

能取湖における外海水の混合過程に依存した 貧酸素水塊の上昇機構

UPWELLING MECHANISM OF ANOXIC WATER MASS DEPENDING ON THE
BOTTOM INTRUSION OF OCEANIC WATER INTO LAKE NOTORO

瀬戸雅文¹・井上佑奈²・多田匡秀³・品田晃良³・渡部貴聴⁴・川尻敏文⁵・巻口範人⁶
Masabumi SETO, Yuna INOUE, Masahide TADA, Akiyoshi SHINADA, Takaaki WATANABE,
Toshifumi KAWAJIRI and Norito MAKIGUCHI

¹正会員 水博 福井県立大学 海洋生物資源学部 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

²福井県立大学大学院 生物資源学研究科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

³北海道立網走水産試験場 調査研究部 (〒099-3119 北海道網走市鱚浦 1-1-1)

⁴網走市役所 水産港湾部 水産漁港課 (〒093-8555 北海道網走市南 6 東 4)

⁵西網走漁業協同組合 (〒093-0045 北海道網走市大曲 1-7-1)

⁶(社) 北海道栽培漁業振興公社 水圏環境部 環境調査課 (〒060-0003 札幌市中央区北 3 西 7-1)

It is known that, at Lake Noto in summer, anoxic water masses near the bottom are often driven up to the intermediate breeding nets of scallops due to the lake surface winds of about 4 m/s, causing death of scallops in nets at relatively deep levels. However, stronger winds facilitate the mixture of upper and lower lake waters, preventing the formation of such masses. This suggests the upwelling of anoxic water masses may also be caused by factors other than winds. In fact, the blue tide in Lake Noto in September 2007 caused anoxic water masses to rise to the surface layer. Our study confirmed that the density of oceanic water entered through the lake mouth is higher than that of lake's bottom water during a period from late September to early October. Our numerical analysis also showed that the oceanic water poured into the lake's bottom has a force to move upward the anoxic water masses formed during summer, and, when weak winds blow, it actually causes them to upwell to the surface layer with almost no mixture of upper and lower lake waters occurring.

Key Words: Blue tide, Anoxic water mass, Bottom intrusion, Upwelling mechanism

1. はじめに

北海道東部に位置する能取湖(水域面積 58.4km², 最大水深 23.1m)はオホーツク海と湖口で接続された海水湖で, ホタテガイ種苗の生産・供給基地として0~1 齢貝の中間育成(網籠による3~14mの水深帯での垂下育成)が行われている。近年, 能取湖では深い水深帯に垂下された網籠を中心に, 中間育成貝の斃死が認められるとともに, 湖内に放流されたホタテガイの生息下限水深も浅所に移行するなど, 湖内の水質環境が本種の生残に及ぼす影響が懸念されている。さらに, 2007 年 9 月には湖奥部を中心に青潮が観測され, 養殖稚貝の大量斃死が発生した。

青潮の発生機構に関わる既往知見によれば, 東京湾や大阪湾など水域面積が1 千 km² 以上の大規模湾や, 湖内に強固な塩淡水境界が形成される網走湖(水

域面積 32.9km², 汽水湖)においては, 風の連吹に伴う貧酸素水塊の上昇が青潮発生 of 主要因であることが指摘され, 予測手法¹⁾も提案されている。

瀬戸ら²⁾は, 夏季の能取湖底層部に形成される貧酸素水塊の風による上昇特性を数値解析的に考察し, 風速 4m/s 程度の南風で中間育成施設の下層部まで到達し, 斃死を発生させる可能性を指摘した。しかしながら, 更に風速を増加させると鉛直混合が急速に促進し, 風応力のみに依存して貧酸素水塊の表層への上昇過程を説明することは困難であった。

本研究は, オホーツク海の海洋構造に依存した, 能取湖における外海水との混合過程の季節変化が, 貧酸素水塊の形成・発達や, 表層付近に至る上昇機構と密接に関わることを解明し, 本湖のように比較的小規模な閉鎖性海域においても青潮が発生する可能性について数値解析的に検討したものである。

2. 水塊構造の変動特性

(1) 調査方法

能取湖では、図-1 に示すように、水域面積約 940 万 m^2 においてホタテガイ 0~1 齢貝が中間育成されるとともに、約 360 万 m^2 において 1~3 齢貝が放流され、四輪採区画制の栽培漁業が実施されている。本調査では、湖内における水塊特性の季節変化を湖内最深部の近傍に位置する湖心（図中 a 点）において 1990 年~2009 年まで実施された STD 観測データより推定した。一方、湖口より流入する外海水の水塊特性については、湖口沖合に設定されたホタテガイ漁場（図中 $b_1 \sim b_3$ 点）において実施された 1999 年~2008 年の STD 観測データを解析した。

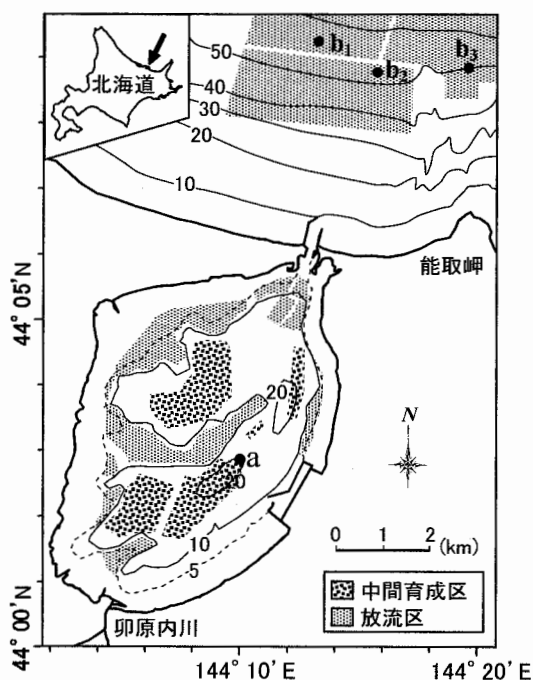


図-1 漁場配置および調査点位置

(2) 能取湖および外海水の水塊特性

能取湖の湖心、および外海域における、観測月別の T S 分布を、オホーツク海の我が国沿岸における代表的な水塊指標³⁾とともに図-2 に示す。これより、外海域における水塊構造は、黒潮を起源とする対馬暖流系で 4 月~11 月にかけて勢力を強める高温・高塩分の宗谷暖流水 (SW)、春先の水溫低下に伴い密度が増加した SW を起源とし、中冷水 (IC) の形成にも関与が指摘される宗谷暖流前駆水 (FSW)、ロシア沿岸の融解水やアムール川流出水を起源とするオホーツク海表層低塩分水 (OS)、および、これら水塊の混合水 (M) によって概ね整理され、オホーツク海南部の季節変動を反映した水塊特性を示した。一方、能取湖においては、夏季に流入する宗谷暖流水は、秋季以降に流入するオホーツク

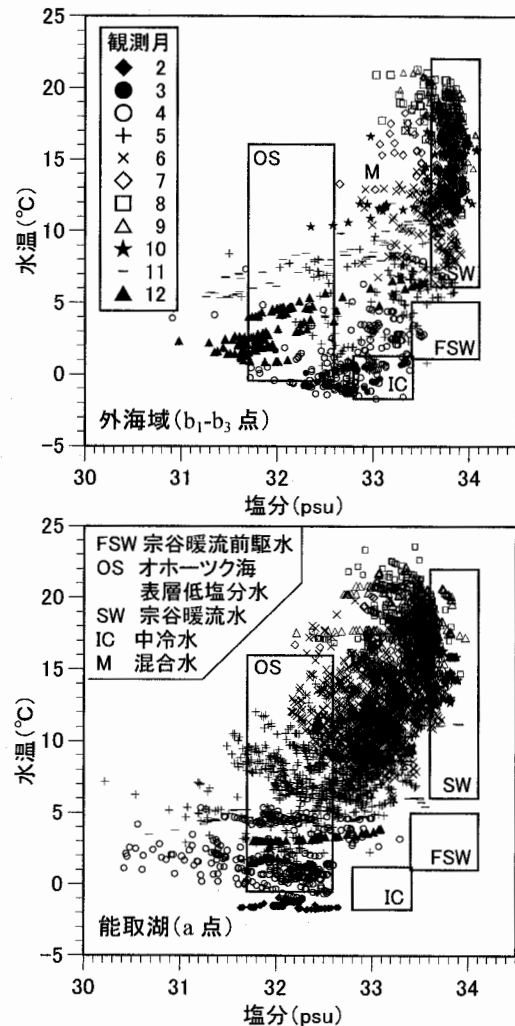


図-2 外海水と能取湖の水塊分類

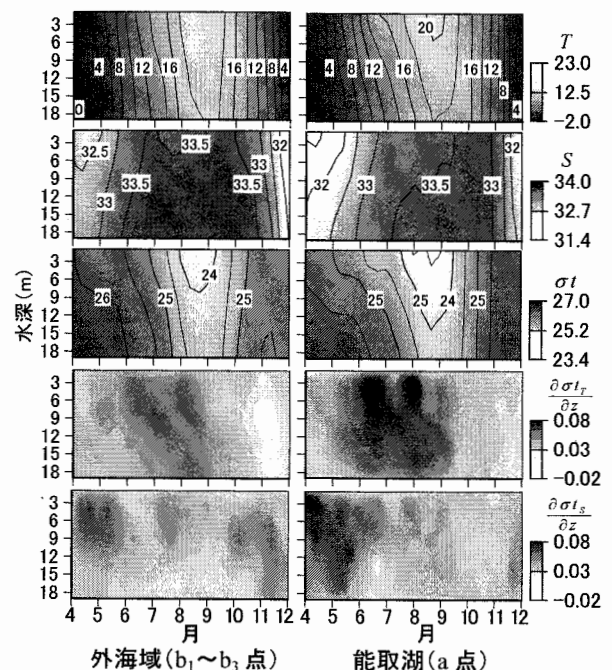


図-3 水塊構造の季節変化

ク海表層低塩分水と混合しながら冬季まで湖内に滞留している。結氷下で -1.0°C 程度まで冷却されたオホーツク海表層低塩分水は、4～5月の融氷・融雪期に低塩分化が進行するが、宗谷暖流の勢力拡大とともに急速に水温・塩分を増加させながら、外海域とは異なる陸水由来の混合水（水温 $5\sim 18^{\circ}\text{C}$ 、塩分 $32.6\sim 33.6$ ）を形成することが示唆された。

(3) 水塊構造の季節変動

既往データをもとに標準化された、能取湖の湖心および、外海域における水温（ T ）、塩分（ S ）、密度（ σ_t ）、水温躍層強度（ $\partial\sigma_t/\partial z$ ）、塩分躍層強度（ $\partial\sigma_s/\partial z$ ）の季節変動イソプレットを図-3に示す。

湖口より流入する外海水と比較して、能取湖底層水（表層水）の水温は、4月下旬以降、低い値（高い値）を取りながら昇温後、9月下旬以降の混合期においては、ほぼ同様な値で推移している。湖内底層水と外海表層水の塩分は、4月以降、ほぼ同様な値をとりながら増加するが、7月上旬～9月中旬の外海表層水には塩分低下が認められ、湖内底層水より低い値で推移している。夏季の外海表層水に認められる塩分低下は半月ほど遅れて湖内表層水にも確認され、宗谷暖流が知床半島を迂回する過程で、オホーツク海表層低塩分水との間で形成される混合水が、能取岬東部で表層循環しながら当該域に到達することなども考えられるが詳細は不明である。

湖内には、4月～6月にかけて塩分躍層、6月～9月まで水温躍層が形成され、これらの複雑な密度構造の季節変動に応じて、湖口より流入する外海水の循環過程も季節的に変化し、貧酸素水塊の形成に影響を及ぼすものと推定される^{4),5),6)}。

図-4は、湖内水と湖内に流入する外海水（表層から湖口の水深7mまでの平均値）の密度差（ $\Delta\sigma_t = \sigma_{t\text{湖内水}} - \sigma_{t\text{外海水}}$ ）、および $\Delta\sigma_t$ の標準偏差（SD）の季節変化を示したものである。 $\Delta\sigma_t=0$ 付近の水深帯に外海水が流入するものと想定すれば、湖内に

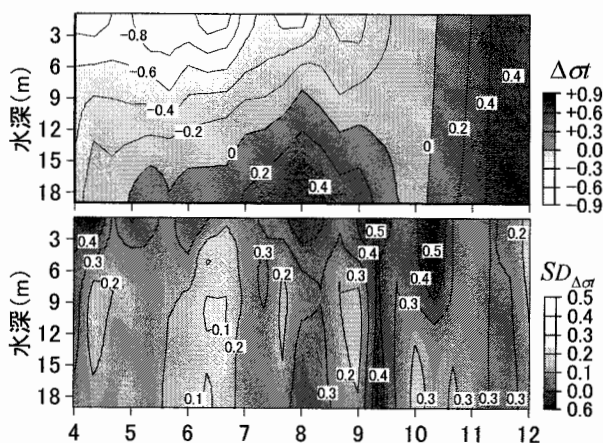


図-4 湖内外水の密度差の季節変化

塩分躍層が形成される春季は下層密度流として外海水が流入するものと考えられる。また、水温躍層が形成される6月～9月は中層密度流となり、8月上旬をピークとして流入水深帯が増減し、湖内底層部には、流出入に伴う湖内循環とは孤立した水塊が形成され、貧酸素化が進行するものと推定された。さらに、9月下旬から10月上旬の一時期においては、外海水を形成する宗谷暖流水の、高塩分を維持したままの水温低下（図-2の外海域のSW領域内における水温低下）に起因した密度増加の影響を受けて、 $\Delta\sigma_t$ はマイナスで推移している。この時期の外海水は、貧酸素水塊の下層に潜り込み、貧酸素水塊を押し上げる可能性が示唆された。

3. 数値解析の方法

図-5に示すように、能取湖およびオホーツク海周辺海域を水平格子間隔 $100\times 100\text{ m}$ で 115×128 メッシュ（湖口周辺は $33\times 33\text{ m}$ で 46×76 メッシュ）、鉛直方向には1 m間隔で最大27層に分割し、フル3次元流動モデル（DHI社製、MIKE3およびECO Lab（DO移流拡散のみ））を使用して、水塊解析より推定される流入パターンの妥当性や、下層密度流に伴う貧酸素水塊の上昇メカニズムについて数値解析的に検討した。

湖内流入パターンの再現計算では、塩分躍層が発達する4月、水温躍層が発達する8月、および鉛直混合が促進される11月の、月平均された水温・塩分の層別データを初期条件とし、境界条件としてはオホーツク海（常呂～網走）の境界に日潮不等の強制振動のみを与えて10秒ステップで計算し、潮汐変動に伴う湖内循環の季節変化を恒流の形成状況より考察した。

青潮発生状況の再現計算では、本湖で青潮が確認された2007年9月19日を挟んだ7日間における風

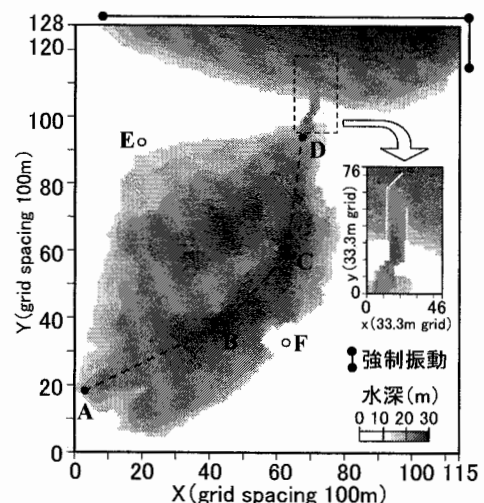


図-5 計算領域の設定条件

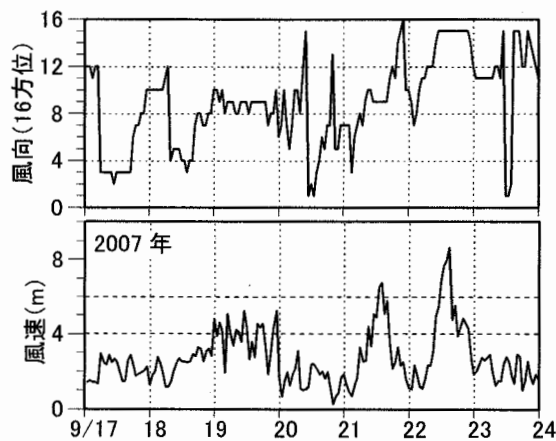


図-6 青潮発生期の風向・風速

データ、外海潮位データを境界条件として与えた。能取湖の南東と北西の湖岸（図-5中E、F点）で観測された風向・風速データと網走地方気象台のアメダスデータの相関性をもとにアメダスデータより本湖の風時系列を求めた（図-6参照）。湖内の水質（水温・塩分）は、9月中旬の層別平均値を初期条件に設定した。外海水の密度を、湖内底層部との密度差（ $\Delta \sigma_t$ ）が $-0.9 \sim 0.6$ （平均値 $\pm$ 標準偏差）の範囲内で段階的に変化させて、青潮の現地調査結果を再現可能な $\Delta \sigma_t$ を探索した。さらに、 $\Delta \sigma_t$ と本湖で夏季に卓越する南風の風速をそれぞれ段階的に変化させて、 $\Delta \sigma_t$ と風応力に依存した貧酸素水塊の上昇特性を調べた。なお、湖内D0の初期値は、青潮発生前日に湖心で計測された鉛直分布が再現されるように試行的に設定し、D0の移流拡散過程が青潮発生直後に確認された養殖ホタテガイ等の斃死に及ぼす影響を中心に検討し、底質や植物プランクトンなどに伴うD0変化は考慮していない。

4. 結果および考察

(1) 流入パターンの季節変化

図-7に、4月、8月、11月の湖内に形成される恒流の水深7m、13mにおける平面分布、および湖東岸の湖底に形成される谷地形（図-5内A-B-C-D）に沿った鉛直断面分布を示す。これより、4月の外海水は下層密度流として流入後、能取湖西岸より中央部に至るマウンド状の隆起地形を避けながら湖東岸の谷地形に沿って湖内最新部へ進入し、中層部へと上昇して、湖西岸の上層より湖口に戻る、湖底地形に依存した時計回りの水平循環流が形成された。8月の外海水は、マウンド状の隆起地形の頂部とほぼ同じ水深帯に形成される水温躍層付近に中層密度流として流入後、一部はマウンド地形の影響を受ながらも中層部を湖奥まで進入し、春季の表層に形成された水平循環流は確認できない。一方、底層部の流

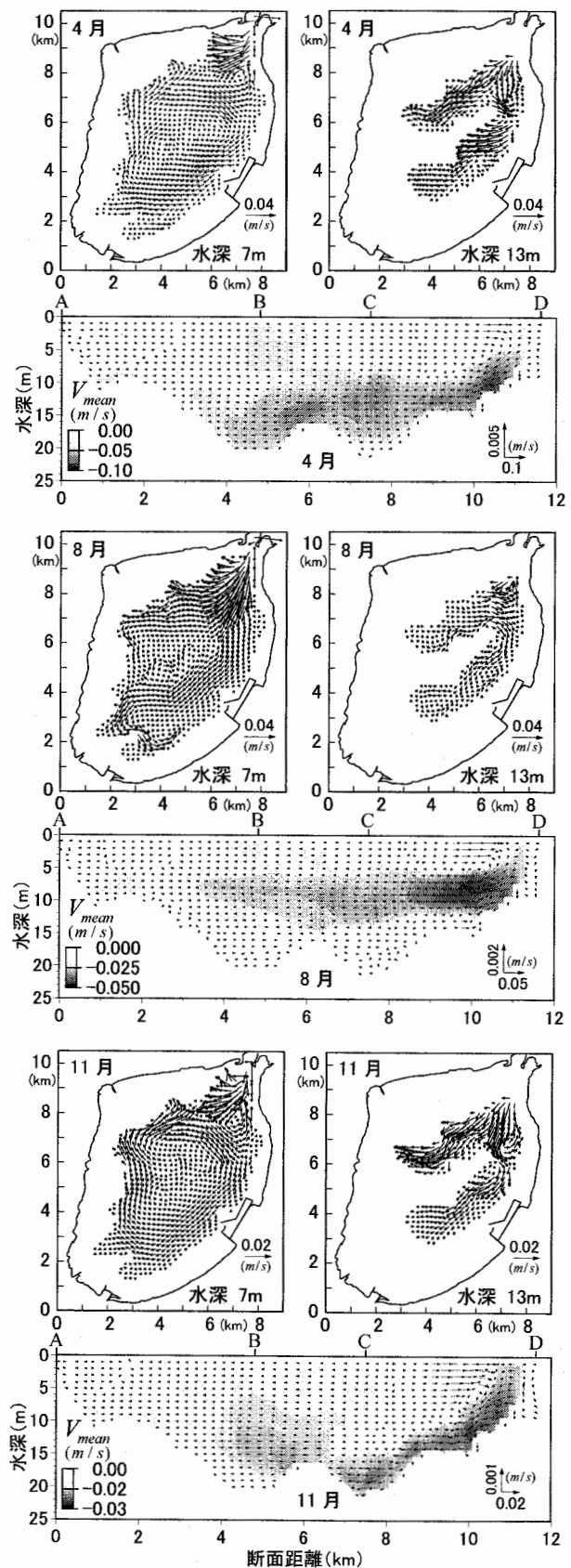


図-7 湖内流動環境の季節変化

れは概して弱く、内部に複数の小規模な環流が形成され、表・中層からは孤立した状況が認められた。11月の恒流分布には、湖東岸の底層より南下し西岸の表層より北上する4月と同様な循環が復活した。

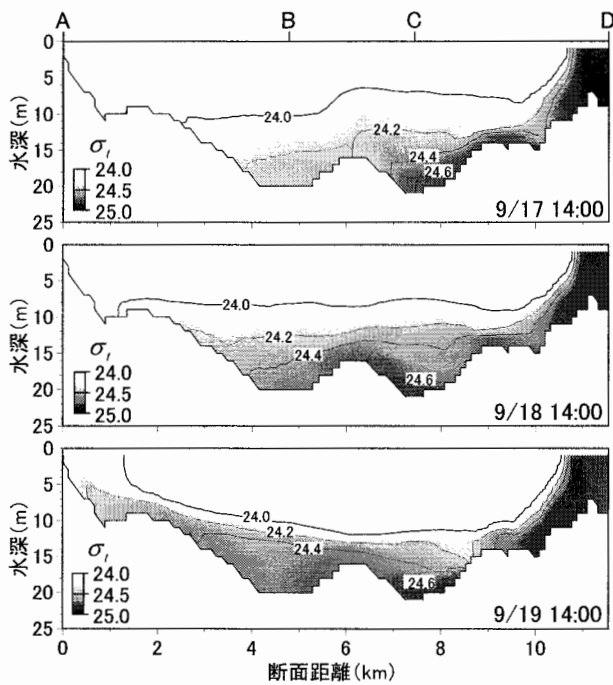


図-8 底層密度流の進入過程

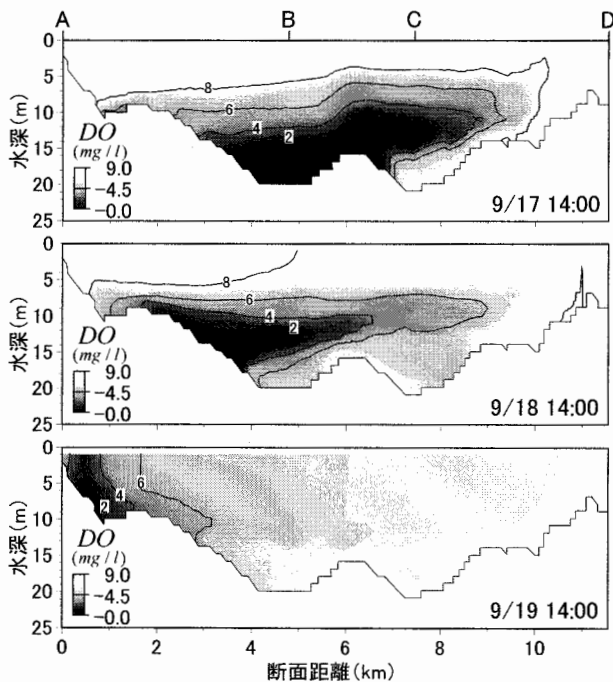


図-9 底層進入による貧酸素水塊の上昇

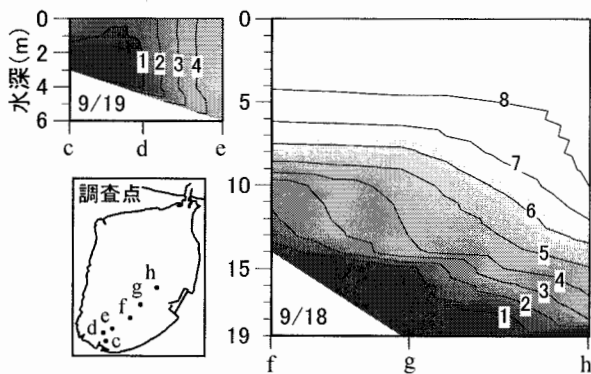


図-10 貧酸素水塊の水質調査結果

(2) 貧酸素水塊の上昇過程

ホタテガイ中間育成施設の深い水深帯で稚貝の斃死が確認された2007年9月17日から湖奥の卯原内地先で青潮が観察された9月19日に至る、湖内A-B-C-D(図-5 参照)における密度断面の計算結果($\Delta \sigma_t = -0.52$)を図-8に示す。これより、外海水は下層密度流として湖内へ進入し、9月17日には湖口側の極深部(図-5の地点C)、9月18日には湖内最深部(図-5の地点B)まで到達して、底層部の等密度面($\sigma_t = 24.3$)を約5m上昇させた。さらに、 $\sigma_t = 24.3$ の等密度面は、9月18日から19日にかけて吹送した最大4m/s程度の南風によって、最浅部は水深8m付近まで到達している。

外海水の底層進入に対応した貧酸素水塊の挙動計算結果を図-9に示す。DO濃度の高い外海水(8.0mg/l)が、貧酸素水塊の下層に潜り込み、水塊全体を湖奥方向へと押し出ししながら上昇させる状況が確認された。ホタテガイ稚貝の斃死を受けて、湖心部より湖奥部へかけて実施されたDO濃度の調査結果を図-10に示す。これより、外海水と湖内底層部の $\Delta \sigma_t$ を-0.52に設定した場合の計算結果と観測値は概ね一致し、風応力に密度差を加味するこ

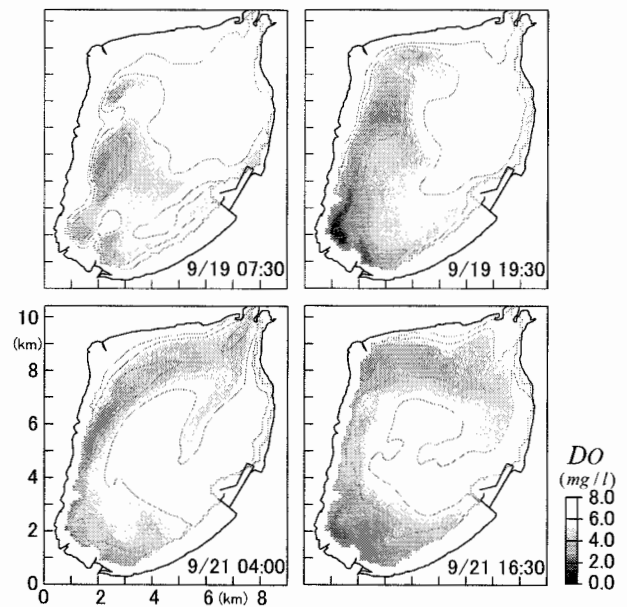


図-11 表層における貧酸素水塊の挙動

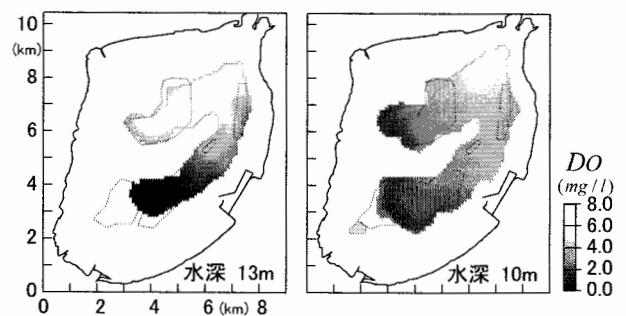


図-12 9月18日の日平均DO濃度

とによって能取湖で発生した貧酸素水塊の表層までの上昇過程を説明できることが示唆された。

表層まで到達した貧酸素水塊の経時変化を図-11に示す。9月19日7時30分に能取湖西岸の0.05km²の表層水域（水深1m以下）で、最初に貧酸素水塊（水産用水基準をもとに4.3mg/ℓ以下の水塊）の出現が認められた。その後、貧酸素水塊の出現位置は湖奥の南西岸が中心となり、同日の19時30分に表層における最低値1.75mg/ℓを記録し、水域面積も1.99km²まで勢力を拡大した。湖奥の表層へ湧昇した貧酸素水塊は、西岸を北上しながら湖口より流出した。貧酸素水域の面積は、9月21日4時に0.4km²まで縮小するが、その後、再び増加に転じ、同日16時30分に1.1km²まで増加した。その後も同様の増減をくり返しながら湖内の貧酸素水塊は完全に消失した。能取湖では、9月19日から21日にかけて、北岸の湖口付近に配置された定置網において、高い溶存酸素濃度（水産用水基準では7.0mg/ℓ以上）を必要とするサケの斃死が確認されている。

水深13mおよび10mにおける9月18日の日平均DO濃度の平面分布を図-12に示す。図中の点線で囲んだ水域では水深3~14mに亘って、ホタテガイ稚貝の垂下育成が実施されている。瀬戸ら⁸⁾は、混合ガスボンベ法を用いてホタテガイ0~1齢貝の貧酸素耐性実験を実施し、2mg/ℓ以下の貧酸素条件下で本種の斃死が発生することを明らかにした。図-12によれば、本湖における水深13m層の3.02km²の水域でDO濃度が2mg/ℓ以下（最小値は0.41mg/ℓ）となり、中間育成区の一區画（湖奥の南東側）は、ほぼ全域が斃死危険水域に該当した。当該区では、実際に2007年の青潮発生時に稚貝の大量斃死が発生している。一方、10mの水深帯では、9.6km²の水域面積が水産用水基準における貧酸素水域に該当するが、当該水深帯におけるDO濃度の最小値は2.13mg/ℓとなり、斃死危険水域は消失していた。

図-13は、9月中旬における湖内底層部と外海水の密度差 $\Delta\sigma_t$ 、および夏季に卓越する南風の風速

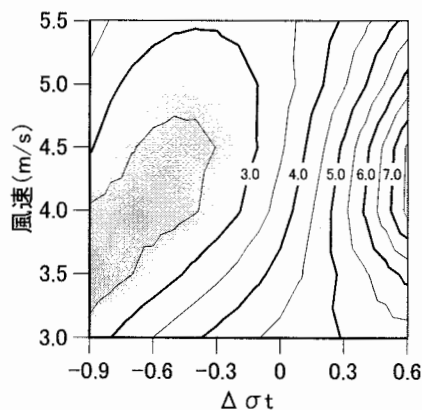


図-13 表層における貧酸素水塊の形成要因

を試行的に変化させた場合に、湖内表層部に出現する貧酸素水域の最小DO値のコンター図を示したものである。これより、本湖の主要な水産対象種であるホタテガイなどの貝類や底生魚類の生存が困難とされる2.0mg/ℓ程度の貧酸素水塊が表層まで上昇するためには、風応力に加えて密度差が重要な要因として作用し、湖内底層部の密度と比較して外海水の密度が増加すると、3.0m/s~5.5m/sの範囲内でより弱い南風ほど表層部における溶存酸素濃度が低下するものと推定された。

5. おわりに

能取湖では、外海水の湖内への流入水深帯が春季から夏季に向けて浅所へと移行し、湖内底層部が孤立して貧酸素水塊が発達し易い水塊特性を有することがわかった。本湖では、9月中旬から10月上旬の一時期、湖内底層水の下層に外海水の潜り込みが認められ、この時期まで湖内底層部に貧酸素水塊が滞留している年には、これらを上層へと押し上げ、比較的弱い南風による鉛直混合が抑制された状況下で表層まで到達して青潮を引き起こす可能性が数値解析的に示唆された。2007年の青潮は予期せぬ状況下で発生したため、観測データに対する数値シミュレーションの再現精度の検証に至らなかったが、貧酸素水塊の表層への上昇過程やホタテガイ、サケの斃死状況など時系列に沿った断片的な整合性を説明することができた。

謝辞：本研究の実施に際し、解析に使用した数値モデルはDHI社より提供されたものであることを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木淳, 磯部雅彦, 藤本英樹: 東京湾における青潮予測手法の開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp1006-1010, 1999.
- 2) 瀬戸雅文, 金子和恵, 新居久也: 能取湖に形成される貧酸素水塊がホタテガイに及ぼす影響, 海洋開発論文集, 第20巻, pp1049-1054, 2004.
- 3) 青田昌秋: オホーツク海・北海道沿岸海域の海況変動, 沿岸海洋研究ノート, 第17巻, pp1-11, 1979.
- 4) Yanagi, T., Tamaru, T., T. Ishimura and T. Saino: Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer, La mer, 27, pp34-40, 1989.
- 5) Allen, G.L. and J. H. Simpson: Deep water inflows to upper Loch Linnhe, Estu. Coas. and Shelf Sci., 47, pp487-498, 1998.
- 6) 寛茂穂, 藤原建紀, 杉山陽一: 伊勢湾底層への間欠的な外海水の進入とそれに伴う湧昇, 海の研究, 13(6), pp537-551, 2004.
- 7) 日本水産資源保護協会: 水産用水基準, 2005年度版, 95p, 2006.
- 8) 瀬戸雅文, 服部志穂, 新居久也: ホタテガイの濾水浄化能力に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp247-252, 2005.