能取湖における密度成層崩壊時の貧酸素水塊の挙動に関する現地観測

Field Observation of Anoxic Water Behavior in the Destratification Process in Lake Notoro

山本 潤¹・酒向章哲²・渡辺光弘³・牧田佳巳⁴・田中 仁⁵

Jun YAMAMOTO, Akinori SAKOU, Mitsuhiro WATANABE, Yoshimi MAKITA and Hitoshi TANAKA

Recently, the fishery damage by the anoxic water occurs in autumn in Lake Notoro. Field observation was carried out to examine the behavior of the anoxic water. The density stratification and the anoxic water at the bottom were observed in the middle of September, 2008. Then, the surface cooling and the north wind on September 19 were observed and the fishery damage was confirmed in the north of the lake the next day. Numerical study was done to clarify the behavior of the anoxic water. As a result, it was proven that the wind-driven current by the strong wind had brought windward upwelling of the anoxic water when the stratification period ended by cooling the surface.

1. はじめに

北海道北部に位置する能取湖は、北端の湖口によりオホーツク海と通じる閉鎖性の海域である。静穏な湖内ではホタテガイ稚貝の養殖が盛んに行われ、道内全域のホタテガイ養殖に必要な種苗の生産を行っている。しかし、閉鎖度が高く、養殖に伴う経年的な底質悪化もあり、夏季には貧酸素水塊が発生しやすい状態になっていることが懸念されている。

2007年9月19日には、能取湖では初めての青潮が湖内南岸の卯原内地区で発生し、中間育成中のホタテ稚貝のうち、約1,200万粒の斃死被害が報告されている。図-1にこの期間中の気象データを示す。青潮発生の数日前から気温が低下し、当日には強い南風が観測されている。青潮に関する研究は、能取湖近隣の網走湖の事例(池永ら、1999)がある他、上野ら(1992)、中辻ら(1993)、佐々木ら(1996)等によって主に東京湾を対象に行われており、貧酸素水塊の湧昇機構として、①表層の吹送流を補償する底層の接岸流や内部界面のせり上がり、②エクマン流に起因して内部界面が上昇した後の内部ケルビン波によるものが挙げられている。能取湖においても、夏季の密度成層下で貧酸素化が進行し、初秋期になって気温が低下し、躍層が弱体化していく中で、強い南風によって湖内南岸で同様の現象が生じた可能性が示唆される。

著者らは能取湖で発生した青潮および水産被害の報告を受け、2008年に夏季成層下での貧酸素水塊の形成と湖口を通じた海水交換、秋季の成層崩壊に伴う貧酸素水塊の挙動等を捉える現地観測を実施した。また、本調査期

(a) 気温 (気象庁: 2007 年常呂気象データ)

(b) 風速 (気象庁: 2007 年常呂気象データ)

図-1 青潮発生時(2007年)の気象状況

間中に、能取湖北岸の定置網で漁獲されたサケに貧酸素水塊の影響と見られる斃死被害が生じたため、その原因についても考察を行った。本稿では、これらの観測の結果を報告するとともに、貧酸素水塊の挙動の解明および漁業被害を生じさせた原因に関して検討を行ったので、それらについて論じる。

2. 現地観測の方法

2008年8月から10月に図-2に示す地点において流況、水質、底質等の観測を実施した。連続観測は、表-1に示す水温・塩分計とDO計を配した係留系およびADCPによって行った。採水・採泥による分析に加え、STDによる湖水密度とDOの鉛直分布観測を地点ア〜クにおいて5回実施した。また、上げ潮時と下げ潮時にADCPを取り付けた調査船を走行させ、湖内流況の3次元分布を把握した。さらに、写真-1に示す自記式DO計を入れた明暗筒(径15.5cm×高さ50cm)を使用して、現地における酸素消費速度の連続計測を8月27日～8月29日および9月25日～9月27日に実施し、同地点の水質・底質分析結

1 正会員 博(工) (独法) 土木研究所寒地土木研究所
2 正会員 理修 (株) アルファ水工コンサルタンツ
3 (独法) 土木研究所寒地土木研究所
4 正会員 北海道開発局網走港湾事務所
5 フェロー 工博 東北大学教授工学研究科土木工学専攻

表-1 計測機器の設置水深 (単位: m)

調査地点	St.1	St.2	St.3	St.4
ADCP	10	20	20	10
水温・塩分計	-	1,10,19	1,10,19	1,5,9
クロロフィル計	-	1,10,19	1,10,19	1,5,9
DO計	-	1,10,19	1,10,19	1,5,9
照度計	-	1,19	1,19	1,9
明筒	1,9	-	1,19	1,9
暗筒	1,9	-	1,19	1,9
底質筒	10	-	20	10

図-2 調査位置図 (能取湖)

写真-1 明暗筒
(上: 水中用)
(下: 底質用)

果と比較した。明暗筒は設置水深帯まで運搬した後、筒内に湖水を導入、密封し、水中でのDO消費や植物プランクトンの光合成等に伴うDOの変化を測定した。初日に設置し、翌日の6:00~18:00の12時間の明・暗筒中のDOの経時変化を読み取った。底質筒は底泥に差込み、底泥の酸素消費速度(BOU:Benthic oxygen uptake)を測定した。観測期間は1昼夜とし、1分ごとに筒内のDOを計測した。

3. 観測結果の概要

(1) 水温・塩分・DOの鉛直分布

図-3に水質鉛直分布の主要なものを示す。湖口側深部(地点ウ)や中央部(地点オ)では、水深約10~15mの位置に躍層の形成が認められたが、9月26日には水温躍層は消滅し、底層まで水温はほぼ一様となっていた。湖奥部(地点キ)でも水深約3m付近に弱い水温躍層が形成され、鉛直的な水温勾配がやや大きくなっていたが、9月26日には躍層は消滅し、底層まで水温はほぼ一様となった。塩分は調査期間全体を通じて、卯原内川河口近くの地点クの表層を一時的に除き、湖内全地点全層において33~34PSU程度であった。塩分の鉛直分布は、水温

(a) 湖口付近 (点イ≒St.1)

(b) 湖口側深部 (点ウ≒St.2)

(c) 中央部 (点オ≒St.3)

(d) 湖奥部 (点キ≒St.4)

図-3 水質鉛直分布図

の鉛直分布に見られる躍層と同じ水深帯で上下層に若干の差異が見られたが、9月26日には全層でほぼ同じ値となった。

DOは、外海の影響を受けやすい湖口部(地点イ)で、全期間を通じて表層から底層まではほぼ同じ値であり、飽和に近い状態を維持していた。湖口側深部(地点ウ)や中央部(地点オ)では、9月16日に躍層以深において、DOが急激に低下し、貧酸素状態となった。また湖奥部(地点キ)においても同様に、底層の近くのDOが低い値を示した。

(2) 水質の経時変化

図-4に連続水質観測の結果と気象データを示す。9月前半にはst.3の表層と中層で約3℃程度、底層については表層と5℃程度の水温差が継続した。成層化が進行するにつれ、底層のDOが徐々に低下して9月11日頃には2mg/L程度まで低下し、貧酸素水塊の形成が認められた。9月18日頃より、気温の低下とともにその水温差は減少し、底層のDOに回復傾向が見られた。9月18日頃から夜間の気温低下に伴って表層冷却が生じ、9月24日には混合状態となった。底層の貧酸素水塊は成層の緩和に伴って徐々に解消され、9月24日には表層とほぼ同程度と

図-4 水温とDO等の経時変化

なった。その過程において、貧酸素水塊が各所に影響していることが報告されている。9月19日午後10時10分を超す強い北風が観測（図-8参照、後述）されており、成層化の減退および強風によって鉛直混合が促進されたと推察された。さらに、9月23日頃には強い南風の影響もあり、成層が崩壊して底層の貧酸素状態はほぼ回復した。成層崩壊時の状況の詳細については後述する。図-4では、尹ら（1993）や五明ら（1998）と同様に、リチャードソン数とアスペクト比を用いたWedderburn数を示した。ここで、抵抗係数 C_d を 1.3×10^{-3} 、海域の長さ L 、水深 h をそれぞれ8km、19mとした。9月19日にWe数が10以下となり、さらに9月23日には2以下となって完全混合が生じたことは、それらの知見と矛盾しない。

(3) 湖内の流況

図-5にADCPを搭載した調査船による流況観測の結果を示す。上げ潮時（2008年9月16日22：30～26：35観

図-5 湖内の流況（左：上げ潮時、右：下げ潮時）

測）には湖内東岸を南下し、下げ潮時（2008年9月16日4：34～8：23観測）には北岸から流出する流れが卓越していることがわかる。いずれも湖内に時計回りの流れが存在していることを示している。ただし、上げ潮の流況調査時には、南からの強風が北岸の能取地区で観測（図-8参照）されており、流況に乱れが目立つとともに吹送流等の影響が生じていることに注意が必要である。

(4) 水中の酸素消費・供給速度

表-2に水中の酸素消費・供給速度の計測結果と水質分析結果を示す。正確を期するため、明・暗筒中のDO値が大きく振動する等、異常値であると判断されたものをすべて棄却した。また、水中の有機汚濁の指標としてCODを用い、水中の酸素消費速度との関係を図-6左に示す。CODはすべて2.0～3.0mg/Lの範囲にあり、湖内において大きな差異は見られなかった。DO収支計算を実施する際に、これらの代表値として湖口付近表層も中央部底層も同じ0.0150mg/L/hとしても計算結果にあまり違いが生じないと考えられた。クロロフィルaの分析結果も湖内の地点間で大きな差異は見られなかった。計算時には、表層における日中の純光合成速度の代表値を0.0306mg/L/hとして、水深による光の減衰の影響を負の指数関数的に考慮して能取湖全体に適用することとした。この他に、同地域でのホタテガイの呼吸量に関する知見（蔵田，1986）を参考に、養殖ホタテガイの呼吸量として養殖施設配置エリアに0.0104mg/L/hの酸素消費速度を付加した。

(5) 底泥の酸素消費速度（BOU）

底泥に挿入した筒内におけるDOの変化より算出した底泥1m²あたりの酸素消費速度を底質分析結果と併せて表-3に示す。図-6右には、底泥の酸素消費速度と底質分析結果の関係を示す。水産用水基準（日本水産資源保護協会，2006）で「汚染された底質」とであると分類された中央部では、「正常な底質」に分類されたst.1やst.4と比

表-2 水質分析結果と水中の酸素消費・供給速度

	st.1 表層	st.1 底層	st.3 表層	st.3 底層
2008年8/28実施分				
COD _{MN} (mg/L)	2.2	2.4	2.6	2.0
Chl-a (μg/L)	1.7	1.1	1.2	1.8
酸素消費(mg/L/h)	0.009	0.014	0.024	0.015
純光合成(mg/L/h)	0.029	-	-	-
2008年9/26実施分				
COD _{MN} (mg/L)	2.9	2.8	2.9	2.9
Chl-a (μg/L)	3.7	3.7	3.3	3.3
酸素消費(mg/L/h)	0.000	-	-	0.012
純光合成(mg/L/h)	-	-	0.0306	-

表-3 底質分析結果と底質の酸素消費速度

2008年8/28採泥分	st.1	st.3	st.4
泥分 (%)	1.4	98.4	97.6
強熱減量 (%)	1.4	12.1	6.3
COD _{sed} (mg/g)	2.8	19.8	8.7
硫化物 (mg/g)	0.05	1.12	0.54
酸化還元電位 (mV)	40	-195	-50
合成指標③ ※	-2.33	1.17	0.19
合成指標④ ※	-2.50	1.74	0.43
底層水のDO(mg/L) 8,9月平均	> 4.3	< 4.3	> 4.3
判断基準による分類 ※	正常	汚染	正常
酸素消費(g/m ² /day) 9/26実施	0.164	0.830	0.169

※水産用水基準 (2005年版)

較して酸素消費速度が大きい傾向が認められた。DO収支計算を実施する際には、底質の状態で異なる酸素消費速度を設定することとし、同様に汚染された底質であるst.2を含めた水深15m以深の領域の底質の酸素消費速度を0.830g/m²/day, それ以外を0.164g/m²/dayとした。

なお、他海域における底泥酸素消費速度は、例えば、東京湾0.83～2.9、大阪湾0.79～1.15、広島湾0.2～0.49 g/m²/day (井上ら, 1998)、有明海諫早湾で0.84～1.04 g/m²/day (中山ら, 2003)であった。今回の測定結果は、これらと比較してほぼ同程度であった。

4. 密度成層崩壊時の水質変動の考察

(1) 数値計算による検討の概要

貧酸素水塊の挙動を検証、予測するため、多層密度流計算及びDO収支計算を実施した。計算の詳細は野見湾の事例 (山本ら, 2007) と同様とし、各種係数は水理公式集 (土木学会, 1999) を用い、その中で能取湖での酸素消費・供給速度に関するものは3章に示す値を用いた。図-7には湖口付近の流速、中央部の水温、DOの観測結果とその再現計算結果の比較を示す。9月16日の密度成

図-6 酸素消費速度と水質・底質の関係

層と貧酸素化した状況の観測値を初期値とし、開境界に潮汐を与えることに加え、気象データを用いて湖面に表層冷却や吹送流を生じさせることによって、底層の貧酸素水塊の挙動を再現した。計算値はほぼ観測結果と同様の変動を示し、DOの収支が良好に再現されていることがわかる。このことは、密度成層の状況と底層のDOのモニタリングにより現況を把握し、気象記録・予報を条件として与えることによって、貧酸素水塊の挙動の再現・予測が可能であることを示している。

(2) 2008年の貧酸素水塊の挙動

図-9にはDOの計算結果の3次元分布を示す。図中の黒い部分が貧酸素水塊である。成層状態で底層が貧酸素化している9月16日0:00が計算開始時である。9月19日未明に一時的に強い南風が観測され (図-8)、この時、図-9 (a) では表層水が北岸に吹送され、その補償流として南岸の湖奥部付近に貧酸素水塊が移動していることがわかる。その後、9月19日午後10時を越す強い北風が観測されており (図-8)、図-9 (b) ではこれに伴って南風時と逆向きの同様の現象が生じて北岸に貧酸素水塊が移動していることがわかる。この時、能取湖北岸の定置網で漁獲されたサケ等に貧酸素水塊の影響と見られる斃死被害が生じたことが報告されている。西網走漁業組合の報告によれば、9月18日に北岸に設置した定置網に、9月20日の6:00にサケ、マス200～300kgの斃死が確認された。この間に魚類の斃死をもたらす現象が生じたことになる。図-10にはサケ定置網設置箇所のDOの計算値を示した。強い北風が観測された9月19日午後以降にDOが低下し、水産用水基準の6.0mg/L (海域) を下回っており、本計算結果は漁業被害の発生を裏付けるものとなっている。この時、図-4のst.4の底層のDOが急速に回復しており、南岸に寄っていた貧酸素水塊が北岸に移動したこともわかる。この後、9月23日頃には強い南風と気温の低下の影響もあり、完全混合の状態となって底層の貧酸素状態はほぼ回復したことがわかる。

(a) 流速 (湖口部)

(b) 水温 (中央部)

(c) DO (中央部)

図-7 計算結果と観測値の比較

(a) 気温 (気象庁: 網走気象データ)

(b) 風速 (西網走漁協: 能取湖北岸地区観測値)

図-8 密度成層崩壊時の気象状況

図-10 サケ定置網設置箇所のDO計算値

図-9 貧酸素水塊 (図中の黒い部分) の可視化画像

5. 終わりに

現地観測と数値計算に基づく考察によって、能取湖の密度成層の崩壊に至る過程で生じる貧酸素水塊の挙動を把握した。この時に生じた漁業被害は、成層強度が弱まる中で、強風によって風上側に貧酸素水塊の湧昇が生じたことが要因であると示唆されたが、こうした問題が生じる背景には経年的な水質・底質悪化の進行がある。これを解決するには、一時的な流動現象の解明だけでなく、湖内全体の汚濁負荷の長期的な収支動向について詳細に把握し、対策について検討する必要がある。

参考文献

- 池永 均・向山公人・大島伸介・内島邦秀・山田 正 (1999) : 汽水湖成層界面の挙動と吹送循環流の形成に関する研究, 土木学会論文集, No. 614/II-46, pp.77-96.
- 井上裕雄 (1998) : 堆積物環境, 沿岸の環境圏, 第1編, 第6章, 第2節 (2), フジテクノシステム, pp.612-646.
- 上野成三・灘岡和夫・石村明美・勝井秀博 (1992) : NOAA-AVHRRデータを用いた東京湾の風に起因する湧昇現象の解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.256-260.
- 蔵田 護 (1986) : オホーツク海における放流ホタテガイの呼吸量, 北水試研報, 49, pp.7-13.
- 五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦 (1998) : 東京湾湾奥の浅瀬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.
- 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40巻, pp.241-245.
- 土木学会編 (1999) : 水理公式集, 713p.
- 中辻啓二・尹鍾星・湯浅泰三・村岡浩爾 (1993) : 東京湾における吹送密度流と青潮発生機構との関連性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1066-1070.
- 中山哲蔵・佐伯信哉・時吉 学・木元克則 (2003) : 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.976-980.
- 日本水産資源保護協会 (2006) : 水産用水基準, 2005年版, 95p.
- 山本潤・田中 仁・佐伯信哉 (2007) : 野見湾の内部潮汐による海水交換と水止まりによる貧酸素水塊発生に関する研究, 土木学会論文集B, 第63巻, 1号, pp.39-50.
- 尹鍾星・中辻啓二・村岡浩爾 (1993) : 開放性成層水域における吹送密度流に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.241-245.