

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

INFLUENCE OF ANOXIC WATER ON JAPANESE SCALLOP SURVIVAL RATE OF LAKE NOTORO

瀬戸雅文¹・金子和恵²・新居久也³
Masabumi SETO, Kazue KANEKO, 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 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)

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)

The anoxic water formed in the bottom layer in Lake Notoro in Hokkaido in summer examined the influence given to the fry of shellfish of the scallop cultivated in the surface layer. Median lethal times (LT_{50}) of the scallop of 0-years-old and 1-years-old were 18 hours and 30 hours under the condition of the dissolved oxygen (DO) density 0mg/l by 15 °C in the water temperature. LT_{50} in DO density 1mg/l were 96 hours, and 63 hours respectively under the same water temperature. LT_{50} decreased with the rise of the water temperature, and the half reached the value at the level roughly in 23°C. Under the condition of 2mg/l or more DO density, half the number died when the state of 23°C in water temperature was consecutive for six days or more. The anoxic water formed in the vicinity of the bottom rises to the nursery when the south wind of less than velocity of the 5m/s is superior, and it causes the death of the fry of shellfish of the scallop cultivated in the lake. The anoxic water disappears when the south wind of velocity 5m/s or more is frequently generated, and the death caused by the hypoxia is not generated.

Key Words: *Patinopecten yessoensis*, Tolerance, Anoxia, Wind-driven current

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(面積 58.4km²、最大水深 23.1m)はオホーツク海と接続された海跡湖であるが、1974年に湖口を開口以来、近隣のサロマ湖とともにホタテガイ種苗の生産・供給基地として、年間5億円程度の生産額を維持している。本湖におけるホタテガイの中間育成は、大型幼生が出現する6月中旬に採種器を投入し、付着稚貝(0齢貝)の殻径が10mm前後に成長した段階で網籠に収容後、3~14mの水深帯に垂下育成して翌春に1齢貝を出荷(一部は湖内に放流)する工程で実施されるが、近年、深い水深帯に垂下された網籠を中心に斃死する個体数が増加する傾向が認められ、夏期に湖内最深部を中心に形成される貧酸素水塊の影響が懸念されている。一方、ホタテガイ稚貝の環境耐性は、高温耐性、低塩分耐性の解明に留まり、貧酸素耐性については成貝に関わる若干の知見¹⁾²⁾が認められるのみである。

本研究は、能取湖においてホタテガイ稚貝の斃死が発生する夏期の高水温期を主対象として、本種の生存に及ぼす貧酸素濃度の影響を実験的に解明する。更に、湖内に係留系を設置して夏期の能取湖における貧酸素水塊の形成状況を調査するとともに、数値シミュレーションを実施して潮汐や風に伴う湖内底層水の挙動特性を解明する。これらの実験、及び調査結果をもとに、本湖の最深部を中心に形成される貧酸素水塊が中間育成海域に垂下されたホタテガイ稚貝の生残に及ぼす影響について検討した。

2. 貧酸素水塊の発生状況

(1) 調査方法

図-1は能取湖において2001年~2003年の夏期(7~9月)を中心に実施された海域調査地点の位置図を示したものである。水質特性値の平面分布は、ホタテガイの中間育成施設や湖内で種苗放流されている海域

の周辺に 17 定点を設定した上で、夏期に月 2 回程度の頻度で可搬式コロテック(アレック電子社製 ACL1183-PDK)を用いて水温、塩分、溶存酸素量(DO)、濁度、クロロフィルの鉛直分布を計測した。また湖内最深部の St. a に係留系を設置して水深 6~19m 内の 7 点で水温を、9, 13, 17m で水温、塩分・DO を連続計測した。更に、St. a、湖内中心部(図-1 中で St. a の左上の白丸)、及び卯原内川の河口付近においてバンドーン採水器を用いて表層水、及び底層水(St. a は水深 5m 毎)を採水後、pH、DO、や各種環境指標の水質分析を実施した。

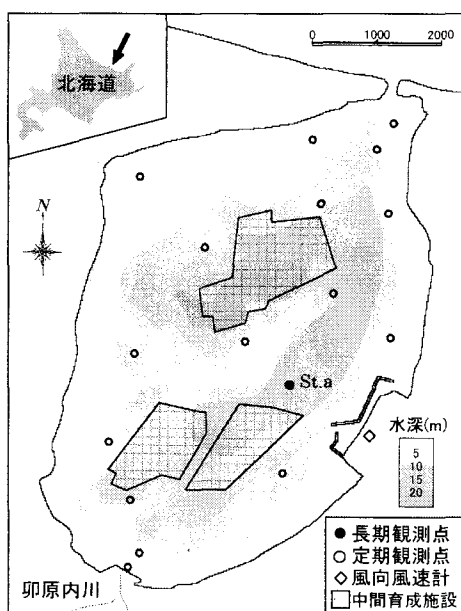


図-1 現地観測地点図

(2) 調査結果

図-2 左図は 2001 年夏期の湖内最深部(St. a)における DO 濃度の鉛直断面時系列、及び図-2 右図は 2001 年 8 月 21 日に湖内全域で実施した定点データをもとに本湖の底面近傍における DO 濃度のコンター図を示したものである。能取湖では、冬～春季に湖内全域を占めるオホーツク海表層低塩分水の上層より、夏期に向かって宗谷暖流水(高温・高塩分)が流入し、水深 12m 前後に形成される密度躍層の発達とともに下層部の貧酸素化が進行するが、図-2 より 2001 年に観測された貧酸素水塊は、7 月中旬より 8 月下旬の約 1.5 ヶ月間に亘って湖内最深部の St. a を中心に形成され、最も発達する 7 月下旬～8 月上旬にかけての底面近傍は無酸素に近い状況(DO 濃度 0.5mg/l 未満)が維持されていた。更に、図-2 右図より St. a 付近に形成された貧酸素水塊は、等深線に沿って南西方向に移流拡散しながら湖奥に設定されているホタテガイ稚貝の中間育成海域の底層における DO 濃度を低下させる可能性が示唆された。

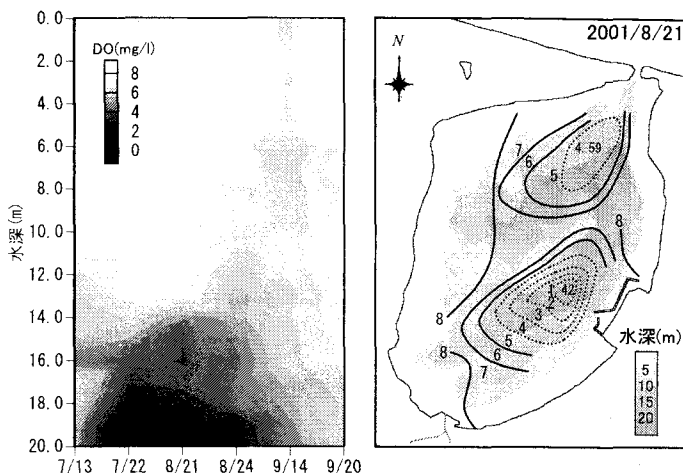


図-2 St. a における DO 濃度の季節変化、及び、底層における DO 濃度の湖内平面分布

図-3 は 2001 年の夏期に St. a の水深 17m で観測された DO 濃度、及び塩分の時系列、及び同時期に St. a の南東側に位置する陸上定点(地上 8m)に設置した風向風速計(コーナシステム社製)で計測された風速値南北成分の時系列を示したものである。

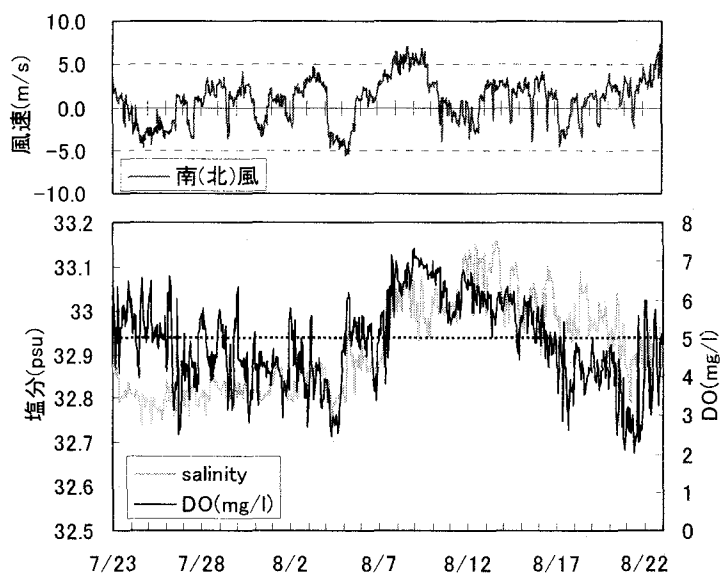


図-3 2001 年夏期の St. a の水深 17m における DO・塩分時系列、及び海上風速の南北成分時系列

これより、密度躍層の形成に伴い底層水の交換が抑制され、塩分濃度がほぼ一定値を維持している 7 月 23 日～8 月 6 日の期間内における DO 濃度はほぼ全ての期間において環境基準 B 類型の基準値である 5mg/l 以下の貧酸素状況を呈しながら徐々に低下する傾向を維持している。一方、観測期間内で海上風の南北成分が卓越する 8 月 6 日以降の数日間に、DO 濃度、及び塩分濃度が急激に増加し、一時的に貧酸素水塊が解消していることが確認された。図-4 は、本研究で観測した毎時

風向風速データと、能取湖の近隣に位置する網走気象台が公表している風向風速資料を比較することによって、本湖における過去5年平均された風向風速値を推定した上で、月別風況頻度図（6月～9月）を作成したものである。

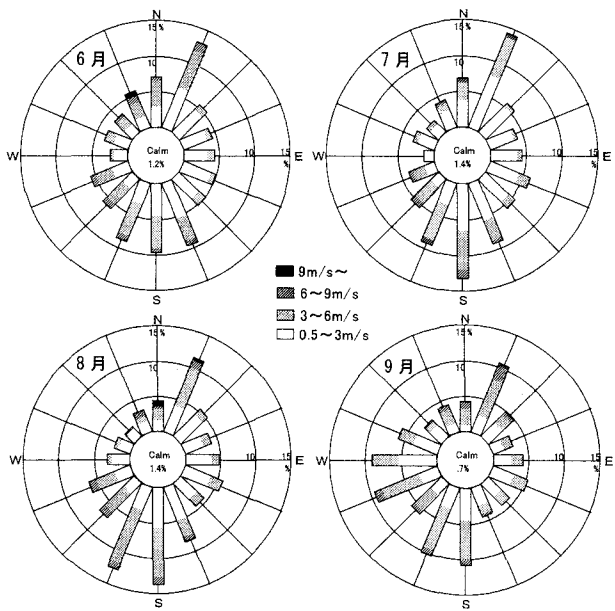


図-4 能取湖の月別風況頻度図

これより、本湖に貧酸素水塊が形成される8月の最多出現風速は0.5～2.9m/s、及び3～5.9m/sで各51.6%及び40.1%と比較的穏やかな風況特性を呈するが、6m/s以上の風速も8.1%（2～3日）出現しており比較的強い低気圧が当該域を月1回程度の割合で通過することが示唆された。また、卓越風向は南～南南西方向、及び北～北北東方向で各26.7%、及び15.9%と南北成分（特に南風）の出現が卓越していた。従って、本湖においては、南北風の卓越に伴って湖内に吹送循環流が形成され、外海起源の塩分濃度の高い海水が底層部に供給されると同時に貧酸素化が解消している可能性が示唆された。特に、本湖は湖口が北側、湾奥が南側に位置していることから、南風成分が湾奥部に配置されたホタテガイ中間育成海域の貧酸素化に影響を及ぼすものと推察された³⁾。

3. ホタテガイの貧酸素耐性

(1) 実験方法

供試貝は、2003年8月6日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59.4mm）480個体、及び2003年8月19日に中間育成施設より採取した0齢貝（平均殻高8.8mm）600個体を、湖内の表層水温とほぼ等しい19℃で最大10日馴致後使用した。実験水槽の概要図を図-5に示す。

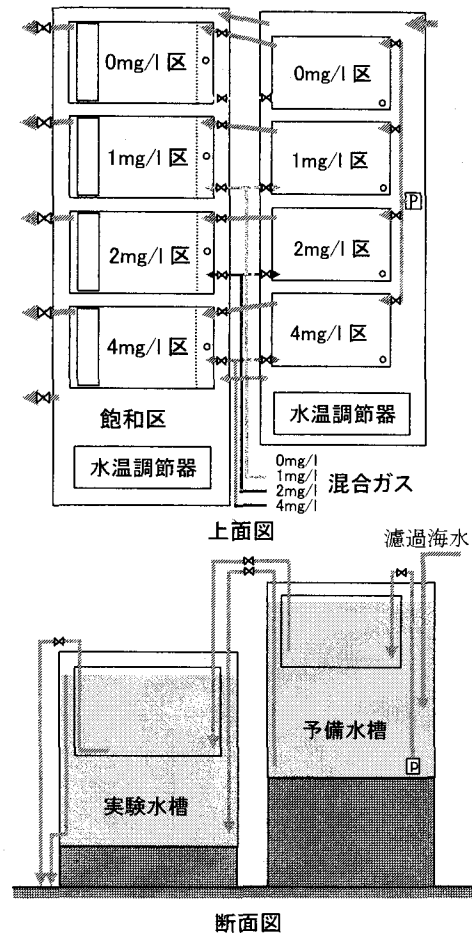


図-5 貧酸素耐性実験水槽の概要図

表-1 O₂ガスの混合率（%）

水温 (℃)	DO濃度 (mg/l)			
	0.0	1.0	2.0	4.0
15.0	0.0	2.6	5.2	10.4
19.0	0.0	2.8	5.6	11.2
23.0	0.0	3.0	6.1	12.1

主成分：窒素ガス

貧酸素耐性実験では、馴致水温を15℃、19℃、23℃の3段階に設定した上で、各水温区毎に図-5に示すように水温調整器が設置された大型水槽（縦410×横1160×高さ450、飽和区）内に、DO濃度が1mg/l～4mg/lの範囲内で4段階に異なる馴致区（縦190×横335×高さ205）を形成した。馴致区内のDO濃度は混合ガスボンベ法に従って、表-1に示すようにO₂ガスとN₂ガスの濃度比が異なるガスボンベを各水槽に接続し所定の濃度に達するまで混合ガスを連続暴露する方法で計15通りの水質条件下で馴致実験を実施した。各水槽に0齢貝40個体、1齢貝32個体を収容後、定期的に8個体ずつ取り出し、飽和水槽に移動後2日以内に死亡した個体数を計数し、半数致死時間（LT₅₀）及び全数致死時間（LT₁₀₀）を算出した。なお、実験期間中は水質設定条件が同一の予備水槽を実験水槽の隣に配置し、定期的に実験区の水質（DO濃度、水

温、塩分、pH、アンモニア濃度)を計測しながら水質悪化が認められる実験区においては、予備水槽と海水を交換することによってホタテガイの斃死が馴致水質に及ぼす影響を排除した。また、供試後のホタテガイにおいては、右殻と左殻が30度以上開放し、外套膜や軟体部に刺激を与えても応答が認められない個体を死亡個体と定義した。

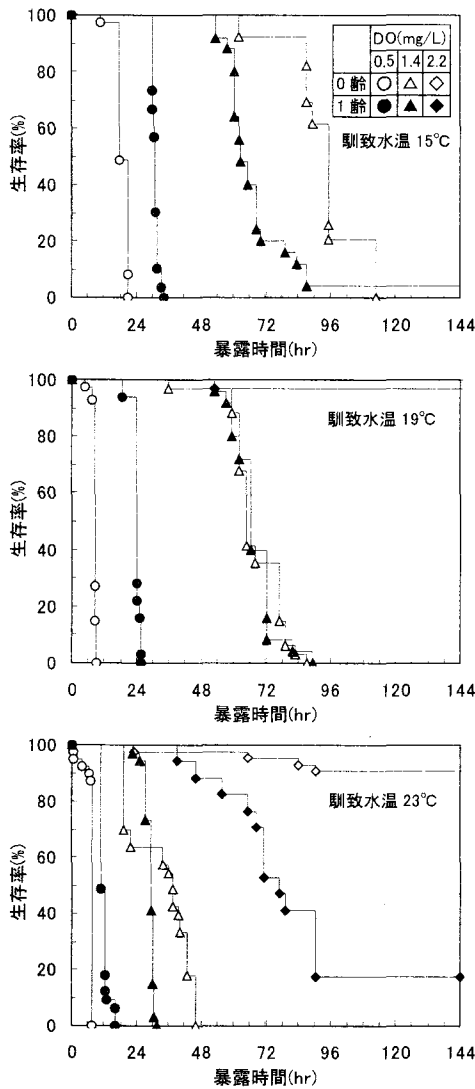


図-6 ホタテガイ稚貝の生存率曲線

(2) 実験結果

図-6 は DO 濃度が 0.0~2.0mg/l の設定条件下における 0 齢貝及び 1 齢貝の生存率を Kaplan-Meier 法で推定し、馴致水温別に示したものである。これより、実験開始 0.75 時間後より死亡個体が確認されはじめ 0 齢貝と 1 齢貝の DO 濃度が 0mg/l, 1mg/l の全ての実験区、及び 1 齢貝の DO 濃度 2mg/l で水温 23℃ の水槽では、実験期間 (連続暴露 96 時間) 内にほぼ全滅し、その他の水槽では半数致死まで至らなかった。水温 15℃ の無酸素区及び DO 濃度 1mg/l 区の LT₅₀ は 0 齢貝で各 18 時間、96 時間、1 齢貝で各 30 時間、61 時間で水温の上昇とともに短縮され水温 23℃ では概ね半減した。ホタテガ

イ稚貝の致死時間より本種の時間換算ストレス度⁵⁾ (ホタテガイ稚貝が備えている貧酸素に対する耐性を 1 とした場合に、貧酸素状況下で稚貝が消耗する 1 時間当たりのストレス度で定義し、本値の時間積算値が 1 になった時点で斃死が発生する) を算出した結果を表-2 に示す。

表-2 ストレス度 (上表: 0 齢貝、下表: 1 齢貝)

DO濃度 (mg/l)	LS ₅₀			LS ₁₀₀		
	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃
0.5	0.058	0.130	0.142	0.047	0.104	0.130
1.4	0.011	0.016	0.029	0.009	0.011	0.022
2.2	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007

DO濃度 (mg/l)	LS ₅₀			LS ₁₀₀		
	15℃	19℃	23℃	15℃	19℃	23℃
0.5	0.033	0.045	0.098	0.029	0.039	0.061
1.4	0.016	0.016	0.035	0.008	0.011	0.031
2.2	<0.007	<0.007	0.013	<0.007	<0.007	0.010

表-2 をもとに DO 濃度 (DO:mg/l)、水温 (T:℃)、及び死亡率 (LT:%) より時間換算ストレス度 (LS) の近似式を成長段階別に以下のように算出した。

1) 0 齢貝の時間換算ストレス度

$$LS = 0.0458 \exp(0.108T - 0.0047LT - 2.05DO)$$

2) 1 齢貝の時間換算ストレス度

$$LS = 0.0141 \exp(0.116T - 0.0056LT - 1.15DO)$$

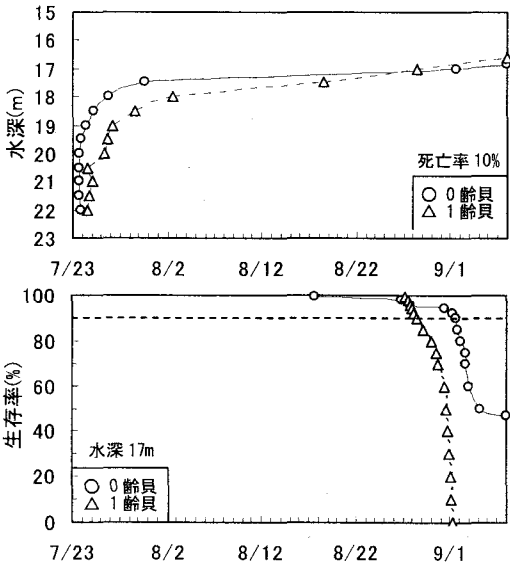


図-7 St. a に形成された貧酸素水塊がホタテガイ稚貝の生存率に及ぼす影響

4. 能取湖への適用

(1) ストレス度の推定

図-7 は、St. a で計測された水温及び DO 濃度の鉛直断面時系列に時間換算ストレス度推定式を適用した上

で、水深別に貧酸素水塊による稚貝死亡率が 10%に達する日時と水深の関係（図-7 上）、及び水深 17m における稚貝生存率の時系列（図-7 下）を推定したものである。これより、2001 年の能取湖最深部においては水深 17m 以深に形成される貧酸素水塊によってホタテガイ稚貝の減耗が発生し、0 齢貝ではほぼ半数、1 齢貝では全数が死亡する可能性が示唆された。一方、St. a の水深 16m 以浅においては貧酸素水塊に伴うホタテガイ稚貝の斃死は発生しないことも推定された。

(2) 数値モデルの概要

湖内の流動シミュレーションにはレイノルズ平均された 3 次元ナビエ・ストークス方程式及び連続式を基礎式としたフル 3 次元モデル (DIH 社製 MIKE3) を使用した。図-8 及び表-3 に示すように、水平格子間隔 200m×200m で南北、東西方向に各 71、及び 57 格子を設定し、鉛直方向には 2m 間隔で最大 22 層に分割した。

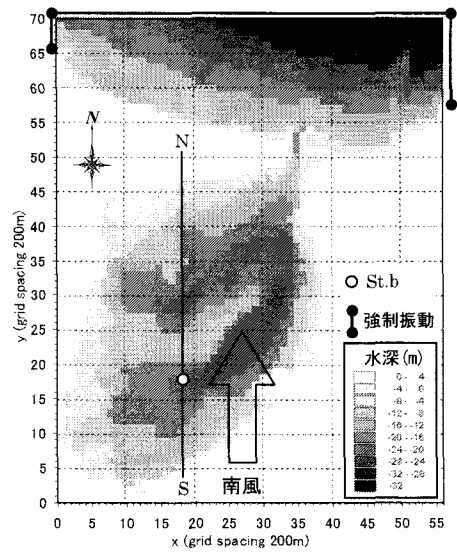


図-8 計算領域の設定条件

表-3 計算諸条件

初期条件	水温	表層19.2℃～底層17.3℃
	湖内塩分	表層33.5psu～底層33.3psu
	外海塩分	表層33.8psu～底層33.9psu
境界条件	開境界	常呂～網走の主要4分潮(8月下旬小潮期)
	河川流量	卯原内川に0.02m ³ /s
	風向風速	S(SSW)方向、0～9m/s内で8段階
計算格子	57×71×21(水平間隔200m、鉛直方向2m)	

計算では、海域調査結果をもとに、貧酸素水塊が形成される夏期の平均的な水質条件を設定後、湖口で接続するオホーツク海（常呂～網走）の境界に日潮不等の強制潮汐与えて 10 秒ステップで計算し、夏期に卓越する吹送流（南風）が湾奥部中間育成海域の密度界面の上下動に及ぼす影響を数値的に検討した。

(3) 計算結果及び考察

図-9 は計算領域に作用させる南風の風速(U_s)を 2.0

～9.0m/s まで段階的に変化させた場合の、ホタテガイ稚貝の中間育成海域（図-8 中の St. b）における σ_t 断面分布の吹送時間による変化を示したものである。図より風速 4m/s 未満においては、吹送開始と同時に底層部を中心に σ_t の増加が認められ、その影響は水深 10m 付近まで及ぶが密度躍層を崩壊させるまでには至らず吹送後約 12 時間以降は、吹送流に伴う水位勾配と密度勾配がバランスして定常状態が維持されることがわかる。一方、風速 6m/s 以上においては、吹送開始と同時に底層部の密度は若干上昇するものの、上下混合の促進とともに、密度は一様に低下しながら水深によらずほぼ一定値に収束することがわかる。

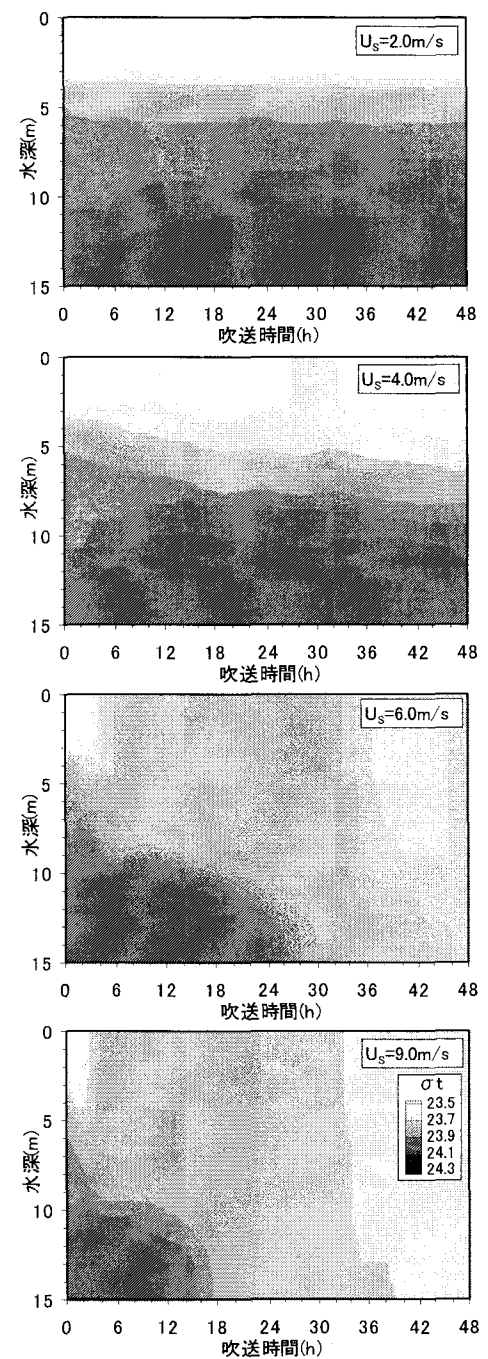


図-9 中間育成海域における σ_t の吹送時間による変化

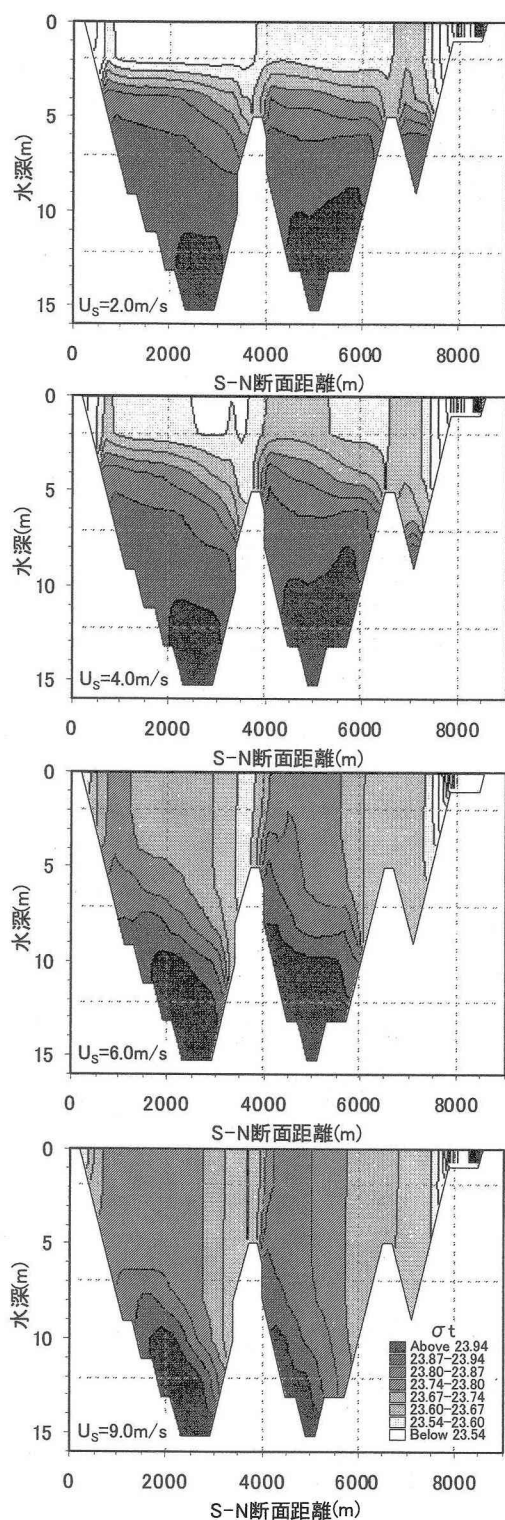


図-10 S-N断面における σ_t の吹送時間による変化

図-10は、図-8内に表示したS-N線上の吹送開始後12時間における σ_t の鉛直断面分布を風速(U_s)が2.0m/s, 4.0m/s, 6.0m/s, 9.0m/sの場合について示したものである。これより、St.bで確認された風速4m/s未満で底層部を中心に発生する密度の増加は湾奥部の南側ほど顕著な傾向を呈することや、風速6m/s以上で確認された上下混合は、湖内のほぼ全域で発生していることなどが推察された。

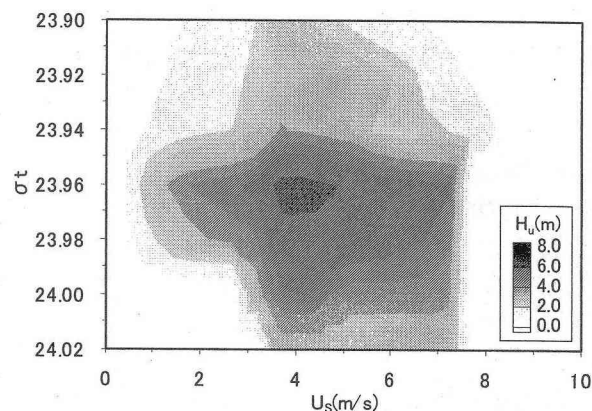


図-11 南風に伴う等密度面上昇高さ

図-11は、中間育成海域における吹送流に伴う等密度面上昇高さ(H_0)を、 σ_t 及び風速(U_s)を指標として整理したものである。これより中間育成海域においては風速4m/s付近に H_0 の最大値が存在し、 σ_t 23.96の水塊は吹送流によって最大6m程度上昇することや、風速が7.5m/s以上では鉛直混合が促進される結果、等密度面上昇が発生しないことがわかった。

すなわち、能取湖においては、夏期に風速4m/s未満の南風が卓越する年には湖央の水深17m以深に形成され、大量斃死を発生させる貧酸素水塊が中間育成施設(12~14m)まで上昇し、ホタテガイ稚貝の斃死要因になるとともに、風速6m/s以上の南風が頻繁に発生する年は湖内の上下混合が促進され貧酸素水塊の影響を受けにくいことが示唆された。

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立川氏、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。更に、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) 櫻井泉, 瀬戸雅文, 巻口範人, 小形孝: ホタテガイの貧酸素および低塩分耐性, 水産増殖, 第48巻1号, pp137-138, 2000.
- 2) 中西孝: 貝類の心拍におよぼす環境の影響I ホタテガイの心拍数におよぼす水温・低塩分および低酸素の影響, 北海道区水産研究所報告, 第42巻, pp65-73, 1977.
- 3) Kajiura, K.: The effect of winds on the stratified lakewater, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, 8(2), pp67-71, 1952.
- 4) 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.
- 5) 瀬戸雅文, 蔵田護, 山田俊郎, 金崎伸幸: 結氷海域におけるアサリ漁場の形成条件, 寒地技術シンポジウム論文集, 第15巻, pp385-389, 1999.