

ベンチュリ管式吸込管による汽水湖塩水層の吸込に関する基礎的研究

Fundamental study on absorption of salty water stratum in brackish water lake
using absorption pipe with venturi tube

北見工業大学大学院 ○学生員 吉川泰弘(Yasuhiro Yoshikawa)
北見工業大学工学部 フェロー 佐渡公明(Kimiteru Sado)
北見工業大学工学部 正員 中尾隆志(Takashi Nakao)

1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖は、海水と河川水が混ざり合う汽水湖である。湖の地形と塩水・河川水の密度の違いにより水深約 5m の塩淡水境界層を境に、厚さが約 0.5m である上部淡水層(密度約 999kgm^{-3})と、湖心で厚さが約 5-16m である下部塩水層(密度約 1016kgm^{-3})に分かれる。このため安定な密度成層を形成し上下混合が全くなく明瞭に分離されている。

網走湖二層構造の下部塩水層は、長年の市街地・農畜産地からの排水及び自然汚濁負荷が流入貯留され、満潮時には網走湖へ海水が逆流し貯留されている。その結果、窒素・リンを多く含む塩水層からの内部負荷と、人工・自然汚濁の流入による外部負荷により網走湖は富栄養化が進んでいる。また、湖への流入河川水によるはく離・連行が少ない事もあり、湖底にはヘドロが溜り、下部塩水層は無酸素状態を呈しCODは淡水層でも年平均 37mg l^{-1} と環境基準の 7mg l^{-1} を達成していない¹⁾。

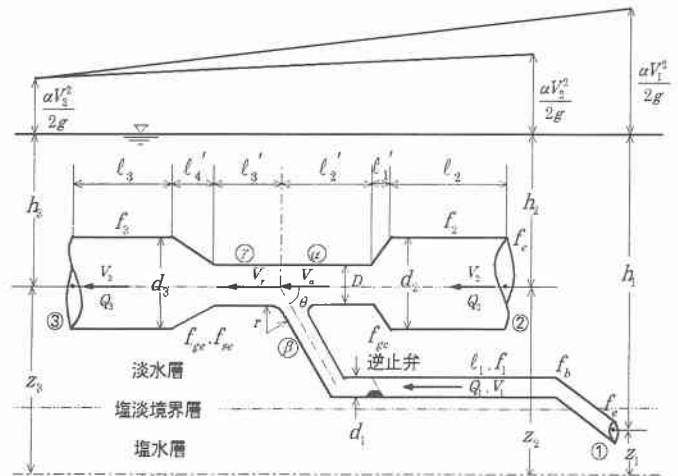
この様な状況のもと、参考文献 2)によれば 1937 年-1998 年の期間において、植物プランクトンの異常発生である"アオコ"は、1982 年頃から毎年発生している。また、塩淡水境界層が強風によって水面に出現する"青潮"は、塩淡水境界層水深が 5m まで上昇した 1987 年から 1~2 年毎に発生している。これに伴い、わかさぎ、シジミを大量に死滅させ甚大な損害を与えており、地域社会からは水質改善のための抜本的対策が求められている。

網走湖水質保全対策検討委員会による生態系モデルでの水質予測計算では、5 つの対策にわけてアオコ発生抑制の検討を試みている。これによると、塩淡水境界層制御が最も大きな水質改善効果を期待できることが指摘されている。また、塩淡水境界層水深が上昇するほど"青潮"が発生しやすく、深いほど発生しにくいことも指摘されている¹⁾。しかしながら、塩淡水境界層水深低下とそれに伴う淡水層の底塩分が、ヤマトシジミの幼生発生などの生態系に影響することから、ある一定の塩淡水境界層水深に保つ必要がある。

本論文では、網走湖の水質改善対策の一つとして、ベンチュリ管が断面縮小部の圧力低下によって塩水層にある吸込管から塩水を吸い込み、塩淡水境界層水深を制御する方法について検討する。最初に水理模型実験について述べ、次に水理計算によってベンチュリ管式吸込管のもつ特性を考察する。

2. 水理模型実験

実験水路は、可変勾配逆台形断面をもつ循環式水路を用いた。網走湖出口付近を想定している水路上流部(深さが約 100cm)に塩水層と淡水層を再現した。塩水層は、密度 1016kgm^{-3} 、塩分濃度 23.3‰、実験状況から塩水層の厚さ約 30cm、水温約 17.4°C 、可視化するためにメチレンブルーで着色した。塩淡水境界層の再現は、ベニヤ板を塩水層・淡水層の間に設置して安定な二層構造とした。また、網走川を想定している水路下流部(高さ 20cm×水路底 10cm×側壁 45° ×長さ 654cm×下流端せき高 13.8cm)にベンチュリ管式吸込管(硬質ガラス製)を吊り下げて設置した。図-1 にベンチュリ管式吸込管の略図を示す。



z_1, z_2, z_3 : 断面①, ②, ③の位置水頭(m), h_1, h_2, h_3 : 断面①, ②, ③の水深(m)
 Q_1, Q_2, Q_3 : 断面①, ②, ③の流量(l/s), V_1, V_2, V_3 : 断面①, ②, ③の流速(m/s)
 d_1, d_2, d_3 : 管路①, ②, ③の管径(m), f_1, f_2, f_3 : 管路①, ②, ③の摩擦損失係数
 l_1, l_2, l_3 : 管路①, ②, ③の管路長(m), l'_1, l'_2, l'_3, l'_4 : 各管路の管路長(m)
 V_v : 断面縮小管の流出の流速(m/s), V_g : 断面縮小管の流入の流速(m/s)
 f_{go} : 入口損失係数, f_{bo} : 曲がり損失係数, m : 曲がり箇所数
 $f_{go} \times f_{so}$: 漸拉損失係数, f_{gc} : 漸縮損失係数, f_v : 弁損失係数
 D : 断面縮小管の管径(m), r : 管路①と断面縮小管の接続部面取り半径(m)
 θ : 管路①と断面縮小管の交角(rad), α : エネルギー補正係数

図-1 ベンチュリ管式吸込管の略図

また、ベンチュリ管式吸込管の断面縮小部の下部に吸込管(塩化ビニール製、内径 9mm)をつなげて塩水層の底まで延長した。

2-1. 実験方法

水路流量・水路勾配を変えて実験を行った。塩水層の水を吸い込む吸込管の流量は、傾斜マンメータを使用し

て圧力水頭差から流量を求めた。以後、この流量を Q_1 と表現する。また、ベンチュリ管式吸込管に流入してくる流量を測定するために入口円筒部と断面縮小部に圧力取り出し口をもうけ同様にして流量を求めた。以後、この流量を Q_2 と表現する。ベンチュリ管式吸込管から流出する流量を Q_3 とする。マンニングの粗度係数は、事前実験より硬質ガラス、塩化ビニールともに $n=0.0085$ とした。

2-2. 実験結果

水路流量と水路勾配を変えたとき、断面縮小部の圧力低下により吸込管が塩水層の水を吸い込むことが確認された。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件と流量

実験	水路 勾配	水路流量 (ℓ/S)	Q_1 ($\times 10^{-2} \ell/S$)	Q_2 ($\times 10^{-2} \ell/S$)
RUN 1	1/200	7.588	1.357	4.520
RUN 2	1/100	5.824	1.610	8.896
RUN 3	1/100	7.944	1.555	7.322

3. 水理計算

3-1. 基礎方程式と解析解

断面①と断面③の間にベルヌーイの式を適用して、

$$\left(z_1 + h_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g}\right) - \left(z_3 + h_3 + \frac{\alpha V_3^2}{2g}\right) = \left(f_e + mf_b + f_v + f_{1'} \frac{\ell_1}{d_1}\right) \frac{V_1^2}{2g} + f_{c,\beta} \frac{V_1^2}{2g} + f_{3'} \frac{\ell_3}{D} \frac{V_1^2}{2g} + f_{ge} f_{se} \frac{V_1^2}{2g} + \frac{2.38n_3^2 Q_3^2 \ell_4'}{D - d_3} \left(\frac{1}{d_3^{13/3}} - \frac{1}{D^{13/3}}\right) + f_{3'} \frac{\ell_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g}$$

.....(1)

また、断面②と断面③の間にベルヌーイの式を適用して、

$$\left(z_2 + h_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g}\right) - \left(z_3 + h_3 + \frac{\alpha V_3^2}{2g}\right) = \left(f_e + f_{2'} \frac{\ell_2}{d_2}\right) \frac{V_2^2}{2g} + f_{e'} \frac{V_2^2}{2g} + \frac{2.38n_3^2 Q_3^2 \ell_1'}{d_2 - D} \left(\frac{1}{D^{13/3}} - \frac{1}{d_2^{13/3}}\right) + f_{2'} \frac{\ell_2}{D} \frac{V_2^2}{2g} + f_{e'} \frac{V_2^2}{2g} + f_{3'} \frac{\ell_3}{D} \frac{V_2^2}{2g} + f_{ge} f_{se} \frac{V_2^2}{2g} + \frac{2.38n_3^2 Q_3^2 \ell_4'}{D - d_3} \left(\frac{1}{d_3^{13/3}} - \frac{1}{D^{13/3}}\right) + f_{3'} \frac{\ell_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g}$$

.....(2)

と得られる。連続の式は次式となる。

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad \text{.....(3)}$$

$f_{c,\alpha}$, $f_{c,\beta}$ は、合流損失係数である。Gardel³⁾の実験式によれば $f_{c,\alpha}$, $f_{c,\beta}$ は、 (Q_1/Q_3) の二次方程式で表され、 $f_{c,\beta} = a_1 (Q_1/Q_3)^2 + b_1 (Q_1/Q_3) + c_1$, $f_{c,\alpha} = a_2 (Q_1/Q_3)^2 + b_2 (Q_1/Q_3) + c_2$ となる。 j_i , k_i , z_{13} , z_{23} を以下のように定義すると、式(1), (2)は式(4), (5)となる。

$$j_i = \frac{8\alpha}{g\pi^2 d_i^4}, \quad k_i = \frac{8f_i \ell_i}{g\pi^2 d_i^5} \quad (i=1, 2, 3)$$

$$z_{13} = (z_1 + h_1) - (z_3 + h_3) \quad z_{23} = (z_2 + h_2) - (z_3 + h_3)$$

$$z_{13} = \left\{k_1 - j_1 + (f_e + mf_b + f_v) \frac{j_1}{\alpha} + k_1\right\} Q_1^2 + \left\{k_3 + j_3 + a_1 \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right)^2 + b_1 \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right) + c_1 + \left(f_{3'} \frac{\ell_3'}{D} + f_{ge} f_{se}\right) \left(\frac{d_3}{D}\right)^4 \frac{j_3}{\alpha} + \frac{2.38n_3^2 \ell_4'}{D - d_3} \left(\frac{1}{d_3^{13/3}} - \frac{1}{D^{13/3}}\right)\right\} Q_3^2$$

.....(4)

$$z_{23} = \left\{k_2 - j_2 + \left(f_e + f_{2'} \frac{\ell_2'}{D} \left(\frac{d_2}{D}\right)^4 + f_{e'} \left(\frac{d_2}{D}\right)^4\right) \frac{j_2}{\alpha} + \frac{2.38n_3^2 \ell_1'}{d_2 - D} \left(\frac{1}{D^{13/3}} - \frac{1}{d_2^{13/3}}\right)\right\} Q_2^2 + \left\{k_3 + j_3 + a_2 \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right)^2 + b_2 \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right) + c_2 + \left(f_{3'} \frac{\ell_3'}{D} + f_{ge} f_{se}\right) \left(\frac{d_3}{D}\right)^4 \frac{j_3}{\alpha} + \frac{2.38n_3^2 \ell_4'}{D - d_3} \left(\frac{1}{d_3^{13/3}} - \frac{1}{D^{13/3}}\right)\right\} Q_3^2$$

.....(5)

式(5)に式(3)を代入して Q_2 を消去し、式(4), 式(5)から定数項を消去して、 (Q_1/Q_3) の二次方程式 (6)が得られる。

$$A \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right)^2 + B \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right) + C = 0 \quad \text{.....(6)}$$

ここに A, B, C は以下ようになる。

$$A = \left\{k_1 - j_1 + a_1 + (f_e + mf_b + f_v) \frac{j_1}{\alpha}\right\} z_{23} - \{k_2 - j_2 + a_2 + AA\} z_{13}$$

$$B = b_1 z_{23} + \{2k_2 - 2j_2 - b_2 + 2AA\} z_{13}$$

$$C = \{k_3 + j_3 + c_1 + CC\} z_{23} - \{k_2 - j_2 + k_3 + j_3 + c_2 + AA + CC\} z_{13}$$

$$AA = \left(f_e + f_{2'} \frac{\ell_2'}{D} \left(\frac{d_2}{D}\right)^4 + f_{e'} \left(\frac{d_2}{D}\right)^4\right) \frac{j_2}{\alpha} + \frac{2.38n_3^2 \ell_1'}{d_2 - D} \left(\frac{1}{D^{13/3}} - \frac{1}{d_2^{13/3}}\right)$$

$$CC = \left(f_{3'} \frac{\ell_3'}{D} + f_{ge} f_{se}\right) \left(\frac{d_3}{D}\right)^4 \frac{j_3}{\alpha} + \frac{2.38n_3^2 \ell_4'}{D - d_3} \left(\frac{1}{d_3^{13/3}} - \frac{1}{D^{13/3}}\right)$$

式(6)より $0 \leq (Q_1/Q_3) \leq 1$ の範囲で解析解を求め、式(4)から Q_3 が求まる。 Q_2 は式(3)から求める。

3-2. 実験結果と計算結果の比較

表-2にベンチュリ管式吸込管の主な諸元と損失係数を示す。RUN1, RUN2, RUN3の実験で得られた定数を、表-3に示す。

表-2 ベンチュリ管式吸込管の主な諸元と損失係数

$d_1(m)$	0.009	$\ell_2(m)$	0.025	f_{ge}	0.420
$d_2(m)$	0.030	$\ell_3(m)$	0.011	f_{gc}	0.130
$d_3(m)$	0.030	$\ell_4(m)$	0.040	f_v	0.000
$\ell_1(m)$	2.091	$D(m)$	0.015	α	1.1
$\ell_2(m)$	0.030	f_e	0.300	$\theta(rad)$	$\pi/2$
$\ell_3(m)$	0.030	mf_b	5×0.08	r	0.003
$\ell_1'(m)$	0.010	f_{se}	0.560	マンニングの 粗度係数	0.0085

表-3 各実験で得られた定数(単位 m)

RUN 1

z_1	0.000	h_1	0.957	淡水層の厚さ	0.652
z_2	0.915	h_2	0.018	塩水層の厚さ	0.305
z_3	0.912	h_3	0.020		

RUN 2

z_1	0.000	h_1	0.925	淡水層の厚さ	0.620
z_2	0.877	h_2	0.027	塩水層の厚さ	0.305
z_3	0.877	h_3	0.030		

RUN 3

z_1	0.000	h_1	0.921	淡水層の厚さ	0.616
z_2	0.878	h_2	0.028	塩水層の厚さ	0.305
z_3	0.776	h_3	0.130		

以上の条件を式(6)に代入して、それぞれの計算値 Q_1, Q_2 を求めた。プログラミング言語は“FORTRAN90”を用いた。実験値と比較した計算結果を、表-4 に示す。誤差評価として[計算値-実験値]を表記する。

表-4 計算値と実験値の流量の比較

実験値	$Q_1 (\times 10^{-2} \ell / s)$			$Q_2 (\times 10^{-2} \ell / s)$		
	計算値	実験値	誤差	計算値	実験値	誤差
RUN1	1.542	1.357	0.186	0.745	4.519	-3.775
RUN2	1.480	1.610	-0.130	1.813	8.896	-7.083
RUN3	1.309	1.555	-0.246	2.037	7.322	-5.285

RUN1 の Q_1 の計算値のみが実験値より大きく、他の計算値は全て実験値よりも計算値の方が小さい結果となった。原因としては、入口損失係数・曲がり損失係数・漸拡損失係数・漸縮損失係数・合流損失係数の値の中でどれかが大きな値となり、流量の減少につながっていると予測される。また、RUN1 は RUN2, RUN3 に比べて、目視で塩水層の水をそれほど吸い込まなかった事が確認されている。

RUN1, RUN2, RUN3 で各損失がピエゾ水頭の実測値 (z_{13}, z_{23}) に占める割合を調べた結果、平均して大きい順に断面①-③では ℓ_1 の摩擦損失が 94.0%, 合流損失 $f_{c, \beta}$ が 8.0% であり、断面②-③では合流損失 $f_{c, \alpha}$ が 57.0%, 漸拡損失 $f_{g, \beta}$ が 26.1% であった。合流損失が大きいことがわかる。表-5 に合流損失を無視した場合の計算値と実験値の流量の比較を示す。

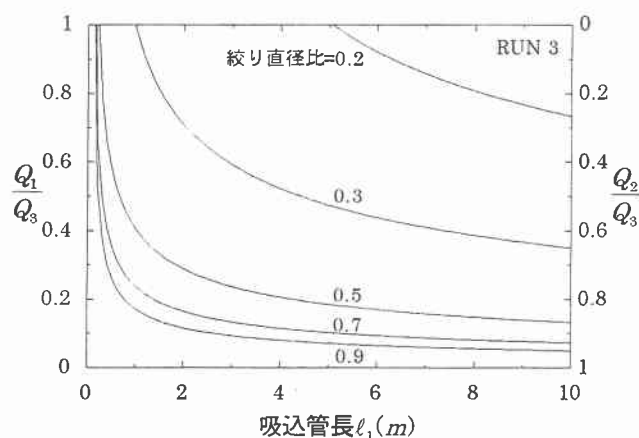
表-5 計算値と実験値の流量の比較(合流損失=0)

実験値	$Q_1 (\times 10^{-2} \ell / s)$			$Q_2 (\times 10^{-2} \ell / s)$		
	計算値	実験値	誤差	計算値	実験値	誤差
RUN1	1.613	1.357	0.256	1.900	4.519	-2.619
RUN2	1.546	1.610	-0.064	3.314	8.896	-5.582
RUN3	1.364	1.555	-0.191	3.476	7.322	-3.846

合流損失を無視した場合、RUN1 の Q_1 以外、全損失を考慮した場合よりも合流損失が減った分だけ Q_1, Q_2 は増加し誤差は小さくなった。しかし、依然、計算値は小さいので実験値そのもの、計算値に対する各種損失の影響についてさらなる検討が必要である。

4. 流量に対する絞り直径比と吸込管長の影響

ベンチュリ管式吸込管の絞り直径比と吸込管長を変化させることにより、流量がどのような挙動を示すかを検討する。絞り直径比とは断面縮小部がどれだけ絞られるかをあらわす値 $0 < (D/d_2) < 1$ であり、0 に近づくほど絞られ管径は小さくなる。RUN3 の合流損失を無視した場合を水理計算の対象とする。絞り直径比 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 をパラメータとして、吸込管長 ℓ_1 (m) とベンチュリ管式吸込管の流出量に対する吸い込み流量の比 (Q_1/Q_3) の関係を図-2 に示す。

図-2 (Q_1/Q_3) に対する絞り直径比と吸込管長の影響

吸込管長を長くするほど、また絞り直径比を大きくするほど、相対的な吸い込み流量比である (Q_1/Q_3) が減少していることがわかる。摩擦損失の影響と断面縮小管の圧力差の減少によるものと思われる。 Q_1, Q_3 の挙動を調べるために、絞り直径比を定数 0.5 として、吸込管長を横軸とした図-3、吸込管長を定数 2.091m として、絞り直径比を横軸とした図-4 を作成した。なお絞り直径比 0.5, 吸込管長 2.091m は実験での値である。

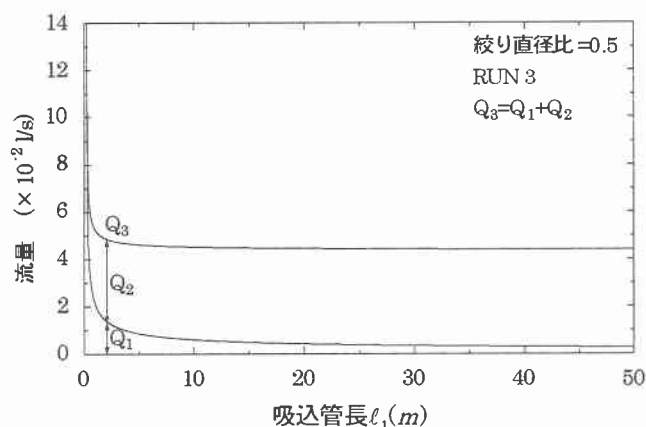


図-3 流量 Q_1, Q_2, Q_3 に対する吸込管長の影響

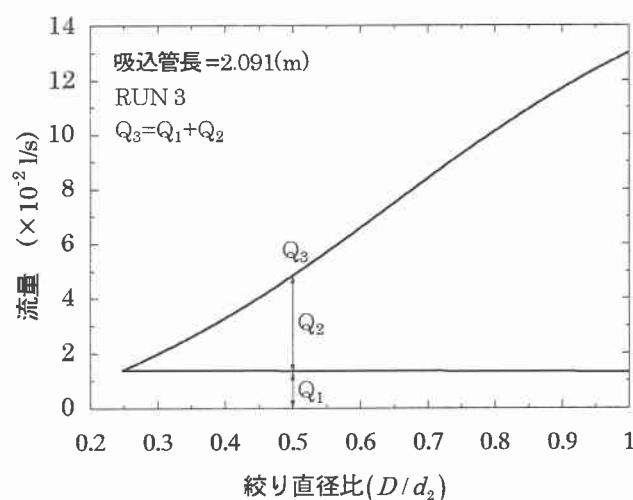


図-4 流量 Q_1, Q_2, Q_3 に対する絞り直径比の影響

図-3では、吸込管長の増加にともなって、 Q_1, Q_3 の流量は減少し、 Q_2 は逆に増加している。 Q_1 は摩擦損失の影響により、0に近づく。また、吸込管長が短いときには Q_1, Q_3 は急激に流量を増す。吸込管長が長くなると図-2より (Q_1/Q_3) は減少するが、これは図-3から Q_3 がほとんど変化しないため、 Q_1 の減少によることがわかる。

図-4では、絞り直径比が0.248未満だと漸縮・摩擦損失が大きくなり、流れは存在しないことが示されている。また、RUN1, RUN2では絞り直径比0.320, 0.264未満で流量は0であった。水路勾配・水路流量の変化により Q_1, Q_2 が流れはじめる絞り直径比は異なる。断面縮小管を拡大すると、 Q_2 は流れやすくなって増加し断面縮小管の圧力差が小さくなり Q_1 は減少してゆくがほぼ一定値になる。 Q_3 については Q_2 の影響を強く受け増加する。

5. ベンチュリ管式吸込管による水質改善

ベンチュリ管式吸込管により吸い上げられた流量 Q_1 は、淡水である Q_2 によって希釈されていることになる。つまり絞り直径比を変えることで、自然環境に与える影響が変わる。ベンチュリ管式吸込管により吸い出された

富栄養化した溶存酸素ゼロの塩水が、網走市内を經由して河口の網走港に流れ出すことを考えれば、絞り直径比を適切な値にすることが望ましい。

図-1は網走湖下流の網走川が順流のときの流れである。逆流時には、従来、海水逆流量は滞筋を通過して塩水層に貯留され、水質悪化の原因となっていた。しかし、ベンチュリ管式吸込管を設置すると管路①の逆止弁が働き $Q_1=0$ となり、ベンチュリ管式吸込管を通過する海水逆流量 $Q_3=Q_2$ は淡水層に流入・拡散され水質改善に寄与することが期待される。

水質改善の程度は、河川横断面に対するベンチュリ管式吸込管の断面積の占める割合で決まってくる。断面積が大きいほど水質改善に寄与できるが、ベンチュリ管式吸込管の実際の大きさについては、今後の検討課題である。

また常に塩水層の水を河口に流すのではなく、網走湖でのシジミ・わかさぎなどの漁業に必要な窒素・リン・塩分を確保できるだけの塩水層を保持しなくてはならない。つまり、最適な塩淡水境界層水深を想定し、常時塩淡水境界層水深を監視し、その制御のために「ベンチュリ管式吸込管」の使用を考えるべきである。

ベンチュリ管式吸込管の良い点は、一旦、動き始めればエネルギーを加えることなく作動すること、設備投資が抑えられることである。

6. 結論

以上の結果から以下のようなことが要約出来る。

- (1) 水理模型実験でベンチュリ管式吸込管が塩水層の水を吸い込むことが確認された。
- (2) 吸込管長と絞り直径比の変化によって、塩水層の吸い込み流量が変化し、流出量の水質希釈が行われることがわかった。とくに絞り直径比を適切に設定することにより、環境に対する影響を少なくすることが期待される。

参考文献

- 1) 網走水質保全対策検討委員会：網走湖の水環境回復に関する調査報告書, pp.259-274, 1996.
- 2) 網走水質保全対策検討委員会：資料, p13, 網走開発建設部, 1999.
- 3) 土木学会水理公式集改訂委員会：水理公式集, pp.3 98-405, 土木学会, 1985.