

中海細井沖窪地の晩秋期における水の動き

相崎守弘¹・木戸健一朗²・三瓶良和³・中田正人⁴

Study on movement of water body in the Hoshoioki dredging hollow located at inshore region of south-east part of Lake Nakaumi in late autumn

Morihiro Aizaki¹・Kenichiro Kido²・Yoshikazu Sampei³・Masato Nakata⁴

Abstract: Movement of water body in the Hoshoioki dredging hollow located in shallow inshore area in south-east part of Lake Nakaumi was surveyed in late autumn (4 Nov.-2 Dec. 2010). Anoxic water was formed and high concentration of nutrient was accumulated in bottom layer of the hollow at start of the survey. After strong north-west direction wind, vertical mixing was occurred, and anoxic water in the hollow was pushed out. $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations in bottom water of the hollow changed from 1.2mg l^{-1} to 0.4mg l^{-1} in the former and from 0.25mg l^{-1} to 0.1 mg l^{-1} in the latter. Current velocity in the bottom layer in the hollow was observed about 2cm s^{-1} on average and over 10cm s^{-1} at maximum. Current direction changed frequently in 10 minute interval.

Key words: Lake Nakaumi, dredging hollow, movement of water body, anoxic water

はじめに

建設用の砂利採取や沿岸の埋め立てなどのために掘られた浚渫窪地は東京湾をはじめとして全国各地に点在し、無酸素水塊の形成による周辺水域への悪影響が指摘されている。内藤ほか(2006)は全国の浚渫跡地の実態調査を行い、窪地を二つのタイプに分類している。一つは東京湾幕張沖にあるような窪

地で、自然海底に対して急深に掘り下げられた局所的な窪地、もう一つは伊勢・三河湾、大阪湾、瀬戸内海などにある海底起伏の平滑化タイプの窪地である。局所的な窪地では窪地内の水の停滞性が強く、平滑化タイプでは比較的交換がされやすいとされている。中海には国営中海干拓・淡水化事業や県営の干拓事業の際に作られた広大な面積の浚渫窪地が中海東南部(以下米子湾と呼ぶ)に残されている(井内ほ

¹ NPO 法人 自然再生センター NPO Nature Restoration Center, 28 Tenjin-machi, Matsue, Shimane 690-0064, Japan

² 鳥取大学大学院連合農学研究科 The United Graduate School of Agriculture Science, Tottori University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

³ 島根大学総合理工学部, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

⁴ ワイエスアイ・ナノテックス(株) YSI/Nanotec Inc., Higashida-cho 8, 13F Kawasaki-ku, Kawasaki, Japan

受付日: 2011年2月14日, 受理日: 2011年12月22日

か, 2009). これらの窪地は彦名沖の連続した窪地と浅場に掘り込まれた独立性の強い窪地に分けることができる. 連続した窪地はアスペクト比(窪地の幅/深さの比)から平滑化タイプの窪地と考えられ, 成層期においてもしばしば水の入れ替わりが起きていると考えられる(福岡ほか, 2002; 木戸ほか, 投稿中). 一方, 独立性の強い窪地は局所的な窪地に属し, 窪地内の水は停滞性が強く, 5月から10月にかけてほとんど入れ替わることなく無酸素水塊が形成され, 高濃度の栄養塩類や硫化水素が蓄積している(Seike *et al.*, 2009; Okumura *et al.*, 2009). しかし, 10月下旬から12月初旬にかけては水の入れ替わりが起き, 無酸素水塊が解消し, 栄養塩類の濃度も低下する(相崎・木戸, 2010). すなわち, 高濃度の栄養塩や硫化水素を含む無酸素水塊が周辺水域に湧昇し, 影響を与えていると考えられる. 海域での窪地の水の入替わりについてはモデルを使った検討が行われているが(大見ほか, 2010), モデルの検証のためには実測データが必要である. 地中海の独立性の強い窪地での水塊の動きに関する実測データはこれまでに無いところから, 私たちは晩秋の水が入替わる時期の窪地内の水の挙動について調査した.

方法

調査は米子湾の細井沖に位置する浚渫窪地で行った. 窪地の位置と形状を図1に示す.

この窪地は安来市の工業団地造成に伴う干拓工事の折に作られたもので, 約8ha (300m × 200 ~ 250m) の面積で複雑な形状をしている. 元は深さ12m程度の窪地であったが, 平成12年から14年にかけて国土交通省により鉄鋼スラグを用いて埋め戻され, 現在は8~9m程度の深さになっている. まわりは4.5m程度の深さであるところから周辺より4~5m程度掘り込まれた窪地である.

窪地内の水の動きを明らかにするため超音波流向流速計(ADCP)を窪地内に設置した. 設置位置を図1に示す. ADCP(超音波ドップラープロファイラーPC-ADP, Sontek/YSI社製, 周波数:1.5MHz, センサからの不感距離:0.4m, 平均化時間:60secに設定)は台に固定し, ダイバーにより垂直になるように設置した. 設置は2010年11月4日に行い12月2日に回収した. その間, 5分ごとに50cm間隔で流向と流速を計測した. また, この期間に12回現地調査を行い, 現地で多項目水質計(556MPS, YSI社)での計測と採水調査を行った. 採水は北原式採水器を用い

て1, 3, 5, 7m および直上水を採取した. 直上水は湖底から0.5mの水を採取した. 持ち帰った試料について栄養塩の分析をオートアナライザー(Auto Analyzer Quattro, BLTEC社)を用いて行った(野尻, 2001). この期間の気象データは松江气象台のホームページ(<http://www.jma-net./matsue>)から引用した.

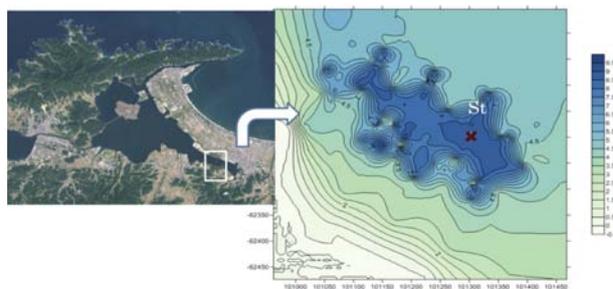


図1 細井沖窪地の場所と窪地の形状および超音波ドップラー流向流速計の設置位置.

Fig. 1 Location and shape of the Hosoioki dredging hollow and study site.

結果および考察

水質変化

水温の変化を図2に示す. 計測を始めた11月5日では表層水温が16°C, 窪地内が22°Cで窪地内の方が水温が高い状況であった. 11月8日に深度7mより深い窪地の水は2°C程度の水温低下が見られたが, それより上層では逆に若干の水温上昇が観測された. その後, 15日には3°Cほどの急激な水温低下が見られ, その後ほとんど同じ水温を維持した. 15日以降は深度4m~5mの間に23日以降は深度3~4mの間に水温が急激に変化する層が見られた.

図3に塩分変化を示す. 窪地内の深度7mより深い底層の水は17日までは塩分が少し低下する傾向を示し, 18日以降は徐々に上昇し22日には28psuになり安定した. 塩分躍層は深度4m付近にあるが, 11月16日以降には深度5mより深い窪地の水はほぼ均質化し, 窪地の水が外に出やすい状況になったものと推測された.

溶存酸素(DO)濃度の経日変化を図4に示す. 窪地内底層の水は15日に1mg l⁻¹程度まで上昇したが, それ以外はほとんど無酸素状態であった. 5~6mの水は11月11日に4mg l⁻¹を超えるDO値となったが16日以降はほとんど無酸素となった.

図5にNH₄-N濃度およびPO₄-P濃度の経日変化を示す. 両者とも類似した変化を示した. 窪地底層

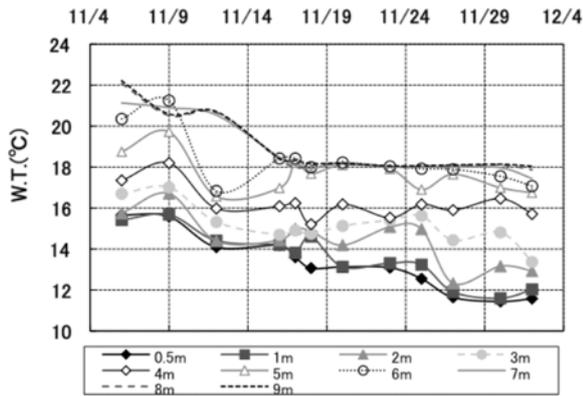


図2 細井沖窪地における水温の変化 (2010年11月4日～12月2日)。

Fig. 2 Change in vertical profile of water temperature from 4 Nov. to 2 Dec. 2010 in the Hosoiki dredging hollow.

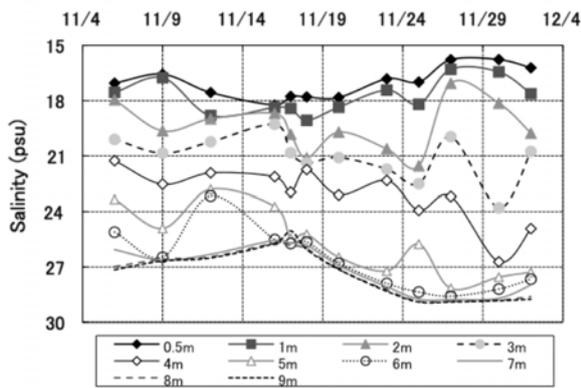


図3 細井沖窪地における塩分の変化。

Fig. 3 Change in vertical profile of salinity from 4 Nov. to 2 Dec. 2010 in the Hosoiki dredging hollow.

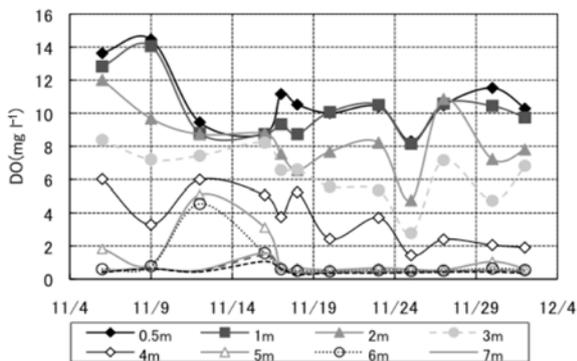


図4 細井沖窪地におけるDOの変化。

Fig. 4 Change in vertical profile of DO concentration from 4 Nov. to 2 Dec. 2010 in the Hosoiki dredging hollow.

の7m及び直上水には11月初旬には 1mg l^{-1} を超える $\text{NH}_4\text{-N}$ や 0.25mg l^{-1} を超える $\text{PO}_4\text{-P}$ が蓄積していたが15日にかけて徐々に低下し16日には急激に低下した。その後は、窒素は 0.4mg l^{-1} 付近を、リンは 0.1mg l^{-1} 付近の濃度を変動した。

以上の水質変化の結果を整理すると水温変化からは11月8日、15日ごろに深度7mより深い窪地底層の水が入れ替わったと推測された。深度0～6mまでの塩分変化からは8日に起きた水の入替わりは強風(後述)による鉛直混合によるものと推測された。15日の水の入替わりも、17日まで塩分の変化がほとんど無かったところから鉛直混合によるものと考えられた。15日に起きた水の入替わりにより、窒素やリン濃度は半分程度に低下した。それ以前の濃度低下とあわせると11月前半で約60%濃度が低下していたことから、窪地内の水の多くが入れ替わったものと推測された。11月後半には深度5mより深い窪地内の水質がほぼ均質化し、窪地の水が容易に外に移動するようになったものと考えられた。

窪地内の水の流れ

ADCPで測定した底層の水温と水位の変化を図6に示す。水温は前述したごとく、11月8日に急激に低下し、その後13日から14日にかけて徐々に低下した後15日に急激に低下した。この時の水位は8日～10日にかけては高く、15日は低くなった。

ADCP設置時の米子における風速と風向の変化を図7に示す。水の入替わりの見られた11月8日から12日にかけては瞬間最大風速が 15m s^{-1} を超える強い風が吹いた。風向きは南西から西の風であった。その後15日にも水の入替わりが見られたがその時の瞬間最大風速は 13m s^{-1} で平均最大風速は 7m s^{-1} であった。風向きは北北西であった。その後、瞬間最大風速が 10m s^{-1} を超えたのは23日、28～30日でもこの時にも水の入替わりが見られた。風向きは23日が北の風、28～30日が西の風であった。

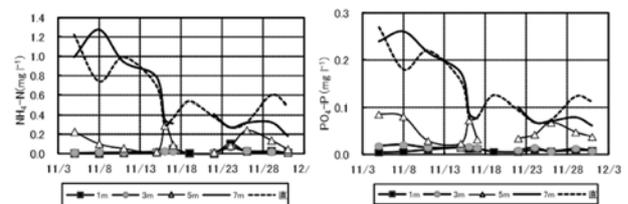


図5 細井沖窪地における $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変化。

Fig. 5 Changes in $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations from 4 Nov. to 2 Dec. 2010 in the Hosoiki dredging hollow.

表層 1m での 1 時間平均の流速を図 8 に示す。平常でも 2cm s^{-1} 程度の流速が計測されたが、風が強まると流れが速くなり、11 月 10 日、15 日、24 日および 11 月下旬には 1 時間平均値で 10cm s^{-1} を超える流速が計測された。水の入替わりが起きたと考えられる 8～9 日および 15 日の 1 時間平均の流向と流速の散布図を図 9 に示す。南西の風が卓越した 8～9 日では東北東への流れが、北北西の風が卓越した 15 日では南西及び東北東への流れとなった。すなわち、表層の流れは風の向きに沿って発生していることが分かった。図 10 に深度 4m 層での流向と流速を示す。4m 層は窪地周辺の水深 (4.5m) に近く、窪地部分との境界の

深度である。11 月 8～9 日では 1m における流向と同じ北東へ向けた流れも見られたが、東南東への流れもあわせて見られた。11 月 15 日では 1m 層では南西および東北東への流れであったが 4m 層では北西から北東への北向きの方向への流れが卓越した。1 時間平均の流速は 6cm s^{-1} 程度が観測され、1m 層より少し低下していた。図 11 に窪地内の 7.5m 層における 1 時間平均の流速を、図 12 に 11 月 8～9 日の流向と流速および 11 月 15 日の流向と流速を示す。窪地の中は水の流れがないと考えていたが、実際には 1 時間平均値の平均で 2cm s^{-1} 、最大で 6cm s^{-1} 程度の流れがあることが分かった。また、流れの方向は表層 1m 層や下層 4m 層の流れとは連動せず 11 月 8～9 日はあらゆる方向に 11 月 15 日はやや北向きの流れが卓越する傾向を示した。図 13 に 11 月 8 日の 14 時から 17 時にかけての 5 分間隔で測定した東西方向の流れの実測値を示す。約 10 分間隔で流れの方向が入替わっている事が分かった。また流速も 10cm s^{-1} を超えるかなり強い流れが生じていることも明らかになった。

これらのことから、窪地内では上層の水の動きにより密度の高い窪地内湖水に内部セイシュが発生し、激しく揺れていることが分かった。すなわち、たらいの中の水を揺すったときに生じるような、向きを頻繁に変化させる流れが窪地内で起きていた。細井沖の窪地における流れの周期は約 10 分程度で変化すると推測され、流れの方向はあらゆる方向に及んでいた。

11 月 8～9 日にかけて窪地底層の水温は急激に低下したが、栄養塩濃度の低下は少なかった。この時は南西の風が吹き湖岸側から沖へ向けた風向きであった。この時の 1m、4m および 7.5m 層における南北方向への 1 時間平均の水の流れを図 14 に示す。プラスが南方向、マイナスが北方向である。1m 層と 4m 層では基本的には逆方向の流れとなっていた。また、流れの方向は時間により変化しており、一方向の流れで

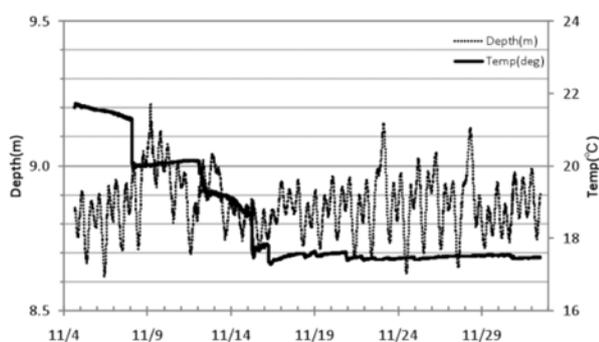


図 6 ADCP で測定した水温と水位の変化。
Fig. 6 Changes in water temperature in bottom layer and water level measured by ADCP in the Hosoioki dredging hollow.

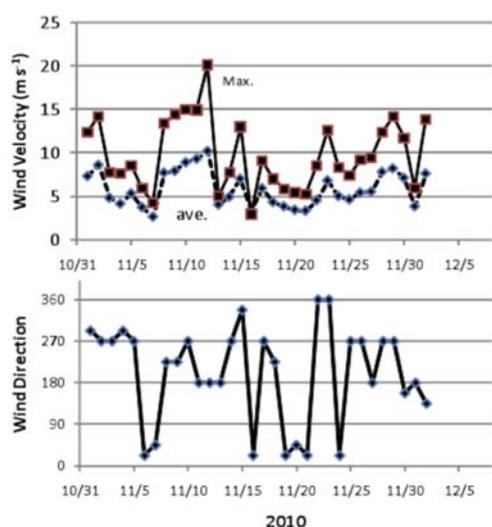


図 7 米子測候所における ADCP 設置時 (2010 年 11 月) の瞬間最大風速、平均最大風速及び風向の変化。風向、90°東、180°南、270°西、360°、0°北。
Fig. 7 Changes in maximum wind velocity, average maximum wind velocity and direction in Yonago area in Nov. 2010.

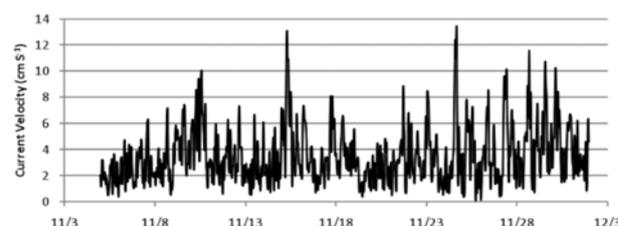


図 8 細井沖窪地表層 1m における 2010 年 11 月 5 日～12 月 2 日間の流速変化 (1 時間平均値)。
Fig. 8 Change in current velocity (1 hour average) at 1m depth in surface layer of the Hosoioki dredging hollow during from 5 Nov. to 2 Dec. 2010.

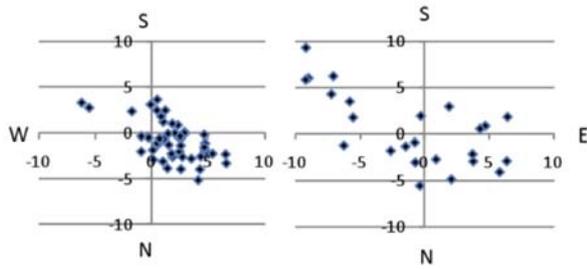


図9 細井沖窪地表面層1mにおける流向と流速(1時間平均値, cm s^{-1}). 左図:11月8~9日, 右図:11月15日.

Fig. 9 Current direction and velocity (1 hour average, cm s^{-1}) at 1m depth in surface layer of the Hosoioki dredging hollow. Left side: 8 ~ 9 Nov.; Right side: 15 Nov. 2010.

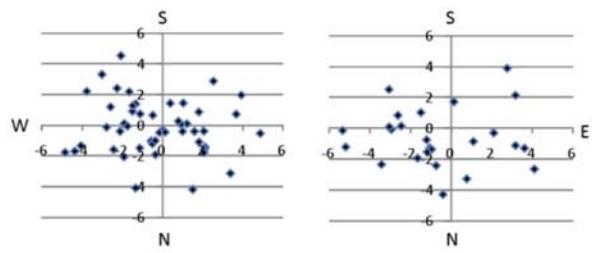


図12 細井沖窪地7.5m層における流向と流速(1時間平均値, cm s^{-1}). 左図:11月8~9日, 右図:11月15日.

Fig. 12 Current direction and velocity (1 hour average, cm s^{-1}) at 7.5m depth in bottom layer of the Hosoioki dredging hollow. Left side: 8 ~ 9 Nov.; Right side: 15 Nov. 2010.

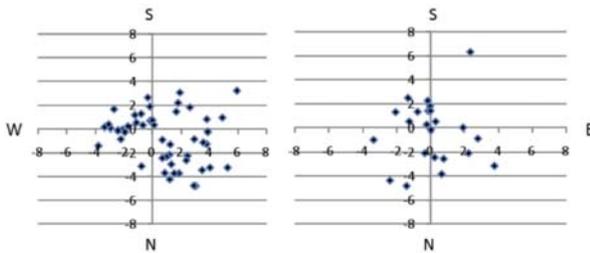


図10 細井沖窪地4m層における流向と流速(1時間平均値, cm s^{-1}). 左図:11月8~9日, 右図:11月15日.

Fig. 10 Current direction and velocity (1 hour average, cm s^{-1}) at 4m depth in middle layer of the Hosoioki dredging hollow. Left side: 8 ~ 9 Nov.; Right side: 15 Nov. 2010.

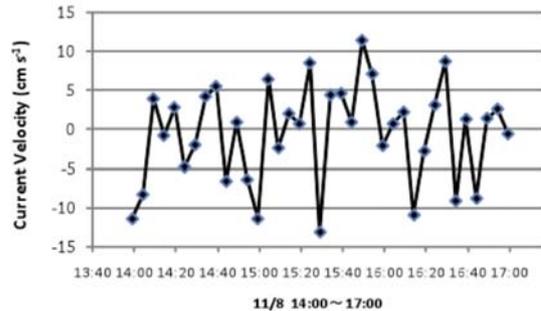


図13 細井沖窪地7.5m層における水の流れ. 東西方向での5分間隔の実測値.

Fig. 13 Current velocity of east-west direction in 5 minute interval at 7.5m depth in bottom layer of the Hosoioki dredging hollow.

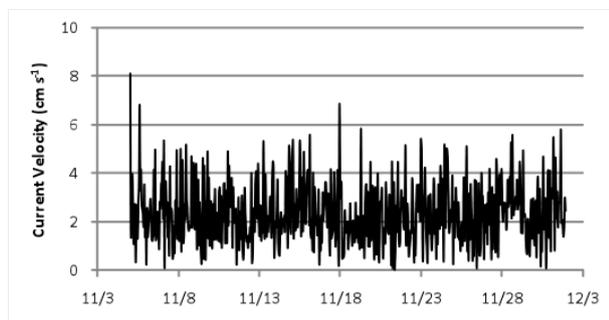


図11 細井沖窪地7.5m層における2010年11月5日~12月2日間の流速変化(1時間平均値).

Fig. 11 Change in current velocity (1 hour average) at 7.5m depth in bottom layer of the Hosoioki dredging hollow during from 5 Nov. to 2 Dec. 2010.

はなく往復する流れであった。これは風が止まったときに起きるセイシュによるものと考えられた。7.5m層では4m層や1m層の水の流れとは無関係に周期の短い往復の流れを示した。南北方向へは北向きと南向きの流れが交互に起きており、底層の水塊が振動していると考えられた。これらのことから6m程度の深度までは水が混ざったが、最下層の7.5m以深では水温は低下したものの入れ替わった水の量は少なかったものと考えられた。11月15日は8~9日に比べると風の吹き方は弱かったが沖側から岸へ向けた風向きであった。この時の1m, 4mおよび7.5m層における南北方向への1時間平均の水の流れを図15に示す。1m層と4m層では基本的には逆向きの流れとなっていた。1m層では午前中に南向きの強い流れが卓越し午後は北向きの流れが見られた。4m層では午後に

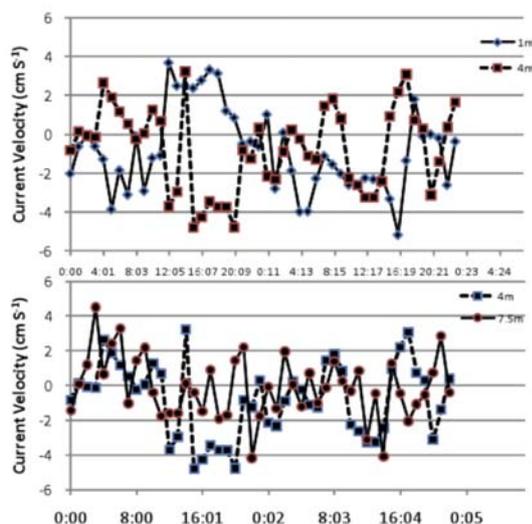


図14 細井沖窪地における11月8～9日の南北方向への水の流れ(1時間平均値)。上図:1m(◆)と4m(■)の比較,下図:4mと7.5m(●)の比較。
Fig. 14 Comparison of current velocity (1 hour average) of south-north direction between 1m and 4m depths (upper) and 4m and 7.5m depths(lower) during 8 ~ 9 Nov. 2010.

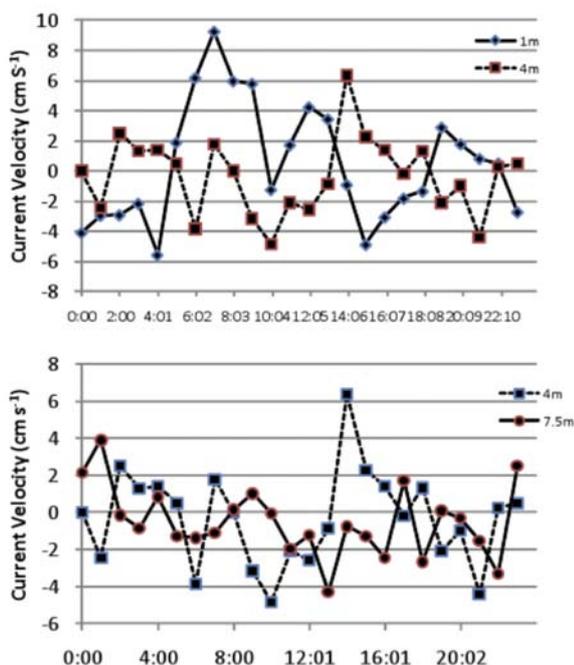


図15 細井沖窪地における11月15日の南北方向への水の流れ(1時間平均値)。上図;1m(◆)と4m(■)の比較,下図;4mと7.5m(●)の比較。
Fig. 15 Comparison of current velocity (1 hour average) of south-north direction between 1m and 4m depths (upper) and 4m and 7.5m depths(lower) in 15 Nov. 2010.

強い南向きの流れが観測された。このことから北北西の強い風で表層の水が米子湾奥に吹き寄せられた後、風がやむことで反対の流れとなり、下層の塩分の高い海水が米子湾奥に向かって供給されたものと考えられた。水深7.5mでの水の流れは4mでの流れと無関係にはほぼ北向きの流れが卓越しており、11月8～9日は異なった挙動を示した。細井沖窪地はその北側に沖の俎と呼ばれる浅瀬や岩礁があり北側の底層水が直接窪地に来ることができない。湖心側の底層水は彦名沖の連続した窪地を通して細井沖窪地の東南部まで達し萱島や水鳥公園沖の窪地内の高まりなどのところで湧昇し、窪地には東南の方向から侵入するものと推測される。従って、窪地内の硫化水素や高濃度の栄養塩を含む無酸素水塊は窪地の北西から北東の北側の浅瀬部分に湧昇し、その後拡散しているものと推測された。

細井沖窪地の西側の湖岸は現在浅場造成が行われており、浅場の生態系の回復が計られようとしている。浚渫窪地の無酸素水塊はその部分を直撃する可能性が高く、浅場造成と併せて浚渫窪地の環境対策が求められる。

まとめ

中海南東部に位置する細井沖浚渫窪地において、2010年11月4日～12月2日の期間、超音波ドップラー流向流速計(ADCP)を設置し窪地内の水の挙動を調べた。また同期間に12回の現地調査を行い水質変化を調査した。調査開始時には高濃度の栄養塩を含む無酸素水塊が窪地内の底層にあった。ADCPでの水温計測では11月8日、12日、15日に窪地内底層水の水温低下が観測され、水の交換が起きたと考えられた。しかし、11月8日では窪地内底層の栄養塩濃度の顕著な低下は見られなかった。15日には顕著な栄養塩濃度の低下が観測された。窪地内底層の水塊は上層の水の動きとは無関係に向きを激しく変化させ振動していた。流速は 10cm s^{-1} 程度まで上昇することがあり、流れの方向が変わる周期は10分程度であった。このことから、窪地内の密度の高い底層水は内部セイシュにより激しく振動していることが明らかとなった。栄養塩濃度が低下した15日では窪地内底層では北向きの流れが卓越し水が一方向へ流れていた。これらの結果から、窪地内の高密度の底層水は、表層の水温が低下し窪地内水との密度差が減少する晩秋の時期に強風が吹くと入れ替わりが起きることが明らかになった。

謝 辞

調査を行うにあたり協力していただいた島根大学生物資源科学部 生態環境工学研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。また、本研究は環境省環境研究総合推進費の援助を受けて行われたことを記し、謝意を表します。

引 用 文 献

相崎守弘, 木戸健一郎 (2010) : 高濃度酸素水生成装置を用いる汽水湖貧酸素水塊の水質改善及び湖底の底質改善, 中海米子湾の浚渫窪地の水質特性, 平成 19 年度~平成 21 年度科学研究費補助金 (基盤研究(A)) 研究成果報告書 (研究代表者:清家泰), 34-39.

福岡捷二, 三浦心, 黒川岳司, 松下智美, 船橋昇治 (2002) : 強固な密度成層を有する水域における下層水内の流動と水質変化, 海岸工学論文集, 49: 356-360.

井内美郎, 西村清和, 渡辺和明 (2009) 米子湾浚渫窪地の分布状況と規模の見積もり, 平成 20 年度委

託業務完了報告書 環境省環境技術開発等推進費による研究 浚渫窪地埋め戻し資材としての産業副産物の活用—住民合意を目指した安全性評価に関する研究—, pp5-6.

内藤了二, 中村由行, 今村均, 佐藤昌宏 (2006) : 浚渫跡地の修復に関する施工上の影響と研究開発課題の抽出, 海洋開発論文集, 22:649-654.

野尻幸宏 (2001) : 湖沼の栄養塩, 霞ヶ浦モニタリングデータブック, pp12-15.

Okumura M., Anate T. and Seike Y. (2009): The behavior of iron(II) and hydrogen sulfide in anoxic brackish lake water, Verh. Internat. Verein. Limnol., 30:1107-1110.

大見智亮, 内藤大輔, 寺澤知彦 (2010) : 浚渫窪地における流れの従来型シミュレーション手法の限界と新手法, 水産工学, 46: 235-240.

Seike Y., Murakami M., Fukumori R., Senga Y., Ayukawa K., Mitamura O., Terai H., Kondo K., Ueda S. and Okumura M. (2009): Behavior of hydroxylamine and nitrous oxide in the stratified brackish Lake Nakaumi, Japan, Verh. Internat. Verein. Limnol., 30:1073-1076.