方，baroclinic 計算では上層で神戸港側に流入，底層で尼崎西宮芦屋港内へ流入する流れとなっている。したがって，港内の上下層で流向の異なる流況は港内の密度差に起因していると言える。baroclinic 計算の結果は港内流動構造を良く再現している。

(3) 港湾域内の流動特性

ここまでの現地調査結果および数値解析の結果，港内の流動構造は成層構造の影響を顕著に受けることが推測される。両港間の水路で 2 層構造となるのは，東側開口部を介して流入する淀川，武庫川等の河川水や，港内に直接流入する河川や排水等による上層水がこの水路にまで到達しているためで，密度差に起因する流れが港内の停滞性を緩和する一方で，鉛直方向の混合を妨げる原因となっている。また，両港の南側開口部は全層一体となった流況が見られる。これは鉛直方向の密度差が比較的

小さいことや，開口部の向き，Line-3 周辺で水路が狭くなっていることなどが原因であると推測される。開口部で 2 層の構造が見られるときは風の影響である可能性が高い。

4. 港内の流動が水質に及ぼす影響評価

本研究において，港湾域内の流動シミュレーションの再現性が現地観測結果により裏付けられた。そこで，数値解析を実施し，港湾域内外の DO の収支について，検討する。ここで用いた 3 次元流動水質モデルは入江ら (2004) で構築し，大阪湾での水質の再現性が確認されているモデルである。水質モデルの概要を図-8 に示す。ここでは夏季を想定し，15 日の助走計算を行った後，15 日間の計算結果から開口部を通じての DO の収支を求め，考察を行う。水質モードの計算ステップごとに各コントロールボリュームの DO 濃度の断面フラックスを計算し，15 日間の和をとっている。尼崎西宮芦屋港における開口部の DO 収支を図-9 に示す。ここで，上層とは水表面から全水深の 3 割までの層，下層とはそれ以下の層を指す。夏季の DO 収支をより正確に評価するには，DO 濃度の急変水深，つまり密度躍層位置を基準に上下層に分けるべきである。しかし，密度躍層そのものが変動すること，また，計算上の層厚が潮位変動に応じて変化することから，取り扱いを簡単にするため，上記のような分け方をしている。当海域では，上層とは水深 3～5 m 以上を指し，夏季の密度躍層はこれらの水

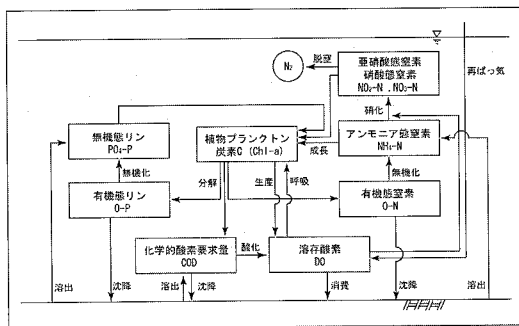


図-8 水質モデルの概要

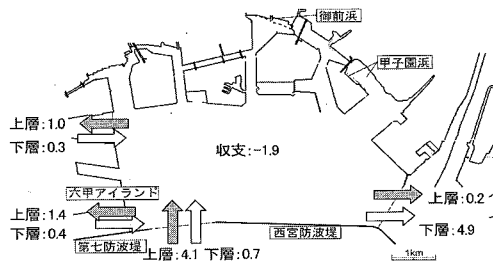
深以浅に収まる。したがって、DO収支についておよその評価は可能である。

南側開口部からの流入量は上層で4.1t/day、下層で0.7t/dayとなっている。この断面は、風がなければ流量フラックスは全層での流入となる断面で、上下層の差は港外水のDOが上層で高く、下層で低いためであると評価できる。西側開口部では、上層で神戸側にDOを供給し、下層からわずかながらDOが供給される構造となっている。これらの点から、尼崎西宮芦屋港外や神戸港の貧酸素化が抑制されれば、尼崎西宮芦屋港内下層へDOが供給され、尼崎西宮芦屋港内の貧酸素化をも抑制することが推測できる。また、東側開口部では上下層とも港外に流出している。この結果港内のDOの収支は、1日あたり19t減少していると算定された。このシミュレーションでは、無風の条件のもと計算を行った。しかし、夏季の卓越風である南～南西風が吹いたと仮定した計算を行えば、観測結果も示すとおり、上層流入・下層流出の2層構造となり、DOの収支は今回の結果とは異なる可能性が高い。DOに及ぼす流況の影響を把握するためにはさらなる詳細な検討が必要である。

5. ま と め

本研究では、大阪湾奥部北部港湾域において流動観測を実施し、河川水が流入する複雑な地形の港湾域の流動特性を明らかにした。また、港内の流動と港外の流動および残差流系との関連性について検討し、これら港内の流動がDOの収支にどのような影響を与えているのかについて評価した。主要な知見を以下に示す。

- ①神戸港潮位が上げ潮最盛時のとき、神戸港および尼崎西宮芦屋港の南側開口部では港内へ流入する傾向を示す。港湾域内の水路では各港域内を西から東へ通り抜ける流れを示し、既知の港外の流動特性と一致している。下げ潮最盛時においては、逆の傾向を示す。
- ②上層流入・下層流出の2層構造となっている南側開口部は風による吹送流の影響が認められる。

図-9 DOの収支 (単位: $\times 10t$)

- ③両港の開口部に着目すると、開口部の流入のピークは神戸港西側から尼崎西宮芦屋港東側へと順にずれていることが分かった。
- ④ barotropic 計算, baroclinic 計算をそれぞれ行った結果、神戸港と尼崎西宮芦屋港間の水路部での流れの2層構造は、尼崎西宮芦屋港内へと流入してくる河川水の影響が一因であることが分かる。
- ⑤流動水質シミュレーションにより、尼崎西宮芦屋港の下層のDOは港外および神戸港側から流入し、東側から流出するものと予測された。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)(課題番号14205073、代表者中辻啓二)により行われ、現地観測は国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所と大阪大学との共同研究によるものであることを付記し、ここに深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 入江政安・西田修三・中辻啓二・金俊憲・湯浅楠勝(2003a): 都市域近傍の閉鎖性水域の貧酸素水塊の挙動に及ぼす気象の影響, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 991-995.
- 入江政安・中辻啓二・西田修三(2003b): 密度差の大きい流動場への改良座標系モデルの適用, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 361-365.
- 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.
- 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.
- 大阪市(2000): 大阪港周辺における水質と漁業生物への影響調査報告書, (財)大阪港開発技術協会, 206p.
- 鯉淵幸生・磯部雅彦(2005): 2004年の東京湾西岸横浜港周辺における青潮の発生要因, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 896-900.
- 通商産業省工業技術院中国工業技術研究所(2000): 瀬戸内海の適正環境創造のためのミチゲーション技術の適用に関する研究, 中国工業技術研究報告, 第19号, 206p.
- 中辻啓二, 入江政安, 西田修三, 湯浅楠勝(2003): 大阪湾湾奥部閉鎖性海域における貧酸素水塊の現地調査, 水工学論文集, 第47巻, pp. 1285-1290.