

浚渫窪地における酸素環境シミュレーション

Numerical simulation of the dissolved oxygen environment around sub aqueous borrow pits

大見智亮¹・内藤大輔²・酒井亨³・山口将人⁴・寺澤知彦⁵・田口浩一⁶・中田喜三郎⁷・中村由行⁸

Tomoaki OHMI, Daisuke NAITOH, Toru SAKAI, Masato YAMAGUCHI, Tomohiko TERASAWA,
Koichi TAGUCHI, Kisaburo NAKATA and Yoshiyuki NAKAMURA

A comprehensive coastal ecosystem model coupled with 3D hydrodynamic model with non-hydrostatic flow was developed to understand the processes of accumulation of anoxic water masses (and hydrogen sulfide) in borrow pits and their upwelling to shallow region. This model was applied to the borrow pit in Mikawa Bay and compared to the observed data. To examine the effectiveness of the model, the numerical results were compared with those of a hydrostatic pressure model. The comparison proved the non-hydrostatic model to be much more adequate at simulating the stratification structure and the vertical mixing in the pit. Moreover, it turned out that the non-hydrostatic model also reproduces reasonably the upwelling process under strong wind conditions.

1. はじめに

内湾沿岸域における浚渫跡地の存在は、貧酸素化などの水質悪化や、窪地を発生源とする無酸素水によって、周辺の浅場生態系にも間接的な悪影響を及ぼしてきたと考えられている(中村, 2006). こうした窪地の修復は沿岸域の環境回復にとって不可避の要件であると思われるが、窪地の周辺浅海域への影響についての定量的評価がなされていないため、修復効果を予測できないのが現状である. そこで本研究では、窪地起源の青潮など窪地周辺で生じている流動や水質悪化を再現する数値モデルを開発し、三河湾の浚渫窪地を事例とした再現性評価から、窪地環境を十分再現するために求められるモデル要件を検討した. また、再現計算の結果から、窪地からの無酸素水の湧昇と周辺浅海域への影響について定量的に明らかにする.

2. 三河湾の浚渫窪地

三河湾における主要な浚渫窪地は湾奥の東北部に存在し、局所的に掘り下げられた窪地タイプのものである. 1カ所は御津沖の海域(御津沖浚渫窪地), もう1カ所は蒲郡沖の海域(大塚沖浚渫窪地)である(図-1). 前者は四方を

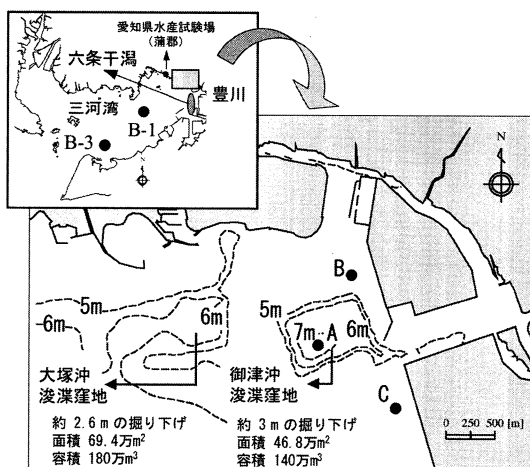


図-1 対象海域と浚渫窪地の位置

(Aは実調査地点, BとCは本論文での定量評価地点)

直方体状に平均3m掘り下げであり、その面積は47万m²、容積は140万m³である. 後者は西側で一部開口部をもつが、ほぼ直方体状に平均2.6m掘り下げであり、面積69万m²、容積180万m³である. 三河湾の浚渫窪地の場合、窪地のアスペクト比(窪地の幅/深さの比)は200~300程度で、鉛直方向に大きく掘り下げられたものではなく、また窪地側面の海底勾配も比較的緩やかであるが、密度成層が発達する夏季においては、長期にわたって例外なく無酸素状態となることが分かっている(武田・石田, 2003). 窪地が位置する三河湾北東部では、2001年、2002年と苦潮(東京湾の青潮と同義)が発生し、豊川河口域の六条干潟に生息するアサリ稚貝に壊滅的な被害を与えた. 武田・石田(2003)は、隣接する浚渫窪地の調査結果から、これらの

1	博(理)	(株)中電シーティーアイ
2	修(環)	(株)中電シーティーアイ
3	修(工)	(株)中電シーティーアイ
4 正 会 員	修(工)	(株)中電シーティーアイ
5		(株)中電シーティーアイ
6	博(工)	(株)中電シーティーアイ
7	工博	東海大学教授海洋学部環境情報工学科
8 正 会 員	工博	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

浚渫窪地が少なからず悪影響を与えていると結論づけた。このため、2003年から三河港での発生土砂を利用して窪地の完全な埋め戻しが開始された。2005年度には御津沖浚渫窪地の埋め戻しがほぼ完了し、現在は大塚沖浚渫窪地についても埋め戻しが進行中である(石田・鈴木, 2006)。

3. 酸素環境予測モデルの概要

窪地環境を十分再現するためには、窪地内部での流動の停滞性から生じる酸素環境の悪化と硫化物の蓄積という一連の物理・生物化学的過程を取り込んだモデル化が必要である。

(1) 流動モデル

一般的な内湾の流動解析では、鉛直方向の圧力分布に静水圧近似を仮定したモデルを適用することが多いが(例えば、佐々木, 1997)、本研究では流動の停滞性に支配的な密度成層の動態に対する再現性を重視し、鉛直方向の運動も厳密に考慮した3次元の非静水圧流動モデルを採用した(大見ら, 2007)。海洋現象の解析に対して3次元非静水圧モデルを用いた例としては、岡田ら(2001)、柿沼ら(2005)、中山ら(2006)による計算事例があり、東京湾の湾奥域における底層水の湧昇現象を解析した岡田ら(2001)は、非静水圧流動モデルによって底層水の湧昇を適切に再現できると報告している。乱流モデルは、Smagorinsky モデルによる Large Eddy Simulation (LES) とし、鉛直成分に対しては Richardson 数依存型の成層化関数によって浮力による拡散抑制効果を考慮した。

(2) 浅海域生態系モデル

水質モデルは、浮遊系の低次生態系モデルと、堆積物食者、懸濁物食者、メイオベントス、底生バクテリアなど底生生物の動態や堆積物と海底直上水との酸素・栄養塩類の物質循環を考慮した底生系モデルから構成されており、図-2 のような模式に基づいて定式化した。同様なアプローチは、浅海域の物質循環解析で主流となりつつある(例えば、相馬ら, 2005)。

窪地内の底層水が無酸素に近い状態となると、堆積物中では微生物群集による有機物の嫌氣的無機化によって硫化物などの還元物質が生成される。この硫化物が底層水中に溶出すると溶存酸素と反応して酸化されるため、底層水中のわずかな酸素までも消費し、容易には窪地内の酸素環境が回復しない状態が続くことになる。このため、窪地内の酸素環境を定量的に評価するためには、底生生態系の物質循環に堆積物の嫌氣層での還元物質の生成・酸化過程を考慮する必要がある。そこで、本研究では硫化水素 H_2S に着目し、図-3 のような硫化水素の物質循環過程を生態系モデルに考慮した。生態系モデルの詳細については、中村ら(2008)を参照されたい。

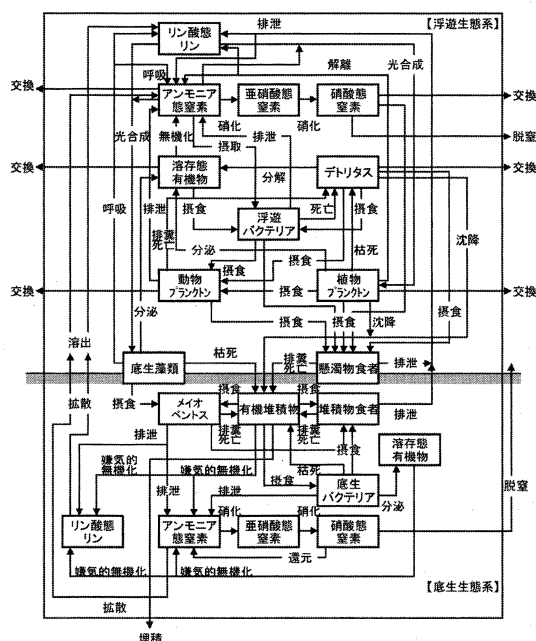


図-2 浅海域生態系モデル

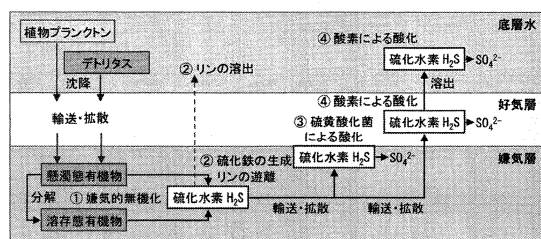


図-3 硫化水素 H_2S の生成・酸化過程

(3) 計算領域と計算条件

本研究では、粗い解像度の三河湾全域シミュレーション結果から窪地周辺の計算領域をネスティングさせることで、窪地周辺海域のシミュレーションを行った。三河湾全域のような広域の海洋では、鉛直方向の空間スケールは水平方向に比べて小さいため、海洋流動モデルについては静水圧近似による準3次元多層レベルモデルを適用した。水質モデルについては、全湾規模での底生生態系データの収集とモデリングが困難のため、底生系は底泥からの栄養塩溶出や酸素消費を現地調査結果に基づいた水温応答関数で表現し、浮遊系の低次生態系モデルを適用した。一方、窪地周辺の海域については、前述した非静水圧の3次元流動モデル、浮遊系-底生系の浅海域生態系モデルを適用した。

三河湾全域の計算領域は、知多半島の師崎から南東方向に渥美半島に達するまでを西側境界とした東西40km×南北42kmの領域で、湾口側の水平格子は最大500m、湾奥部側は最小200mで分割した。

また、鉛直方向には最小1m～最大5m ピッチで14層の区分を設けた。一方、窪地周辺海域は、大塚沖浅渚窪地および御津沖浅渚窪地を含む東西4.8km×南北3.9kmの海域(図-1を参照)とし、窪地周辺の水平格子は20mで等間隔、沖側は最大50mで分割した。また、鉛直層は水域を0.5mピッチで17層、堆積層を最小0.1cm～最大2cmピッチで10層に分割した。

湾口の潮汐条件は、師崎、伊良湖における主要4分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)と年周潮 S_a の潮汐調和定数から求めた推算潮位とし、さらに湾外の鳥羽における実測潮位と推算潮位の偏差を加えることで、外海からの影響を考慮した。水温、塩分、水質項目の初期条件は、愛知県公共用水域水質調査結果に基づいて与えた。境界条件は、水温、塩分については愛知県水産試験場が保有する海況自動観測ブイのうち湾口に最も近い3号ブイ(図-1のB-3地点)の連続観測データ、水質項目については公共用水域水質調査結果に基づいて与えた。流入河川のうち豊川と矢作川については計算期間中の連続流量観測値を設定し、その他の中小河川については流量比により推定した。河川からの負荷流入量は、過去の調査結果から得られた負荷量と流量の相関関係に基づいて与えた。海上風については海況自動観測ブイ、および愛知県水産試験場が沿岸近くで取得している観測データを、他の気象要素についてはAMeDAS測定地点等のデータを利用し、スプライン補間法を用いて、湾全体の空間分布に展開した。

4. 酸素環境の再現シミュレーション

窪地内に溜まった無酸素水は、台風など海況の短期変動に伴い湧昇、周辺の浅海域へ広範囲に拡がることで、底生生物に甚大な影響を及ぼす恐れがある。ここでは、2002年8月19日に台風13号の接近に伴って窪地周辺域で発生した苦潮(武田・石田, 2003)を対象とした再現シミュレーションを実施し、モデルの有効性を評価した。再現シミュレーションの対象期間は、台風接近前後の2002年8月13日0時～8月27日0時とした。なお、流れのシミュレーションは静止状態から開始するため、流れを計算領域内で安定させる目的で、実際の計算は7月1日0時から開始している。

(1) 三河湾全域の再現性

全湾域における酸素環境シミュレーションの再現性を確認するために、愛知県水産試験場による海況自動観測ブイのうち最も湾奥部に位置する1号ブイ(図-1のB-1地点)における流向・流速、水温、塩分、溶存酸素飽和度(DO飽和度)の計算結果と連続観測結果との比較を行った(図-4)。

シミュレーションの結果では、台風13号接近の8月19日以降の表層u成分(東西成分)や、接近以降の20日～23日における水温の鉛直混合で不一致が見られたものの、主な

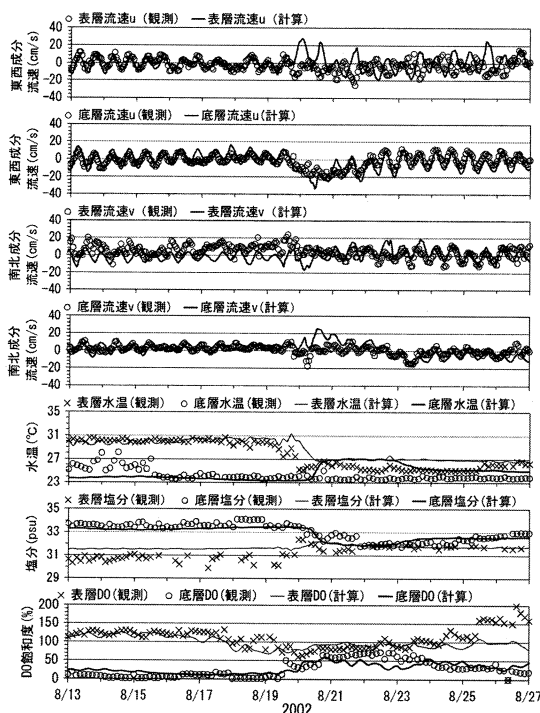


図-4 三河湾全域シミュレーションの再現性(図-1のB-1地点)
表層：海面下2.5m、底層：海底上2.0m

無酸素水の形成期間(台風到来前)では、流況や密度成層の様相は良く再現された。不一致が見られた期間は台風接近前後であり、流況が時間とともに複雑に変化する様相をポイント観測値の空間補間だけでは捉え切れていないことが大きな要因と考えられる。

(2) 窪地周辺海域の再現性

窪地周辺海域の初期値や境界値、気象条件など入力条件は、三河湾全域シミュレーションのうち窪地周辺海域に該当する領域の値を用いた。なお、窪地を起源とした無酸素水の挙動に評価の焦点を当てるために、硫化水素濃度の初期値は全域でゼロ値、境界値も常時ゼロ値で設定した。このため、湾中央底層の無酸素化で蓄積される硫化水素の移流や湧昇については、再現の対象外とした。

窪地周辺海域における酸素環境シミュレーションの再現性を確認するために、愛知県水産試験場が苦潮発生直後に実施した窪地内(図-1の実調査地点A)での水温、塩分、DO飽和度の連続測定データ(武田・石田, 2003)とシミュレーション結果の比較を行った。また、底層水中の硫化水素濃度と堆積物間隙水のDO飽和度(底層水からの酸素浸透量)を合わせて示した(図-5)。

貧酸素水塊が発達する夏季成層期においては、水温と塩分の鉛直構造の再現性が重要である。この視点で見ると、台風13号接近直後の8月22日～23日において表層塩分の回復に不一致が見られたものの、8月19日に接近した台風

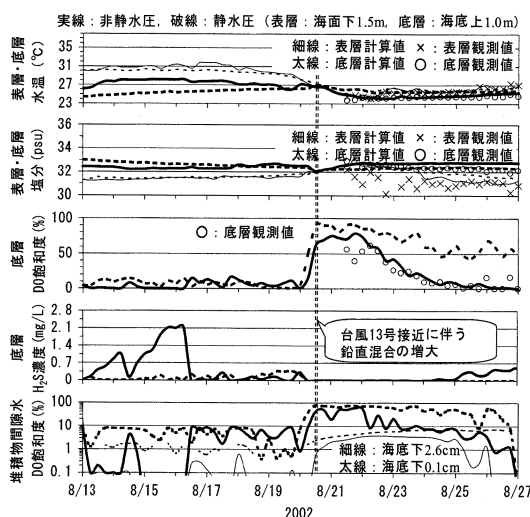


図-5 モデルの再現性と非静水圧モデルの有効性
(御津沖浚渫渚地内の調査地点 A での評価)

の強風により密度成層が解消し、数日後に再形成する水塊変動の傾向や、上下層の勾配とも全体の傾向は良い整合性が見られた。表層塩分の不一致は、台風通過後の吹き返しにより風向・風速が大きく変化する風況を観測値の空間補間だけで表現することが難しく、渚地に近い豊川からの出水による表層低塩分水の移流が捉え切れていないことが大きな要因と考えられる。このため、数値モデルの成層発達度は実際よりは弱いが、渚地底層では観測値と同程度の高塩分水が浸入しているため、渚地内水塊の停滞から貧酸素化が急速に進行し、8月24日までに無酸素状態となる状況は良く再現された。無酸素時では堆積層への酸素浸透も無いため堆積物中も無酸素状態となり、硫化水素が底層水へ溶出する様相も再現できた。貧酸素時の酸素浸透は海底面下2.6cm以浅であるが、底層水の酸素環境が回復すると、海底面下2.6cm以深にも酸素が供給されることが分かった。

比較検討のために行った静水圧近似の流動モデルによるシミュレーション結果と比較すると、底層での持続的な無酸素化や硫化水素の蓄積、台風到来による鉛直混合(8月20日)以降の貧酸素化への進展などで、非静水圧モデルの有効性が認められた。こうした現象は密度成層の動態に強く支配されるため、鉛直方向の流れの挙動を十分再現するためには、3次元非静水圧流動モデルが不可欠といえる。

5. 無酸素水の湧昇と周辺浅海域への影響

流動シミュレーションでは、8月13日～18日において安定した密度成層が認められ、台風13号接近時にダイナミックな成層変動が捉えられた。この様相を視覚的に把握するために、調査地点 A を東西に横断する鉛直断面での塩分分布を図-6に、硫化水素濃度分布を図-7に示した(鉛直

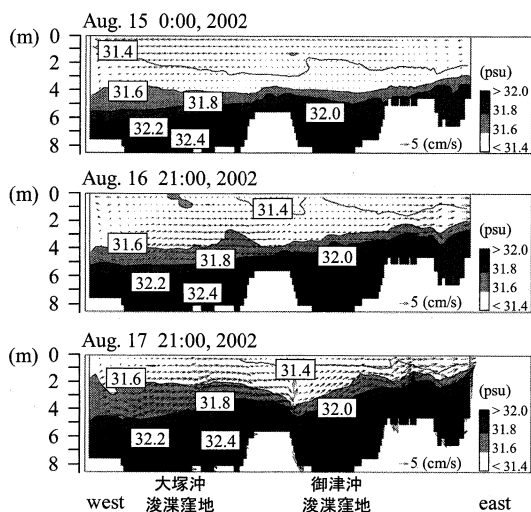


図-6 塩分の鉛直分布(調査地点Aの東西横断断面)

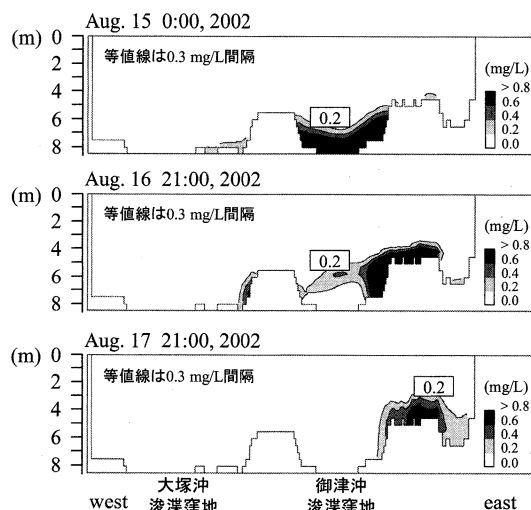


図-7 硫化水素濃度の鉛直分布(断面は図-6と同一)

スケールのみ150倍に拡大)。シミュレーションの結果では、8月15日の時点で渚地に蓋をするような形で密度躍層が確認でき、高濃度の硫化水素(すなわち、無酸素水塊)が渚地上端付近まで蓄積されている様子が分かる。8月16日以降になると、密度躍層は傾斜を始め、御津沖浚渫渚地内の硫化水素が岸側浅海域へと湧昇する様子が見られた。

水塊が滞留している8月15日の時点では、渚地に蓋をするように密度躍層が存在するため、無酸素水塊の湧昇は密度躍層の深さと密接に関係していると思われる。これを確認するために、硫化水素濃度の鉛直分布と塩分躍層水深の時間変化を比較した。図-8には、御津沖渚地内の海面から海底までの水柱における硫化水素濃度および塩分の水平平均値の時間変化と、渚地に近い愛知県水産試験場で取

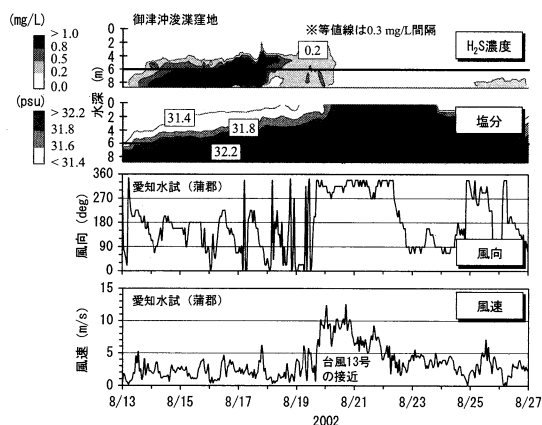


図-8 御津沖窪地内の硫化水素 H_2S 濃度、塩分の水平平均値に対する鉛直分布と沿岸での風向・風速の時間変化

得られた風速・風向の観測データを示した。硫化水素濃度と塩分の時空間分布図には、窪地上端の水深を黒線で示した。南寄りの風が卓越する8月13日～14日においては塩分躍層が窪地に蓋をするように位置しており、御津沖窪地内は外界と隔絶された閉鎖的環境といえる。その後、断続的に北～東寄りの風となり、岸から沖方向への沖出し風による表層水の離岸化と沖合下層水の流入によって躍層水深が上昇すると、あたかも窪地の蓋を開けたかのような状態となり、窪地内に溜まった無酸素水と硫化水素は窪地外へ湧昇するという平均的様相が見られた。

無酸素水塊が浅海域へ広がった様子を把握するために、御津沖窪地周辺での評価地点 A, B, C における硫化水素濃度の時間変化を図-9 に示した。御津沖窪地内ではシミュレーションを開始直後から硫化水素が蓄積され続け、8月14日にその一部が御津沖窪地の南側滞筋から湧昇し、窪地南側の浅海域（地点 C 周辺）に広がった。その後、8月16日の午後以降に再び生じた湧昇により、硫化水素は窪地東側の浅海域（地点 B 周辺）に広がったことが分かる。局所的なポイントで見ると、窪地内からの硫化水素の湧昇は断続的に生じ、その度に窪地周辺の浅海域に拡散したと思われる。アサリは断続的に貧酸素水に曝されることにより徐々に活力が低下するという報告もあり（鈴木ら, 1998）、シミュレーションで見られた窪地内からの無酸素水塊と硫化水素の断続的な湧昇が、窪地周辺の浅海域に生息する底生生物の体力を徐々に消耗させた可能性が示唆される。

6. 結 論

窪地内部での流動の停滞性から生じる酸素環境の悪化と硫化物の蓄積、窪地内部の水塊の湧昇現象という一連の現象を十分再現するためには、浅海域生態系モデルへ底泥の硫化物生成過程を考慮するだけでなく、3次元非静水圧流動モデルの適用が有効であることが明らかとなった。

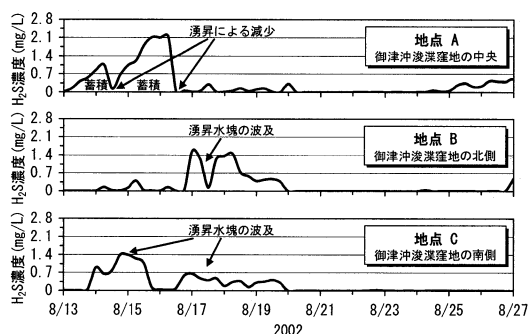


図-9 御津沖窪地内および周辺浅海域での底層硫化水素 H_2S 濃度の時間変化（各地点の位置は図-1を参照）

御津沖窪地のように浅くて閉鎖的な深掘り型の窪地では、密度躍層が窪地に蓋をするように形成されると、すぐに無酸素状態となり硫化水素の蓄積が始まるため、断続的な青潮/苦潮の発生に対する潜在的脅威といえる。このとき、台風など海況の短期変動によって躍層水深が上昇すると、窪地の蓋が開いたような状態となり、窪地内に溜まった無酸素水と硫化水素は窪地外へ湧昇することが分かった。

謝辞：本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」により行われた。

参 考 文 献

- 石田基雄・鈴木輝明 (2006)：三河湾における底層窪地修復事例と実現に至る経過，海洋理工学会誌，Vol. 12(2)，pp. 65-71.
- 大見智亮・山口将人・市川哲也・寺澤知彦・田口浩一・中田喜三郎 (2007)：底層窪地における流れの数値シミュレーション，日本流体力学会年会2007講演要旨集 (CD)，沿岸域の流れと物質循環(1)-3，pp. 1-5.
- 岡田知也・中山恵介・野村宗弘・古川恵太 (2001)：夏期の東京湾湾奥における表層の植物プランクトンに対する底層栄養塩の影響，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1086-1090.
- 佐々木淳 (1997)：東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1101-1105.
- 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信 (1998)：三河湾における貧酸素化によるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の死亡率の定式化，海洋理工学会誌，Vol. 4(1)，pp. 35-40.
- 武田和也・石田基雄 (2003)：土砂採取に伴う底層窪地における顕著な貧酸素化現象について，愛知水試報，第10号，pp. 7-14.
- 中村由行・中田喜三郎・船越茂雄・寺澤知彦・今尾和正 (2008)：港湾における発生土砂を利用した底層窪地修復効果の定量的評価手法の開発，(独法) 鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」研究成果報告書，pp. 128-164.
- 中村由行 (2006)：我が国における底層窪地の現状と修復，海洋理工学会誌，Vol. 12(2)，pp. 43-50.
- 中山恵介・岡田知也 (2006)：湾口部にシルをもつ湾における底層貫入と DO 濃度に関する観測と数値実験，海洋開発論文集，第22巻，pp. 817-822.
- 相馬明郎・桑江朝比呂・左山幹雄 (2005)：内湾堆積物表層における酸素循環過程の解明と内湾複合生態系酸素循環モデル構築に関する基礎的研究，(独法) 鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」研究成果報告書。