

自立可動式マイクロバブル発生装置によるサロマ湖の 溶存酸素量の改善に関する研究 第2報—マイクロバブルによる溶存酸素量の改善

An improvement of the small amount of dissolved oxygen in Lake Saroma
using energy saving and movable apparatus for micro-bubble generation
—An improvement of the small amount of dissolved oxygen with micro-bubble—

(株)森機械製作所 森 光典(Mitunori Mori)
(株)榑崎製作所 清野 勝博(Katuhiko Seino)
(株)榑崎製作所 陳 二郎(Jiro Chin)
北見工業大学 フェロー 佐渡 公明(Kimiteru Sado)
北見工業大学 正員 中尾 隆志(Takashi Nakao)
北見工業大学 正員 吉川 泰弘(Yasuhiro Yoshikawa)
北見工業大学 ○学生員 高橋 慶多(Keita Takahashi)

1. はじめに

サロマ湖は北海道東部に位置しオホーツク海に面する2つの湖口を持つ面積150km²の日本で3番目に大きな湖である。カキ、ホタテなどの水産養殖も盛んな漁場として有名である。しかし、1978年の第2湖口開削により水質改善されたサロマ湖であるが、近年また水質は悪化してきている。サロマ湖底質中の全有機物含有率は年々増加傾向にあり、COD、全窒素、全リンについて環境基準を超える年がしばしばある¹⁾。このような富栄養化により溶存酸素量DOは湖底付近では低くなり8、9月の夏季においては溶存酸素量飽和度が20%という貧酸素水域を生じることあり漁業に大きな被害を与えている²⁾。

本研究では、養殖漁場においてこのような貧酸素水域が発生した時、緊急避難的な処置としてマイクロバブルを曝気することでDOの改善ができるか否かを調べ、また同時にマイクロバブルエアレーションの基本的特性を求めめるため2回の室内実験と4回の現地観測を行った。

2. 観測方法

2.1 マイクロバブル発生装置と観測機器

マイクロバブルの発生原理は次の通りである。

高压ポンプで発生した数気圧～数百気圧の高压水は、図-1に示すように、水噴射ノズルで細くまっすぐ整えられ秒速数百メートルで空気室に噴射される。噴射された高压、高速水は直進し噴射口板の穴(表-1のノズル径)より空気を伴い水中に放出される。放出された高速水と空気は、水との衝突エネルギーにより空気が細かく分断されマイクロバブルが発生する。空気室は負圧になるため空気導管より空気を吸い込む。図-1のような高压水を用いた微細気泡発

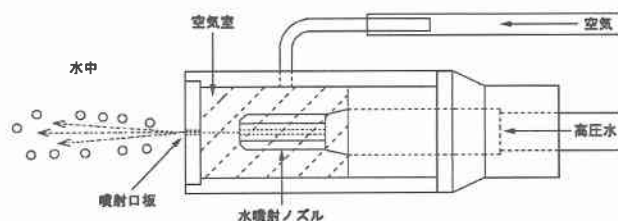


図-1 高压微細発生装置

生装置を以後高压ノズルと呼ぶ。一方、塩ビ管に噴射口板を取り付け、空気および水中ポンプによる低压水を送り、微細気泡を発生させる装置を低压ノズルと呼ぶ。測定に使用した計測器を測定項目ごとに表-2に示す。

表-1 実験条件

(a)単一塩水層、(b)密度成層、(c)現地観測

曝気方法	ノズル径 (mm)	空気量 (L/min)	水量 (L/min)	ポンプ
低压ノズル	(a) 15×2本	10～40	100	250W水中ポンプ
	(b) 15×1本	2	20	80W循環ポンプ
	(c) 15×2本	10～40	100	250W水中ポンプ
高压ノズル	(a)	10～20		
	(b) 1.2	2	4.5	250W高压ポンプ
	(c)	10～20		
散気管	(a) 310×28φ 孔サイズ20μm	10～20	-	-

表-2 計測器一覧

測定項目	計測器
溶存酸素量	YSI model 58*, YSI model 85*
塩分濃度	YSI model 85*, クロロテック**, 水質チェッカーWQC-22/
水温	T熱電対***, YSI model 85*, クロロテック ACL1180-DK**
気温	T熱電対***
相対湿度	アスマン通風乾湿計***
気圧	アネロイド型気圧計***
三次元流速	ADCP 1200**

*:室内実験・現地観測共通, **:現地観測のみ, ***:室内実験のみ

2.2 室内実験

2.2.1 単一塩水層の曝気実験

一辺1m、高さ2mの角柱水槽(図-2)を使用しサロマ湖から汲んだ海水(塩分濃度31.8～32.6‰)を水深1.7mまで入れ1.7m³とした。無酸素状態からの曝気効果を見るため脱酸素剤として亜硫酸ナトリウム190g、触媒に塩化コバルト12g投入し循環ポンプで攪拌させ、10分経過し十分にDO値が下がった後曝気した。曝気中も常時水中ポンプにより均一攪拌した。DOの測定は、脱酸素剤投入からYSI model 58を用いてデータロガーにより、1秒毎に行った。DO・水温センサーの位置は水深0.7mに固定した。別のデータロガーで水温、気温、湿度、気圧を1分毎に記録した。低压・高压ノズル、散気管は水槽底面に置いた。表-1に実験

条件を示す。送気は全て 100V,750W コンプレッサーを用いて行った。また、低圧・高圧ノズルと従来の曝気方法とを比較するために散気管による曝気実験も行った。

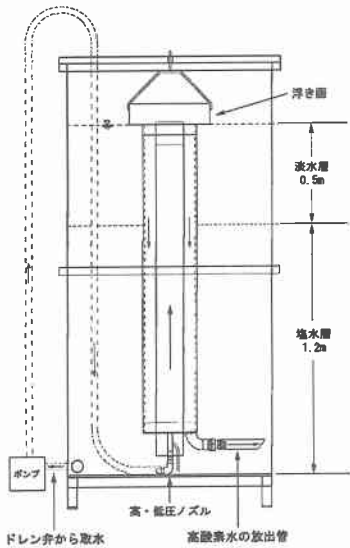


図-2 密度成層の曝気装置

2.2.2 密度成層の塩水層曝気実験

最初に亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトで脱気した後、食紅で赤く着色した水温約 4℃のサロマ湖の海水を準備した。次に図-2 の角柱水槽に水温約 18℃の水道水を水深 0.5m まで溜め、下層から徐々に上記海水を注入して、淡水層と塩水層の密度成層を作った。水槽中心に据え付けた 2 重管の内管の下から高・低圧ノズルで気泡・水を送り、エアリフトを作り水面で大きな気泡を大気に解放し、外管出口に接続する放出管から高酸素水を塩水層に放出した。

予備実験より浮き函から海水が溢れず、また気泡が塩水層に混入しない状態で実験を行うことができる空気量と水量を決めた。その結果の空気量、水量を表-1 に示す。エアリフト上昇水量は実測により低圧ノズルで 19.6L/min、高圧ノズルで 14.8L/min であった。塩水層の DO センサーの位置は、塩水層の平均 DO が測定できる底面上の位置に固定した。淡水層については、塩淡水境界層から海水が淡水層に拡散しているかを調べるために、塩淡水境界層から 10cm 上に塩分計を固定した。単一塩水層の実験結果と比較するために密度成層の塩水層と同じ水深 1.2m を持ち 2 重管のない単一塩水層において、密度成層と同じ空気量、水量で実験を行った。

2.3 サロマ湖現地観測

第 1 回目(2002/6/28)と第 2 回目(2002/7/31)の現地曝気実験は、太陽光・風力発電装置を載せた筏(N44° 07.493',E143° 47.987')を用いてその直下水深 9～13m で行った。しかし、当該地点は湖内の水通しの良い航路にあたり、流速・流向が複雑だったこと、ノズルと DO センサーとの距離が長かったこと等により、DO 上昇は確認されなかった。そこで第 3 回目(2002/8/29)と第 4 回目(2002/9/27)は、貧酸素で流速が遅い養殖棚内(N44° 07.170',E143° 49.513')水深 15.3m で行った。気泡が DO センサーに確実に当たるようにするため高圧・低圧ノズルと DO センサー

は鉄棒に取り付け、その距離を 0.5,1.0,1.5m と変えながら測定した。その他塩分濃度、水温、三次元流速を測定した。

3. 観測結果

3.1 総括酸素移動容量係数と酸素移動効率

単一塩水層曝気実験での低圧・高圧ノズル、散気管に対する DO の変化を図-3、4 に示す。また図-5 は空気量 10L/min の場合の比較を表わしており、高圧ノズルがやや優れていることがわかる。

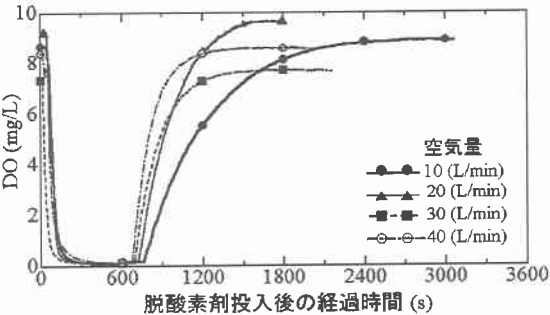


図-3 DO 濃度の時間変化(低圧ノズル)

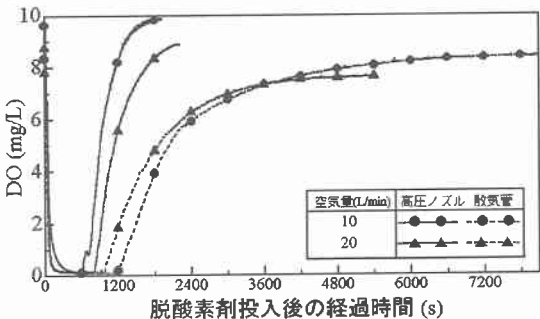


図-4 DO 濃度の時間変化(高圧ノズル、散気管)

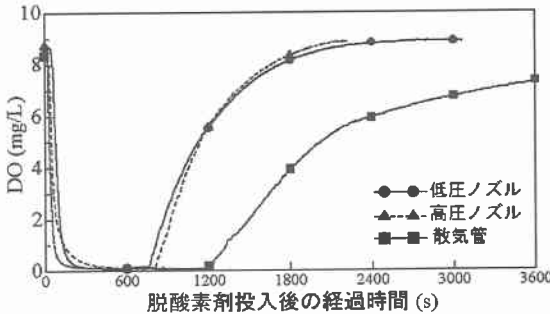


図-5 DO 濃度の時間変化(空気量 10L/min)

各曝気方法の性能比較、空気量の影響を知るために総括酸素移動容量係数 K_La と酸素移動効率 E_A を用いる。曝気中の時間 t における溶存酸素量 $C(\text{mg/L})$ に関する微分方程式を $t=t_0 \sim t$ で $K_La=$ 一定、初期条件($t=t_0$ で $C=C_0$)のもとに解くと、次の K_La を求める式(1)が得られる。 C_s は水温、塩分濃度で決まる飽和溶存酸素量である。

$$K_La = \frac{-\log_e \left(\frac{C_s - C}{C_s - C_0} \right)}{t - t_0} \tag{1}$$

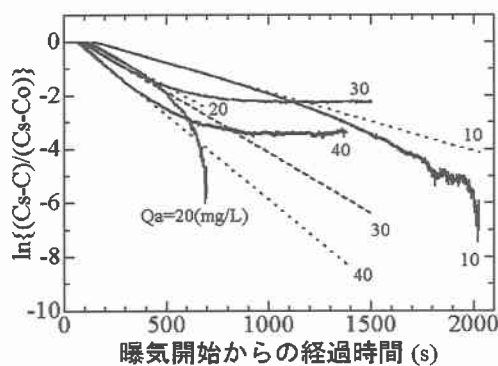


図-6 $\ln\{(C_s-C)/(C_s-C_0)\}$ の時間変化 (低圧ノズル)

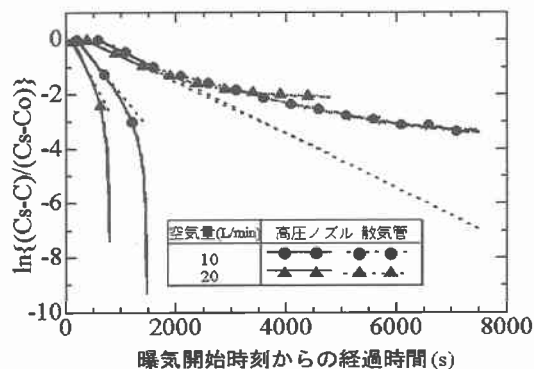


図-7 $\ln\{(C_s-C)/(C_s-C_0)\}$ の時間変化 (高圧ノズル, 散気管)

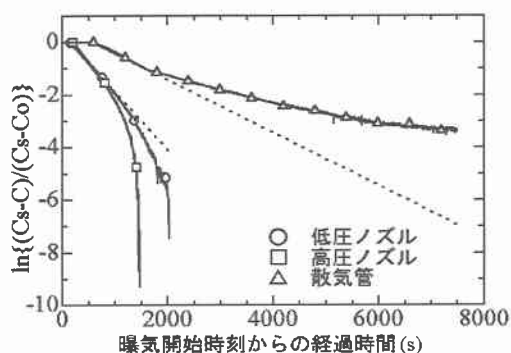


図-8 $\ln\{(C_s-C)/(C_s-C_0)\}$ の時間変化 (空気量 10L/min)

すなわち、図-6, 7, 8 に示す $\ln\{(C_s-C)/(C_s-C_0)\} \sim t$ のグラフにおける直線区間の傾きが $K_L a$ である。表-3 は、直線の始点を DO 上昇開始時刻とし、終点を任意の DO 到達時刻とした時の $K_L a$, E_A の変化を示す。ここで、DO 到達時刻とは 1 秒毎に記録された DO が指定された値を初めて超えたときの時刻である。DO 到達時刻の取り方により $K_L a$, E_A が大きく変化することがわかる。

曝気槽に供給された酸素に対して、水中に溶けた酸素の割合である E_A は以下のように表わされる。

$$E_A = \frac{K_L a C_s V}{Q_a \rho_a \chi_a} \quad \cdots (2)$$

ここに、 V : 試水の体積、 Q_a : 空気量、 ρ_a : 空気密度、 χ_a : 空気中の酸素重量含有率 (0.232 kg O₂/kg Air)。空気密度は、気温、相対湿度、気圧の実測値から計算で求めた。

式(2)の E_A は、DO がゼロで酸素溶解速度が最大のときの $K_L a$ を用いて、溶存酸素量がゼロから飽和に達するまでの間の酸素移動効率を表わしており、高めに見積もられているが、これが曝気槽の性能比較に簡便的に使用されている³⁾。すなわち図-3, 4, 5 の DO 上昇開始時の初期勾配から $K_L a$ を求めるべきである(方法 1)。一方、式(1)の $K_L a$ は微分方程式の係数であり、曝気開始から終了までの全実験時間の平均値が望ましい(方法 2)。表-3 から案 1 と案 2 では $K_L a$ が大きく異なる。しかし、DO が 5 mg/L 付近に到達した時刻の $K_L a$ は一定値に収束し、その後大きく変化している。そこで、本研究では $\ln\{(C_s-C)/(C_s-C_0)\} \sim t$ のグラフ上で、DO 上昇開始時刻と DO が 5 mg/L 到達時刻を結ぶ直線の傾きから $K_L a$ を求めることにする。

表-3 傾きを求める 2 点の取り方による $K_L a$, E_A への影響 (始まりの点は DO 上昇開始時刻)

(a) 低圧ノズル 10L/min ($K_L a$ が時間と共に増加する場合の例)				(b) 低圧ノズル 30L/min ($K_L a$ が時間と共に減少する場合の例)			
DO (mg/L)	DO 到達 時刻 (s)	$K_L a$ (1/h)	E_A (%)	DO (mg/L)	DO 到達 時刻 (s)	$K_L a$ (1/h)	E_A (%)
1.00	209	6.6	58.4	1.00	115	15.8	44.9
2.00	268	7.8	68.8	2.00	143	17.3	49.0
3.00	337	7.9	69.6	3.00	178	16.9	47.8
4.00	421	7.9	69.9	4.00	226	16.4	46.4
5.00	525	8.0	70.7	5.00	280	16.4	46.5
6.00	665	7.9	70.0	6.00	360	15.9	45.1
7.00	845	7.9	70.2	7.00	511	14.5	41.0
8.00	1137	8.3	73.5	8.00	600	13.5	38.1
8.50	1400	8.8	77.8	8.50	800	11.0	31.1
8.70	1600	9.3	82.3	8.70	1000	8.7	24.8
8.83	1800	9.9	87.6	8.83	1200	6.9	19.5
8.85	2000	10.5	92.9	8.85	1400	5.4	15.5

次に、曝気開始 t_0 (DO 濃度 C_0) から終了 t_n (DO 濃度 C_n) までの時間に実際に水中に溶解した酸素の割合 E_A' を次式で算出する。

$$E_A' = \frac{(C_n - C_0)V}{(t_n - t_0)Q_a \rho_a \chi_a} \quad \cdots (3)$$

表-4 $K_L a$, E_A , E_A' の計算結果

曝気方法	空気量 (L/min)	水温(曝気開始 - 終了) (°C)	C_0 (mg/L)	C_n (mg/L)	C_s (mg/L)	$t_n - t_0$ (s)	$K_L a$ (1/h)	E_A (%)	E_A' (%)
低圧ノズル	10	10.1-10.5	0.080	8.906	8.885	2220	8.0	70.7	14.2
	20	10.0-10.1	0.102	9.606	8.910	960	14.7	65.0	17.7
	30	11.5-11.6	0.094	7.678	8.595	1500	16.4	46.5	6.0
	40	10.1-10.2	0.108	8.574	8.872	1380	23.2	51.2	5.5
高圧ノズル	10	10.5-10.6	0.122	8.836	8.799	1500	9.1	78.6	20.6
	20	8.30-8.90	0.124	9.820	9.192	1200	13.3	60.1	14.3
散気管	10	10.8-11.4	0.106	8.388	8.686	7500	3.7	32.8	3.9
	20	11.0-11.3	0.096	7.624	8.671	4800	3.5	14.7	2.8

表-4 から、空気量と共に $K_L a$ は増加し、 E_A は減少傾向にある。空気量が増えると、大きな気泡径の割合が多くなると考えられるが、しかし気液接触面積は増えて $K_L a$ は増加し、水面から大気へ逃げる気泡が多くなるので E_A は減少すると思われる。高圧ノズルで空気量が 10 L/min の場合に、最大の酸素移動効率 78.6% を示している。低圧・高圧ノズルの $K_L a$, E_A は散気管より明らかに大きく従来の曝気方式に比べ優れていると言える。同じ空気量では、低圧ノズルと高圧ノズルの $K_L a$, E_A には差があるとは言えない。一般に簡便的に使用されている酸素移動効率 E_A は、表-4 より実際に曝気槽の中で生じている酸素移動効率 E_A' と同じ傾

向であるが、 E_A' より4～9倍大きいことがわかる。

3.2 密度成層の塩水槽曝気実験

密度成層曝気実験で得られたDO濃度の時間変化を図-9に示す。密度成層の場合の酸素供給は主としてエアリフトを介しているため、単一塩水層に比べDO上昇速度が遅い。塩水層へのマイクロバブルの混入は、高圧ノズルでDO5.7mg/L、低圧ノズルで7.2mg/Lに到達したときに目視で確認された。塩淡水境界層は実験終了後まで乱れることなく、また淡水層の塩分、DOは実験前と同じであり、密度成層を破壊することはなかった。

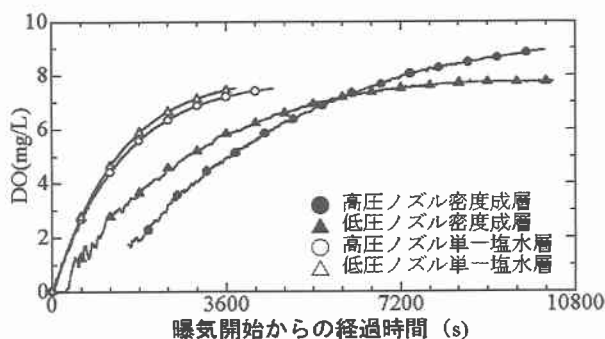


図-9 密度成層と単一塩水層のDO時間変化

3.3 サロマ湖の現地観測

図-10は、サロマ湖における4回の観測の中で底泥付近のDO飽和度が20%と最も小さかったときの養殖棚の鉛直分布である。図-11, 12は第4回目の観測における低圧・高圧ノズルによるDO時間変化の一例である。曝気開始とともにマイクロバブルはDOセンサーに確実に到達するので、DOは低圧ノズルで最大1.7～2.2mg/L、高圧ノズルで最大5.2mg/L上昇し、曝気終了とともに気泡の拡散範囲がDOセンサーから遠ざかるのでDOが急激に元の値に低下している。以上から養殖漁場の貧酸素域において本システムを用いることにより、マイクロバブル到達域のDO改善が期待できると思われる。DOのピーク付近に見られる凹凸は、気泡に対する流速、流向による気泡の流れが変わるためである。

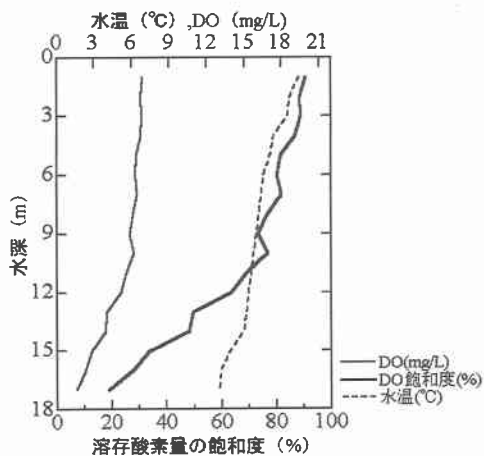


図-10 サロマ湖の水温、DO濃度、DO飽和度の鉛直分布
(2002年7月31日14:56～15:38)

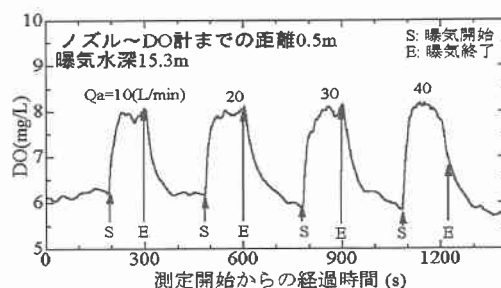


図-11 サロマ湖における低圧ノズルによるDO濃度時間変化の一例(2002年9月27日13:08～13:28)

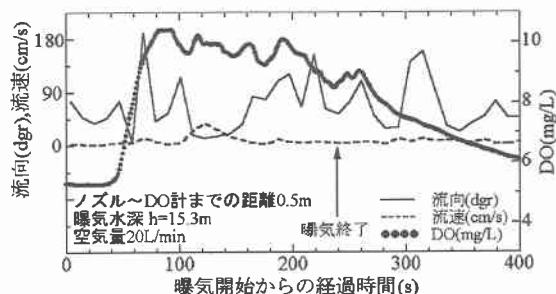


図-12 サロマ湖における高圧ノズルによるDO濃度時間変化の一例(2002年9月27日14:33～14:40)

4. 結論

- 1) $\ln\{(C_s - C)/(C_s - C_0)\} \sim t$ のグラフ上で、直線の傾きを求める2点の取り方により $K_L a$ は大きく変化する。本研究では、初期勾配と全実験時間の平均勾配の両者を考慮して、DO上昇開始時刻とDOが5mg/Lに到達した時刻の2点間の直線勾配から $K_L a$ を求めた。
- 2) 単一塩水層曝気実験より次のことが得られた。空気量と共に $K_L a$ は増加するが E_A は減少する。低圧・高圧ノズルの $K_L a$, E_A は散気管より優れている。空気量が同じ場合、低圧ノズルと高圧ノズルの $K_L a$, E_A は優劣つけ難い。高圧ノズルで空気量が10L/minの場合、 E_A の最大値78.6%が得られた。一般に簡便的に使用されている酸素移動効率 E_A は、実際に曝気槽の中で生じている酸素移動効率 E_A' よりはるかに大きい。
- 3) 密度成層の塩水層曝気実験ではDOが5mg/Lに達するまで塩水層への気泡混入がなく、終始塩淡水境界層を破壊せず酸素供給できた。単一塩水層に比べ $K_L a$ は悪い。
- 4) サロマ湖の現地観測ではマイクロバブルによるDO上昇は、流速、流向の影響を受けるが、マイクロバブル到達点のDOは2～5mg/L上昇した。したがって、本システムより現地の貧酸素域のDO改善が期待できる。

謝辞：本研究は北海道の平成14年度地域産業集積活性化計画支援事業費補助金の助成により行われた。また、本研究の遂行に当たりサロマ湖養殖漁業漁業協同組合から測定機器等の協力を得た。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) サロマ湖漁業協同組合、常呂漁業協同組合、佐呂間漁業協同組合、湧別漁業協同組合：北海道サロマ湖の概要、pp.15-18.
- 2) サロマ湖養殖漁業協同組合：サロマ湖のこれまでの現況把握既往資料の概要、p.1, 2001.
- 3) 井出哲夫：水処理工学、技報堂出版、pp.236-252, 1976.