

ホタテガイの濾水浄化能力 に関する基礎的研究

BASIC RESEARCH ON JAPANESE SCALLOP'S ABILITY ON PURIFYING WATER BY FILTRATION

瀬戸雅文¹・服部志穂²・新居久也³
Masabumi SETO, Shiho HATTORI and Hisaya NII

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒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(社) 北海道栽培漁業振興公社 調査設計第2部企画設計課 (〒060-0003 札幌市中央区北3西7-1)

By considering the structure of Scallop's body, density of inorganic suspended particle and dissolved oxygen (DO) are the main factors that influence the environmental tolerance of the Scallop and the ability on purification by filtrating. By building a model of the Scallop's filtration process, using Scallop's soft body mass, and water temperature, salinity, DO density, inorganic suspended particle density, it is possible to decide the Scallop's tolerance against anoxic water and inorganic suspended particle by developing a biological model. Under condition of anoxic water (DO density under 2.0mg/L), the Scallop's subsistence condition would be determined only by the tolerance of DO density and the density of inorganic suspended particle does not affect. When the condition of high turbidity lasts more than a day, and the surrounding water is hypoxia (DO density under 5.0mg/L), Scallop starts to decrease from small individuals by the influence of the inorganic suspended particle. However under condition of saturated oxygen, death will not occur in any level of the inorganic suspended particle density.

Key Words: *Patinopecten yessoensis*, tolerance, anoxia, suspended particle

1. はじめに

北海道東部のオホーツク海沿岸に位置する能取湖やサロマ湖などの閉鎖性海域は、ホタテガイ種苗の生産・供給基地として重要な役割を担っている。

近年、能取湖では深い水深帯に垂下された網籠を中心に、中間育成貝の斃死個体数の増加傾向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、15年間で6m程度浅所に移行していることが報告され、湖内の水質・底質環境の経年変化が本種の生残に及ぼす影響が懸念されている^{1), 2)}。

本研究は、ホタテガイの斃死個体数の増加が認められる夏期高水温期に、湖内最深部を中心に形成される貧酸素水塊や、流入河川などより供給される無機懸濁物が、本種の生残に及ぼす影響を評価するための個体群動態モデル(濾水行動モデル)を新たに提案するとともに、本モデルを能取湖に適用して、湖内で実施されるホタテガイ漁業が、本湖の水質・底質環境に及ぼす影響について検討した。

2. 濾水行動のモデル化

(1) ホタテガイの鰓機能

図-1に示すように、ホタテガイなどの一体弁鰓類の鰓は、多数の鰓条から構成され、鰓条表面に配置された無数の繊毛群を一体的に運動(鰓繊毛運動)させることによって、外套膜内外の海水を交換し、溶存酸素(DO)の吸収(呼吸)を行うと同時に、海水を濾過しながら植物プランクトンなどの有機懸濁物を口へ移動させたり、無機懸濁物の多くを擬糞として体外に放出する餌料選別(摂餌)を行っている。このためDO濃度が飽和状況下において、海水中的無機懸濁物濃度が極端に増加すると、ホタテガイは鰓繊毛運動を抑制し、擬糞形成に伴う活力低下を回避する方向で運動能力を調整することが指摘されている³⁾。しかしながら、DO濃度が低下すると、生命維持に必要な酸素要求量を確保するために鰓繊毛運動を活発化させ、結果として濾水率や擬糞形成量(本報告では、以降、濾水浄化能力)が向

上することが推定される．このように，海水中の無機懸濁物濃度と DO 濃度は本種の環境耐性や濾水浄化能力に主因的に影響を及ぼすものと考えられる．

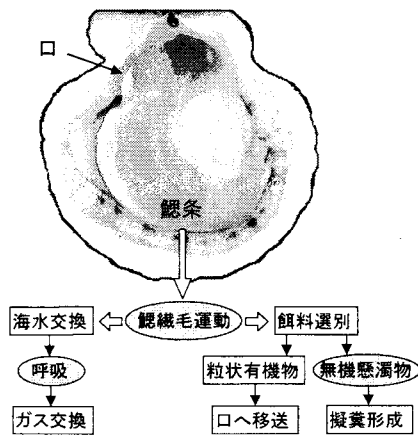


図-1 ホタテガイの鰓の役割

(2) 濾水行動モデル

DO 濃度が飽和状況下におけるホタテガイの標準代謝量 (M) を，同一の水温，塩分条件下で無酸素状況下に連続曝露した場合の致死時間 ($t_d(DO=0)$) で積算した値を，飽和状況下でホタテガイが備えている貧酸素耐性 ($Ta_{(t=0)}$ ，但し， t は曝露時間) と定義し，貧酸素状況下で酸素吸収量が標準代謝量を下回る場合においても，ホタテガイは，一定時間 (t_n) は飽和状態と同様な濾水行動 (飽和状態における濾水量: $Fw_{(t=0)}$) を維持した後，濾水量を急激に増大させて体内の酸素不足を補おうとする行動 (異常代謝) に移行するものと仮定して，貧酸素耐性 (Ta) および濾水量 (Fw) の経時変化を図-2 のようにモデル化した．

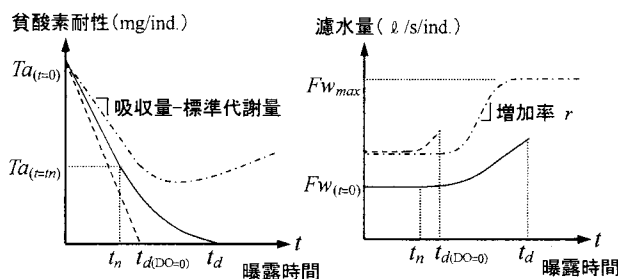


図-2 濾水行動モデル

モデル化において，酸素吸収率 (鰓を通水する溶存酸素量に対する鰓の酸素吸収量の割合) は一定と仮定し，既往知見⁴⁾をもとに 7.6% とした．鰓纖毛運動や心拍数に関わる既往知見をもとに，酸素飽和度 25% に対する濾水量を最大濾水量 (Fw_{max}) とし，曝露時間が t_n 経過後より致死が発生するまでの濾水量の増加過程を Logistic 曲線で近似した上で，曲線の増加率 r を無機懸濁物濃度の関数として定式化し

た．更に，濾水量の初期値 ($Fw_{(t=0)}$) に対する無機懸濁物濃度の影響は，濁度ゼロにおける濾水量に濁度補正係数 C_w を乗ずることによって評価した．なお，飽和状態におけるホタテガイの標準代謝量は蔵田⁵⁾に基づいて算定した．

3. ホタテガイの貧酸素・懸濁物耐性

(1) 実験方法

濾水行動モデルを構築するために必要となる貧酸素耐性 Ta ，濾水量 Fw ，貧酸素状況下における濾水量の増加開始時間 t_n ，および濾水量の増加率 r を決定するために，表-1 に示す耐性実験を実施した．表中の貧酸素耐性実験の概要は，既に前報¹⁾によって報告されているため，本報告では，懸濁物耐性実験，および貧酸素状況下で懸濁物濃度を变化させた場合の環境耐性実験 (相互作用耐性実験) について説明する．

表-1 環境耐性実験とパラメータ

実験条件			パラメータ				
項目	DO	濁度	Ta	Fw	r	t_d	t_n
貧酸素耐性実験	変化	なし	○		○	○	
懸濁物耐性実験	飽和	変化		○			
相互作用耐性実験	変化	変化			○	○	○

供試貝は，2004 年 8 月に能取湖内において桁網で採取した放流 1 齢貝 (平均殻高 64.2mm) 約 400 個体を，能取湖内の生海水で馴致後使用した．懸濁物耐性実験には，以前に著者ら⁶⁾が浮遊砂耐性実験で用いた鉛直循環式噴流発生水槽 (図-3 参照) を使用した．水槽内に濾過海水 42 ℓ を注入後，マグネットポンプを用いて水槽中心部より底面へ噴流を発生させ，底面より水槽側面に分散しながら上層部に到達後，再び水槽中心へ集約される濁度のほぼ均一な流れ場を形成した．水槽上層部にホタテガイを 8 個体収容し，本種の摂食行動や成長に好適な 5~10cm/s 程度の定常流を作用させた．実験では，水温を 19℃ に設定し，水槽内の濁度が一定値を維持するように水槽上部より定量ポンプを使用し高濃度の無機懸濁物を注入した．本実験に使用した無機懸濁物は，中央粒径 1.69 μm 及び 23.94 μm の Silica 微粉末で，水槽内の濁度を 50,100,250,500,1000ppm の 5 段階に変化させながら，酸素飽和状態における濾水浄化能力を調べた．また，相互耐性実験では，水槽上面を密閉し，水温を 19℃ に設定した上で， O_2N_2 混合ガスを水槽内に曝露し，混合ガスボンベ法⁷⁾を用いて DO 濃度が 0.0,2.0,4.0mg/l の貧酸素区，及び飽和区を形成した．水槽上層部に供試貝を 8 個体収容後，水槽内の濁度を 50,500,1000ppm で一定となる

ように懸濁物を定期的に注入しながら、濁度計（KENEK 社製,PM-503 型）を用いて水槽内の濁度を経時的に測定した。ホタテガイの濾水量は、一時的（一計測当たり約 1 時間）に懸濁物の供給を停止した場合の水槽内の濁度変化をもとに算出した。

更に、図-3 に示すように、水槽内に収容された供試貝の下部にプランクトンネット（布地 7XX-200 μ ）製の袋を配置し個体毎の擬糞量を計測した。

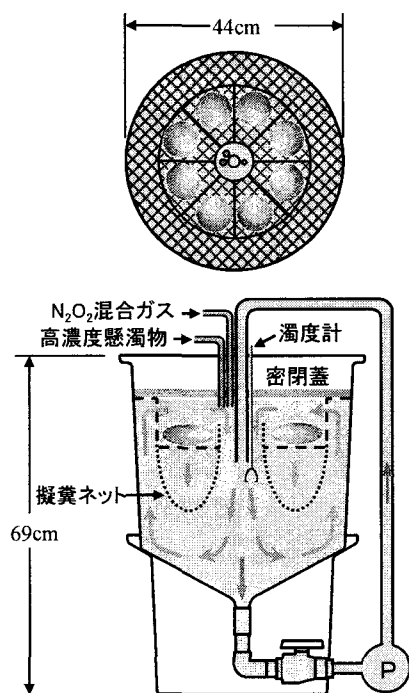


図-3 懸濁物耐性実験の概念図

(2) 実験結果

表-2 は、DO 濃度が 0.5～2.2mg/l の貧酸素状況下における 0 齢貝および 1 齢貝の、10%, 50%, 100% 致死時間である LT_{10} , LT_{50} , LT_{100} を、Kaplan-Meier 法をもとに推定し、供試水温別に示したものである。

これより、0 齢貝と 1 齢貝の DO 濃度が 0.5mg/l、1.4mg/l の全ての実験区、及び DO 濃度が 2.2mg/l で水温 23℃の実験区においては、実験期間（連続暴露 144 時間）内にほぼ全滅し、その他の実験区では 10%致死まで至らなかった。

表-2 致死時間（上表：0 齢貝，下表：1 齢貝）

DO (mg/l)	LT_{10}			LT_{50}			LT_{100}		
	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃
0.5	11.9	6.7	5.6	17.1	7.7	7.0	21.4	9.6	7.7
1.4	73.6	56.8	14.1	91.2	64.0	35.1	113.0	87.2	46.2
2.2	144<	144<	130.3	144<	144<	144<	144<	144<	144<

DO (mg/l)	LT_{10}			LT_{50}			LT_{100}		
	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃
0.5	21.09	17.00	8.63	30.66	22.23	10.17	34.11	25.75	16.44
1.4	56.15	57.77	25.01	62.86	64.46	28.80	119.96	89.09	31.76
2.2	144<	144<	45.4	144<	144<	74.9	144<	144<	99.5

（単位：時間）

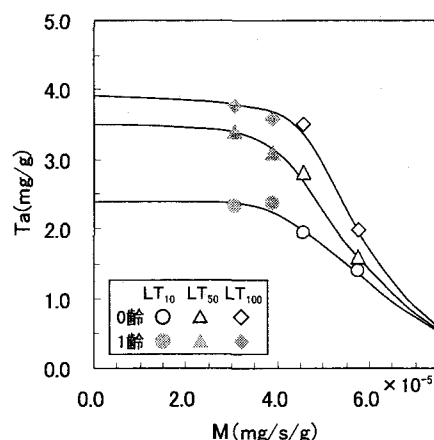


図-4 貧酸素耐性 T_a の標準代謝量 M による変化

表-2 における DO 濃度 0.5mg/l の致死時間を濾水行動モデルにおける $t_{d(DO=0)}$ と見なした上で、標準代謝量 (M) に対する貧酸素耐性 $T_{a(t=0)}$ を、年齢別、致死率別に示したものが図-4 である。ここに、貧酸素耐性が標準代謝量の増加（減少）とともにゼロ（一定値）に漸近する性質をもとに、致死率ごとの貧酸素耐性を下式で近似的に算出した。

$$Ta_{(LT_{10})} = 2.44 \exp(-1.57 \times 10^{21} M^{5.05})$$

$$Ta_{(LT_{50})} = 3.61 \exp(-2.97 \times 10^{17} M^{4.15})$$

$$Ta_{(LT_{100})} = 3.94 \exp(-8.65 \times 10^{20} M^{4.99})$$

図-5 は、ホタテガイにおける濾水量の濁度による変化を濁度補正係数 C_w で示したものである。これより、濾水量は濁度に反比例し、次式で近似できることがわかった。

$$C_w = 1 - \frac{C}{C + C_{Fmax}}, \quad C_{Fmax} = 69.8$$

ここに、 C は海水中の無機懸濁物濃度で、これに C_w を乗じた値を濾水浄化効率 C_F と定義すれば、 C_F は単位流量内に含まれる懸濁物を鰓で除去できる割合を意味し、鰓の構造に依存して決定されるものと考えられる。図-6 は C_F の濁度による変化を示したものである。これより、 C_F は濁度の増加とともにほぼ一定値に収束し、濾水浄化効率の上限値 C_{Fmax} が明らかとなった。ホタテガイの濾水浄化能力は、濾水量 F_w に無機懸濁物濃度 C 、及び濁度補正係数 C_w を乗ずることにより算定される。

図-7 は、無酸素状況下における濾水率の経時変化を濁度 C をパラメータとして示したものである。これより、曝露開始後、約 10 時間程度 ($t \leq t_n$) までは、曝露開始時とほぼ等しい濾水量を維持するものの、 t_n 以降、濾水量が急激に上昇し、例えば、濁度 500ppm においては t_n 経過上昇後約 10 時間で半数致死、更に約 7 時間後に全数致死が発生しており、図-2 で仮

定した濾水行動モデルの変動パターンとほぼ同じ濾水量の時系列変化が確認された。 t_n 経過後に発生する濾水量の増加過程を Logistic 曲線で近似した場合の増加率 r と濁度の関係を示したものが図-8である。これより、海水中の無機懸濁物濃度が増加すると、ホタテガイの濾水量は曝露開始直後より、低位に推移するとともに、 t_n 経過後の増加率も小さいことが確認され、貧酸素状況下においては、貧酸素耐性 Ta の減少傾向を濾水量の増加で解消することが困難となり、無機懸濁物による濾水量低下に伴う斃死が発生することが示された。

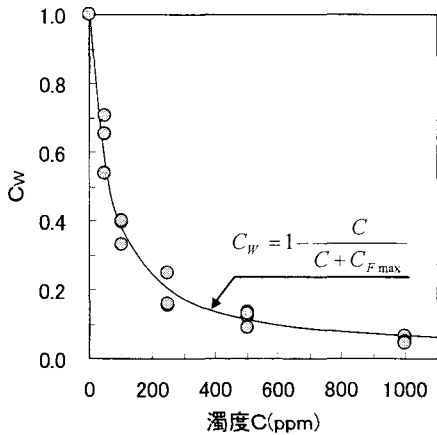


図-5 濁度補正係数

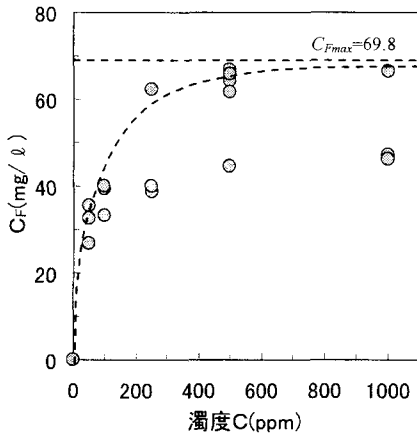


図-6 濾水浄化効率

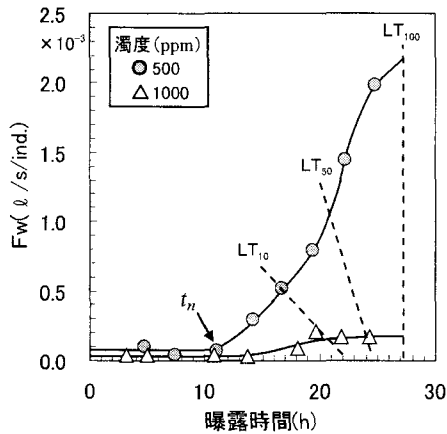


図-7 無酸素状況下における濾水量の経時変化

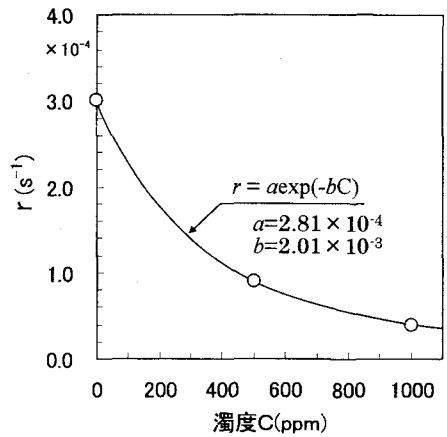


図-8 濾水量増加率の濁度による変化

(3) 貧酸素・懸濁物耐性

図-9 は、水温 19℃、DO 濃度 3.0mg/ℓ の貧酸素条件下に曝露された軟体部重量 10g の 1 齢貝に、10% の斃死が発生する可能性を、濁度をパラメータとして今回開発した濾水行動モデルを用いて推定し、貧酸素耐性 Ta 、濾水量 Fw 、および懸濁物除去量 Wa の経時変化とともに示したものである。

これより、濁度の増加とともに、曝露開始後における貧酸素耐性の減少率は増加し、高濁度ほど濾水量の増加開始時間 t_n も短縮している。 t_n 経過後、濁度 1000ppm のケースにおいては、濾水量の増加率も小さいため貧酸素耐性の減少傾向を増加に転じるには至らず、18 時間後に Ta 値はゼロとなり 10% の斃死が発生している。斃死が発生しないケースにおける懸濁物の除去量は、 t_n 経過後に急増し、濁度 500ppm に対する濾水浄化能力は 50ppm の約 6.4 倍に及ぶことが推定された。

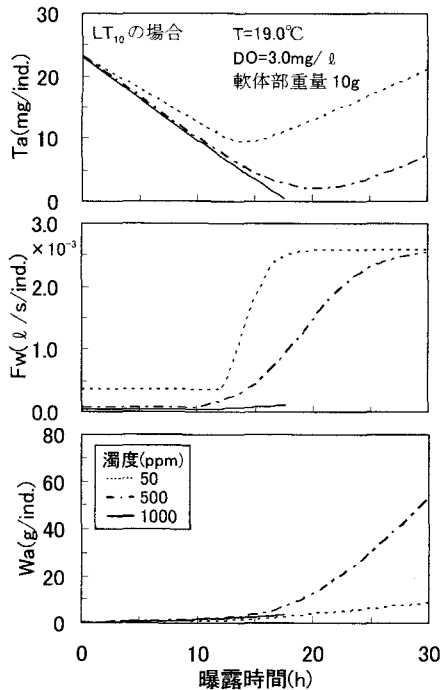


図-9 濾水行動モデルの計算例

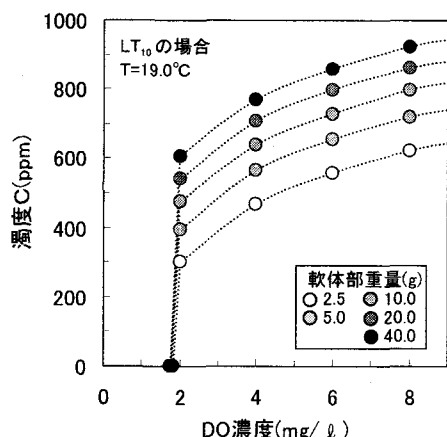


図-10 貧酸素・懸濁物耐性

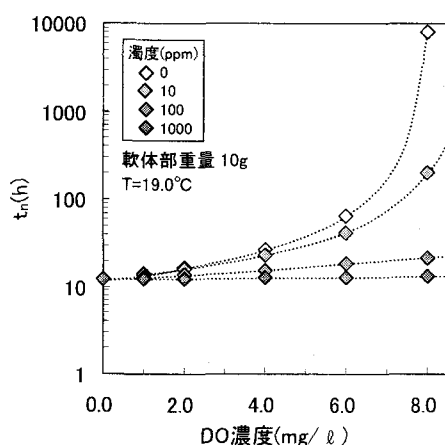


図-11 異常代謝の発現時間

図-10 は、能取湖で貧酸素水塊の形成が確認されている夏期高温期（水温 19℃）をケーススタディとして、各 DO 濃度に対して無機懸濁物濃度が増加した場合に、10%以上の斃死個体が発生する濁度の下限値を、軟体部重量をパラメータとして算定した結果である。また、図-11 は、軟体部重量 10g の個体をモデルケースとして、貧酸素状況下において異常代謝が発生する時間 t_n を濁度をパラメータとして算定した結果である。これらより、DO 濃度 2.0mg/L 程度未満の貧酸素条件下における 10%斃死の発生条件は、無機懸濁物の濃度によらず、DO 耐性で決定されることが推定される。また、DO 濃度 5.0mg/L 程度未満の低酸素条件下においては、無機懸濁物濃度が 200ppm 程度以上の高濃度状態が 1 日程度以上継続する場合には、小型個体より無機懸濁物濃度に依存したホタテガイの斃死が発生することが推定された。一方、DO 濃度が飽和状況下においては、無機懸濁物に依存して異常代謝を開始するまでに要する時間が、荒天時の河川大量出水に伴い発生する高濁度の継続時間と比較して、オーダー的に長いことなどから、飽和状態においては、無機懸

濁物濃度に依存したホタテガイの斃死は発生しないものと推定された。

4. 能取湖への適用

(1) 漁場環境

能取湖（面積 58.4km²、最大水深 23.1m、推定貯水量 5.03×10⁸m³）は、図-12 に示すように湖口がオホーツク海と接続された海跡湖で、2004 年度の実績では、海域面積約 940 万 m²において、総計 2 億個体の 0～1 齢貝が湖内 3～14m の水深帯で中間（垂下）育成されるとともに、海域面積約 360 万 m²において総計 2450 万個体の 1～3 齢貝が湖内に放流されており、四輪採区画制の栽培漁業が実施されている。湖内中心部の観測定点（図中 a 点）で定期的の実施される公共用水域水質調査等^{8),9)}のデータをもとに、観測定点 a の水深 2m 付近における水温および塩分の月別平均値を図-13(a)に示す。更に、湖内最深部（図中 b 点）で実施された STD 調査結果、および係留系調査結果より得られた TS ダイアグラム（4 月下旬～9 月上旬）を図-13(b)に示した。

能取湖は、1～4 月上旬の結氷期は全域的にオホーツク海表層低塩分水に占められるが、結氷期に続く融氷・融雪期には、上層を中心に低塩分化が進行する。その後、夏期に向かって宗谷暖流系水が流入し、7 月中旬から 9 月上旬に亘って密度躍層が発達し、下層部の貧酸素化が進行する。

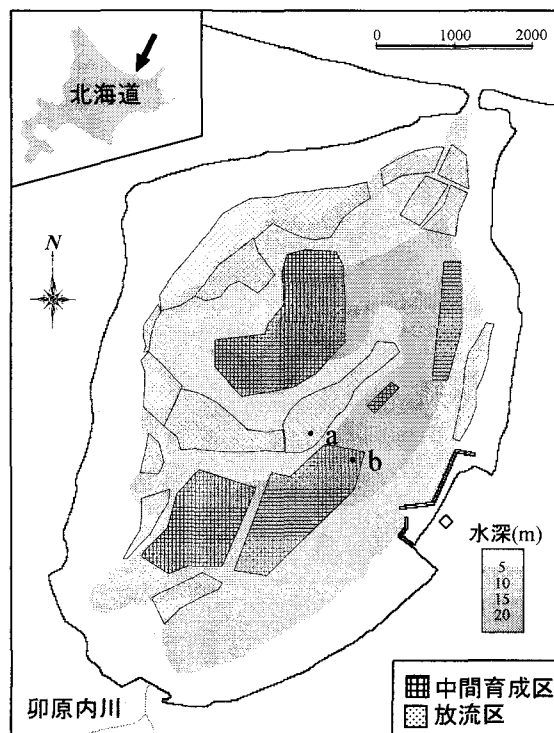


図-12 能取湖におけるホタテガイ漁場配置図

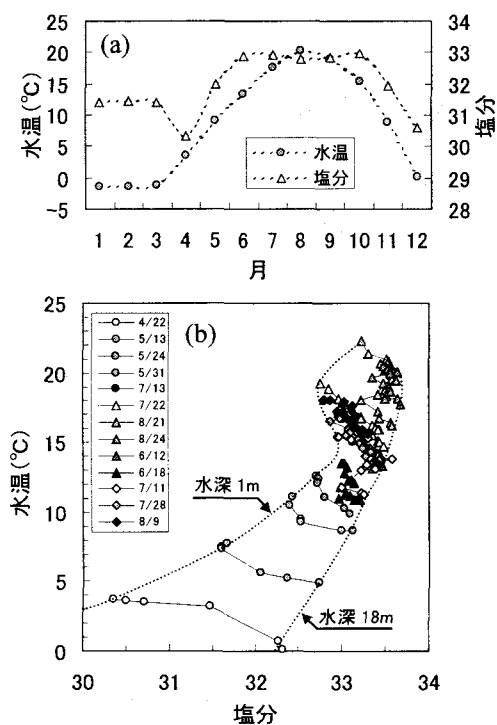


図-13 能取湖における水温塩分の季節変化
(a)表面水温、(b)T Sダイアグラム

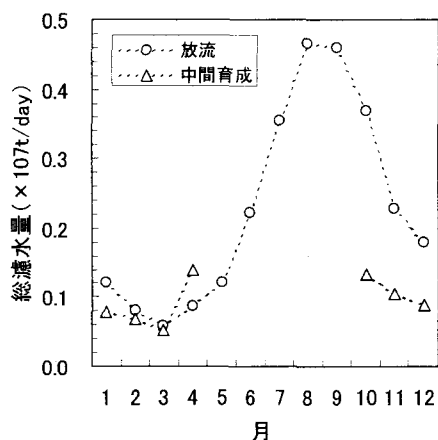


図-14 総濾水量の月変化

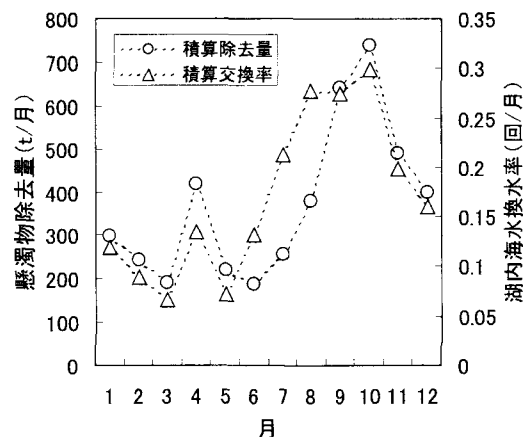


図-15 懸濁物除去量および換水率の月変化

(2) 濾水浄化能力

図-14 は能取湖の水質データおよびホタテガイ軟体部重量の月平均値をもとに、濾水行動モデルを適用して、中間育成貝および放流貝による総濾水量の月変化を推定したものである。更に、図-15 は、濾水過程でホタテガイに除去される総懸濁物量、及び本湖の貯水量に対するホタテガイ濾水量の割合（湖内海水換水率）の月変化を算定したものである。なお、本計算で使用した濁度データに占める無機懸濁物量の割合は不明であるため、推定値は、実際に擬糞として排出される値の最大値と考えられる。これらより、軟体部重量が増加する夏期～秋期にかけてホタテガイの総濾水量も増加し、最大値に達する10月には、1カ月間で本湖貯水量の3割程度の海水を換水し、生産される擬糞量は最大700トン程度に達するものと推察される。また、本湖においては、放流貝は中間育成貝の最大4倍程度の濾水浄化能力を有しているが、湖内で養殖も実施しているサロマ湖などでは、養殖貝による影響が他と比較して突出することが推察される。本研究によって、ホタテガイ増養殖が本湖の水質性状や底質環境に大きな影響を及ぼしていることが示された。

謝辞：本研究の実施に際し、供試個体の採集や貧酸素耐性実験の遂行にご協力いただいた、西網走漁業共同組合の川尻氏、北海道栽培漁業振興公社の飯村技師、及び、網走市水産科学センター、北海道立網走水産試験場の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 蔵田護, 田村亮一, 渡辺安廣, 品田晃良: 能取湖大型底生動物調査, 平成13年度網走水産試験場事業報告, pp170-215, 2002.
- 3) 山本護太郎: 種々の成長段階の帆立貝の環境に対する抵抗力について, 特に鰓毛運動に対する懸濁浮泥, 酸素欠乏などの影響, 日本生態学会誌, 第5巻, pp172-175, 1956.
- 4) 蔵田護, 干川裕, 西浜雄二: サロマ湖における垂下養成ホタテガイの摂餌量, 北海道水産試験場報告, 第37巻, pp37-57, 1991.
- 5) 蔵田護: オホーツク海における放流ホタテガイの呼吸量, 北海道水産試験場報告, 第49巻, pp7-13, 1996.
- 6) 瀬戸雅文, 中山威尉, 水口洋, 田畑真一, 齊藤次郎: 浮遊砂による基質表面の自動更新に伴う藻場形成に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp419-424, 2002.
- 7) 玉井恭一: シズクガイの貧酸素耐性, 日本水産学会誌, 第59巻4号, pp615-620, 1993.
- 8) 網走市: 網走市湖沼環境総合調査成果最終報告書, pp62-70, 2000.
- 9) 北海道通商産業局: 網走・能取地区内陸工業開発環境保全総合事前調査報告書, pp181-202, 1995.