

半閉鎖性水域の海水交換に与える 養殖施設の影響

INFLUENCE OF THE AQUACULTURE FACILITY TO THE WATER EXCHANGE AT THE SEMI-CLOSED WATER AREA

蒔田俊輔¹・佐伯浩²

Shunsuke MAKITA, Hiroshi SAEKI

¹学生会員 工博 北海道大学大学院研究生 工学研究科(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科(〒060-8628 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 the semi-closed water area connected to open sea by narrow mouth, the area is suitable for the aquaculture of scallops, oysters, and other marine products. However the water quality in semi-closed water area has the danger of getting worse quickly with change of surrounding environment. For the permanent use for the aquaculture, the maintenance of the water quality is needed. As one of the water quality preservation measures, promotion of the water exchange is mentioned. Although the aquaculture facility densely installed in the water area is one factor that worsens water exchange, the flow analysis and evaluation of the amount of water exchange in considering influence of the aquaculture facility has not been performed. In this paper, the influence of aquaculture facility to water exchange clarified by the flow analysis which set up the fluid resistance of the facility obtained by experiment is described.

Key Words: Semi-closed water area, Water exchange, Aquaculture facility, Fluid resistance, Flow analysis

1. 研究背景

寒冷地である北海道には、オホーツク海沿岸のサロマ湖・コムケ湖・能取湖, 太平洋沿岸の風連湖・温根沼・火散布沼・湧洞沼等, 30以上の半閉鎖性水域が存在しており, その多くで帆立貝・牡蠣貝等の養殖漁業が営まれている。半閉鎖性水域は外海に近い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, 狭い開口部により外海と通じているため, 水質環境を急速に悪化させる危険性をあわせもっている。恒久的な漁場としての利用のためにも水質環境に配慮した開発計画が必要とされている。半閉鎖性水域における水質保全策の一つとして海水交換を促進することが挙げられるが, 海水交換を悪化させる一要因となる養殖施設の影響を考慮した流動解析は行われておらず, 流動・海水交換にたいする養殖施設の影響は明らかとされていないのが現状である。本研究においては, 現在, 検討されている養殖量の増加にたいし, 養殖許容量および養殖施設配置等の計画手法の一つとして, 養殖施設の影響を考慮した流動解析による海水交換量の評価を行うこととする。

2. 養殖施設の流体抵抗

本研究においては, 一定の範囲に設置されている養殖施設を群として捉え, 養殖施設群に作用する流体力を計測し, 養殖施設群の抵抗力係数を算出することとする。

(1) 実験方法

牡蠣貝の養殖は幹綱より養殖籠を垂下させる延縄式垂下法により行われている。実験では幅1mの回流水路内に枠型の浮体を設置し, 浮体に張られた幹綱より養殖籠を垂下させ作用する流体力を測定した。養殖籠は現地において用いられている4種類の籠, 採苗器・ポケット・ザブトン・耳吊りのFroudeの相似則において1/30の模型を用いている。実験に用いた模型養殖籠の形状を図-1に示す。今回の実験では, 流れが幹綱に平行な場合と幹綱に垂直な場合にたいし, 幹綱・養殖籠の間隔, 幹綱の本数, 養殖籠の連数を変化させ流体力を計測している。実験条件を図-2および表-1にまとめる。

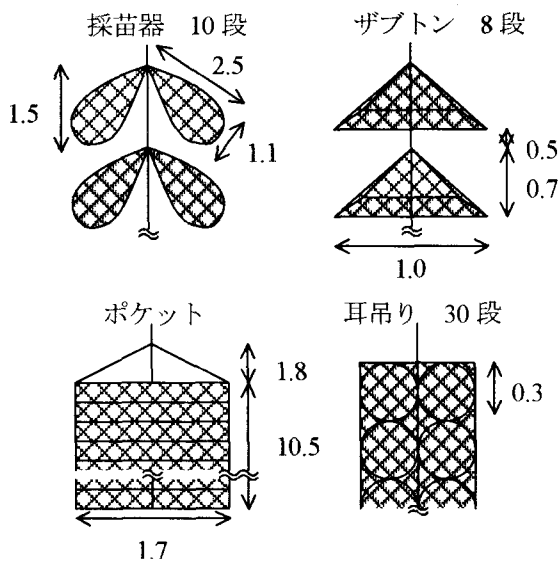


図-1 模型養殖籠 (図中単位: cm)

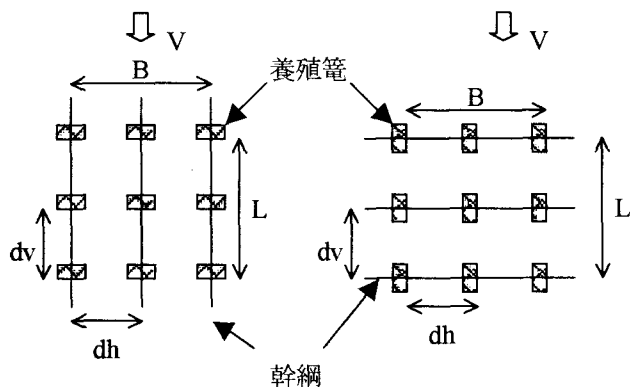


図-2 流れの作用方向および諸要素の表記

表-1 実験条件

Case_1: 幹綱が流れ方向にたいし平行			
dv (cm)	1・2・3・4	n	10・50・100
dh (cm)	10・20・30	N	1・2・3
Case_2: 幹綱が流れ方向にたいし垂直			
dv (cm)	30・40・50・60	N	1・2・3
dh (cm)	1・2・3・4	n	20

N : 幹綱の本数・ n : 垂下される養殖籠の連数

流速は流体力計測ごとに計測しており 3.03～46.2cm/sec の範囲であり、養殖籠の模型の幅を代表長とした Reynolds 数の範囲は、3,000～6,000 程度である。現地における Reynolds 数は、開口部付近の流速が早い水域では 10^6 程度の大きな値ではあるが、養殖施設が密に設置されている水域における流速は 0.01m/sec～0.03m/sec 程度の非常に遅い流れであり、Reynolds 数は 3,000～7,000 程度の実験とほぼ同等の範囲である。

(2) 実験結果および考察

養殖施設群に作用する流体力は、剪断抵抗力と形状抵抗力の和であり、全体を流速の 2 乗で除すると、以下の式(1)に示される、養殖施設の流れ方向長さを変数とする 1 次式の形式となり、剪断抵抗力と形状抵抗力の成分に分離することが可能である。

$$\frac{F_w}{V^2} = \alpha L + \beta$$

$$\alpha = \frac{F_{sw}}{V^2} = \frac{1}{2} \rho C_{sw} B \quad (1)$$

$$\beta = \frac{F_{dw}}{V^2} = \frac{1}{2} \rho C_{dw} DB$$

F_w : 流体力・ F_{sw} : 剪断抵抗力・ F_{dw} : 形状抵抗力・ ρ : 水の密度・ V : 流速・ C_{sw} : 剪断抵抗力係数・ C_{dw} : 形状抵抗力係数・ B : 養殖施設群の幅・ L : 養殖施設群の流れ方向長さ・ D : 養殖施設群の水深方向高さ・ α : 剪断抵抗力成分・ β : 形状抵抗力成分

剪断抵抗力は、養殖籠の形状を考慮する係数および垂下された全養殖籠の側面形状を表す標準偏差により、形状抵抗力は、形状を考慮する係数および全養殖籠の投影面積により整理することとする。(2a)・(2b)に示される数式により求められた抵抗力係数を表-2に示す。

$$\frac{F_{sw}}{V^2} = \alpha L = C'_s \sigma L \quad (2a)$$

$$\frac{F_{dw}}{V^2} = \beta = C'_D A \quad (2b)$$

C'_s : 形状に考慮する係数・ σ : 側面形状を表す標準偏差・ C'_D : 形状を考慮する係数・ A : 投影面積

表-2 養殖籠の形状を考慮する抵抗力係数

	採苗器	ポケット	ザブトン	耳吊り
C'_s	1.39×10^{-4}	2.21×10^{-4}	0.51×10^{-4}	0.42×10^{-4}
C'_D	0.58×10^{-4}	0.60×10^{-4}	0.59×10^{-4}	0.48×10^{-4}

a) 抵抗力係数にたいする養殖籠の間隔の影響

採苗器・ポケットにおいて、養殖籠の間隔が 3cm 以下である状態では、隣接する養殖籠の影響により以下の式(3a)・(3b)に従い係数が増加する。

$$\text{採苗器 } C'_D = 0.58 \times 10^{-4} \times 1.0198(3-d) \quad (3a)$$

$$\text{ポケット } C'_D = 0.60 \times 10^{-4} \times 1.0349(3-d) \quad (3b)$$

d : 養殖籠の間隔 (cm)

b) 抵抗係数に対する幹網間隔の影響

流れが幹網にたいし平行に作用する状態・垂直に作用する状態ともに、幹網の間隔が養殖籠の幅の 30 倍以上に増加すると、隣接する幹網に垂下された養殖籠の影響を受けず、養殖施設群に作用する全流体力は、1 本の幹網に垂下されている養殖籠に作用する流体力の幹網の本数倍となることが確認された。なお、現地における幹網の間隔は養殖籠の幅の 60 倍程度以上であり、隣接する幹網に垂下された養殖籠の影響は無いものと思われる。

(3) 養殖施設群の抵抗力係数

養殖施設群に作用する流体力は以下の式(4)により算出され、流動解析において抵抗力係数は、剪断抵抗力係数の形式で式(5)により算出し設定することとする。

$$\frac{F_w}{V^2} = (C'_s \sigma L + C'_D A) N \quad (4)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C L B V^2 \quad (5)$$

$$C = 2(C'_s \sigma L + C'_D A) \frac{N}{LB}$$

C : 養殖施設群の抵抗力係数

オホーツク沿岸の養殖漁業では、6 月中旬～9 月中旬の夏期 3 ヶ月間は採苗器とポケットが 2:1 の割合で垂下され、9 月中旬～翌 6 月中旬までの冬期 9 ヶ月間はザブトンと耳吊りが 1:1 の割合で垂下されている。現地において養殖施設は、養殖籠間隔約 0.5m・幹網間隔 30～50m で設置されている。数値解析において 1 格子 (100m×100m) 内に設置されている全養殖籠を養殖施設群の 1 単位とし、1 本の幹網より垂下されている養殖籠の連数を 200 連、幹網の本数を 3 本算出された抵抗力係数を表 - 3 に示す。

表 - 3 養殖施設群の抵抗力係数

	平行	垂直
夏期 3 ヶ月間	6.0×10^{-3}	1.6×10^{-1}
冬期 9 ヶ月間	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-2}

3. 流動解析

現在、養殖許容限界は主に養殖貝と同一食地位に存在する植物プランクトンおよび濾過食者との共存下における懸濁有機物質の収支関係により定められている。

しかし、懸濁有機物質等の負荷物質は比重が非常に小さいため、水域内のごく僅かな流動によっても輸送され、流動が極端に弱くなる水域、すなわち養殖施設が密に設置されている水域に蓄積されることとなり、同一食地位内での収支関係により許容限界を定める手法は不十分である。サロマ湖では湖内ほぼ全域で養殖漁業が営まれ安定した生産をあげているが、同時に多数の斃死被害が発生している。コムケ湖・能取湖等では近年の値下がりを受け増殖が計画されており、負荷物質の輸送過程を含めた養殖計画が必要である。以降、実験によって得られた抵抗力係数を用い、養殖施設の配置・設置方向を考慮した流動解析を行うことにより、養殖施設の流動に与える影響を明らかとし、水質保全策の一つとして、養殖施設の配置の変更による海水交換の活性化にたいして考察を行うこととする。

(1) 解析手法

数理モデルは、水域を水平方向には格子を用い、鉛直方向には層を用いて分解する、マルチレベルモデルを用いている。表層のみ層厚変化を考慮し、その他の層にたいしては鉛直方向流速成分として計算されるため、湧昇流等が重要である半閉鎖性水域の流動解析には適しているといえる。基礎方程式として連続方程式を式(6)に運動方程式を式(7a)・(7b)に示す。

$$\text{div} \mathbf{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(M_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_k v_k) \quad (7a)$$

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

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(N_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k v_k) \quad (7b)$$

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

M_k, N_k : x 方向・y 方向の流速を層厚で積分した流量
 N_x, N_y : x 方向・y 方向の渦動粘性係数

養殖施設の影響は、式(7a)・(7b)内の下線部に示される項に幹綱の方向を考慮し式(8a)・(8b)で算出される剪断抵抗力とし計算されている。なお、養殖施設の水深方向高さは約10mであるため、各層厚5mの第1層および第2層にのみ抵抗力を設定している。幹綱の方向はx方向・y方向を基準に設定し、流れが作用する角度の影響は計算上で処理することとする。

$$\tau_{fx} = \frac{1}{2} \rho C u \sqrt{u^2 + v^2} \tag{8a}$$

$$\tau_{fy} = \frac{1}{2} \rho C v \sqrt{u^2 + v^2} \tag{8b}$$

計算条件として、解析に用いた諸係数を以下の表-4に示す。なお、係数の決定法は参考文献の1)に詳しく記されているため、本論分では省略する。

表-4 計算条件

海面摩擦係数	1.3×10^{-3}
底面摩擦係数	2.6×10^{-3}
内部摩擦係数	0.5×10^{-3}
渦動粘性係数	4.64

解析対象は、サロマ湖であり、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。サロマ湖は天然の第1湖口（幅約300m・平均水深10m）と人工の第2湖口（幅50m・水深5m）の2つの湖口により外海と通じている。なお、第2湖口の幅は格子間隔を補正することにより考慮している。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。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いる。

(2) 解析の信頼性

解析結果において流入時に第2湖口部より300mの位置に渦状の流れが現れている。現地観測では200～300mの位置で剥離の渦が発生することが報告されており、渦動拡散係数の設定が妥当であることが確認できる。

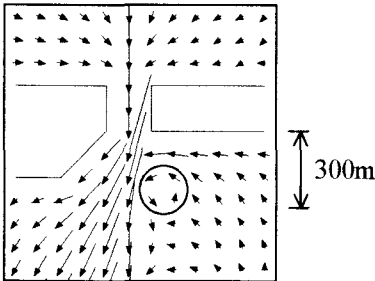


図-3 第2湖口付近の剥離渦

また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を確認している。

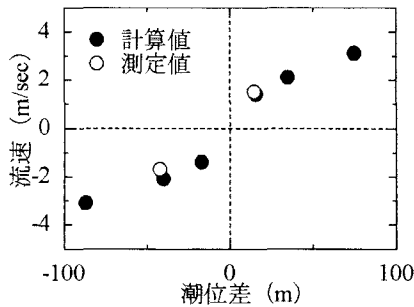


図-4 潮位差と湖口部流速の関係

(3) 流動および海水交換にたいする養殖施設の影響

流動にたいする養殖施設の影響を明らかにするため、養殖施設が設置されていない状態での流動解析結果と現在の設置状況をもとに抵抗力を設定した解析結果を比較する。解析領域における養殖施設の設置状況を図-5に示す。図中の線は幹綱の設置方向を示している。今回の解析においては、より長期間である、冬期9ヶ月を想定し抵抗係数を設定している。図-6・7に、流入流速が最大となる時刻の殖施設の無い状態および抵抗係数を設定した状態での流動解析結果を示す。図-8に、流出流速が最大となる時刻の流動解析結果を示す。なお、湖口付近以外の水域の流動が僅かであり養殖施設の有無による差が顕著に現れていないため、養殖施設の有る状態の流動のみ示すこととする。図中の白抜き矢印は特徴的な流動を模式的に表したものである。

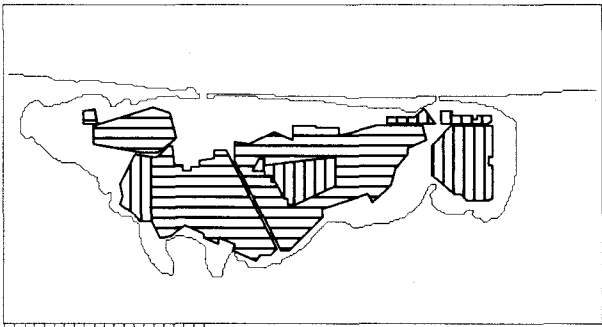


図-5 現状の養殖施設設置状況

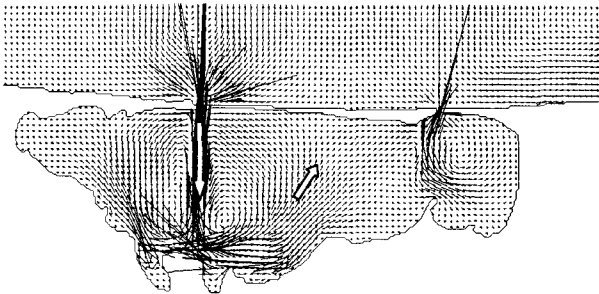


図-6 養殖施設の無い状態における湖内流動

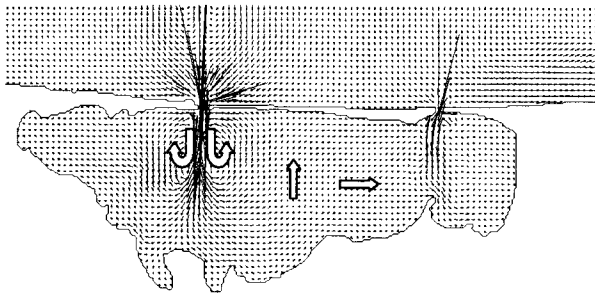


図-7 養殖施設の有る状態における湖内流動

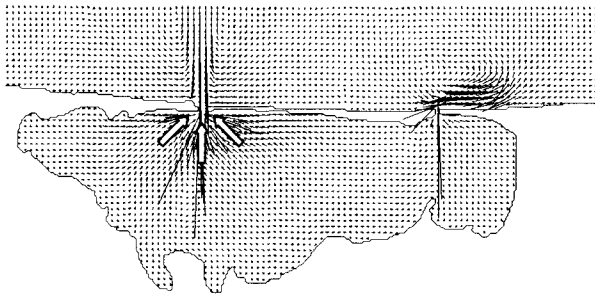


図-8 流出時の湖内流動

流入時、両湖口からの流入はジェット状の流で湖内へ流入しており、養殖施設の無い状態では湖奥の岸へ到達し拡散しているが、養殖施設の有る状態では抵抗力の影響により設置位置で拡散し、外海水が湖奥まで達していない。また、流動の緩やかな湖中央の水域において、養殖施設の無い状態では拡散後の流れに従い斜め方向の流れが卓越しているが、養殖施設の有る状態では養殖施設の設置方向に沿った方向の流れが卓越している。すなわち、養殖施設は流れの速い湖口付近では大きな抵抗力を作用させ湖奥までの外海水の流入を阻害し、流れの遅い湖中央付近では設置方向により流れの方向を変化させることが明らかとなった。流出時、湖口方向へ集まるポテンシャル状の流動が卓越している。流入時にはジェット状の流れ、流出時にはポテンシャル状の流れが発生することは、半閉鎖性水域における海水交換の特徴である。また、初期状態で湖内に一様に溜められた拡散物質にたいし移流拡散計算を行うことにより、拡散物質の減少域により外海水の流入領域を、拡散物質の減少量により湖内水の流出量を評価し海水交換に関して考察を行った。図-9に拡散物質湖内残留率および湖口を介する流量を示す。

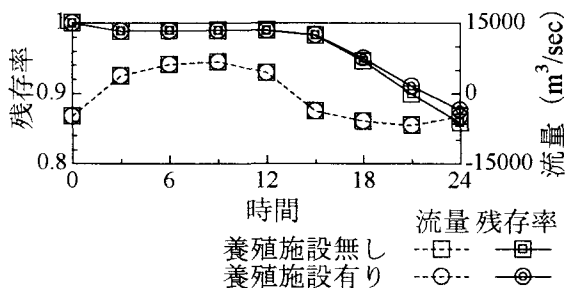


図-9 拡散物質湖内残留率および湖口部流量

図-10・11に1周期後の拡散物質の湖内分布を示す。

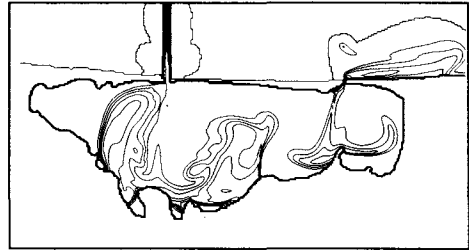


図-10 養殖施設の無い状態における拡散物質濃度分布



図-11 養殖施設の有る状態における拡散物質濃度分布

図-9では、湖口を介する流量に養殖施設の有無による有意な差異は現れておらず、養殖施設は、湖内流動には大きな影響をおよぼしているが、湖口を介する流出入量にはごく僅かな影響しかおよぼさないことが明らかとなった。また流出時、拡散物質は養殖施設の有る状態で減少量が少なく、総流出量は同等であるが、より多量の流入外海水が再流出しているといえる。図-10・11では、養殖施設の無い状態では流入した外海水が湖奥に達し湖内に広く輸送されているが、養殖施設の有る状態では湖口付近に狭く停滞し、湖中央付近の養殖漁業が行われている水域に輸送されていないことが確認できる。以上のことより、養殖施設は流入外海水の湖内広域への輸送を妨げるだけでなく、湖口付近に停滞させることにより再流出量を増加させ海水交換の効率を悪化させていることが明らかとなった。

4. 海水交換の活性化

現状の養殖施設配置は、外海水が供給されやすい湖口付近から養殖量の増加とともに湖全域に拡大してきた、水質環境の考慮されていない配置である。養殖施設の配置を変更することによる海水交換の活性化の可能性にたいし考察を行う。今回の考察において設定された養殖施設配置を図-12に示す。養殖施設は以下の3つの条件により変更している。1)湖口からの外海水の流入を妨げないよう、幅 400m の水路を設置する。2)湖奥に達した外海水の拡散を妨げないよう、奥側の養殖施設を岸から離す。3)養殖量を確保するため、設置面積は減少させない。

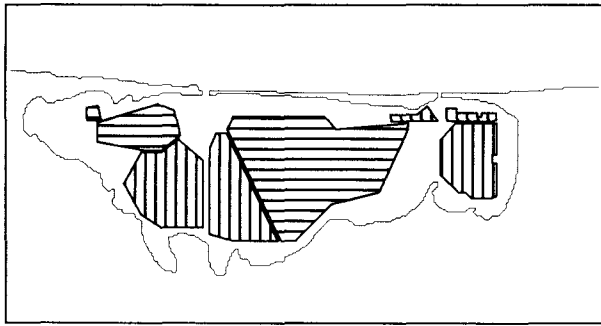


図-12 変更後の養殖施設配置

図-13 に流入流速が最大となる時刻の流動解析結果を示す。なお、湖口付近以外の水域の流動が僅かであり養殖施設配置の変更による差が顕著に現れていないため、養殖施設の有る状態の流動のみ示すこととする。また、図-14 に1周期後の拡散物質の湖内分布を示す。

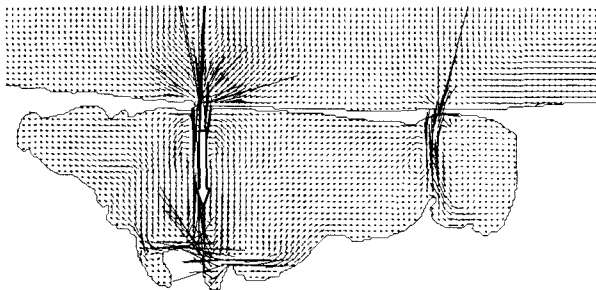


図-13 養殖施設配置変更後の湖内流動

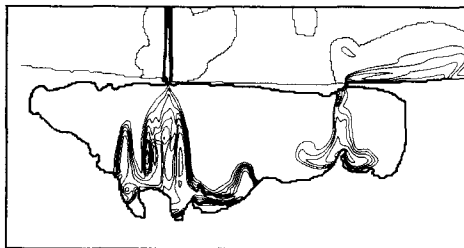


図-14 養殖施設配置変更後の拡散物質濃度分布

養殖施設の配置変更後、両湖口からのジェット状の流で湖内へ流入しており、湖奥へ達し拡散していることが確認でき、外海水の流入域は、変更前の状態と比較し湖中央方向へ拡大しており、湖口付近に停滞する外海水量が減少していることが確認できる。今回の解析は1周期間ではあるが、流出しにくい中央に輸送されるため以降の湖内流動により外海水が湖内全域に輸送されることが期待できる。図-15 に拡散物質の流出量と最大流出水量を示す。養殖施設配置の変更後、湖内水の流出量は養殖施設の無い状態の流出量近くまで増加しており、潮汐1周期間の海水交換量が回復していることが示されている。

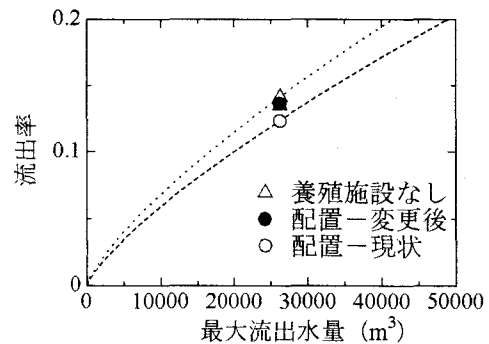


図-15 拡散物質の流出率と最大流出水量

5. 結論

今回の研究において、養殖施設は湖内流動にたいし大きな影響を及ぼしており、その配置により海水交換量は増減することを明らかとした。水質環境は海水交換のみで評価できるものではなく、今回提示した養殖施設配置が最適なものであるとはいえないが、養殖施設の影響を考慮した流動解析は、養殖許容限界の決定に活用でき、半閉鎖性水域における水質環境の維持改善手法の一つとして位置付けられるものである。主要な結論を以下にまとめる。

- 1) 流動解析において養殖施設の影響を的確に設定するため、実験により養殖施設の抵抗係数を求めた。
- 2) 流動解析により、養殖施設の配置・設置方向の流動に及ぼす影響を明らかとした。
- 3) 拡散物質の移流拡散計算により、養殖施設が海水交換を悪化させていることを明らかとした。また、流入外海水が湖口付近に停滞することにより、流出時に再流出することが海水交換の悪化の原因であることを明らかとした。
- 4) 養殖施設を考慮した流動解析は、養殖許容量・養殖施設の配置の決定に利用することが可能であることを明らかとした。
- 5) サロマ湖を例とし解析を行い、養殖施設の配置を変更することで、海水交換を活性化させることが可能であることを明らかとした。

参考文献

- 1) 蒔田俊輔, 佐伯浩, 古屋温美, サロマ湖の流況にあたる氷盤の影響, 海洋開発論文集 第18巻, pp743-pp748, 2002
- 2) 平成14年度事業実績概要報告書 サロマ湖養殖漁業協同組合
- 3) 武内智行, 坂田年隆, 早瀬吉雄, 寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究, 平成2年, 北海道開発土木研究所, 開発土木研究所報告 第92号