南三陸長面浦における溶存酸素濃度の変動 に関する現地調査

FIELD OBSERVATIONS OF DO CONCENTRATION VARIATION IN NAGATSURA-URA LAGOON ON SOTHERN SANRIKU COAST

高崎 みつる¹・田中 仁²
Mitsuru TAKASAKI and Hitoshi TANAKA

¹正会員 工博 石巻専修大学教授 理工学部 (〒986-8580 宮城県石巻市南境新水戸 1 番地)

²正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

Nagatsura-ura Lagoon is located at the southern end of Sanriku Coast, Japan with the area of 1.41km² and the maximum water depth of 10m. The lagoon area has been used for cultivating oyster for these several decades. In the recent years, however, the appearance of anoxic water causes severe damage to the fishery industry in this area.

In the present study, filed observations of water quality, such as water temperature, salinity, dissolved oxygen (DO) concentration, and phytoplankton were carried out every one week in Nagatsura-ura Lagoon to investigation detailed process of occurrence of anoxic water and its decline. During the course of continuous measurement for 6 months from May to November 2002, abrupt recovery of DO can be measured. Based on the analysis of phytoplankton, it is concluded that the recovery was induced by water exchange between the lagoon and the sea through a narrow channel connecting these two.

Key words : Nagatsura-ura Lagoon, dissolved oxygen (DO), anoxic water, field observation, stratification

1. はじめに

長面浦は南三陸の宮城県河北町に位置する海跡湖であり、狭水路により追波湾とつながれている汽水域である(図-1 参照)。海域から隔てられていることによる水域の静穏な特徴を利用して、カキの養殖が盛んに行われているが、生産規模の拡大とともに底質が悪化し、貧酸素水塊の発生が見られるようになった。そのため、浦内の水質改善策の検討がなされている。その効果は水域内における流動特性に大きく依存するものであることから、事前にその水理特性を十分に把握しておく必要がある。そこで、2002年に調査に着手し、昇温期から降温期にかけて浦内において各種水質項目の現地観測を実施した。その結果、11月に劇的な溶存酸素(DO)の回復が見られた。ここでは調査結果の詳細とこの溶存酸素回復の過程に関して報告を行う。

2. 観測対象ならびに観測調査方法

長面浦は宮城県北東部の北上川河口近くに位置し、周囲は約8km、その面積は1.41km²である。その概要を図-1に示す。長面浦を取り囲む集水域からは数

図-1 長面浦の概要

本の沢を通じて淡水の流入はあるものの、潮汐による入退潮が浦内の流動を大きく支配している。追波湾と結ぶ狭水路は1.7kmの長さを有し、その水深は

図-2 浦内における養殖筏の分布 (1985 年)

図-3 既往研究による実測結果¹⁾

最大で約 2m であるが、奥部は 10m 近い大きな水深を有している (図-1 参照)。カキ養殖は水深 5m 以深の南寄りの水域で行われている (図-2)。養殖筏は平均して 20m×5m 程度の大きさであり、浦内には概ね 200 基ほどの筏が存在する。

著者らはこれまで長面浦における水理特性に関する基礎的調査を実施している^{1), 2)}。その成果の一部を図-3 に示す。観測は 2002 年 7 月 25 日大潮時に行われ、図の観測地は上げ潮最強時に対応する。また、横軸の番号は図-1 の測点に対応する。図-3(a)において左端の塩分は 15PSU ほどであり、追波湾において北上川の河川流出水と混合した海水が流入していることが分かる。一方、奥部下層は海水で占められている。このため、図-3(b)において、流入水の中層貫入が認められる。また、浦内における水位観測によ

れば、浦内での水位振幅は大潮時に約 70cm、小潮時に約 50cm であり、外海潮位に比べて約 50% の低減が見られる。同様な水位低減は高瀬川河口³⁾、七北田川河口⁴⁾ においても報告されている。

長面浦における現地観測は一週間に 1 回、午前 9 時前後での実施を原則に行った。観測は平成 14 年 5 月から始めた。観測地点は浦海奥に位置する図-1 の St.10 であり、カキ養殖筏に隣接する。水深は 9.5~10m であり、測定は水表面下 0.5m から底面近くまで、1m 間隔で行った。観測項目は水温、塩分濃度、溶存酸素、植物プランクトン特有の活性指標であるクロロフィル-a とフェオフィチンなどである。採水には 10 l バンドーン採水器を用いた。水温測定はサーミスター温度計を用い、塩分測定には光学式屈折計を用いた。溶存酸素の測定はウィンクラーアジ化ナトリウム変法を用いている。

溶存酸素は採水直後の水を船上で直ちに固定し、石巻専修大学に持ち帰り分析に供した。クロロフィル-a およびフェオフィチンの分析は採水した水を保冷し大学に運んだ直後に分析に供している。

観測期間中の降雨量としては、長面浦漁業協同組合に設置してある降雨計のデータを用いた。

3. 観測結果

(1) 溶存酸素の変化

深水層溶存酸素の減少は 5 月にすでに始まっていた。本格的な調査が始まった 5 月 31 日の底泥直上 1m 層までの溶存酸素は 1.0mg/l を示していた。調査期間中の 5 月 31 日から 11 月 29 日まで週 1 回の頻度で行った溶存酸素鉛直分布の変化を図-4(a)に示す。縦軸は鉛直座標であり、横軸は 1 回目から 28 回目までの観測回を表す。図に示されるように観測期間中の溶存酸素は全体的に深水層において枯渇状態を保ったなかで推移していた。図中横軸の 1 は 5 月 24 日に、28 は 11 月 29 日に対応している。図から深水層や底泥直上層でいったん形成された無酸素層が秋期循環まで堅固に維持されていたわけではなく、対象期間中には何度も溶存酸素の弱い回復傾向と溶存酸素減少に向けた波のような変化が観察できた。深水層の溶存酸素枯渇が最も強く見られた時期は 8 月中旬から 11 月 1 日までで、この間深水層の底泥直上から上 3m は溶存酸素 0 mg/l を示し、強烈な硫化水素臭を伴う強い還元状態を示していた。溶存酸素は 25 回調査時 (11 月 8 日) に劇的に解消した。

溶存酸素鉛直分布変化の最も特徴的なことは、回復時に表層すぐ下に見られた貧酸素水塊の出現である。25 回調査 (11 月 8 日) 時に非常にはっきり認められたこの現象は 21 回調査時にも弱いながら認めることができた。

深水層の無酸素層が解消していく過程で水深の浅い層に出現する貧酸素水塊は、拡散、移流による移動機構のみでは説明仕切れない現象が起こっていることを示唆する。

Note: 観測月日

1: 5月24日, 2: 5月31日, 3: 6月7日, 4: 6月14日, 5: 6月21日, 6: 6月28日, 7: 7月5日, 8: 7月12日, 9: 7月19日, 10: 7月26日, 11: 8月2日, 12: 8月9日, 13: 8月17日, 14: 8月22日, 15: 8月30日, 16: 9月6日, 17: 9月13日, 18: 9月20日, 19: 9月27日, 20: 10月4日, 21: 10月11日, 22: 10月17日, 23: 10月25日, 24: 11月1日, 25: 11月8日, 26: 11月15日, 27: 11月22日, 28: 11月29日

図-4 現地観測結果 ((a)DO, (b)水温, (c)塩分, (d)クロロフィル-a, (e) σ_t)

(a) 2002 年 7 月 13 日

(b) 2002 年 10 月 5 日

図-5 塩分濃度の鉛直分布

(2) 塩分・水温の変化

塩分、水温の観測期間中の変化を図-4(b), (c)に示す。塩分鉛直分布の変動は観測期間中を通して見られ、安定した状態が長く続かない傾向を示した。塩分鉛直分布は一般に下に向かって高くなるが、このような常識的な分布を示したのは 11 月 8 日までの 24 回の観測回数のうち 8 回だけで、残りの 16 回の観測では塩分の低い水が高い水の下に観測された。このような鉛直方向の塩分変曲点は鉛直方向に 1 回現れる例が多かったが、変曲点が複数回 (2~3 回) 現れた観測結果も示された (図-5(a), (b))。

水温 (図-4(c)) は観測初期から全体的に上昇傾向が続き、7 月 19 日 (横軸 9 に対応) から 9 月 13 日 (横軸 17 に対応) まで表層近くで 25℃以上の高い状態が続いた。その後の 6 週間で表層水温は約 10℃低下していき、溶存酸素の急激な回復の起こった 11 月 8 日には 15℃以下に下がっていた。水温鉛直分布

は塩分に見られるほど極端な不連続性を示さなかった。水温鉛直分布にも観測期間を通し合計 15 回上下層間での水温逆転現象が観測されたが、このうちの 11 回は水面に接した層 (0~1m) とその直下 (1~2m) 層とに見られるものだった。23 回以降 3 回の観測では、表面水温がもっとも冷たく、その下すべての層で表面より高い水温を示していた。19 回から 25 回調査まで鉛直方向水温分布は一様化していった。この調査期間に塩分鉛直分布の表層から深水層に向かう変化は一様化していなかった。塩分鉛直分布と水温鉛直分布とは連動せず、密度差に依存した要因以外に挙動が支配されていると思える傾向を示した。

(3) クロロフィル-a の変化

図-4(d)に示す図は、植物プランクトンの指標となるクロロフィル-a の鉛直方向分布の時間変化である。植物プランクトンは、光合成の可能な表層に近い部分で生産されるが、生産層の系外流出が高い場合や高次生物による捕食が大きい場合を除き長期的には沈降した植物プランクトンやその遺骸が底質上に堆積していく。クロロフィル-a の鉛直分布は全体的に表層から中層にかけて低い値を示した。調査地点はカキ養殖筏の置かれた水域であったため、表層から中層にかけてのクロロフィル-a 鉛直分布にはカキによる植物プランクトン摂餌が影響しているであろう。図-4(d)では、4~17 回 (6 月 14 日~9 月 13 日) にかけて、底層に高濃度のクロロフィル-a が集積している傾向が見られる。この期間は底層で溶存酸素の枯渇が起こっていたため、高等生物は生息できない。この期間はベントスなどによる植物プランクトン捕食が起こらなかったと考えられ、底層に集積したプランクトンはカキの食べ残したもののも含め、生産層から沈降してきた成分とみなせる。

植物プランクトン指標であるクロロフィル-a の無光条件下の変化は、状況に応じて減少する場合や増加する場合のあることが知られている。今回の調査から植物プランクトンの活性状態やクロロフィル-a 濃度の厳密な議論はできない。ここでは底層に集積したクロロフィル-a 挙動に着目することで、水中密度が水と近い物質の全体的な動きを知り、水の動きのマーカー的存在の追跡になると考えてみた。興味深いことは、底層に集積した植物プランクトンの濃度に大きなムラが見られる点である。これは、底層に集積した植物プランクトンが流れに乗って動いていく可能性の大きいことを示唆している。急激な溶存酸素回復の見られた 25 回 (11 月 8 日) に近い 14, 15 回から 17 回にかけて植物プランクトンの最も集積した層が底層直上から徐々に上へと移動していることが観測されている。また 17 回から 21 回にかけては本来底質上に沈降している植物プランクトン集積層が完全に浮遊していることを示していた。このような観測結果は水の動きに伴う比重の軽い成分の移動現象が起こっているとする説を支えるものといえるだろう。

図-4(e)に関しては後述する。

4. 考 察

(1) 降雨の影響

長面浦集水面積の 8km^2 、長面浦面積 1.43km^2 に降った雨によってどの程度長面浦が希釈されるかを検討した。降雨のどの程度が沢水となって長面浦に入るか検討することは困難であった。そこで降雨から長面浦へと注ぐ沢水水量の推定は、 100mm を超える降雨までが雨量のおよそ 20% が流量に変換され、 100mm 以上で降雨量と出水量が対応するとした既往データ⁵⁾ に基づいて行った。

降雨の影響を考察する対象期間は、観測日前に降雨が無い状態が 1 週間以上続き、集水域から流入する沢水水量の増加がはっきり認められるような (15mm 以上) の雨が降った週を挟んでいる 2 週の観測とした。観測期間中の 3 回がこの条件に当てはまった。塩分濃度の変化では、湖盆形態 (50m ピッチで測定した浅深測量から推定) を反映させた 1m 層厚毎の塩分絶対量の変化を推計した。希釈に必要な淡水量の推定は、降雨を挟んだ 1 週間の塩分濃度変化を生じさせるために必要な 1m 層厚毎の容積に対する希釈量として求めた。

3 回の対象期間は 6 月 14 日～6 月 20 日、8 月 9 日～8 月 15 日、9 月 28 日～10 月 5 日で各対象期間中に降った雨は 42.5mm 、 15mm 、 115.5mm となっていた。

降雨を挟んだ週の塩分濃度の変化を 1m 層の容積毎に計算し、直接集水域に降った雨由来による塩分濃度の希釈寄与率を全水深対象で考えた場合、表層 2m だけを対象に考えた場合のそれぞれに対して試算した。その結果、降雨量が少ない 8 月 9 日～8 月 15 日には集水域に降った雨による希釈寄与率は大体 1% と 2%、 42.5mm の降雨があった 6 月 14 日～6 月 20 日で 2% および 4% 程度、降雨量が大きかった 9 月 28 日～10 月 5 日で 2% と 5% 程度となっていた。

このように集水域の降雨が長面浦塩分低下に果たす影響は小さく、長面浦の塩分変動のおもな原因は狭水路を通して流入する追波湾海水由来などと考えられそうである¹⁾。

降雨条件を限定せずに、すべての降雨を対称とした 1 週間降水量と 1 週間の 1m 層毎塩分変化を表層から 3m 層までまとめて示した結果を図-6 に示す。この図は調査対象期間中のすべての降雨と降雨のあった週を挟んだ 3m まで各層の塩分濃度の変化を示したもののだが、降雨と塩分減少には正の相関が認められるわけではなく、降雨に無関係に塩分濃度が増加していくケースも見られた。降雨時に塩分濃度が上昇する現象は降雨と塩分希釈効果が無関係なことを示し、塩分濃度変化は集水域に降った雨とは無関係な要因によって導かれていると考えられる。これは著者らによる既往の報告結果¹⁾ を支えるものとなった。

(2) 深水層での溶存酸素消長

図-6 1 週間の降雨量と 0～3m 間の 1m 毎各層の塩分濃度変化

深水層で発達した無酸素層は 25 回 (11 月 8 日) 観測時の急激な回復に至るまで深水層で安定した状態を維持することはなかった。5 月から始まった観測期間中、何度か深水層の溶存酸素回復傾向と減少とが繰り返し起こっていたことは、図-4(a) に見ることができる。図-4(e) は、表層 1m ～ 2m 層の水温・塩分から密度を求め、 σ_t としての変化をプロットしてある。 1.5m 採水に代表されるこの層は、図-2 に示す様に、別途行われた観測で明らかになった流入水の貫入深さ^{1), 2)} に相当する。

図中大きな山型のピークは観測回数 4, 6, 11, 17, 19, 21 回に対応する。溶存酸素回復局面を、ここでは 7m 以深～底泥上 (およそ 10m) までと $5\sim 7\text{m}$ 層の二つの層に限り、2 つの層の溶存酸素がそれぞれプラスに転じた観測時を回復局面と定義した。

溶存酸素回復局面を示したのは観測回数で 4, 6, 11, 16, 19, 21 回となっていた。水の重さの指標となる変化を表す山型ピークとは、1 箇所がずれていただけでその他は全て一致していた。またズレのあったピークに相当する観測時の溶存酸素回復は、一連の溶存酸素回復局面の中で最も弱い回復傾向を示していた。このように流入水の貫入する深さの層を対象に求めた水の重さの変化を示す波形は深水層の溶存酸素回復局面と関係していた。

(3) 深水層での急激な溶存酸素回復

25 回目 (11 月 8 日) に観測された深水層無酸素化の完全解消は、表層から下の 2.5m を中心に 1.5m から 3.5m に貧酸素水塊の発現を伴っていた。これまで無酸素化の解消過程でこのような貧酸素水塊の出現が報告された例は見当たらない。この観測結果はこれまで水塊の水質変化を、移流や拡散に基づいた考え方で進めてきた方向とは違う挙動でもある。

この急激な溶存酸素回復時に何が起こったのかを、植物プランクトン起源のクロロフィル-a とフェオフィチンから考察した。図-7 にはクロロフィル-a とフ

図-7 溶存酸素回復期に見られる植物プランクトン濃度鉛直分布の変化

フェオフィチンを合計した色素量の変化を示す。図中の1, 1'は深水層で弱い溶存酸素回復局面を示した14回から15回目の観測時の色素合計量を、2, 2'は、はっきりとした溶存酸素回復局面を示した20回から21回目を、3, 3'は24回目(底泥上3mは無酸素)から25回目をそれぞれ示す。急激な溶存酸素回復のあった25回目のクロロフィル-aとフェオフィチン色素合計量は、図中の表記では読み取れないほど著しく低くなっていた。25回観測時を対象に、光合成が起こる表層を除く4m以深のクロロフィル-aとフェオフィチン色素の合計を求めると、24回観測時のおよそ4%であった。また、深水層のクロロフィル-aとフェオフィチン色素の合計値は、南三陸の海で測定された値と同レベルとなっていた。これは、急激な溶存酸素回復が長面浦の内部で起こった循環などに起因するものではなく、外海との水交換に依存していることを裏付ける有力な情報といえるだろう。

5. おわりに

南三陸に位置する長面浦の深水層で約6ヶ月の溶存酸素枯渇が続く期間を対象に、1回/週の頻度で行った現地観測結果から長面浦の特徴に関して次のような知見を得た。

- (1) 塩分の鉛直分布は下に向かう一様な増加傾向を示すことが少なく、上下の層で逆転が見られることが多かった。 σ_t で表した鉛直方向の密度分布も塩分鉛直分布と同じ傾向の挙動を示していた。
- (2) 最終的に急激な解消が起こった時を含め、溶存酸素回復過程で表層から下に貧酸素水塊層が出現した例が2例見られた。
- (3) 降雨が浦内の塩分濃度の希釈に及ぼす影響は無視できるほど小さい。
- (4) 流入水の貫入する深さ層の水の重さを示す経時変化波形に見られたピークは、深水層の溶存酸素の挙動によく連動していた。
- (5) 急激な溶存酸素回復の起こった後、長面浦の植物プランクトン濃度はそれまでの4%を示し、外海と等しい濃度レベルになっていた。急激な溶存酸素回復には、狭水路を通した海水交換が主な要因として働いたと考えられた。
- (6) 底質上に集積した植物プランクトンの移動と、急激な溶存酸素回復過程を経た消滅から、比重の軽い成分を移動させることのできるような水の動きが起っていたことが推測できた。

謝辞：本研究の現地調査を実施するに当たり、(株)ヤマニシ・菅野孝一郎氏、石巻専修大学・高崎研究室卒研究生、東北大学・環境水理学研究室の諸兄ならびに河北町漁業協同組合の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中 仁・高崎みつる・山路弘人・李 炫錫: 長面浦における水理特性の現地観測, 東北地域自然災害科学, 第39巻, pp.165-170, 2003.
- 2) 李 炫錫・田中 仁・高崎みつる・山路弘人: 長面浦における密度成層と海水貫入現象, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp.302-303, 2003.
- 3) 成田 舞・石川忠晴・高橋 淳: 青森県高瀬川の河口部変動特性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.526-530, 2002.
- 4) 田中 仁: 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, 第509号/II-30, pp.169-181, 1995.
- 5) 岡本芳美: 日本列島の山林地流域における降雨の流出現象に関する総合研究, 土木学会論文報告集, 第280号, pp.51-66, 1978.

(2003. 9. 30 受付)