

# 寒冷地半閉鎖性水域の水質改善手法 に関する研究

STUDY ON METHOD OF WATER QUALITY IMPROVEMENT  
AT SEMI-CLOSED WATER AREA OF COLD REGION

蒔田俊輔<sup>1</sup>・佐伯浩<sup>2</sup>

Shunsuke MAKITA and Hiroshi SAEKI

<sup>1</sup>工博 北海道大学 工学研究科 (〒060-6828 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学 (〒060-6828 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

In Hokkaido, more than 30 semi-closed water areas exist, and aquaculture has been performed in many of those water areas. Since semi-closed water areas connected to open sea by a narrow inlet are very calm water area, such areas are suitable for the aquaculture. However there is also the risk that the water quality may suddenly decrease. For permanent use for aquaculture, maintenance of the water quality is needed. As one of the water quality preservation methods, improvement of water quality by promotion of water exchange has been pointed out. Many of these water areas are located on the coast of the Okhotsk Sea. Ice floes normally reach the coast in winter; tides cause ice floes to pass through lagoon inlets into the lagoon. These ice floes have caused serious damage to aquaculture facilities. To prevent such damage, ice booms had started to be installed. However, these facilities have been used only during winter. In this paper, it proposes that the method of water quality improvement by use of these facilities.

*Key Words : semi-closed water area, improvement of water quality, promotion of water exchange, cold region, ice booms*

## 1. 研究背景

半閉鎖性水域は、狭い開口部を介し外海と通じている汽水域であり、霞ヶ浦、八郎潟を代表とし、全国に約40湖沼が存在している。本州において半閉鎖性水域の多くは、陸地化による農地としての利用、淡水化による水源としての利用などの高度な開発がなされているが、北海道を代表とする積雪寒冷地においてはオホーツク海沿岸のサロマ湖、能取湖、太平洋沿岸の風連湖を代表とし、本来の汽水域としての特性を保つ湖沼が多く残されており、その特性を活かし、帆立貝、牡蠣などの養殖漁業の場として利用されている。

半閉鎖性水域は外海と同等の塩分濃度と高い静穏性を有するため、養殖漁業の場として適していると同時に、開口部の狭さゆえ海水交換が行われにくく、水質環境を急激に悪化させる危険性を併せ持っており、恒久的な漁場利用のためにも、水質環境の改善、海水交換の活性化手法が必要とされている。

## 2. 研究内容

北海道内において、養殖漁業が営まれている半閉鎖性水域の多くはオホーツク海沿岸に位置している。沿岸域には、通常1月から2月にかけて流氷が到来し、接岸した流氷は潮汐の影響により湖内へ侵入する。侵入した流氷は湖内を異動することにより、養殖施設に衝突し、破壊、磨耗などの被害を与えてきた。このような被害を防止するため、これらの水域の開口部に数スパンのアイスブームにより構成される防氷堤が建設され始めており、現在サロマ湖に建設されている防氷堤は、ほぼ完全に流氷の侵入を制御している。

しかし、流氷侵入制御を目的としたこの構造物は、冬期間のみ利用されており、その他の期間には固定構造物を残しアイスブームは撤去されているため、有効な利用がなされていないのが現状である。本研究では、冬期以外の期間における活用法として、防氷堤を用いた水質改善手法の可能性に関して研究を行っている。

### 3. 研究手法

#### (1) 解析手法

数値モデルは、水域を水平方向には格子を、鉛直方向には層を用いて分解する、Multi Level Model<sup>1)</sup>を用いている。表層においてのみ層厚変化を考慮し、他の層においては鉛直方向流速成分として計算されるため、湧昇流が重要である半閉鎖性水域の流動解析には適したモデルである。基礎方程式として、連続方程式を式(1)に、運動方程式を式(2a)および式(2b)に記す。なお、式(2a)および式(2b)の下線で示される項は、湖内に設置されている養殖施設の抵抗力であり、式(3a)および式(3b)により計算される剪断力として計算されている。

$$\text{div}U = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_k v_k) \\ & - (uw)_k + (uw)_{k+1} - gh_k \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} (\tau_x^{k-1,k} - \tau_x^{k,k+1}) - \frac{1}{\rho} \tau_{fx} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(N_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k v_k) \\ & - (vw)_k + (vw)_{k+1} - gh_k \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} (\tau_y^{k-1,k} - \tau_y^{k,k+1}) - \frac{1}{\rho} \tau_{fy} \end{aligned} \quad (2b)$$

$M_k, N_k$  : x, y方向の流量を層厚で積分した線流量,

$N_x, N_y$  : x, y方向の渦動粘性係数

$$\tau_x = \frac{1}{2} \rho C u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3a)$$

$$\tau_y = \frac{1}{2} \rho C v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3b)$$

$C$  : 養殖施設の抵抗係数

#### (2) 諸係数

##### a) 海面摩擦係数

海面摩擦係数は、風・波浪・流動などの条件により複雑に変化するが、実際には次に示される一定値が用いられることが多く、今回の解析でもこの値を用いている。

$$\gamma_a^2 = 1.3 \times 10^{-3}$$

##### b) 底面摩擦係数

Multi-Level-Modelにおいては、Hasenが潮流観測により求めた一定値が用いられることが多い。今回の解析においてもこの値を用いている。

$$\gamma_b^2 = 2.6 \times 10^{-3}$$

##### c) 内部摩擦係数

一般的には、底面摩擦係数の1/10~3/4程度の値が使用される。今回の解析においては次の一定値を用いている。

$$\gamma_i^2 = 0.5 \times 10^{-3}$$

##### d) 水平拡散係数

一般的に、運動規模の4/3乗に比例することが知られており、以下の式(4)により算出される。

$$K_h = cL^{4/3} \quad (4)$$

$c$  : 定数 (0.01程度),  $L$  : 格子サイズ

解析にはこの式により、格子サイズ100mに対し計算された値を用いている。

$$K_x = K_y = 4.64 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$$

##### e) 水平渦動粘性係数

運動状態や運動規模により変化するが、一般的には水平拡散係数と同程度の値が用いられる。今回の解析においても同じ値を用いている。

$$N_x = N_y = 4.64 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$$

##### f) 養殖施設の抵抗係数

今回の研究において養殖施設の抵抗係数は、著者らの実験<sup>2)</sup>により得られた値より、延縄式養殖施設の幹綱方向に対し流れが垂直に作用する状態および平行に作用する状態の抵抗係数を基準に設定されている。表-1に養殖施設の抵抗係数をまとめる。

表-1 養殖施設の抵抗係数

流れが平行	$C_p = 2.0 \times 10^{-3}$
流れが垂直	$C_v = 2.0 \times 10^{-2}$

実際の現象では流れは幹綱に対し角度を持ち作用することとなるが、流れの作用角の影響は、実験より得られた補正手法を用い計算上で処理し式(3a)および式(3b)に用いる係数 $C$ を決定している。

### (3) 解析条件

今回の解析では、北海道の代表的な半閉鎖性水域であるサロマ湖を解析対象とする。サロマ湖と第1湖口部の防氷堤の位置を図-1に示す。オホーツク海沿岸に位置するサロマ湖は2つの湖口により外海と通じており、第1湖口部の防氷堤は14基の固定構造物とその間に張られた13スパンのアイスブームにより構成されている。湖全域と第1湖口より500m沖までの水域を100mの格子により分割し計算を行った。図-2に解析範囲を示す。図中の線影領域が養殖施設設置領域であり、線の方向が養殖施設幹線方向を示している。入力条件は、潮位観測より得られた外潮位変動として、半潮位差0.8mの日周期型水位変動を正弦波で沖側の境界に与えており、外海へ通じている境界は、Sommerfeldの開放条件により処理されている。

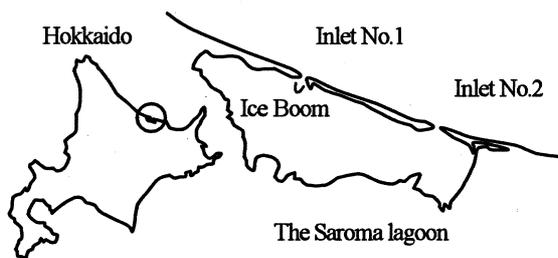


図-1 サロマ湖

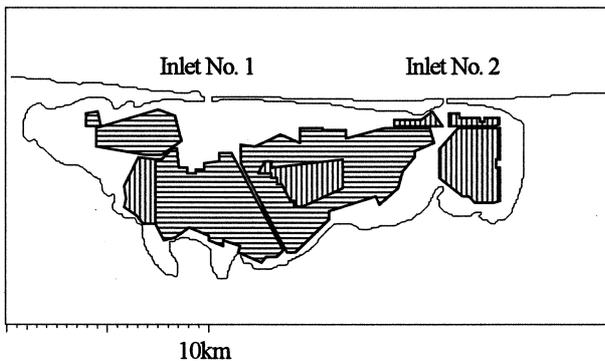


図-2 解析領域

### (4) 解析の信頼性

解析結果から第2湖口付近の流動の拡大図を図-3に示す。流入時に第2湖口の湖内側300mの位置に渦状の流れが発生している。

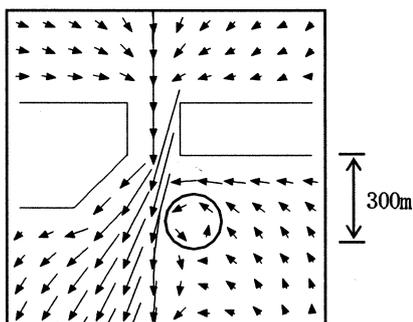


図-3 第二湖口部の流動

現地観測では200m~300mの位置で剥離の渦が発生することが報告されており、渦動粘性係数の設定が妥当であることが確認できる。

また、図-4に湖内外潮位差および湖口部流速の関係を示す。湖内外の潮位差と湖口部流速の関係も現地で観測された値と同等であり、的確に実現象を再現していることが確認できる。

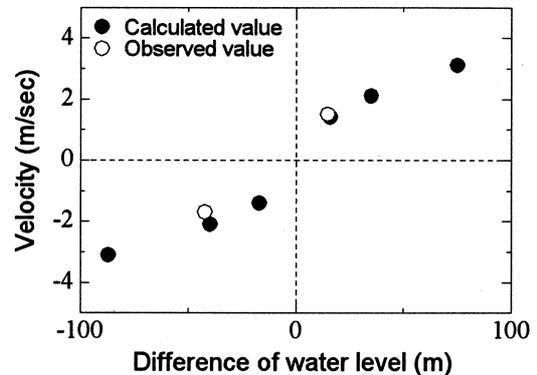


図-4 湖内外潮位差および湖口部流速の関係

### (5) 海水交換の評価手法

初期状態で湖内に一様に溜められた拡散物質に対し移流拡散計算を行うことにより、海水交換の評価を行った。拡散物質の初期濃度が湖内で1.0、外海で0.0であり、拡散物質の減少域により外海水の流入域を、拡散物質の減少量により湖内水の流出量を評価することが可能である。

$$\frac{\partial SS}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uSS) - \frac{\partial}{\partial y}(vSS) - \frac{\partial}{\partial z}(wSS) \quad (5)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial SS}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial SS}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial SS}{\partial z}\right)$$

SS : 拡散物質濃度

## 4. 防氷堤を用いた海水交換活性化手法

著者らは過去の研究<sup>3)</sup>より、湖口からの流入流は直線的なジェット状の流れであり、湖中央部の養殖施設設置域には流入外海水が供給されにくいこと、また防氷堤の氷盤制御効果により第1湖部の堆積氷盤が流出時に湖外へ排出された場合に湖口間に流量の差が発生し、抵抗力が作用しなくなり流出量が回復する第1湖口方向へ、湖全体の水塊が移動することを明らかにしている。

本研究では、放物線状に配置されている防氷堤の一部のスパンを導流堤として用いること、および流出時に抵抗力を作用させ、流れを阻害し第1湖口からの流出量を減少させ、流入外海水を第2湖口方向、すなわち湖中央

方向へ移動させることの、2種類の流動制御による湖中央部における海水交換活性化の可能性に関し考察を行う。計算格子上的における防氷堤の位置を図-5に示す。防氷堤の位置は実線および破線により示されており、サロマ湖に設置されている13スパンのうち、図中左側から1番目から6番目のスパンを区間A、7番目から13番目のスパンを区間Bとする。また、防氷堤形状の効果をよりの確に再現させるため、図中灰色で示される領域は10m格子で分割し計算されている。

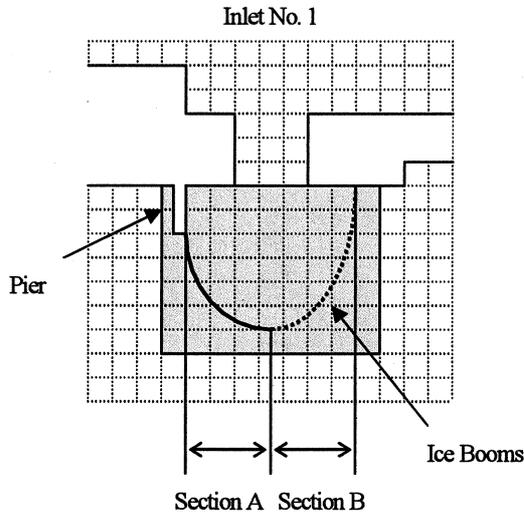


図-5 計算格子上的における防氷堤配置

流動解析における防氷堤各区間の処理を以下の表-2にまとめる。

表-2 各区間の処理	
区間A	導流堤として利用するため、格子間を不透過とする。
区間B	流出時にのみ流量を減少させるため抵抗力を作用させる。 抵抗係数は流れが垂直に作用する場合の養殖施設の抵抗係数を用いている。

## 5. 解析結果

防氷堤による外海水の導流を行わない状態と行う状態における流入流速最大時の湖内流動を、図-6および図-7に示す。図からは、導流を行う場合においては、湖口から外海水の流入流がより湖中央方向へ向かっていることが確認できる。

また、潮汐1周期後の拡散物質濃度の湖内分布を、図-8および図-9に示す。分布図より、流動制御を行わない状態では湖中央部に拡散物質濃度が1.0である水域、すなわち外海水が輸送されていない水域が残っていることが確認できる。また制御を行う状態では湖口付近における外海水流入域は多少減少しているが、湖中央部まで

外海水が輸送されており、湖中央部の海水交換を促進することが可能であることが確認できる。

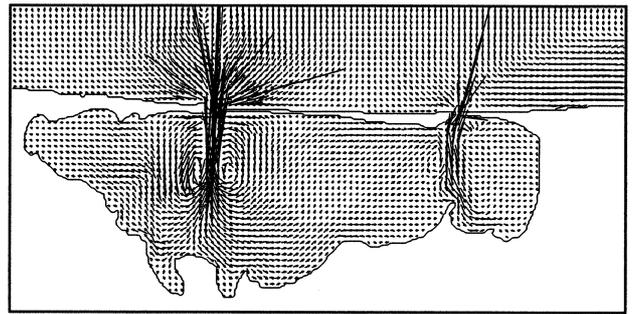


図-6 流入流速最大時の湖内流動\_流動制御無し

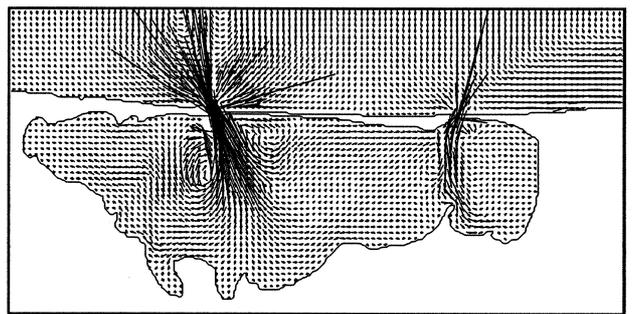


図-7 流入流速最大時の湖内流動\_流動制御有り



図-8 潮汐1周期後の拡散物質濃度分布\_流動制御無し

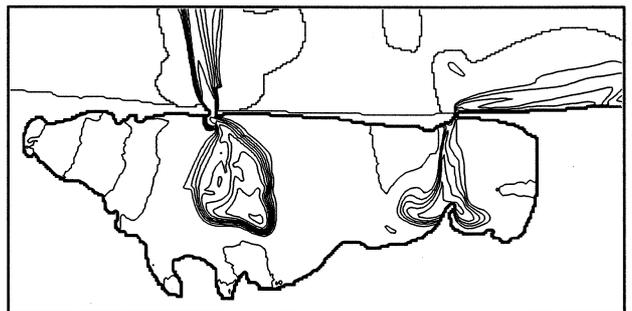


図-9 潮汐1周期後の拡散物質濃度分布\_流動制御有り

流入および流出流速最大時における、湖口部流速を図-10に示す。なお、流出流速が正、流入流速が負で示されている。導流を行う場合では、流出時に第1湖口の流速が減少、第2湖口の流速が増加していることが確認できる。

各湖口が海水交換において、流出入どちらの役割をより大きく担っているかを示す値として、1潮汐間の流入量と流出量をそれぞれ正の値として差をとり、各湖口の平均流量により除した値を図-11に示す。流動制御を行っていない状態においても、海水交換において第1湖口は流出、第2湖口は流出の役割を担っているが、流動制御を行う状態においてその役割の差がより大きいことが確認できる。

以上ことから、流動制御を行うことにより、第1湖口から流入し第2湖口へ流出する方向の水塊移動による流入外海水の湖中央部への輸送が促進されていることが推測される。

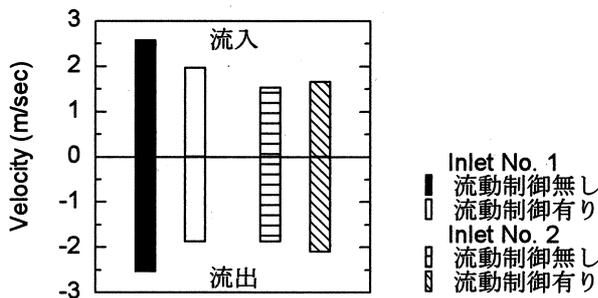
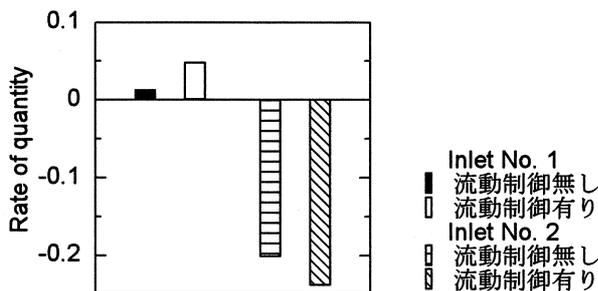


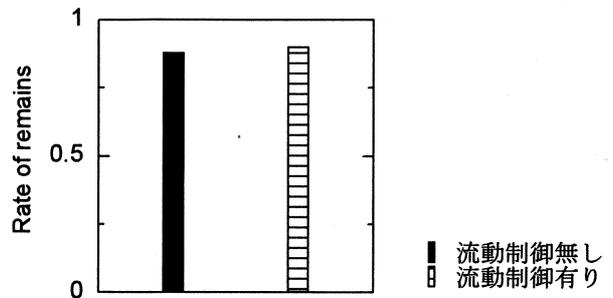
図-10 流速最大時の湖口部流速



$$\text{流出入の流量差} = \frac{(\text{流入量} - \text{流出量})}{(\text{平均流量})}$$

図-11 流出入量差

初期の拡散物質質量と潮汐1周期後の拡散物質質量の比、湖内残存率を図-12に示す。残存率は導流を行わない場合には0.87、行う場合には0.89であり、より多量の拡散物質が湖内に残存していることが確認できる。



$$\text{拡散物質湖内残存率} = \frac{(\text{湖内に残存している拡散物質質量})}{(\text{初期の拡散物質湖内量})}$$

図-12 拡散物質の湖内残存率

ここまででは、潮汐1周期間に行われる海水交換に対して考察を行ってきた。以降、同様の数値解析を10周期間行なった結果に対して考察を行う。

潮汐10周期後の拡散物質濃度の湖内分布を、図-13および図-14に示す。流動制御を行う場合と行わない場合ともに第1湖口において広い外海水の流入域が形成されているが、流動制御を行った場合には、より湖中央部に流入域が形成されていることが確認でき、また第1湖口から第2湖口へ向かう方向に等濃度線の間隔が広がっており、この方向の水塊移動による流入外海水の湖中央部への輸送が促進されていることが推測される。

第2湖口付近においては、拡散物質はほぼ同様の濃度分布を示していることが確認できる。

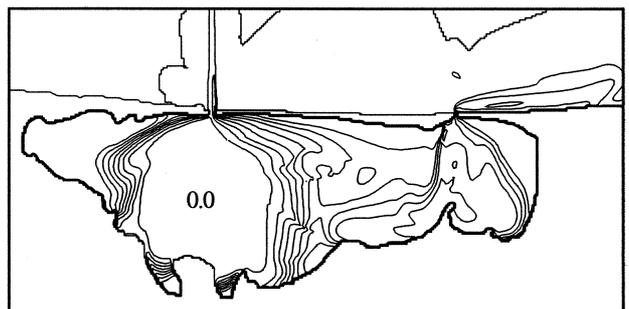


図-13 潮汐10周期後の拡散物質濃度分布\_流動制御無し

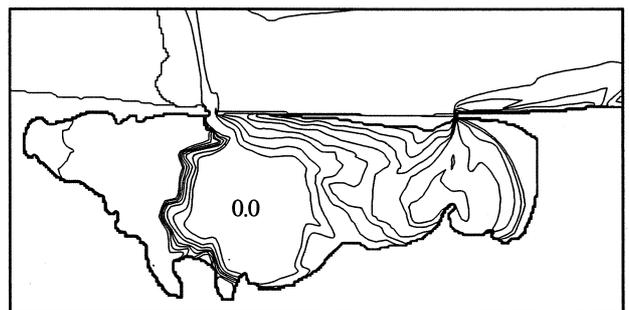


図-14 潮汐10周期後の拡散物質濃度分布\_流動制御有り

図-15に潮汐10周期間の拡散物質の湖内残存率を示す。なお、潮汐周期は24時間すなわち1日である。流動制御を行う状態においても、行わない状態と同様に時間の経過とともに拡散物質は減少しているが、その減少量は少なく、また徐々に減少量の差が増加していることが確認できる。

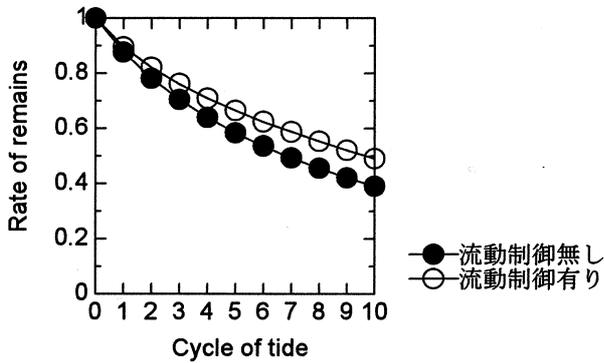


図-15 湖内残存率の10周期間の変化

以上のことから、防氷堤を用いることにより、湖中央部の海水交換を促進することは可能であるが、海水交換の総量としては減少するため、水質悪化時のみ期間を定め流動制御を行うなどの計画が必要であることが推測される。

## 6. 主要な結論

- 1) 現在、冬期間以外には撤去されている防氷堤を、流入時に導流堤として用いることにより湖中央部など任意の水域に外海水を供給することが可能である。
- 2) 対象とする半閉鎖性水域が複数の開口部を有する場合、防氷堤により開口部間に流出入量差を生じさせることにより、湖内に大規模な水塊異動を発生させることが可能である。
- 3) 防氷堤を用いることにより、湖全域の海水交換の量は若干ではあるが減少するため、水質悪化時のみ期間を定め使用するなどの計画が必要である。

## 参考文献

- 1) 藤原正幸, 明田定満, 武内智行, マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用, 水工研技報 水産土木 14, pp13-35, 1992
- 2) 蒔田俊輔, 佐伯浩, 半閉鎖性水域の海水交換に与える養殖施設の影響, 海洋開発委員会 土木学会, pp395-400, 2004
- 3) 蒔田俊輔, 古屋温美, 佐伯浩, サロマ湖の流況にあたる氷盤の影響, 海洋開発委員会 土木学会, pp. 743-748, 2002